

# MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PESQUISA E APLICAÇÃO

COLETÂNEA



**HERBET ALVES DE OLIVEIRA**  
ORGANIZADOR



# MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PESQUISA E APLICAÇÃO

---

COLETÂNEA

**HERBET ALVES DE OLIVEIRA**  
ORGANIZADOR



**INSTITUTO  
FEDERAL**  
Sergipe

ARACAJU  
2022



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA DE SERGIPE (IFS)**

**PRESIDENTE DA REPÚBLICA**

Jair Messias Bolsonaro

**MINISTRO DA EDUCAÇÃO**

Milton Ribeiro

**SECRETÁRIO DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**

Ariosto Antunes Culau

**REITORA DO IFS**

Ruth Sales Gama de Andrade

**PRÓ-REITORA DE PESQUISA E EXTENSÃO**

Chirlaine Cristine Gonçalves

**Copyright© 2022 - IFS**

Todos os direitos reservados para a Editora IFS. Nenhuma parte desse livro pode ser reproduzida ou transformada em nenhuma forma e por nenhum meio mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer sistema de armazenamento de informação, sem autorização expressa dos autores ou do IFS.

**Editora-chefe (Coordenadora de Publicações)**

Kelly Cristina Barbosa

**Planejamento e Coordenação Gráfica**

Thiago Estácio

**Projeto Gráfico da Capa**

Thiago Estácio

**Avaliadoras ad hoc**

Oscar Khoiti Ueno

Vinicius Albuquerque Fulgencio

**Diagramação**

Thiago Estácio

**Revisão**

Cochiran Pereira dos Santos

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Oliveira, Herbert Alves de

048m

Material de construção [recurso eletrônico]: pesquisa e aplicação coletânea / Herbert Alves de Oliveira, Fernanda Martins Cavalcante de Melo, Thiago Augusto Remacre Munareto Lima, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida. - Aracaju: Editora IFS, 2022.

280 p.: il. color.

E-book

ISBN 978-65-87114-87-3

1. Materiais de construção. 2. Construção civil. 3. Resíduo. I. Oliveira, Herbert Alves de. II. Melo, Fernanda Martins Cavalcante de. III. Lima, Thiago Augusto Remacre Munareto IV Almeida, Vanessa Gentil de Oliveira. V. Título.

CDU 691

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Kelly Cristina Barbosa CRB 5/1637

[2022]

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS)**

Avenida Jorge Amado, 1551. Loteamento Garcia, Bairro Jardins.

Aracaju/SE. CEP: 49025-330

TEL.: +55 (79) 3711-3222 E-mail: edifs@ifs.edu.br

Publicado no Brasil

## **Conselho Científico**

Chirlaine Cristine Gonçalves  
Pró-reitora de Pesquisa e Extensão  
Jaime José da Silveira Barros Neto  
Diretor de Pesquisa e Pós-graduação  
José Wellington Carvalho Vilar  
Área: Ciências Exatas e da Terra  
Diego Lopes Coriolano  
Área: Engenharias (titular)  
Herbet Alves de Oliveira  
Área: Engenharias (suplente)

Adeline Araújo Carneiro Farias  
Área: Ciências Humanas  
Alexandre Santos de Oliveira  
Área: Ciências Sociais Aplicadas  
João Batista Barbosa  
Área: Ciências Agrárias  
Manoela Falcon Gallotti  
Área: Linguística, Letras e Artes  
Sheyla Alves Rodrigues  
Área: Ciências Biológicas

## **Membros Externos**

Flor Ernestina Martinez Espinosa - FIOCRUZ  
Odélsia Leonor Sanchez de Alsina - UFCG  
Mirian Sumica Carneiro Reis - UNILAB  
Claudio Cledson Novaes - UEFS  
Caique Jordan Nunes Ribeiro - UFS  
Lucas Molina - UFS  
Murilo Lopes Martins - IF Sudeste MG

Eliane Maurício Furtado Martins  
- IF Sudeste MG  
Zélia Soares Macedo - UFS  
Mario Ernesto Giroldo Valério - UFS  
Ana Aparecida Vieira de Moura - IFRR  
Josilene de Souza - IFRN  
Charles dos Santos Estevam - UFS

## **Editoração**

Kelly Cristina Barbosa - Bibliotecária

## **Produção Visual**

Jéssika Lima Santos - Diagramador  
Júlio César Nunes Ramiro - Técnico em Artes Gráficas

# APRESENTAÇÃO

Sustentabilidade é o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. É a preocupação em reaproveitar todos os recursos explorados, maximizando seu aproveitamento. Vivemos em uma geração de automação, agilidade e alta produtividade. Para quem estava na ativa em meados de 1982, pôde viver a reengenharia, em que a indústria questionava seus processos e buscava automação e, conseqüentemente, redução de custos de processo. Naquele momento, iniciava-se a busca pelo desenvolvimento sustentável. Na atividade industrial dos dias de hoje muito resíduo é produzido e na maioria das vezes é descartado em aterros e pouca solução foi encontrada para esse descarte.

Hoje temos diversos segmentos que geram resíduos em quantidades astronômicas, como garrafas plásticas de refrigerante e alimentos de modo geral, vidros de embalagem, resíduos poliméricos, artefatos cerâmicos, como tijolos, telhas e revestimento cerâmico, entre outros. Esses resíduos gerados pelos diversos segmentos industriais são alvo de preocupação, pois o uso indevido dos recursos naturais compromete as gerações futuras.

Os resíduos nem sempre têm um destino correto. Às vezes porque a quantidade gerada não é suficiente para atender a um processo produtivo de forma continuada, ou porque é considerado perigoso, e muitas ações de prevenção deveriam ser aplicadas, o que inviabiliza a operação.

No Departamento de Construção Civil no Campus do Instituto Federal de Sergipe, localizado na cidade de Estância-SE, pesquisas são realizadas afim de reaproveitar todo tipo de resíduo, seja em argamassas, concreto ou elementos de construção civil, além da cerâmica. As pesquisas consistem em avaliar o tipo do resíduo quanto a quantidade gerada mensalmente e, por fim, caracterizá-los física e quimicamente para em seguida avaliar a possibilidade de reaproveitamento.

Nesse livro trazemos uma coletânea dos principais trabalhos realizados no período de 2014 a 2021 na área de construção civil, em que o reaproveitamento de resíduo foi explorado, bem como pesquisas em que a otimização das propriedades dos materiais foi realizada. Foram realizados trabalhos

com argamassa, concreto leve utilizando argila expandida, concreto, blocos de concreto e tijolo solo-cimento, entre outros. Foram testados resíduos de marmorarias, cinza gerada na queima de madeira para indústria têxtil, plásticos, vidro de garrafas, serragem de madeira gerada no processamento de móveis de modo geral, entre outros, além de trabalhos voltados para revisão bibliográfica.

Agradecemos ao Instituto Federal de Sergipe e a PROPEX, à Diretoria do Campus Estância pelo apoio, além dos alunos do Ensino Médio Técnico em Edificações, como do curso superior de Engenharia Civil, além das empresas parceiras da cidade de Estância e a Universidade Federal de Sergipe.

Esperamos que gostem e possam fazer uso dos resultados obtidos.

Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira

## **AGRADECIMENTOS**

O(s) autor(es) são gratos pela infraestrutura do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC).

Ao Laboratório de Preparação e Caracterização de Materiais (LPCM) do Departamento de Física (DFI) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Aos Laboratórios do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (DCEM) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

As instalações do Centro Multiusuário de Nanotecnologia da Universidade Federal de Sergipe (CMNano-UFS), um Centro Nacional Multiusuário de pesquisa apoiado pela FINEP. Agradecemos o apoio técnico das equipes do CMNano-UFS durante os experimentos das propostas.

Os autores agradecem a CAPES, ao programa PIBIC do Instituto Federal de Sergipe – IFS

# SUMÁRIO

## **IMPERMEABILIZANTE PARA CONSTRUÇÃO CIVIL COM REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE VIDRO E ARGILA ..... 12**

*José Eduardo Macedo, Rayza Bispo Tavares, Cochiran Pereira dos Santos, Ray Augusto Santos, Vanessa Gentil Oliveira Almeida, Fernanda Cavalcante Melo, Rosane M. Betânio Oliveira, Zélia Soares Macedo, Herbet Alves de Oliveira*

## **DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA DE REBOCO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GRANITO ..... 30**

*Any Salonny S. Santos Nascimento, Herbet Alves de Oliveira, Cochiran Pereira dos Santos, Vanessa Gentil A. Oliveira, Zélia Soares Macedo*

## **DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COM INCORPORAÇÃO DE ARGILA ..... 45**

*Herbet Alves de Oliveira, Franciele C. Santos, Gean R. Santos, Mário R. Oliveira, Bruno Fraga*

## **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE AGREGADO LEVE ..... 57**

*Fernando Luis .A. Santos, Vanessa Gentil de O. Almeida, Cochiran Pereira dos Santos, Zélia Soares Macedo, Herbet Alves de Oliveira,*

## **DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE REBOCO COM A INCORPORAÇÃO DE TALCO ..... 75**

*Johanata de Jesus Prudêncio, Herbet Alves de Oliveira*

## **ESTUDO PARA REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO EM BLOCOS DE CONCRETO ..... 83**

*Karoline Vieira Santos, Leonardo Santos Caldas, Rhayra Guadalupe, Herbet Alves de Oliveira*

## **ESTUDO DA VARIAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AGREGADO SNTÉTICO PARA FABRICAÇÃO DE PLACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO NÃO ESTRUTURAL ..... 100**

*Fagner F. Santos, Fernando Luiz de Andrade Santo, José Nilton Soares Santos, Mandarlan H. N. Pereira, Vanessa G. Almeida, Fernanda M. Cavalcante de Melo, Shevine Silva de Oliveira Rizzo, Herbet Alves de Oliveira*

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE REBOCO COM A INCORPORAÇÃO DE CAULIM NATURAL.....111**

*Beatriz Rocha Silva, Hudson Santos Menezes Júnior, Any Manuela Soares Santos, Antônio José da Silva Filho, Herbet Alves de Oliveira*

**TIJOLO DE SOLO-CIMENTO COM REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE GRANITO.....123**

*Elvia Soraya Santos Nascimento, Patrícia Campos de Souza, Herbet Alves de Oliveira, Carlos Mariano Melo Júnior, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida, Fernanda Martins Cavalcante de Melo*

**ESTUDO PARA INCORPORAÇÃO DE CINZA DE MADEIRA EM TIJOLO DE SOLO-CIMENTO..... 143**

*Patricia C. Souza, Elvia S. S. Nascimento, Luciano Melo, Herbet A. Oliveira, Vanessa. G. O. Almeida, Fernanda. M. C. Melo*

**PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE ESTRUTURAL COM ARGILA EXPANDIDA E RESÍDUO DE CORTE DO GRANITO ..... 162**

*Hayala Karoline Santos Rodrigues, Herbet Alves de Oliveira, Fernanda Martins Cavalcante Melo, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida*

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO LEVE DE ARGILA EXPANDIDA MODIFICADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU.....178**

*José Nilton Soares Santos, Cochiran Pereira dos Santos, Zélia Soares Macedo, Herbet Alves de Oliveira, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida*

**TIJOLO DE SOLO-CIMENTO: ANÁLISE CRÍTICA - REVISÃO.....192**

*Hudson Santos Menezes Junior, Beatriz Rocha Silva, Antônio José da Silva Filho, Any Manuela Soares Santos, Vanessa Gentil A.de Oliveira, Fernanda Martins C. de Melo, Herbet Alves de Oliveira*

**ESTUDO DA CRISTALINIDADE EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO CRISTALITO EM CONCRETOS DE 25 MPA OBTIDOS VIA PASTA DE CIMENTO PORTLAND..... 216**

*Thiago A. Remacre Munareto Lima, César D. B. Dos Santos, Gabriel S. Bento*

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO EM DIFERENTES REGIÕES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CONCRETAGEM ..... 228**

*Thiago A. Remacre Munareto Lima, Luís Flávio A. Mendonça, César D. B. Dos Santos, Iuri dos Santos Bispo, Gabriel S. Bento, Rafaela R. Dantas, Wandelely S.S Júnior,*

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL LEVE COM ARGILA EXPANDIDA E DOLOMITA .....237**

*Thayslene dos Santos, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida*

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU ..... 255**

*Larissa Isabelle Conceição da Silva, Emily de Oliveira Santos, Luan da Conceição Ribeiro, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida*

**SOBRE OS AUTORES .....278**

# IMPERMEABILIZANTE PARA CONSTRUÇÃO CIVIL COM REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE VIDRO E ARGILA

*José Eduardo Macedo  
Rayza Bispo Tavares  
Cochiran Pereira dos Santos  
Ray Augusto Santos  
Vanessa Gentil Oliveira Almeida  
Fernanda Cavalcante Melo  
Rosane M. Betânio Oliveira  
Zélia Soares Macedo  
Herbet Alves de Oliveira*

## RESUMO

Na construção civil são utilizados diversos tipos de impermeabilizantes à base de componentes orgânicos a fim de reduzir infiltrações de água nas paredes, oriundas do subsolo. Nesse trabalho, foi analisada a incorporação de uma argila e resíduo de vidro de embalagem à base de soda cal, a um polímero de polimetila meta acrilato PMMA, utilizado para impermeabilização na construção civil. Foram elaboradas formulações em que foi adicionado um percentual que variou de 0 a 40% de resíduo de vidro de embalagem e 0 a 20% de argila ilítica sobre uma matriz de polímero PMMA. Foram produzidos cinco corpos de prova cilíndricos de dimensão de 75 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, para cada formulação, sendo que os mesmos foram submetidos aos seguintes ensaios tecnológicos: densidade aparente, absorção de água, retração, dureza e microscopia eletrônica de varredura. Além disso, o polímero foi caracterizado pelo ensaio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier, e a composição química da argila foi determinada por fluorescência de raios X. As fases constituintes da argila foram determinadas por difratometria de raios X. Para avaliação da permeabilidade, foram aplicadas três camadas de cada formulação, com auxílio de um pincel, a uma base cerâmica de 11 x 11 cm, totalizando uma taxa de 1 kg.m<sup>-2</sup> em cada peça, sendo que manteve-se um intervalo de 24 h para cada camada. Após cura de 24 h, as amostras foram submetidas a um ensaio de permeabilidade utilizando um cilindro de acrílico. Os resultados das propriedades tecnológicas mostraram que o vidro até o limite de 10% e argila até 20%, apresentaram elevada dureza e densidade aparente, além de baixa absorção de água, apresentando eficiência na impermeabilização em relação ao polímero padrão. O produto abre espaço para a utilização de materiais inorgânicos, além de reduzir o impacto ambiental

promovido pelo descarte do resíduo de vidro no meio ambiente.

**Palavras-chave:** Impermeabilizante, argila, resíduo de vidro, polímero PMMA.

## 1. INTRODUÇÃO

A impermeabilização dos componentes de construção civil, sobretudo para os baldrames, é uma necessidade para evitar as patologias devido a umidade oriunda do solo [1-3]. Segundo Righi [4], essa água é originada do solo, tanto por fenômenos sazonais de aumento de umidade, quanto por presença permanente de umidade de lençóis freáticos superficiais. Essa umidade ascensional deve-se ao fenômeno de capilaridade, que de acordo com Queruz [5], os vasos capilares pequenos permitem a água subir do solo passando pelos baldrames, até o momento em que entra em equilíbrio com a força da gravidade, e pode chegar até um metro de altura, e em muitos casos, podem provocar patologias como eflorescência nas paredes [6,7].

Segundo Salgado [8], a viga baldrame é uma fundação direta de pequena altura podendo ser de alvenaria, concreto simples ou concreto armado, suportando cargas leves, como paredes. A impermeabilização pode ser feita na forma rígida ou flexível, sendo que a flexível apresenta melhores resultados em relação ao desempenho [9].

Um impermeabilizante deve ser flexível para garantir que não sofra fratura, além de ser resistente a intempéries, como um polímero de PMMA [4]. Para garantir a impermeabilização eficiente de argamassas para baldrames, a incorporação aos polímeros de componentes inorgânicos pode ser uma solução.

Para que os materiais inorgânicos atuem de forma eficaz, os mesmos devem ser dispersos na matriz polimérica. A preparação de polímeros pode ser realizada de diversas formas, mas nesse projeto as matérias-primas foram dispersas no polímero de PMMA por agitação. Nesse projeto foi utilizado como matéria-prima, além do polímero de PMMA, argila e resíduo de vidro do tipo soda-cal.

As argilas são formadas por argilominerais normalmente formados em camadas de sílico aluminatos hidratados na proporção 2:1. Sua estrutura cristalina possui duas folhas tetraédricas de  $\text{SiO}_4$  envolvendo uma folha octo-

gonal de  $Al^{+3}$  ou  $Mg^{+2}$ . Dentro das camadas existem substituintes isomorfos que geram cargas negativas que são definidos de acordo com a capacidade de troca de cátions (CTC). As argilas apresentam elevada área específica e plasticidade, o que favorece a intercalação dos polímeros [10-12]. Por sua vez, o vidro é um silicato resultado da fusão da  $SiO_2$ ,  $NaOH$  e  $CaCO_3$ . O vidro apresenta características específicas, sendo inerte, amorfo e com elevada dureza, além de não ser poroso e nem absorvente [13].

Dentre os polímeros utilizados na construção civil, pode-se citar o polímero de PMMA, que é uma matriz utilizada no revestimento de lajes devido a sua elasticidade e resistência. A incorporação de produtos inorgânicos poderia contribuir no desempenho de certas propriedades ou até mesmo no grau de comportamento da camada como um todo.

No campo de argamassas de cimento, o uso de aditivos como substâncias adicionadas com a finalidade de melhorar as propriedades tem sido amplamente pesquisado. O crescente interesse nos materiais compósitos tem levado muitos pesquisadores [12-14] a estudar a melhor forma de intercalar grupos orgânicos com os inorgânicos, em busca de se obter melhores propriedades mecânicas e térmicas, além de reduzir os problemas de infiltração de água por meio dos baldrames. Além disso, vários pesquisadores estudaram o uso de uma membrana à prova d'água e revestimento de superfície como polímeros, bloqueadores de poros e silano/siloxano para aprimorar as propriedades de barreira da umidade do concreto [15-17].

Guozhong [14] analisou matérias-primas de rejeitos de mineração para argamassa impermeável de polímero seco e concluiu que se a relação polímero-cimento for 0,06-0,1, a aplicação de cola em pó redispersível melhora significativamente a força coesiva e a flexibilidade da argamassa e reduz a proporção de compressão à força flexural. Wang [15] analisou a adição de polímeros em argamassa de cimento e verificou os efeitos da ação da água capilar e a resistência à absorção dessas argamassas.

Mateus [18] estudou argamassas modificadas com polímeros à base de látex e observou melhoria na trabalhabilidade e na redução da absorção de água. Na proporção polímero/cimento da ordem de 0,1 a 0,2, notou-se a redução da quantidade de água necessária para desenvolver a plasticidade do material. Por outro lado, observou redução da densidade da suspensão em função

do ar incorporado no látex, enquanto a resistência à compressão permaneceu na mesma faixa da argamassa de referência. Adicionalmente, estudos têm sido realizados com a incorporação de materiais argilosos aos polímeros. Em anos recentes, argilas montmoriloníticas modificadas quimicamente foram usadas para conferir melhorias nas propriedades físicas e mecânicas de impermeabilizantes [19-22]. Hosseini [23] conseguiu aumento da resistência à penetração de água e Hi [24] reduziu o nível de permeabilidade de cloreto.

Yang, [25] estudou a incorporação de argila bentonítica em uma matriz de copolímero em que o quartzo também foi adicionado. Ele concluiu que a incorporação até 8% de bentonita aumenta em até 61% a resistência mecânica e reduz a capilaridade em 76%. Em estudos de Usuki, [26] e LvShuzhen [27] a dispersão completa de nanocamadas de argila em um polímero otimiza o número de elementos de reforço disponíveis que transportam uma carga aplicada e desviam as rachaduras em evolução. O acoplamento entre a grande área superficial da argila e da matriz polimérica facilita a transferência de estresse para a fase de reforço, permitindo a melhoria da tensão de tração e tenacidade.

Qureshi [28] e Choudalakis [29] concluíram que a argila bentonita que é rica em montmorilonita em contato com água incha, aumentando o volume da partícula, e fecha os poros, contribuindo para o acréscimo da resistência mecânica e redução da absorção de água. O fato se dá devido a elevada capacidade de troca de cátions, o que favorece o aumento da superfície específica quando em contato com o meio líquido. O trabalho proposto é de incorporar a uma matriz de copolímero acrílico, uma argila íltica montmorilonítica não modificada quimicamente, e resíduo de vidro de embalagem do tipo soda-cal e avaliar sua eficiência na impermeabilização.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado como formulação padrão, um polímero de PMMA utilizado como impermeabilizante para a construção civil na forma líquida da marca Vedapren. A argila utilizada foi uma argila íltica, contendo traços de montmorilonita, rica em carbonatos, denominada de Pinheiro (PIN). A argila está localizada na região de Laranjeiras (SE) Brasil, cujas coordenadas geográficas são Latitude: 10° 48' 12" Sul e Longitude: 37° 10' 11" Oeste. A

argila é muito utilizada na produção de cimento e cerâmicas de revestimento na região. O vidro escolhido foi o do tipo soda-cal. O mesmo foi previamente seco em estufa a  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , em seguida o vidro foi cominuído em almofariz até redução de cerca de 2 mm. Em seguida foi moído em moinho de bolas de laboratório com peso padrão de 500 g por 30 minutos e passados na peneira de abertura 0,074 mm. A argila foi submetida ao mesmo processo de beneficiamento que o vidro.

## 2.1 Ensaios realizados com as matérias-primas

A caracterização do polímero de PMMA foi realizada por meio do ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), cuja finalidade é identificar os agrupamentos químicos presentes na mistura. Foi utilizado o espectrômetro 640-IR-IT-R com varredura no intervalo de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ . Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras de argila e vidro foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). Foi utilizado sistema à vácuo em equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, sendo que foram utilizadas amostras com massa de 10,0 g, as quais foram conformadas por prensagem com diâmetro de 20 mm e 3 mm de espessura. A difratometria de raios X da argila foi realizada em um equipamento da Rigaku, com radiação  $\text{Cu-}k_{\alpha 1}$ , filtro de níquel e utilizando espaçamento de  $1^\circ/\text{min}$  na faixa de 3 a  $60^\circ$ . Foi ainda determinada a capacidade de troca de cátions CTC da argila pelo método do azul de metileno de acordo com a norma ASTM 837-1992 [30]. A partir desse resultado, foi possível determinar a área específica BET pela equação Eq. (1), em que BET: é a superfície específica em  $\text{cm}^2/\text{g}$  e CTC: capacidade de troca de cátions.

$$BET=CTC.7,85 \quad (1)$$

## 2.2 Preparação dos corpos de prova

Conforme a Figura 2, as suspensões foram preparadas pesando-se 100 g do total das matérias-primas, usando-se uma balança da marca Marte com resolução de 0,01 g e submetidas à agitação em um misturador mecânico por 1 minuto para produção das suspensões. Em seguida, foram moldados 6 corpos

de prova por formulação utilizando as formulações apresentadas na Tabela 1. Os corpos de prova foram moldados por meio de fôrmas plásticas, com diâmetro de 75 mm e espessura de 2 mm e deixados em processo de cura por 24 h, vide Figura 1.



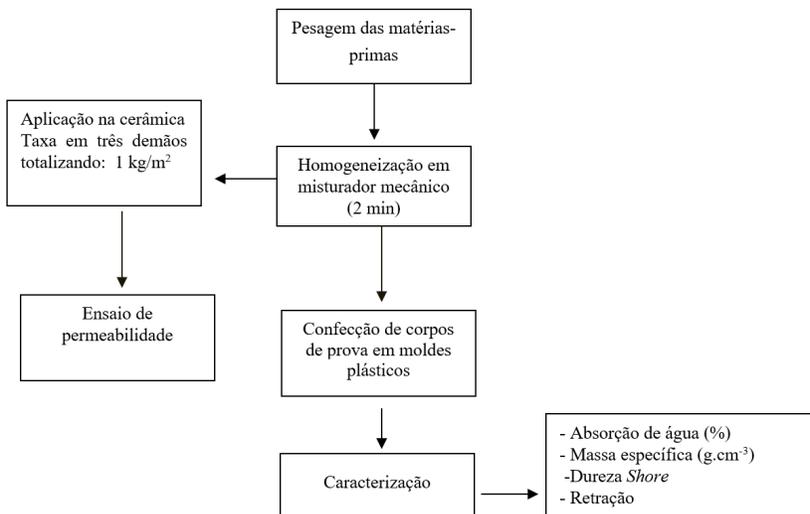
**Figura 1.** Forma utilizada para preparação dos corpos de prova (Fonte: Autor).

Os corpos foram utilizados para avaliação da densidade, absorção de água, dureza e retração. Para avaliação da permeabilidade foram aplicadas as suspensões com auxílio de um pincel em bases cerâmicas de 10 x 10 x 2 cm, a uma taxa de 0,3 kg.m<sup>-2</sup> por camada, totalizando três camadas, respeitando um intervalo de 24 h por camada.

**Tabela 1.** Formulações propostas (%)

Formulações	PD	A10	A20	V10	V20	V30	V40
Polímero	100	90	80	90	80	70	60
Argila	-	10	20	-	-	-	-
vidro	-	-	-	10	20	30	40

Fonte: Autor



**Figura 2.** Procedimento do processo para confecção e análise dos corpos de prova (Fonte: Autor).

## 2.3 Ensaios de caracterização dos corpos de prova

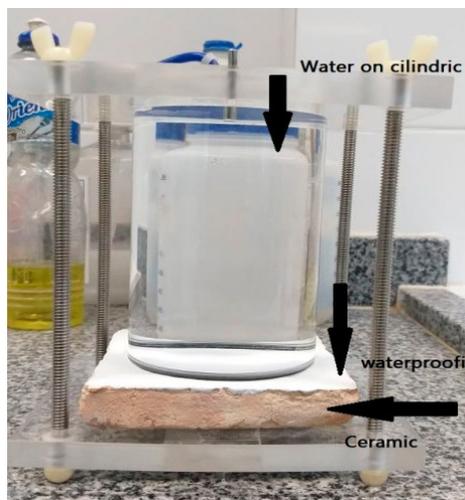
Para se determinar a resistência mecânica de forma indireta, foi determinada a dureza dos corpos de prova das formulações de acordo com a norma ASTM D2240/75 [31]. Os corpos de prova foram preparados nas dimensões de 75 mm de diâmetro e espessura de 2 mm. Os ensaios foram realizados nas seguintes condições: penetrador pontiagudo e espaço mínimo 15 segundos. Foram realizadas cinco medidas em cada amostra estudada, utilizando-se um durômetro da marca DIGIMESS de 0 a 100 Shore.

Com finalidade de avaliar a permeabilidade ou capacidade de impedir a água passar por um baldrame, foi utilizado procedimento interno para determinar a permeabilidade em g/h. Esse procedimento foi adotado pois desejava-se realizar pressão da água sobre a base de contato. Inicialmente foram preparadas bases cerâmicas de 10 x 10 x 2 cm cuja absorção de água era em média 10%. Nessas bases foram aplicadas três camadas de cada mistura formulação, obedecendo a um intervalo de 24 h para cada demão, em local com umidade relativa e temperatura controlada. Em cada camada era aplicada 0,3 kg/m<sup>2</sup>, sendo que foi aplicado em todas as formulações o total de 1 kg/m<sup>2</sup>, ou

seja, a mesma camada recomendada pelo fabricante do impermeabilizante. Após aplicação da terceira camada, foi ainda observado mais 24 h para cura. Cada base foi pesada e determinado seu ( $P_o$ ), ou seja, o peso da cerâmica com o impermeabilizante que estava sendo testado. Em seguida, utilizando um cilindro de acrílico de 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura, constituído de hastes de fixação e borracha de vedação, foi introduzido água deionizada. Em seguida, o conjunto foi acoplado na cerâmica conforme apresentado na Figura 3 e mantido em contato com a água por 24 h. Após, a base cerâmica era retirada e novamente pesada ( $P_f$ ) determinando-se o peso contendo água absorvida. O cálculo da permeabilidade foi realizado conforme a Eq. (2).

$$P = \frac{P_f - P_o}{h} \quad (2)$$

Os corpos de prova já curados foram submetidos ao ensaio de densidade aparente e absorção de água no estado endurecido em conformidade com a NBR 9778 [32] e NBR 15289 [33]. Para realização do ensaio foi utilizado uma balança da marca Marte com resolução de 0,01 g e uma balança hidrostática de acordo com o princípio de Arquimedes. As imagens das formulações foram realizadas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em um microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JSM-6510LV. Os resultados médios e os desvios padrões dos ensaios de laboratório foram analisados através do método estatístico ONE WAY ANOVA, cuja técnica consiste na análise de variância entre os grupos de resultados, utilizando-se índice de significância de 95% ( $p < 0,05$ ). Para esta pesquisa, o aplicativo utilizado foi o programa Microsoft Excel 2010 que se encarregou de determinar os valores de  $p$  entre os grupos de materiais nas diferentes condições das amostras [34].



**Figura 3.** Ensaio de impermeabilização (Fonte: Autor).

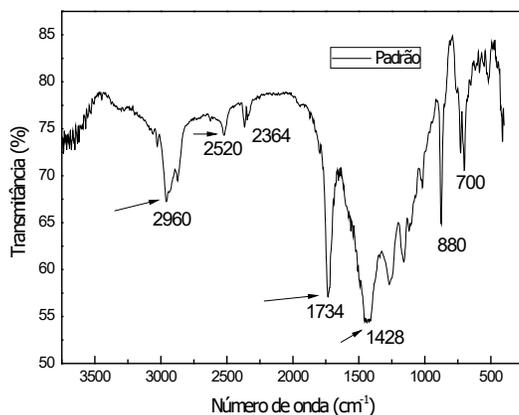
### 3. RESULTADOS

Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades físico-químicas do copolímero acrílico. Trata-se de uma matéria-prima de cor branca e viscosidade elevada, bem como seu pH.

**Tabela 2.** Características do PMMA

pH	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosidade Cps	Sólidos presentes (%)
8 a 10	1,1 ± 0,1	4500-5000	40 ± 1

Na Figura 4 é apresentado o FTIR da matriz de polímero de PMMA. As bandas estão de acordo com a literatura [35]. Na banda de 1734 cm<sup>-1</sup> corresponde ao estiramento do grupo carbonila (C=O), a 2960 cm<sup>-1</sup> ao grupo (CH<sub>3</sub>) e a 2520 cm<sup>-1</sup> ao ácido carboxílico.



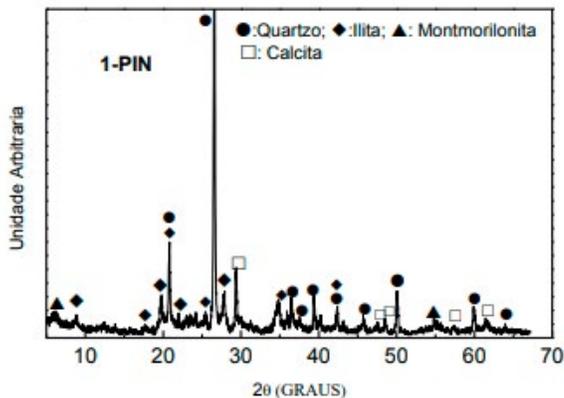
**Figura 4.** FTIR do polímero à base de PMMA (Fonte: Autor).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de análise química da argila e do vidro. A argila é constituída principalmente de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com elevados teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , os quais são elementos associados com estruturas de argilominerais, quartzo e feldspatos, típicos de produtos de cerâmica vermelha [36]. Já o vidro apresenta teor de  $\text{CaO}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  [37-38]. A argila apresenta CTC elevado, o que favorece a reação com o polímero para alargamento das placas da sua estrutura [39-40].

**Tabela 3.** Análise química das matérias-primas

Óxidos	Composição química (%)	
	Argila	Vidro
PF	8,8	5,0
$\text{SiO}_2$	53,3	67,8
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16,5	1,9
$\text{CaO}$	7,0	14,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6,6	0,2
$\text{Na}_2\text{O}$	1,3	10,8
$\text{K}_2\text{O}$	3,7	-
$\text{MgO}$	2,7	-
Total	99,8	100,1
CTC	9,5	-

Na Figura 5 é apresentada a difratometria de raios X da argila. Nota-se que é uma argila ílítica, contendo traços de montmorilonita, rica em carbonatos e que apresenta ainda quartzo como impureza [41].

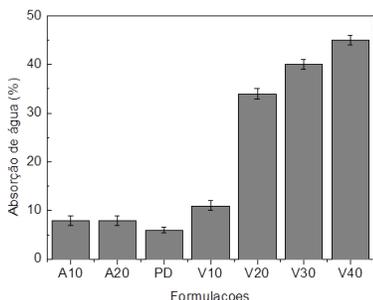


**Figura 5.** Padrão de difração de raios X da argila (Fonte: Autor).

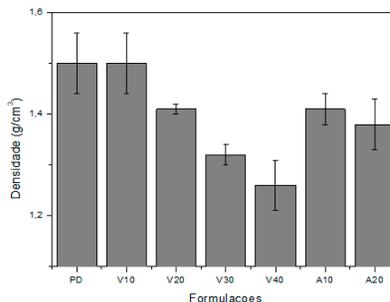
Nas Figuras 6 a 9, são apresentados os resultados de ensaios tecnológicos de caracterização das formulações. De acordo com a Figura 6, à medida que se acrescentou vidro no polímero PMMA, a absorção de água foi aumentando de forma expressiva. Já nas formulações em que a argila foi incorporada, a absorção de água foi próxima ao PD (6%), A10 (8%) e A20 (8%). De acordo com Choudalakis [29], três características particulares dos silicatos ocorrem quando misturados em polímeros: a primeira é que eles desempenham um papel importante na criação de compósitos. A segunda é a capacidade das folhas de silicato se dispersarem em camadas, e a terceira é a possibilidade de modificar sua química de superfície através de reações de troca iônica com cátions orgânicos e inorgânicos, o qual pode ser medido pelo CTC. A simples mistura de polímero e silicatos em camadas nem sempre resulta na geração de compósito, pois isso geralmente leva à dispersão de folhas empilhadas. Esta falha é devido às interações fracas entre o polímero e o componente inorgânico, foi o que ocorreu com o vidro quando incorporado.

Por sua vez, se estas interações se tornam mais fortes, a fase inorgânica pode ser dispersa na matriz orgânica em escala nanométrica. Assim, se a

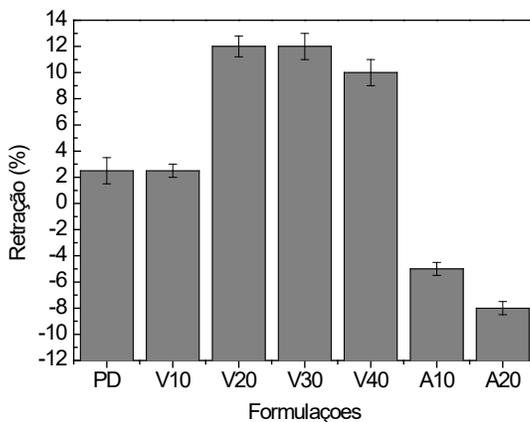
argila e seus particulados de filossilicato que estão em camadas geralmente contêm íons  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$  e são compatíveis apenas com polímeros hidrofílicos. Para tornar os silicatos em camadas compatíveis, a argila deve ser tratada quimicamente ou apresentar elevado CTC para promover inchamento, e por sua vez mais facilidade de reação com o polímero, promovendo redução da absorção de água [25-29].



**Figura 6:** Absorção de água das formulações



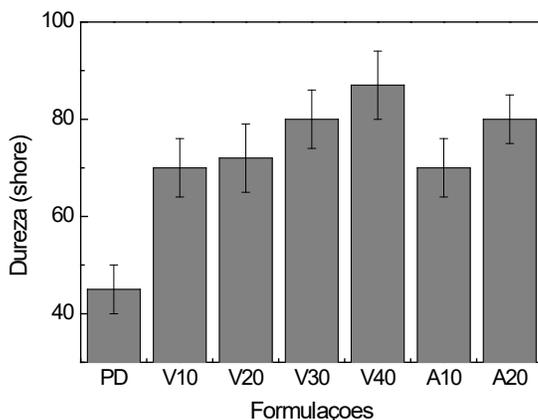
**Figura 7.** Densidade das formulações (autor)



**Figura 8.** Retração das formulações (Fonte: Autor).

De acordo com a Figura 7, tanto o vidro como a argila ao serem incorporados ao polímero de PMMA, ocorreu redução da densidade. Esse fato se deve à incorporação de ar no processo de mistura, conforme descrito por Anadão [42]. Na Figura 8 é apresentada a retração das formulações. Destaca-se que as formulações contendo argila apresentaram expansão (inchamento) que se-

gundo [29,42] é devido à presença do argilomineral montmorilonita na argila que apresenta elevada CTC, que em contato com meio líquido, expandiu.



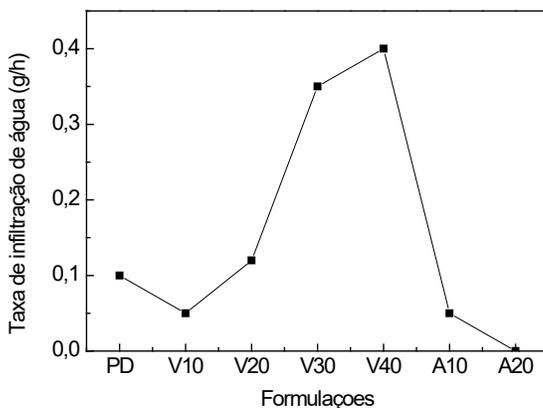
**Figura 9.** Dureza Shore (Fonte: Autor).

Conforme apresentado na Figura 9, tanto o vidro como a argila incorporados promoveram aumento da dureza e, por sua vez, da rigidez.

Na Figura 10 são apresentados os resultados do ensaio de permeabilidade. O vidro apresentou uma taxa menor do que a padrão até V10, enquanto a argila A10 e A20 apresentaram resultados bem melhores do que o padrão. Apesar da absorção de água das formulações V10, A10 e A20 apresentarem ligeiramente mais elevadas do que o padrão, provavelmente ocorreu formação de canais fechados que dificultam a passagem da água, sobretudo em argilas, conforme discutidos por Anadão [45] e Choudalakis [29].

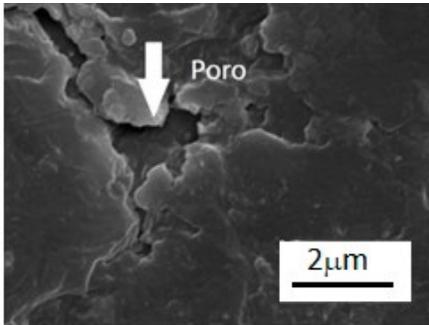
Segundo Choudalakis [29], argilas tratadas organofilicamente ou com elevado CTC, diminuem a energia da superfície, melhora as características de umedecimento da matriz polimérica e resulta em maior espaçamento entre camadas (inchaço), ou seja, as camadas da argila se separam. Além disso, os grupos funcionais podem reagir com a matriz polimérica ou, em alguns casos, pode iniciar a polimerização de monômeros para formar o polímero *in situ*. As partículas de filossilicato apresentam uma maior proporção de largura/espessura, da ordem de 10–1000. Por muito baixas concentrações de partículas, a interface total entre polímeros e silicatos em camadas é muito

maior do que em compósitos convencionais. O acoplamento entre a grande área superficial da argila e da matriz polimérica facilita a transferência de estresse para a fase de reforço, permitindo a melhoria da tensão de tração e tenacidade. As camadas de argila que incharam melhoram o empacotamento e favorecem a redução da permeabilidade [43-45].

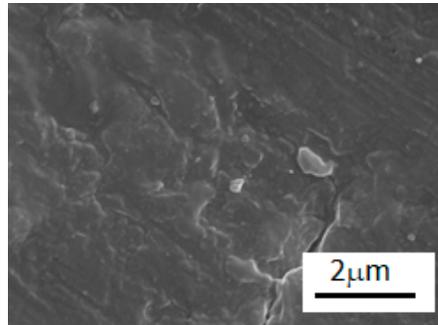


**Figura 10.** Permeabilidade em g/h (Fonte: Autor).

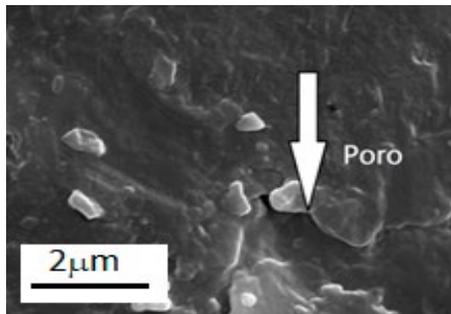
Na Figura 11 são apresentadas as micrografias das amostras com aumento de 5000 X. A amostra padrão (a), com incorporação de argila 20% (b) e incorporação de vidro 20% (c). Pode-se observar poros nas amostras (a) e (c). Na amostra (a) é decorrente de ar incorporado junto com o polímero e em (c) além do ar incorporado, o vidro não reagiu com o polímero, logo favoreceu para o acréscimo da absorção de água e redução de densidade, como apresentado nas Figuras 5 e 6. Adicionalmente na amostra (b), a argila apresentou os mesmos resultados de absorção de água e permeabilidade em relação ao padrão e praticamente não apresentou poros conforme apresentado na Figura 10.



**Figura 11 (a)** Polímero de PMMA (Autor)



**Figura 11 (b)** Polímero de PMMA com 20% de argila (Autor)



**Figura 11 (c)** Amostra de polímero de PMMA com 20% de vidro (Autor)

## 4. CONCLUSÕES

O vidro apresentou valores similares ao padrão quanto à densidade, retração, absorção de água e permeabilidade quando foi incorporado até o limite de 10%, apesar do vidro aumentar em 20% a dureza, o mesmo pode ser incorporado numa matriz de polímero acrílico.

A argila por ser plástica e com traços de montmorilonita, sofreu expansão e aderiu à camada polimérica, favorecendo o aumento da dureza e densidade, além de promover redução da permeabilidade similar ao padrão, até o limite de 20%.

As imagens de MEV mostram que na amostra padrão foi observada a presença de poros, provavelmente devido à incorporação de ar quando se misturou os componentes de modo geral. A presença de vidro até 10% favore-

ceu a eliminação deste ar, além de facilitar o empacotamento. Acima de 10% ocorreu a formação de poros, conforme apresentado na Figura 11.

## AGRADECIMENTOS

O(s) autor(es) são gratos pela infraestrutura do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Federal de Sergipe (NUPEG e Lab semi nano de Microscopia Eletrônica)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GEIKER, M. R., “On the importance of execution for obtaining the designed durability of reinforced concrete structures: Construction of durable concrete structures”. *Materials and corrosion*, v. 63, p. 1114-1118, 2012.
- [2] SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T., *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. 1ª. ed. São Paulo: Pini, 1998.
- [3] HELENE, P. R. D. L., *Manual para reparo, reforço e proteção de Estruturas de Concreto*, São Paulo: PINI, 1992.
- [4] RIGHI, G. V., “Estudo dos Sistemas de Impermeabilização: Patologias, Prevenções e Correções –Análise de Casos”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2009.
- [5] QUERUZ, F., “Contribuição para identificação dos principais agentes e mecanismos de degradação em edificações da Vila Belga”, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2007.
- [6] LI, X., Q. XU, S. CHEN, “An experimental and numerical study on water permeability of concrete”, *Constr. Build. Mater.* v.105, p. 503–510, 2016.
- [7] MUHAMMAD, N. Z. KEYVANFAR A., ABD. MAJID M. Z., SHAFAGHAT, MIRZA A., J., “Waterproof performance of concrete: a critical review on implemented approaches”, *Constr. Build. Mater.* v.101, p. 80–90, 2015.
- [8] SALGADO, J. C. P., *Técnicas e práticas construtivas para edificações*. 2 ed., São Paulo, Érica, 2012.
- [9] PIRONDI, Z., *Manual Prático de Impermeabilização*. São Paulo, Editor e Arte Gráfica Ltda, 1979.
- [10] SAUYANYA, C., RADAHAKRISHN, S., “Structure and properties of PP/SBS/glass fiber hybrid composites. Part I: Crystallization behavior and morphology”. *Polymer composites*, April 2001, v. 22, n. 2, <https://doi.org/10.1002/pc.10533>.
- [11] PAUL, D. R. ROBENSON, L. M., *Polymer Nanotechnology nanocomposites*. *Polymer*, v.49, n.15, p. 3187-4004, 2008.
- [12] SANTOS, P. S. *Tecnologia de Argilas*. Editora Blucher, 6ª edição, São Paulo, 1989.
- [13] NORTON, M. G.; CARTER, C. B., 2013, *Ceramic Materials Science and Engineering*, second Edition, New York, Springer.
- [14] GUOZHONG, L., XIUJUAN, D., WEI XUAN Z. et al., “Development of Polymer

Modified Cement Mortars for Waterproof”, *Materials Science and Engineering*, v. 381, 2018, doi:10.1088/1757-899X/381/1/012086.

[15] WANG, MA, WANG, W., “Study on waterproof mechanism of polymer-modified cement mortar” *Magazine of Concrete Research*, v.67, no 18, p. 972–979, 2018. <http://dx.doi.org/10.1680/mac.14.00294>

[16] TOUTANJI, H.A., CHOI, H., WONG D., GILBERT, J.A. **Aplicação de um revestimento de poliureia a materiais cimentícios orgânicos de alto desempenho**. *Constr. Construir. Mater.*, 38 (2013), pp. 1170-1179.

[17] DIAMANTI, M. V, BRENNNA, A., BOLZONI, F., BERRA, et al. Efeito de revestimentos cimentícios modificados com polímeros na permeabilidade à água e cloretos no concreto, *Constr. Construir. Mater.*, 49 (2013), pp. 720.728.

[18] MATEUS H. S. “Análise de argamassas de reparo de base polimérica”, Tese Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil, 2018.

[19] CHOUDALAKIS, G., AD GOTSIS, Permeabilidade de nanocompósitos polímero/argila: uma revisão *EUR. Polym. J.*, 45 (4) (2009), pp. 967-984.

[20] KUO, W., HUANG J., YU, B., “Evaluation of strengthening through stress relaxation testing of organo-modified montmorillonite reinforced cement mortars”, *Constr. Building Materials*. v 25, n. 6, p. 2771–2776, 2011.

[21] NEHDI, M. L., “Clay in cement-based materials: critical overview of state-of-the-art”, *Construction Building Materials*, v51, p 372–382, 2014.

[22] KALPOKAITE, R., DIC`KUVIENE, LUKOŠIUTE I., J. SNIENE, C., BRINKIENE, K., BALTUŠNIKAS A., “Cement substitution by organoclay – the role of organo clay type”, *Cem. Concr. Compos.* v. 62, p. 90–96, 2015.

[23] HOSSEINI, P., A. AFSHAR, B. VAFAEI, A. BOOSHEHRAN, E. MOLAEI RAISI, A. ESRAFILI, Effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete, *Eur. J. Environ. Civ. En.* 21 (2) (2017) 127–147.

[24] HE, X., X. SHI, Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating, *Nanomaterials* (2008).

[25] YANG, H., LONG, D., ZHENYU, L., YUANJIN, H., TAO, Y., et al. “Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar”, *Construction and Building Materials*, 2019, v.224, p. 276–283.

[26] USUKI A, KAWASUMI M, KOJIMA Y, OKADA A, KARAUCHI T, KAMIGAITO O. Swelling behavior of montmorillonite cation exchanged for x-amino acids by e-caprolactam. *J Mat Res* 1993;8(5):1174– 1180

[27] LVSHUZHEN; Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials* 224 (2019) 276–283.

[28] QURESHI, T, A. AL-TABBAA, “Influence of Expansive minerals on the Self-healing of Cement Paste and Mortar Systems”, 2015.

[29] CHOUDALAKIS G, GOTSIS A. D. Permeability of polymer/clay nanocomposites: A review. *European Polymer Journal* 45 (2009) 967–984. doi:10.1016/j.eurpolymj.2009.01.027

[30] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C-837,1992 - Standard Test Method for Methylene Blue Index of clay.

[31 ] ASTM D2240-15, Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness, 2015.

- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [33] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [34] WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H., 2009, Probability and statistics for engineering and science. 2ª ed. São Paulo, Pearson Education (in Portuguese).
- [35] RAMESH S.; KOAY H. L.; KUMUTHA, K.; AROF A. K. FTIR studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes Spectrochimica Acta Part A 66 (2007) 1237–1242, doi:10.1016/j.saa.2006.06.012
- [36] ALCÂNTARA, A. C., M. S. BELTRÃO, H. A. OLIVEIRA, I. F. GIMENEZ, L. S. BARRETO, “Characterization of ceramic tiles prepared from two clays from Sergipe-Brazil”, *Applied Clay Science*, v. 39, p.160, 2008.
- [37] OMER, O' ZKANA , ISA Yu'ksel b, Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-product”, *Construction and Building Materials*, v. 22, pp. 1288-1298, 2008.
- [38] SHAYANAXU A.; Value-added utilization of waste glass in concrete”, *Cement Concrete Res*, v. 34, pp. 81, 2004.
- [39] BENNOUR A. MAHMOUDI, S.; SRASRA, E. et al., “Composition, firing behavior and ceramic properties of the Sejnène Clays (Northwest Tunisia)”, *Applied Clay Science*, 2015, v. 115, p. 30-38.
- [40] GRIM, R. E., 1962, *Applied Clay Mineralogy*, New York, Ed. Mc-Graw Hill Publ. Company Ltda.
- [41] BOUSSEN , S., SGHAQIER, D., CHAABANI, F, JAMOUSSE B., BENNOUR, A. “Characteristics and industrial application of the lower cretaceous clay deposits (Buhedma formation), southeast Tunisia: Potential use for the manufacturing of ceramic tiles and bricks”, *Applied Clay Science*, 2016, 123, p. 210-221.
- [42] ANADÃO, P., *Tecnologia de nanocompósitos polímero/argila*. Editora Artliber, São Paulo, 2012.
- [43] LE BARON P. C., WANG Z, PINNAVAIA T. J. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Appl Clay Sci* 1999 (15), p.11–29.
- [44] POWELL CE, BEALL G. W., Physical properties of polymer/clay nanocomposites. *Curr Opin Solid State Mater Sci* 2006 (10), p.73–80.
- [45] JORDAN, J., JACOB, K, TANNENBAUM R, SHARAF M, JASIUK I. Experimental trends in polymer nanocomposites-a review. *Mat Sci Eng A* 2005, (393) 1–11.

# DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA DE REBOCO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GRANITO

*Any Salonny S. Santos Nascimento*

*Herbet Alves de Oliveira*

*Cochiran Pereira dos Santos*

*Vanessa Gentil A. Oliveira*

*Zélia Soares Macedo*

## RESUMO

No município de Estância (SE), Brasil, existem indústrias de produção e corte de granito que geram resíduos que são descartados no meio ambiente. Esses resíduos podem ser reutilizados por uma empresa local que produz argamassa, desde que seja tecnicamente viável. Os resíduos ainda são pouco utilizados no segmento industrial. Este trabalho tem como objetivo verificar a influência do uso de resíduos cortados em granito (GCW) como substituto parcial do cimento (A1) em porcentagens (5, 10, 15 e 20%) e substituir o agregado fino (areia) (A2) em porcentagens (5%, 10% e 20%) na produção de argamassas. As matérias-primas utilizadas na produção da argamassa foram: cimento Portland CPIIF-32RS, caulim, areia de rio e água da concessionária local. O resíduo utilizado foi caracterizado em termos de massa específica, massa unitária e análise química, através do teste de difratometria de energia dispersiva. O traço utilizado foi de 1:2:6, respectivamente cimento, caulim e areia, sendo que foi utilizado uma relação água/cimento fixada em 1,70. As composições de argamassa foram utilizadas com resíduos de granito e uma composição convencional que serviu de referência. Nas argamassas no estado fresco, foram realizados os testes de índice de consistência e densidade aparente, enquanto no estado curado, os testes foram de resistência à flexão, resistência à compressão, densidade aparente e absorção de água. Os resultados da resistência mecânica das argamassas nas quais a areia foi substituída por resíduos de granito foram superiores aos valores de referência, principalmente com uma substituição de 20% e, como outras propriedades analisadas, não sofreram grandes alterações. Os resíduos melhoram as propriedades da argamassa e podem ser incorporados à argamassa de reboco, substituindo a areia do rio e contribuindo para a redução do impacto ambiental.

**Palavras-chave:** argamassa, sustentabilidade, resíduos, granito

# 1. INTRODUÇÃO

A destinação final dos resíduos é um dos grandes problemas enfrentados hoje no mundo, independentemente de quais sejam as razões, se políticas, econômicas ou ecológicas. Nos últimos anos a reciclagem de resíduos em todos os segmentos da cadeia produtiva tem sido incentivada pois é a alternativa mais eficiente para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o grande consumo de matérias-primas e a geração de resíduos [1].

As áreas urbanas são palcos de grandes concentrações populacionais, e como consequência, também é onde ocorrem maiores extrações de recursos naturais, sendo a construção civil um dos setores que mais impacta o ambiente, sendo responsável por consumir 75% desses recursos no planeta [2].

No Brasil, anualmente são empregados cerca de 210 milhões de toneladas de agregados naturais na produção de concretos e argamassas. Essa crescente demanda tem esgotado as reservas de matérias-primas próximas aos grandes centros urbanos, gerando maior consumo de energia, poluição e prejuízos para os produtores no transporte desses materiais a longas distâncias [3].

O Brasil tem um grande destaque no segmento de exploração e beneficiamento de rochas ornamentais, tais como mármore, granito, ardósia, serpentinitos e xistos, e se encontra entre os maiores exportadores e importadores desse material no mundo. Dados coletados até o mês de setembro de 2016, apontam um total exportado próximo de dois milhões de toneladas, com destaque para os estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará, Bahia, Rio Grande do Norte e Pernambuco, que contribuíram em maior proporção no beneficiamento de rochas ornamentais [4].

No processo produtivo de rochas graníticas, na fase do beneficiamento primário, além do resíduo do corte e água, forma uma lama abrasiva com grande potencial para a produção de argamassas e concretos, pois possui grande estabilidade e resistência à abrasão [5]. A aplicação do resíduo em matrizes cimentícias tem se mostrado uma alternativa viável para reaproveitamento para vários processos produtivos [6,7] em função da elevada finura e da possibilidade de utilização como *filler*, minimizando o uso de recursos naturais, reduzindo custos, respeitando a geodiversidade e, conseqüentemente, a biodiversidade. Durante o beneficiamento primário, muitas vezes o resíduo

é depositado a céu aberto, sem nenhum tratamento prévio, causando sérios danos ao meio ambiente. A maior parte da lama é proveniente dos teares convencionais presentes nas serrarias, constituída por 67% de água, e deste percentual, 30% é de pó de rocha. Estima-se que sejam geradas 2,2 ton de lama por cada metro cúbico de rocha serrado. No entanto, como as indústrias não separam os resíduos por processo (serragem e polimento), misturando todos eles, a lama final pode conter, ainda, outros produtos. No polimento são gerados em torno de 3,5 kg de lama por metro quadrado de chapa (ou 100 kg/m<sup>3</sup> de bloco) [8]. O diferencial desse artigo é o reaproveitamento de resíduo de processamento de granito em argamassas com caulim.

## 2. METODOLOGIA

As argamassas utilizadas neste estudo experimental foram do tipo mistas de revestimento com traço 1:2:6 (cimento:caulim:areia), em volume, usualmente utilizada na execução de revestimento de alvenarias de vedação. Essas misturas foram formuladas a partir da substituição de diferentes teores de cimento e de areia pelo resíduo de corte de granito (RCG). Como mostra a Tabela 1, foram formuladas um total de sete argamassas com substituições, consideradas argamassas com resíduos, e uma argamassa sem adições, considerada como argamassa de referência (REF), que serviu como parâmetro comparativo. Nas formulações A1 foram substituídos o cimento pelo resíduo RCG nas proporções de 5, 10, 15 e 20%. Nas formulações A2 o resíduo substituiu o agregado miúdo nas proporções de 5, 10 e 20%. Foi calculada água para manter a relação água-cimento (a/c) em 1,1 e índice de consistência de (210 ± 10) mm. Para conversão dos traços se utilizou a Eq. 1, em que:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x} \quad (1)$$

Sendo:  $\gamma_c$ ,  $\gamma_a$  e  $\gamma_b$ , as massas específicas do cimento, da areia e do caulim, e 1:a:b:x o traço do concreto expresso em massa, e  $C$  é o consumo de cimento por metro cúbico de argamassa (1000 dm<sup>3</sup>).

**Tabela 1.** Formulações de argamassa

Traços de argamassa	Argamassa	Material substituído	(%)	Descrição
1:2:6	A	-	-	A/0/REF
1:2:6	A1	cimento	5	A1/5/RCG
1:2:6	A1	cimento	10	A1/10/RCG
1:2:6	A1	cimento	15	A1/15/RCG
1:2:6	A1	cimento	20	A1/20/RCG
1:2:6	A2	areia	5	A2/5/RCG
1:2:6	A2	areia	10	A2/10/RCG
1:2:6	A2	areia	20	A2/20/RCG

## 2.1 Caracterização tecnológica das matérias-primas

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo Portland CP II F-32 RS. O caulim foi adquirido em pó da empresa Caulix e passado na peneira de abertura 0,6 mm. O resíduo de granito foi colhido em uma marmoraria da cidade de Estância-SE. O mesmo apresentava umidade de cerca de 30%, foi seco em estufa a  $(105 \pm 5)$  °C e passado na peneira de 0,074 mm.

**Massa unitária:** a massa unitária do cimento, caulim, resíduo de granito e agregado miúdos, foram determinados por meio da média de três amostras vertidos em um recipiente cilíndrico com diâmetro de 10 cm e altura de 13 cm, que foram pesados em balança com resolução de 0,01 g, o peso foi dividido pelo volume do recipiente.

**Massa específica aparente:** a massa específica aparente dos corpos de prova de concreto foram obtidas em conformidade com a NBR 7185 (ABNT, 2016) [9].

**Massa específica real:** a massa específica representativa da densidade real de todas as matérias-primas, foram determinadas utilizando picnômetro de hélio, modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics.

**Análise granulométrica por peneiramento:** o agregado miúdo foi caracterizado por meio da análise granulométrica, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016) [10].

**Finura:** a finura do cimento, resíduo e caulim foram realizados através

de peneiramento manual conforme a NBR 11579 (ABNT, 2012) [11] e NBR 16605 (ABNT, 2017) [12].

DRX: a difratometria de raios X das matérias-primas foram realizadas em um equipamento da Rigaku utilizando espaçamento de 1°/min.

Análise química: os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10,0 g que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

## **2.2 Preparação das argamassas**

As matérias-primas foram pesadas em balança com capacidade de carga de 2100 g e resolução de 0,01 g, modelo JH2102. Neste experimento, as argamassas foram produzidas utilizando-se um misturador mecânico (argamassadeira) de eixo vertical com capacidade de 5 litros, da marca Edutec. Inicialmente, o teor de água foi determinado para a obtenção do índice de consistência padrão prescrito na NBR 13276 (ABNT, 2005) [13], chegando-se a uma consistência no intervalo de  $(210 \pm 5)$  mm. Foram moldados corpos de prova, que foram submetidos a ensaios após cura de 28 dias.

## **2.3 Ensaios de caracterização das argamassas**

*Índice de consistência:* para realização deste ensaio foi utilizada a NBR 13276 (ABNT, 2005) [13].

Densidade de massa aparente no estado endurecido: o ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias, em conformidade com a NBR 13280 (ABNT, 2005) [14].

Resistência mecânica à compressão e tração na flexão: a resistência foi determinada na idade de 28 dias, conforme procedimento descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005) [15] em uma prensa Contenco, modelo Pavitest HD-200T.

Absorção de água e densidade aparente: para realização deste ensaio seguiu-se o método de ensaio descrito na NBR 15259 (ABNT, 2005) [16].

Os resultados médios e os desvios padrões obtidos através dos ensaios de laboratório foram analisados por meio do método estatístico ONE WAY ANOVA, o qual consiste em uma técnica de análise de variância entre os grupos de resultados, utilizando-se índice de significância de 95% ( $p < 0,05$ ) para comprovar se essas diferenças são significantes. A análise de variância tem como objetivo comparar a variação resultante de fontes específicas com a variação entre os indivíduos que deveriam ser semelhantes. Especificamente, a ANOVA testa se várias populações têm a mesma média comparando o afastamento entre as médias amostrais com a variação existente dentro das amostras. Para esta pesquisa, o programa utilizado foi o Microsoft Excel 2010 que se encarregou de determinar os valores de  $p$  entre os grupos de materiais nas diferentes condições das amostras [17].

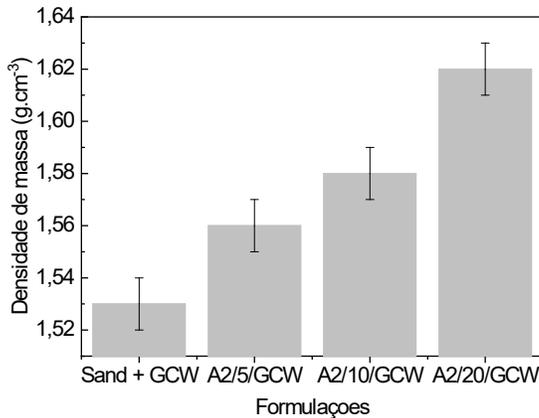
### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Conforme apresentado na Tabela 2 e Figura 1, os resultados indicam que a massa específica do cimento, caulim e areia estão de acordo com outros trabalhos [18]. Já a massa unitária, sobretudo do resíduo de granito, é o menor de todos e similar à do cimento devido a sua finura, o que favorece a elevada superfície específica. Foi observado que apesar do resíduo apresentar menor massa unitária do que a areia, ao se misturar com a areia a massa unitária aumentou de forma expressiva, indicando que melhorou o empacotamento da mistura.

**Tabela 2.** Massa unitária das matérias-primas

Matéria-prima	Método	Normas	Unidade	Resultados
Cimento	Massa específica	NBR 16605 (2017)	g/cm <sup>3</sup>	3,270 ± 0,004
	Massa específica	NM 45 (2006)	g/cm <sup>3</sup>	1,050 ± 0,001
Caulim	Massa específica	NBR 16605 (2017)	g/cm <sup>3</sup>	2,730 ± 0,001
	Massa unitária	NM 45 (2006)	g/cm <sup>3</sup>	0,780 ± 0,001
Areia	Massa específica	NBR 7185 (2016)	g/cm <sup>3</sup>	2,580 ± 0,001
	Massa unitária	NM 45 (2006)	g/cm <sup>3</sup>	1,510 ± 0,001
Resíduo de granito	Massa específica	NBR 16605 (2017)	g/cm <sup>3</sup>	2,550 ± 0,001
	Massa unitária	NM 45 (2006)	g/cm <sup>3</sup>	1,070 ± 0,001
Areia + GCW				1,530 ± 0,001
A2/5/GCW				1,560 ± 0,001
A2/10/GCW				1,570 ± 0,001
A2/20/GCW				1,620 ± 0,001
GCW	Módulo finura	NBR16697/2018	g/cm <sup>3</sup>	7,400 ± 0,013
Cimento	Finura		g/cm <sup>3</sup>	2,00 ± 0,20

GCW: resíduo de granito

**Figura 1.** Massa específica aparente das formulações (Autor)

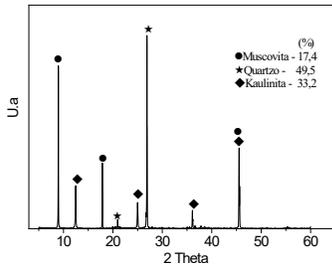
Na Tabela 3 é apresentado os resultados da análise química realizada das matérias-primas que foram utilizadas nas formulações de argamassa. O

resíduo em estudo apresentou análise química similar aos estudos de Freire e Motta (1995) [19]. Segundo o autor, o resíduo de granito apresenta composição química com a presença dos óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ , e é compatível para a utilização em argamassas na construção civil, entre outras aplicações. Já a areia, o cimento e o caulim são similares a outros trabalhos [18].

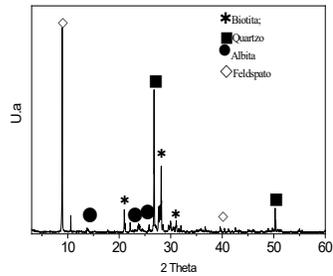
**Tabela 3.** Análise química das matérias-primas

Óxidos	Composição Química (%)	
	Argila	Resíduo
PF	8,8	5,0
$\text{SiO}_2$	53,3	67,8
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16,5	1,9
$\text{CaO}$	7,0	14,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6,6	0,2
$\text{Na}_2\text{O}$	1,3	10,8
$\text{K}_2\text{O}$	3,7	-
$\text{MgO}$	2,7	-
Total	99,8	100,1
CTC	9,5	-
BET	74,6	-

A Figura 2 ilustra o difratograma de raios X do caulim. O resultado da análise mostra que o material contém caulinita, quartzo e muscovita, característicos dos caulins [18]. Na Figura 3 é apresentado a difratometria do resíduo de granito. O resultado da análise mostra que há uma predominância das fases biotita, albita e quartzo, conforme apresentado em outros trabalhos [20].

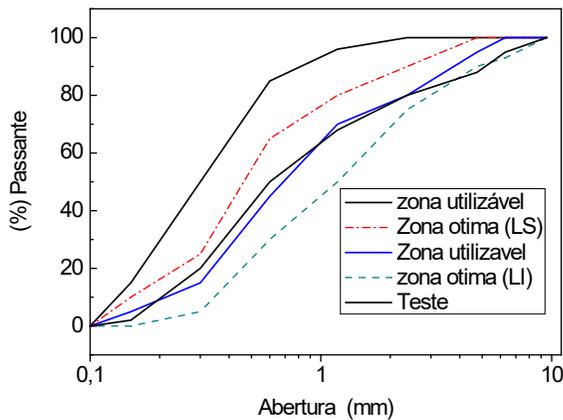


**Figura 2.** Padrão de difratometria de raios X



**Figura 3.** Padrão de difratometria de raios X do resíduo do caulim do resíduo de granito

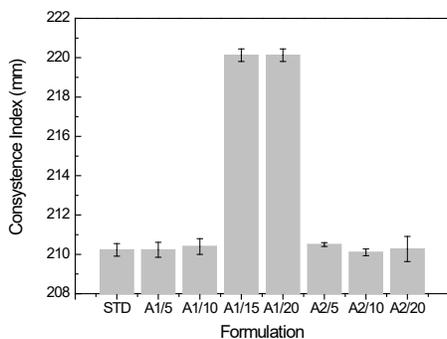
Na Figura 4 estão apresentadas a análise granulométrica do agregado miúdo utilizados nas argamassas estudadas. A areia se encontra dentro de uma zona de utilização [21]. O agregado miúdo pode ser classificado como uma areia média e apresentou módulo de finura igual a 2,63.



**Figura 4:** Análise granulométrica (Fonte: Autor).

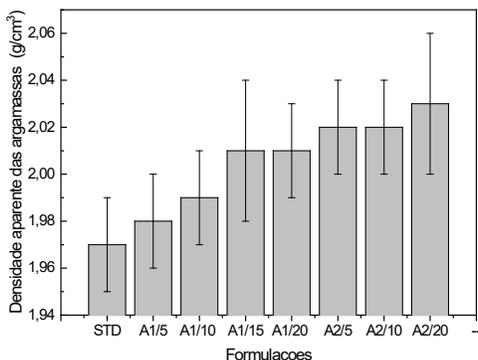
Na Figura 5 é apresentado o índice de consistência (IC) das formulações no estado fresco. Nesse ensaio constatou-se um leve aumento do IC para as argamassas com percentuais de 15 e 20% de adição de resíduo substituindo o

cimento, como consequência, ocorreu uma provável redução na coesão, visto que foi substituído uma materia-prima aglomerante por uma inerte. No entanto, para as demais misturas, não houve alteração do IC, se comparado ao de referência. Adicionalmente, esse fato pode proporcionar ganhos relativos à qualidade e produtividade durante a elevação e revestimento de alvenarias, podendo ter influência na redução de perdas das argamassas, minimizando assim o desperdício e, conseqüentemente, a geração de mais resíduos [22].



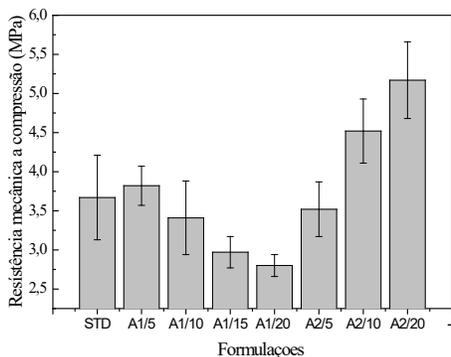
**Figura 5.** Índice de consistência das formulações (Autor)

Na Figura 6 é apresentada a densidade aparente das argamassas no estado fresco. A substituição do cimento (A1) e areia (A2) pelo resíduo indicaram melhora na densidade. Isso se deve ao melhor empacotamento provocado pelo resíduo.

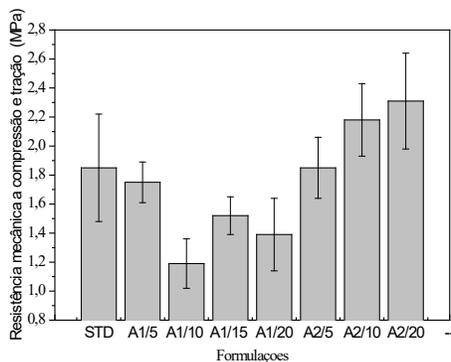


**Figura 6.** Densidade aparente da argamassa no estado fresco (Autor)

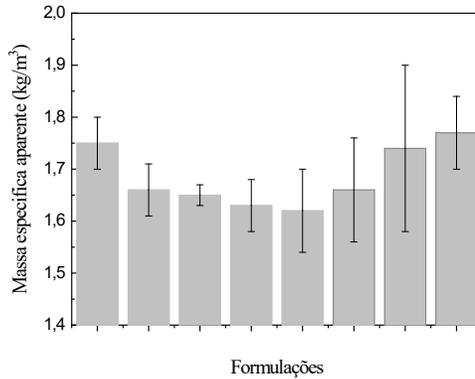
Nas Figuras 7 e 8 estão apresentadas as resistências mecânicas à compressão e tração na flexão, e na Figura 9, pode-se observar a massa específica. Nas formulações A1 em que foi acrescentado resíduo em substituição ao cimento, foi observado redução da resistência mecânica. Isto se deve à diminuição do elemento aglomerante e, como esperado, a resistência diminuiu. Adicionalmente, quando o resíduo substituiu o agregado miúdo, nas formulações A2, foi observado que favoreceu o acréscimo da resistência. Partículas mais finas inertes agem como pontos de nucleação, provocando a precipitação de produtos hidratados, ativando a hidratação do cimento. Este maior empacotamento das partículas permite que a mistura se torne mais homogênea e compacta, fornecendo maior resistência e massa específica [23,24]. Na Figura 10 é apresentado a absorção de água a qual é proporcional à resistência mecânica.



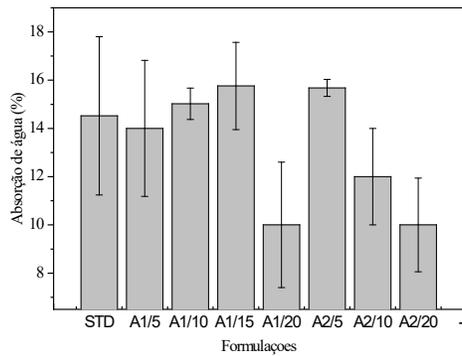
**Figura 7.** Resistência mecânica à compressão (autor)



**Figura 8.** Resistência à compressão e tração (Autor)



**Figura 9.** Massa específica aparente das formulações (Autor)



**Figura 10.** Absorção de água das formulações (Autor)

## 4. CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa foi mostrar a viabilidade da substituição parcial do cimento e do agregado miúdo (areia) por resíduos na mistura de argamassas mistas sem provocar danos no desempenho das mesmas.

Quanto às propriedades das argamassas no estado fresco, foi observado que a incorporação do resíduo em substituição do cimento na mistura quando da produção das argamassas, aumentou o índice de consistência das argamas-

sas, conseqüentemente, as mesmas têm sua coesão um pouco reduzida, no entanto, para substituições em relação a areia, os resultados de IC se mantiveram constantes. Ressalta-se ainda que as argamassas produzidas com RCG que tiveram alteração na sua consistência, esse aumento foi de 4,8%, não sendo muito relevante essa alteração nas propriedades de trabalhabilidade da argamassa.

Através dos resultados encontrados na pesquisa, pode-se constatar que a presença de resíduo na mistura das argamassas não alterou a densidade de massa das mesmas, independentemente do percentual de RCG incorporado e de qual componente ele estava substituindo. No que se refere a classificação, os resultados mostram que não há variação entre as argamassas formuladas com resíduo e a de referência e que as argamassas estão na faixa central da tabela de classificação estabelecida pela norma.

Quanto às propriedades das argamassas no estado endurecido, se observou que as argamassas produzidas com resíduos apresentaram desempenho comprometido nas propriedades de resistência à tração na flexão e resistência à compressão quando o resíduo substituiu o cimento. Para as argamassas produzidas com incorporação de RCG substituindo o agregado miúdo, ocorreu um aumento favorável nas resistências à tração na flexão e à compressão. As correlações para as argamassas A2, indicam que quanto maior o teor de resíduo presente na mistura, maior será o desempenho mecânico das argamassas. Quanto a classificação, os resultados mostram claramente que em relação a resistência à tração na flexão, as argamassas A2 estão classificadas na faixa mais elevada da tabela e as argamassas A1 nas faixas intermediárias. Já em relação a resistência à compressão, as argamassas A1 estão classificadas na faixa intermediária e a A2 na faixa mais alta.

Os resultados mostraram que a propriedade de absorção de água por capilaridade foi prejudicada nas misturas A1 (10% e 15%) e A2 (5%).

A presença do resíduo na mistura, independentemente do teor, não modificou a densidade de massa das argamassas formuladas.

## REFERÊNCIAS

[1] LILIANE, O., Reaproveitamento de resíduos de marmoraria em compósitos cimentícios. Dissertação - Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ). São João Del-Rei, 2015.

- [2] FEDERAÇÃO DO COMÉRCIO DE BENS, SERVIÇOS E TURISMO DE SÃO PAULO (FECOMERCIO). Disponível em: [www.fecomercio.com.br/?option=comeventos&view=interna&Itemid=20&id=3363](http://www.fecomercio.com.br/?option=comeventos&view=interna&Itemid=20&id=3363)>. Acesso em julho de 2019.
- [3] JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- [4] ABIRROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período Janeiro-Setembro de 2016.
- [5] APOLINÁRIO E. C. A., MATTA, V. R. P.; RIBEIRO, D. V. Efeito da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades das argamassas de revestimento, CEBECIMAT, 2012.
- [6] GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos. Porto Alegre, 2000. 135f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [7] MENEZES, R. R., FARIAS, J. et al. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. Cerâmica, v. 55, p. 263-270, 2009.
- [8] VIDAL, H. H. Azevedo, N. F. Castro, Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Eds. Francisco W. H. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.
- [9] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7185: Solo: Solo: Determinação da massa específica aparente pelo frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016.
- [10] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- [11] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579. Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200), Rio de Janeiro, 2013.
- [12] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- [13] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do Índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- [14] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- [15] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência a tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- [16] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade

- [17] WALPOLE, R. E.; MYERS R. H., 2009, Probability and statistics for engineering and science. 2ª ed. São Paulo, Pearson Education (in Portuguese).
- [18] DOS SANTOS, P.; DA COSTA, A. C. S. Difractometria de raios X e análise térmica das frações granulométricas de caulins. Seminários: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 34, n. 1, p. 9-22, 2013.
- [19] FREIRE, A. SAYEG; MOTTA, J. FRANCISCO, J. Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. Revista Rochas de Qualidade. São Paulo. Ano XXV. Edição 123, p.98-108, julho/ago. 1995.
- [20] HOLANDA, MOREIRA J.; Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. Cerâmica 49 (2003) 262-267.
- [21] BAUER, L. A., Materiais de Construção 1. 5. ed. São Paulo: Editora LTC, 1995.
- [22] PIMENTEL, L. L. JUNIOR, P. Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas revista Matéria, v.23, n.1, 2018.
- [23] SILVA, N., BUEST, N. G., CAMPITELI V. C., Argamassa com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais. Florianópolis, 2005.
- [24] BENACHOUR, Y., DAVY Y., SKOZZYLAS, C. A., et al. Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. Cement and Concrete Research, v. 38, p. 727-736, 2008.

# DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COM INCORPORAÇÃO DE ARGILA

*Herbet Alves de Oliveira*

*Franciele C. Santos*

*Gean R. Santos*

*Mário R. Oliveira*

*Bruno Fraga*

## RESUMO

Argilas são materiais que apresentam plasticidade, mas que são pouco utilizados em argamassas devido a dificuldades com a contração após secagem. Considerando a existência de grandes depósitos de argila no estado de Sergipe que são largamente utilizadas nos segmentos de cimento e cerâmica, nesse contexto, foi avaliada a influência de uma argila na fabricação de argamassa decorativa. As matérias-primas utilizadas, como o cimento, a cal, areia e argila, foram caracterizadas por meio da análise química por fluorescência de raios X, difratometria de raios X, análise granulométrica, índice de plasticidade e massa específica. Foram preparadas argamassa a partir de um traço 1:3 de cimento e areia. Foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, que foram caracterizadas no estado fresco por meio dos ensaios de densidade aparente e consistência. Após cura aos 28 dias, foram determinadas a resistência à flexão, compressão, massa específica e avaliada a retração das argamassas de forma visual. Os resultados mostraram que a argila pode ser utilizada em argamassa até o percentual de 10% sem risco de fissuramento, desde que controlada a retração adicionando areia.

**Palavras-chaves:** argamassa, argilas, cerâmica.

## 1. INTRODUÇÃO

As argamassas são materiais de construção comumente usados para assentamento de blocos de cerâmica e revestimento de paredes, entre outras aplicações [1]. Para garantir a aderência e resistência necessária, aditivos minerais são frequentemente usados na formulação de argamassas, sobretudo em rebocos. Atualmente, a argamassa decorativa monocamada vem sendo

introduzida em larga escala pela indústria como uma das alternativas para uso na construção civil, sendo constituída de misturas de cimento, cal, minerais, polímeros e outros. As argilas são materiais alternativos para aplicação em argamassas que apresentam plasticidade, além de ser abundante na natureza, mas que são pouco utilizadas, sobretudo devido a dificuldades encontradas no controle da contração após secagem. Como material muito abundante e sem necessidade de tratamentos especiais, a argila é utilizada desde a antiguidade na construção de habitações [2].

Nas regiões com climas secos ou temperados, a argila tem sido sempre o material de construção predominante. Na atualidade, um terço da população mundial vive em construções de terra, e nos países em desenvolvimento, esse valor sobe para metade da população. Prevê-se que, especialmente nos países em desenvolvimento, este material continue a ter um papel muito relevante [3]. Por se tratar a argila de um material não padronizado, o que faz variar a sua composição e características, esta variação pode levar a uma maior ou menor adequação face às necessidades construtivas. Por conseguinte, a sua aplicação na construção necessita de um controle prévio da sua composição que, se necessário, levará a uma correção da mistura [2].

A argila confere plasticidade, podendo substituir a cal, como encontrado em vários trabalhos. Gomes e Neves [4] realizaram um estudo sobre argamassas de cimento Portland e utilizando argila e areia natural do rio. Os autores compararam uma proporção convencional de argamassa de 1:1:6 (cimento: cal hidratada: areia natural), com argamassas modificadas com argila. Quanto às argamassas, os autores concluíram que a retenção de água foi afetada, o que ocasionou uma diminuição na resistência mecânica. Entretanto, a força de aderência da argamassa ao substrato foi aumentada, devido à plasticidade da argila que resultou em um comportamento coesivo da argamassa. Eires et al. [5] estudaram a influência da argila nas propriedades mecânicas de argamassas. Os autores prepararam três diferentes argamassas, eles concluíram que as argamassas contendo argila ao invés de cal não mostraram uma diminuição na resistência mecânica. Adicionalmente, isso foi atribuído à melhoria do empacotamento causado pela incorporação da argila na estrutura das argamassas.

Noor [6] estudou a incorporação de argila em cimento, e concluiu que ela

aumenta a resistência nas idades iniciais. Nestas argamassas, a argila funciona como ligante ou aglomerante e, deste modo, a terra utilizada para a construção deve ser suficientemente rica em argila de modo a permitir uma boa plasticidade enquanto molhada e elevada dureza enquanto seca. É de salientar o fato de, ao contrário dos ligantes comuns, a argila não apresenta um processo de endurecimento irreversível. Isto é, após ser obtido o endurecimento, é possível retomar a plasticidade original através da adição de água. Tal feito não é possível nas argamassas de cimento ou cal [7-8].

Os agregados utilizados nas argamassas de argila podem ser siltes ( $0,002 > 0,06$  mm), areias ( $0,06 > 2$  mm) e, mais raramente, pedregulhos ( $> 2$  mm) consoante à sua dimensão [4]. Tal como nas argamassas convencionais, o conjunto dos agregados deve apresentar uma boa distribuição granulométrica, de modo a proporcionar maior resistência mecânica. A argamassa de terra tem ainda como principal característica uma elevada higroscopicidade e um reduzido impacto ambiental e energético [3].

O presente projeto propõe um estudo da viabilidade técnica da utilização de uma argila ílítica retirada das jazidas do Estado de Alagoas utilizada na produção de cerâmica para fins decorativos [9]. Acredita-se que o consumo de matéria-prima do próprio estado irá contribuir para a contenção dos custos devido à diminuição de distâncias na aquisição e transporte dessa matéria-prima, desenvolvimento da economia da região, além de contribuir para a redução de danos causados ao meio ambiente no leito dos rios com a extração de areia.

Inserida no mercado brasileiro há quase um século, as argamassas decorativas são conhecidas pela durabilidade e beleza, devendo haver uma preocupação com a sua composição, de forma a evitar problemas ou mesmo diminuir eventuais deficiências e custos de reparo.

Não obstante todas as possibilidades e o grande interesse atual que a produção de argamassa decorativa suscita, existe ainda a necessidade de investigação contínua de caráter tecnológico sobre esse sistema construtivo e sobre os materiais a serem utilizados, sempre baseados no conhecimento das circunstâncias locais e visando uma boa adaptação a estas. Neste contexto, reside o interesse deste trabalho, que propõe um estudo da viabilidade técnica da utilização de argila tipo ílítica (IN) retirada de jazidas do Estado de

Alagoas, como uma das matérias-primas para a produção de argamassas para fins decorativos.

## 2. METODOLOGIA

A argila utilizada na pesquisa é da região de Igreja Nova, estado de Alagoas, Brasil, conforme apresentado na Figura 1.



**Figura 1.** Localização da argila estudada (Fonte: dados dos autores)

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo Portland CP II F-32 RS, a cal e o agregado miúdo são do município de Estância (SE), Brasil.

### 2.1 Caracterização tecnológica das matérias-primas

Massa específica aparente: a massa específica aparente dos corpos de prova de argamassa foram obtidas em conformidade com a NBR 7185 [10].

Massa específica real: a massa específica representativa da densidade real de todas as matérias-primas, foram determinadas utilizando picnômetro de hélio, modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics.

Composição granulométrica por peneiramento: o agregado miúdo foi caracterizado por meio da análise granulométrica, conforme a NBR 7181 [11].

Finura: a finura do cimento, resíduo e cal foram realizadas através de peneiramento manual conforme a NBR 11579 [12]

DRX: a difratometria de raios X das matérias-primas foram realizadas em um equipamento da Rigaku utilizando espaçamento de 1°/min no intervalo de 3 a 60°.

Análise química: os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10,0 g que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

Índice de plasticidade: foi realizada na argila de acordo com NBR 6459 [13].

## 2.2 Preparação das argamassas

A argila foi seca em estufa a  $(110 \pm 5)$  °C, em seguida passou por moagem em moinho de martelo e passado na peneira (0,42 mm), conforme procedimentos de AMOROS [14]. As matérias-primas foram pesadas em balança com capacidade de carga de 2100 g e resolução de 0,01 g, modelo JH2102. Neste experimento, as argamassas foram produzidas utilizando-se um misturador mecânico (argamassadeira) de eixo vertical com capacidade de 5 l, da marca Edutec. Inicialmente, o teor de água foi determinado para a obtenção do índice de consistência padrão prescrito na NBR 13276 [15], chegando-se a uma consistência no intervalo de  $(210 \pm 10)$  mm. Foram moldados corpos de prova que foram submetidos a ensaios após cura de 28 dias. As formulações propostas estão na Tabela 1. A partir de uma formulação padrão foi introduzido argila em substituição à areia.

**Tabela 1.** Formulações de argamassa com argila em massa (kg)

Matérias-primas	Padrão	A	B	C	D	E
Cimento	1	1	1	1	1	1
Cal	2	2	2	2	2	2
Areia	6	-	2	3	1	5
Argila IN	-	6	4	3	5	1
a/c	1,80	2,55	2,69	2,79	2,61	1,90

## 2.3 Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco

*Índice de consistência:* para realização deste ensaio foi utilizada a NBR 13276 [15].

Densidade de massa aparente no estado endurecido: o ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias, em conformidade com a NBR 13280 [16].

## 2.4 Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido

Resistência mecânica à compressão e tração na flexão: a resistência foi determinada na idade de 28 dias, conforme procedimento descrito na NBR 13279 [17] em uma prensa Contenco, modelo Pavitest HD-200T.

Absorção de água e densidade aparente: para realização deste ensaio, seguiu-se o método de ensaio descrito na NBR [18]. Os resultados médios e os desvios padrões obtidos através dos ensaios de laboratório foram analisados por meio do método estatístico ONE WAY ANOVA, o qual consiste em uma técnica de análise de variância entre os grupos de resultados, utilizando-se índice de significância de 95% ( $p < 0,05$ ) para comprovar se essas diferenças são significantes.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Tabela 2, a densidade aparente das matérias-primas foi bem próxima, com exceção da areia que é mais grosseira. Com relação a granulometria, o cimento é o material que apresentou menor porcentagem de partículas retidas na peneira 0,074 mm e a argila apresentou alto índice de partículas finas ( $< 2 \mu\text{m}$ ), o que contribuiu para melhorar o índice de plasticidade. A argila IN apresentou IP de 9%, que segundo Maestrelli [19], materiais que apresentam IP entre 1 e 7% são considerados fracamente plásticos, de 7 a 15% são medianamente plásticos e acima de 15% altamente plásticos. Essas diferenças estão relacionadas com a distribuição do tamanho de partículas, teor de matéria orgânica e ainda do tipo de argilomineral presente. Assim, a argila é classificada como de plasticidade média.

**Tabela 2.** Ensaio de caracterização tecnológica das matérias-primas

Matérias-primas	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )	Finura (%) (0,074 mm)	IP (%)	Análise granulométrica		
					Argila (<2 μm)	Silte (2-60 μm)	Areia (>60 μm)
Cimento	1,19	3,26	0,96	-	-	-	-
Areia	1,52	2,62	-	-	-	-	-
Argila IN	1,15	2,71	32,20	9	39,7	39,2	21,1
Cal	0,94	2,72	12,00	-	-	-	-

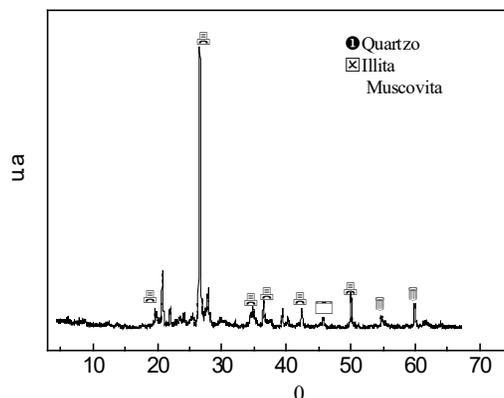
IP: índice de plasticidade; CTC: capacidade de troca de cátions

De acordo com a Tabela 3, a argila é rica em potássio e ferro, característico de argilas ílíticas. Já nas demais matérias-primas, a composição é similar a outros trabalhos [1].

**Tabela 3.** Análise química das matérias-primas (%)

	PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	ZrO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Cimento	1,4	8,6		5,3	1,4	-	-	-	0,36
Areia	4,3	85,0	15,3	3,0	0,5	-	-	0,5	5,3
Argila	0,5	64,2	3,7	5,3	4,3	1,6	12,8	-	0,9
CaO	-	4,0	95,0	-	-	-	-	-	-

Na Figura 2 é apresentada a difratometria de raios X da argila. Está presente o argilomineral ilita, que é rico em K<sub>2</sub>O, conforme apresentado na análise química da Tabela 3. Estão presentes como impurezas o quartzo e muscovita [20]. A presença da SiO<sub>2</sub> refere-se a sua composição original, mas também a presença de quartzo livre.



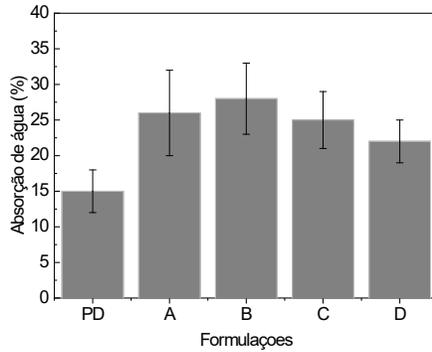
**Figura 2.** Padrão de difratometria de raios X da argila (Fonte: Autor).

De acordo com a Tabela 4, a consistência aumentou com a incorporação de argila, sendo necessária a correção com a adição de água, reduzindo a densidade aparente da suspensão conforme trabalho de BARROS [21]. Adicionalmente, com o acréscimo de argila houve aumento da absorção de água (Figura 3), redução da densidade (Figura 4) e da resistência (Figura 5).

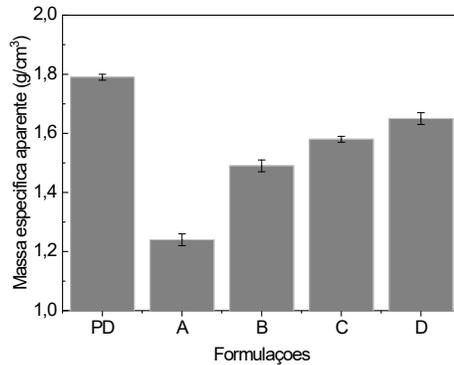
**Tabela 4.** Ensaio de caracterização da argamassa

Estado da argamassa	Ensaio	Padrão	A	B	C	D
Fresco	Consistência (mm)	202 ± 2	222 ± 2	189 ± 2	252 ± 2	180 ± 1
	DA (g/cm³)	2,06	2,05	1,91	1,91	1,88
Endurecido	RC (MPa) 28 dias	2,22 ± 0,51	2,07 ± 0,47	1,35 ± 0,17	2,40 ± 0,28	2,26 ± 0,23
	AA (%)	15,5 ± 2,8	26,5 ± 3,0	28,0 ± 2,4	24,8 ± 2,8	21,6 ± 0,6
	DA (g/cm³)	1,80 ± 0,80	1,32 ± 0,00	1,49 ± 0,01	1,58 ± 0,02	1,65 ± 0,02

DA: densidade aparente; RC: resistência à compressão; AA: absorção de água

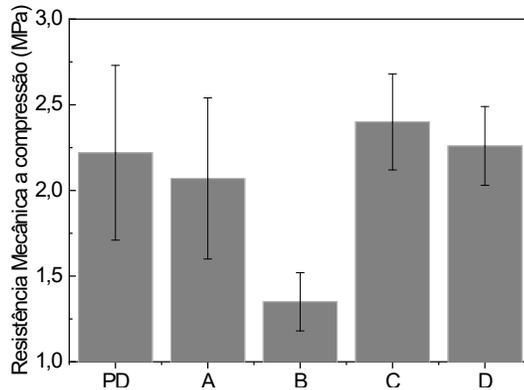


**Figura 3.** Absorção de água das formulações (Fonte: Autor).



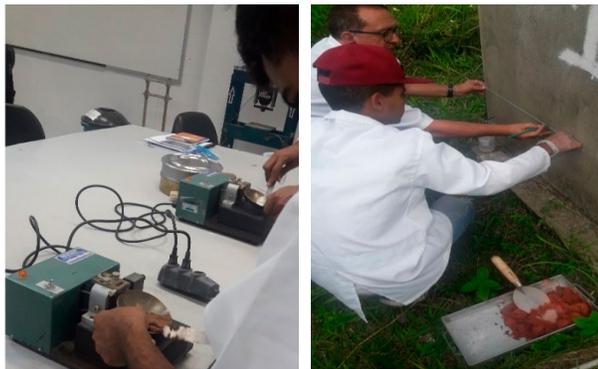
**Figura 4.** Massa específica aparente das formulações (Fonte: Autor).

Conforme apresentado na Figura 5, a resistência mecânica à compressão sofreu redução com a substituição da areia pela argila em A e B. À medida que a areia foi incorporada acima de 50% em C e D, a resistência voltou a aumentar.



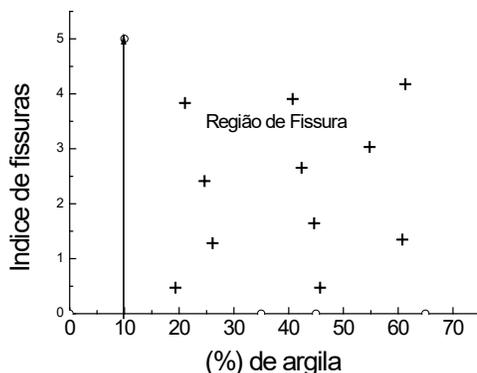
**Figura 5.** Resistência mecânica à compressão das formulações (Fonte: Autor).

Foi avaliado o comportamento das argamassas aplicadas na parede e todas apresentaram fissuras. Foram então elaboradas fórmulas adicionais com E e F com 5 e 10% de argila e não trincaram. Nas Figuras 6a e 6b são apresentados, respectivamente, a aplicação da argamassa e o ensaio de índice de plasticidade.



**Figura 6.** (a) aplicação da argamassa (b) ensaio de índice de plasticidade (Fonte: Autor).

Na Figura 7 é apresentado um gráfico em que se define uma região de fissuras provocada pela incorporação de argila. Pode-se observar que o índice de trincas ocorreu com adição de argila acima de 10%.



**Figura 7:** índice de fissuras em relação ao teor de argila (Fonte: Autor).

## 4. CONCLUSÕES

A argila apresentou plasticidade média, sendo necessária mais água do que a argamassa tradicional, o que contribuiu para o aparecimento de trincas. Assim, foi necessário reduzir drasticamente o teor de argilas nas formulações para minimizar as fissuras. Por sua vez, o acréscimo de água favoreceu a queda da resistência e da densidade aparente, bem como o aumento da absorção de água.

Os resultados mostraram que a argila pode ser utilizada na argamassa até o percentual de 10% sem risco de fissuramento, desde que controlada a retração adicionando-se areia.

## REFERÊNCIAS

- [1] PETRUCCI, E. G. R. Materiais de construção, Editora Globo, Rio de Janeiro, 2011.
- [2] BRAVO, D. R.; Tese de Mestrado, Conservação de Edifícios em Terra: Argamassas de Reboco; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2017.
- [3] SANTOS, T. R. A. dos. (2014). Argamassas de terra para rebocos interiores - Ensaio de caracterização e influência da formulação. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- [4] GOMES, M. I., Gonçalves T. Faria e P., The compatibility of earth-based repair mortars with rammed earth substrates, HMC 2013 – Historic Mortars Conference, University of West Scotland, Glasgow, Sept 2013 (CD).

- [5] EIRES, R.; Cardoso, C.; Camões, A., Argamassas de terra e cal reforçadas com fibras naturais. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Guimarães, Portugal (CD) 2014.
- [6] NOOR-ul-Amin, Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases, *Construction and Building Materials* 34 (2012) 381–384.
- [7] LIMA, J.; FARIA, P.; SANTOS SILVA, A. Earthen Plasters Based on Illitic Soils from Barrocal Region of Algarve: Contributions for Building Performance and Sustainability. **Key Engineering Materials**, v. 678, p. 64-77, 2016.
- [8] NETO J. S. A.; SILVA, V. S.; Influência da sequência de mistura nas propriedades da argamassa industrializadas; in.: XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, São Paulo, agosto, 2017.
- [9] OLIVEIRA, H. A.; SANTOS, C. P., Avaliação do potencial de argilas de Sergipe e Alagoas na produção de agregados para uso em concreto. *Revista Cerâmica*, 63. 2017.
- [10] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2016.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7181, Determinação da granulometria (2016).
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11579:2012, Determinação da finura do cimento.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6459, Determinação do limite de plasticidade de solos, Rio de Janeiro (2016).
- [14] AMOROS, J. L., SANCHES, G., JAVIER, 2011, Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas. Edição, Madrid, ITC, Instituto de Tecnologia Cerâmica.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13276, 2003, Determinação do índice de consistência de argamassas.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13280, 2005, Determinação da densidade no estado endurecido.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13279, 2005, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- [19] MAESTRELLI, S. C.; Roveri, C. D.; Nunes A. et al., 2013, Estudo da caracterização de argilas não plásticas da região de poços de caldas, *Cerâmica*, v.59, n. 350, abril/junho.
- [20] Mahmoudi, S.; BENNOUR A.; SRASRA, E., ZARGOUNI, F., 2017, Characterization, firing behavior and ceramic application of clays from the Gabes region in South Tunisia, *Applied Clay Science*, v.135, pp. 215–225.
- [21] BARROS, M. M. B.; Metodologia para implantação de tecnologias construtivas racionalizadas na produção de edifícios. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, USP, 1996.

# REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE AGREGADO LEVE

*Fernando Luis .A. Santos  
Vanessa Gentil de O. Almeida  
Cochiran Pereira dos Santos  
Zélia Soares Macedo  
Herbet Alves de Oliveira*

## RESUMO

A destinação final dos resíduos é um dos grandes problemas enfrentados pela indústria em todo mundo, visto que locais de descarte estão cada vez mais difíceis. A serragem que é gerada na produção de móveis, ou descascamento de madeiras, são reaproveitadas como combustível em fornos cerâmicos, ou é muitas vezes descartada no meio ambiente, mas pode ser utilizada na produção de argila expandida. A serragem pode ser utilizada na produção de agregado leve para redução do peso da estrutura, como adorno para jardins e como elemento acústico. A argila expandida é caracterizada pela baixa densidade aparente, entre 500 e 2000 kg/m<sup>3</sup> e elevada resistência mecânica à compressão, de 20 a 50 MPa. Nesse trabalho foram testadas incorporações a uma argila de uso corrente nas indústrias cerâmicas do estado de Sergipe e serragem, com o intuito de reduzir a densidade após queima. Os corpos de prova foram produzidos por prensagem axial a uma pressão de 30 MPa em formato cilíndrico com 19 mm de diâmetro e altura de 15 mm. Após queima a 1100 °C, os corpos de prova foram caracterizados em ensaios de absorção de água, densidade aparente, resistência mecânica à compressão, difratometria de raios X e análise química por fluorescência de raios X. A melhor formulação foi escolhida pelo método de decisão por meio de utilidades. A formulação contendo 5% de serragem apresentou a maior resistência mecânica (12 MPa) contra 5 MPa em relação ao padrão e menor densidade, respectivamente. Assim, a serragem pode ser utilizada como alternativa para a produção de agregado leve, além de reduzir o impacto ambiental pelo descarte aleatório.

**Palavras-chave:** argila expandida, cerâmica, serragem.

## 1. INTRODUÇÃO

A destinação final dos resíduos é um dos grandes problemas enfrentados

pela indústria em todo o mundo. Essa questão inclui os resíduos de madeira, que é tudo o que sobra do processo industrial ou da exploração florestal [1-3]. Por exemplo, uma serraria de médio porte, projetada para produzir 2000 metros cúbicos por mês de madeira serrada, pode gerar 78 toneladas por mês de serragem [4]. Na indústria moveleira, de 40 a 60% da matéria-prima vira resíduo [5]. Os métodos de reciclagem ou descarte adotados por essas indústrias podem ter efeitos negativos sobre o meio ambiente. Um procedimento comum é a queima que polui o ar, gerando dióxido de carbono, material particulado e fuligem. Além disso, uma alta porcentagem de serragem é simplesmente despejada na natureza causando contaminação do solo e da água. Nesse sentido, o reaproveitamento da serragem é um tema de grande importância tecnológica e ambiental.

Considerando que as pequenas e médias empresas tendem a adotar soluções locais, baseadas na simplicidade e no lucro eventual, é importante desenvolver uma ampla variedade de possibilidades de reaproveitamento de resíduos. Sendo a serragem composta essencialmente por celulose e lignina, com 60% de carbono, 34% de oxigênio, 5% de hidrogênio e 1% de nitrogênio, considerou-se sua utilização em materiais de construção, para substituir parcialmente matérias-primas afim de aumentar a porosidade e/ou aumentar a capacidade de isolamento [3].

Quesada [6], Benjeddou [7] e Giuseppe [8] estudaram a incorporação da serragem na produção de tijolos de argila, observando que a resistência mecânica é preservada para amostras contendo até 10% de resíduos. Gil [9] estudou a incorporação de serragem em argamassas e concluiu que as argamassas podem incorporar até 0,5% dos resíduos sem comprometer sua resistência mecânica. Ekpunobi [10] utilizou serragem com argila para produzir filtros de água e conseguiu incorporar até 50% de serragem em uma formulação com argila e diatomita. Outra reutilização de sucesso foi alcançada por Sujoy [11], na produção de membranas de alta porosidade. Uma possibilidade de reaproveitamento é na produção de agregados leves.

Agregados leves são materiais de construção que têm uma densidade aparente menor do que os agregados de rocha usuais. A densidade aparente desses materiais oscila entre 400 e 1200 kg.m<sup>-3</sup>, preservando alta resistência mecânica à compressão por esmagamento de até 40 MPa [12-13]. Diversos

aditivos têm sido testados no processamento de agregados leves, visando a substituição parcial da argila ou a produção de porosidade durante a fase de queima das peças. Esse tipo de procedimento tem se apresentado como uma opção válida para a reciclagem de uma série de resíduos, incluindo óleo diesel e carvão mineral [14].

O trabalho mais recente que relata a utilização de serragem na produção de agregado foi Low [15]. Em seu trabalho ele incorporou serragem de 0 a 14% a uma argila, queimou de 500 a 1050 °C e determinou a resistência à compactação e densidade. No entanto, ele não se preocupou em verificar a temperatura ideal para a sinterização da argila.

O reaproveitamento da serragem no processamento de agregados leves ainda é uma área de pesquisa aberta. Diante disso, o objetivo do presente trabalho é investigar os parâmetros de produção e as propriedades finais de agregados leves produzidos com adição de serragem. Eventos térmicos e expansão durante a sinterização, perda ao fogo, plasticidade e propriedades mecânicas são investigados e comparados com as propriedades de amostras de referência (agregados comerciais e agregados produzidos com outros aditivos usuais).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material

A argila investigada nesse trabalho é proveniente de jazidas localizadas no estado de Alagoas, região nordeste do Brasil. A argila Igreja Nova (IN) é proveniente do município de Igreja Nova (AL) de Latitude: 10° 7' 13" Sul e Longitude: 36° 39' 39" Oeste. A serragem utilizada é proveniente do processo de beneficiamento de madeiras na região. Para comparar a eficiência da serragem, foi testado concomitantemente outros aditivos utilizados para aumentar a porosidade de cerâmica, como o carvão, o qual foi adquirido no mercado, e a serragem foi oriunda da madeira Timborana (*Pseudopiptadenia psilostachya*), que de acordo com madeiras Brasileiras e Exóticas [16], contém cerne e alborno, cheiro e gosto imperceptíveis, e textura média. A massa específica aparente da serragem é em torno de 0,90 g/cm<sup>3</sup> e a resistência mecânica também, assim como é resistente ao ataque de fungos e insetos. Além disso, a serragem é indicada para a fabricação de assoalhos, partes internas de móveis

e lâminas decorativas. Na cidade de Estância (SE), ela é utilizada na produção de móveis.

## **2.2 Preparação das formulações**

Uma amostra de aproximadamente 20 kg da argila foi colhida diretamente dos depósitos das jazidas para realização dos ensaios. As amostras foram homogeneizadas, secas ao ar e depois em estufa a temperaturas de  $(40 \pm 10)$  °C por 48 h. Para iniciar a caracterização tecnológica destes materiais, foi realizada sua desagregação e redução granulométrica por meio de moinho de martelo com abertura de grelha de 2 mm. Uma amostra de cerca de 1 kg foi separada de cada formulação por quarteamento e passada em peneira ABNT 200 (0,074 mm) para realização dos ensaios de caracterização: difratometria de raios X, fluorescência de raios X análise granulométrica, índice de plasticidade, análise térmica diferencial e termogravimétrica e análise dilatométrica.

Foi ainda colhida outra amostra de cerca de 2 kg e passada em peneira ABNT 60 (0,25 mm) para produção de corpos de prova. As amostras foram então umedificadas e granuladas utilizando um teor de água de 8% e passadas na peneira ABNT 16 (1,2 mm) para ajuste da granulometria. Em seguida, as formulações foram deixadas em descanso por 24 h para homogeneização da umidade. A serragem e o carvão mineral na forma de pó foram passados na peneira ABNT 60 (0,25 mm)[17].

Foram conformados corpos de prova cilíndricos com dimensões 20 x 20 mm em uma prensa manual com pressão uniaxial de compactação de 35 MPa. Os corpos de prova foram secos inicialmente ao ar livre por 24 h e depois em estufa a  $(100 \pm 5)$  °C até obter peso constante. A etapa de queima foi realizada em forno da marca JUNG modelo LF 0612 nas temperaturas de 1080, 1100 e 1120 °C em uma taxa de 20 °C/min com patamar de 20 min na maior temperatura.

## **2.3 Ensaios tecnológicos de caracterização**

### **Distribuição do tamanho de partículas**

O método do peneiramento seguido de sedimentação foi utilizado para

determinação da distribuição de tamanhos das partículas, em conformidade com a norma NBR 7181 (2016) e ASTM D422-63 [18-19].

### **Análise química**

Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10,0 g que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

### **Perda ao fogo**

Foi realizada pela diferença das massas antes e após a queima a 1000 °C em forno com patamar de 2 h.

### **Análise térmica diferencial e gravimétrica (DTA-TG)**

Os eventos térmicos apresentados pela amostra no intervalo de temperatura entre 25 e 1200 °C foram registrados em medidas simultâneas de DTA e TG. As medidas foram realizadas em um equipamento da TA Instruments, modelo SDT 2960. As amostras foram medidas em cadinho de platina, sob fluxo de ar sintético com vazão de 100 ml/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min.

### **Avaliação da plasticidade**

Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram obtidos de acordo com a norma ASTM D4318, 7180 e NBR 6459 [20-21]. O índice de plasticidade (IP) é o resultado da diferença aritmética entre os limites de liquidez e plasticidade, o qual pode ser expresso pela Equação (1), em que IP é o índice de plasticidade, LL é o limite de liquidez e LP é o limite de plasticidade. O erro experimental foi de aproximadamente  $\pm 3\%$ .

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

## Análise mineralógica

A difratometria de raios X foi utilizada para a identificação das fases cristalinas de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) e a análise foi realizada utilizando o *software* Match. Os padrões de difração foram obtidos em um equipamento Rigaku D-MAX 100 usando radiação Cu K<sub>α1</sub> ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 70° com velocidade de varredura de 1°/min. Para confirmação da fase montmorilonita, uma amostra foi saturada com etilenoglicol por 1 h afim de observar o aumento da distância interplanar e outra amostra foi calcinada a 550 °C por 2 h. Em seguida, ambas foram analisadas por DRX, no intervalo de varredura de 2 a 15° [22]. A análise foi realizada em duas partes: a fração argila (< 2  $\mu\text{m}$ ) foi separada por centrifugação, em seguida tratada com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para eliminação de matéria orgânica e com HCl para eliminação de carbonatos. Com o material restante, analisou-se os acessórios.

## Análise dilatométrica

As medidas dilatométricas foram realizadas para verificar as alterações dimensionais de expansão e retração térmica envolvidas no processo de densificação das amostras. Os corpos de prova foram preparados por compactação em um molde cilíndrico de 12 x 6 mm de dimensão. Nos ensaios, foi utilizado um dilatômetro da marca Netzsch DIL 402PC com fluxo de ar sintético e vazão de 100 ml/min, variando da temperatura ambiente até 1100 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A temperatura ideal de queima foi obtida a partir da derivada da curva dilatométrica, correspondendo à temperatura de máxima retração.

## Absorção de água e resistência mecânica à compressão

Após queima a 1100 °C, os corpos de prova foram caracterizados por meio da absorção de água (AA) com imersão em água por 24 h segundo a norma ASTM C-20 [23], cujos resultados podem ser expressos pela Equação (2), em que  $m_1$  é a massa seca e  $m_2$  a massa saturada:

$$AA = (m_2 - m_1 / m_1) \cdot 100 \quad (2)$$

Foi ainda determinada a massa específica aparente ( $Me_{a_q}$ ) dos corpos sinterizados, usando o método de Arquimedes [17].

A tensão de ruptura à compressão (TRC) após queima, foi obtida em um tensiômetro da marca Instron, modelo 3385H, com velocidade de aplicação de carga de 1mm/min, utilizando corpos de prova cilíndricos, cujos resultados podem ser expressos pela Eq. (3) em que  $P$  é a carga aplicada em  $N$ , e  $A$  é a área da seção transversal ( $mm^2$ ) adaptado da ASTM C-634 [24].

$$TRC = \frac{P}{A} \quad (3)$$

## 2.4 Preparação dos corpos de prova de concreto

No processo de mistura dos materiais, foi inicialmente colocado na betoneira as argilas e as britas, em seguida areia, metade da água e cimento. Promoveu-se a mistura por cerca de um minuto e, finalmente, o restante da água. Em função da elevada absorção de água que os agregados de argila expandida exercem, e para compensar esse efeito, foi realizado um pré-umedecimento dos agregados imergindo em água por 24 h antes de serem utilizados na concretagem. Após o amassamento, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco cone segundo a NBR MN 67 [19], em que se obteve um *slump* de cerca de 80 mm. Para cada traço foram moldados cerca de 3 corpos de prova. Após 24 h foram desmoldados e imersos em água onde permaneceram por 28 dias.

## 3. RESULTADOS

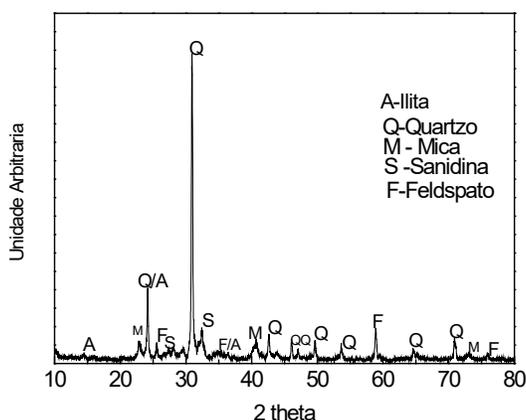
Para produção da argila expandida foi utilizada uma argila denominada IN do município de Igreja Nova, estado de Alagoas. A composição química de uma argila para produção de argila expandida deve atender à seguinte faixa: (%) de  $SiO_2$  de 50 a 65, (%) de  $Al_2O_3$  de 16 a 20, (%) de  $CaO$  de 1 a 4, (%) de  $Fe_2O_3$  de 5 a 9, (%) de  $MgO$  de 1,5 a 3,5, segundo Cabral [25]. De acordo com a Tabela 1, a argila apresenta elevado teor de álcalis ( $Na_2O+K_2O = 5,7\%$ ) os quais acima de 3% atuam como óxidos fundentes, favorecendo a redução da temperatura de queima, além de contribuir para a formação de fase líquida com consequente aumento da resistência mecânica e redução da absorção de

água do agregado [14]. Os demais óxidos, como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atendem às especificações [26].

**Tabela 1.** Análise química da argila (%)

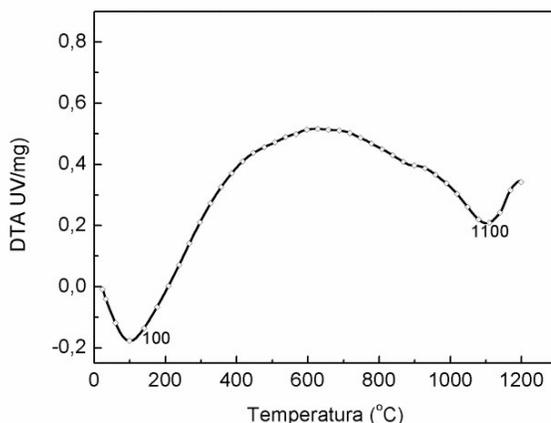
Argila	PF	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	MgO	$\text{TiO}_2$
IN	5,00	63,80	15,92	0,66	5,21	4,26	1,51	2,62	0,76

A análise de difratometria de raios X das argilas utilizadas no trabalho é apresentada na Figura 1. A argila apresenta majoritariamente os argilominerais illita (JCPDS 96900-9666) que fornece os óxidos  $\text{K}_2\text{O}$  que favorecem a sinterização durante a queima. Em menor proporção apresenta ainda o acesório muscovita (JCPDS 96101-1059), que fornece os óxidos  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , além do quartzo (JCPDS 96101-1160), que juntamente com os demais óxidos formam fase vítrea que preenchem os poros, conferindo a densificação da massa após queima [26]. Os depósitos naturais de argila contêm tipicamente esmectita, caulinita, clorita e illita, juntamente com alguns componentes não argilosos, como quartzo, feldspatos e calcita. Outras fases associadas, como a muscovita e a vermiculita, também foram identificadas. A argila demonstrou inchaço e pode ser usada para formar agregado leve. Argilas ílíticas são relatadas como sendo mais efetivas em aprisionar  $\text{CO}_2$  da decomposição de carbonatos do que argilas caulíníticas [22].



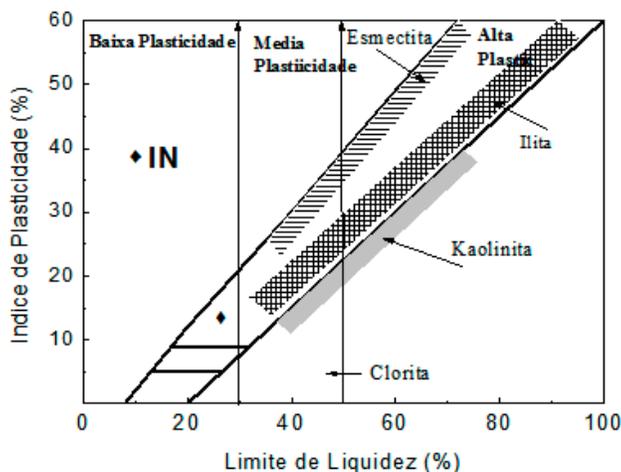
**Figura 1.** Padrão de difração de raios X da argila estudada (Fonte: Autor).

A Figura 2 apresenta a curva de DTA da argila. Foi observado um pico endotérmico a cerca de 100 °C, que segundo Celik [22] e Santos [14], é perda de água adsorvida. Pode ocorrer ainda comumente perda de hidroxilas nas argilas até 700 °C. Foi ainda observado um pico característico da nucleação da mulita a 1100 °C.



**Figura 2.** Análise Térmica Diferencial das formulações padrão (Fonte: Autor).

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de caracterização física. Os valores de IP médio foram de cerca de 10%, considerado média plasticidade por Caputo [27], mas suficiente para conformação de produtos de cerâmica. A plasticidade ótima é aquela mínima necessária para que o processo de conformação se realize, não gerando problemas posteriores como deformações, reduzindo a resistência mecânica das peças verdes ou secas [28]. O índice de plasticidade (IP) pode ser classificado como baixo quando é menor que 7%, média plasticidade cujos resultados oscilam entre 7 e 15%, e altamente plástica quando maiores que 15%. A argila IN apresenta médio índice de plasticidade devido, provavelmente, ao elevado teor de quartzo e minerais acessórios como muscovita, identificados no difratograma de raios X na Figura 1. A Figura 3 apresenta o diagrama de Holtz e Kovacs [29]. Nesse diagrama classificam-se solos argilosos a partir do seu limite de liquidez e índice de plasticidade. De acordo com o diagrama, a argila é classificada como de baixa plasticidade.



**Figura 3.** Diagrama de Holtz e Kovacs da argila investigada [29]

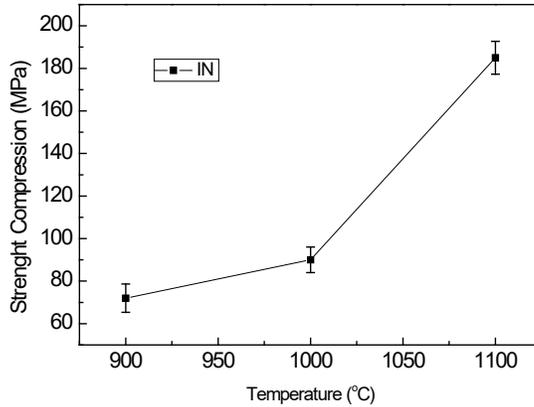
Na distribuição granulométrica das argilas, conforme discutido por Celik [22], a fração de finos menores que 2  $\mu\text{m}$  confere maior área específica, favorecendo o desenvolvimento da plasticidade, obtendo-se maior resistência mecânica dos corpos conformados a verde e, proporcionalmente, melhora a sinterização e a resistência mecânica após queima. Já o teor de matéria orgânica é considerado elevado para ciclos de queima rápido.

**Tabela 1:** Caracterização física da argila

Amostra	IP (%)	Argila	Silte	Areia	Matéria orgânica (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
		< 2 $\mu\text{m}$	2-60 $\mu\text{m}$	> 60 $\mu\text{m}$		
IN	9	39,7	39,2	21,1	1,4 $\pm$ 0,2	2,710 $\pm$ 0,003

IP: índice de plasticidade

Na Figura 4 é apresentada a resistência mecânica à compressão da argila queimada nas temperaturas de 900, 1000 e 1100  $^{\circ}\text{C}$ . Foi observado na queima a 1100  $^{\circ}\text{C}$  que a resistência da argila se aproximou da resistência obtida com britas comerciais (180 a 400 MPa) [26]. Assim, para atender ao requisito resistência, as formulações foram queimadas a 1100  $^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.** Resistência mecânica à compressão (Fonte: Autor).

Inicialmente, foram definidas formulações para produção de argila expandida, comparados com o único fornecedor de argila expandida do Brasil, denominado  $AR_{EXP}$  (padrão).

Foram produzidos corpos de prova que foram submetidos a ensaios para determinar sua resistência à compressão e sua massa específica. De acordo com a Tabela 3 foram incorporados à argila resíduos de serragem e carvão, além de óleo combustível, que após queima liberam  $CO_2$  e favorecem a expansão do agregado [2].

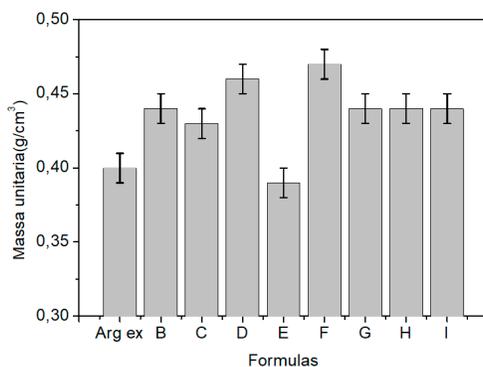
**Tabela 3.** Formulações para produção de argila expandida (%)

Matéria-prima	Padrão	B	C	D	E	F	G	H	I
Agregado leve	100	-	-	-	-	-	-	-	95
Argila	-	95	90	80	95	90	80	98	-
Carvão	-	5	10	20	-	-	-	-	-
Serragem	-	-	-	-	5	10	20	-	-
Óleo	-	-	-	-	-	-	-	2	5

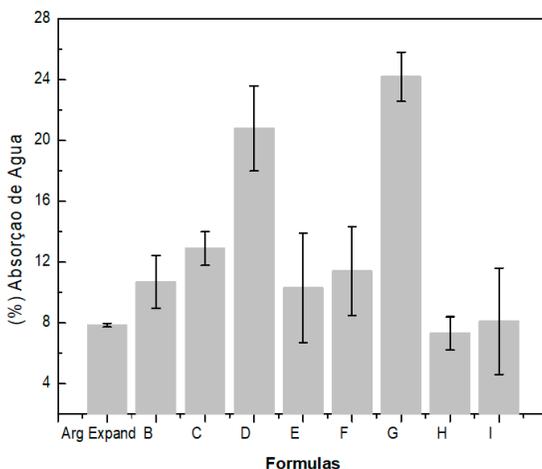
Os resultados da densidade aparente (massa unitária) estão apresentados na Figura 5 e os resultados de absorção de água (AA) e da tensão de ruptura à compressão (TRC) estão apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. A

resistência é maior do que a argila expandida do mercado em todas as formulações, com exceção da formulação I com 5% de óleo combustível.

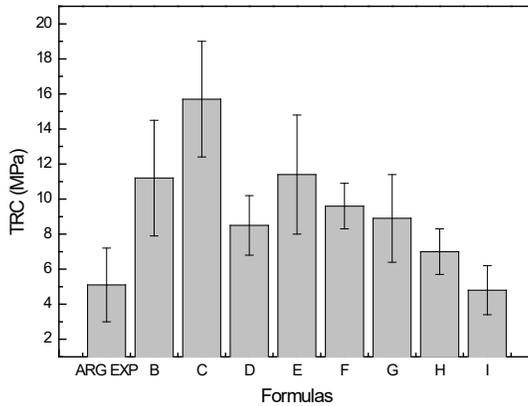
Por sua vez, à medida que se acrescentou carvão e serragem, a absorção de água aumentou, devido a perda de massa que ocorre em cerca de 400 a 500 °C, conforme estudos de Mackenzie [30]. As formulações E e F apresentaram absorção próxima ao padrão. Os resultados estão de acordo com os trabalhos de Rossignolo e Santis [31-32].



**Figura 5.** Massa unitária das formulações de argila expandida (Fonte: Autor).

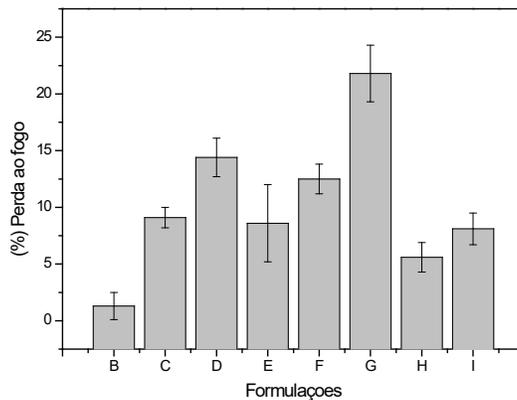


**Figura 6.** Absorção de água das formulações (Fonte: Autor).



**Figura 7.** Resistência à compressão das formulações (Fonte: Autor).

De acordo com a Figura 8, a perda ao fogo foi aumentando à medida que se acrescentou os materiais acessórios carvão, serragem e óleo. A maior perda ao fogo foi observada na formulação G, com 20% de incorporação de serragem.



**Figura 8:** Perda de massa das formulações (Fonte: Autor).

Para escolha da formulação ideal, ou seja, que apresentasse maior resistência mecânica à compressão e menor massa unitária, foi utilizada a técnica de decisão com vários objetivos, apresentada na Tabela 4. Nesse procedimento é atribuído ao item de maior de valor a unidade um, e ao de menor va-

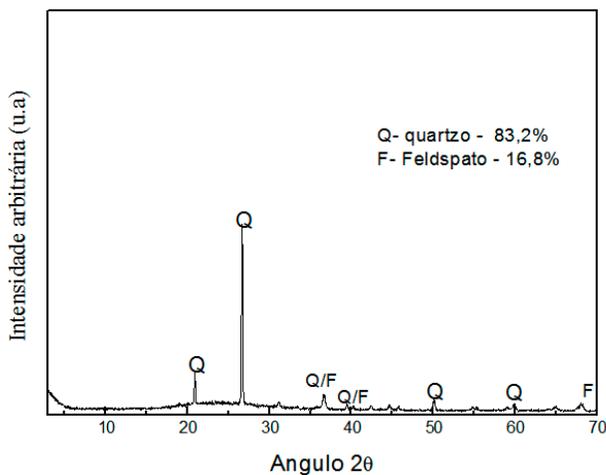
lor agregado o valor zero. Os demais são obtidos por interpolação de acordo como modelo de YU [33]. Assim, a fórmula escolhida para a produção efetiva dos agregados para produção de concreto foi a E, contendo 5% de serragem.

**Tabela 4:** Técnica da decisão com vários objetivos

Fórmulas	RC (MPa)	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Utilidade média
B	11,2 (0,59)	440 (0,375)	0,482
C	15,7 (1)	430 (0,50)	0,75
D	8,5 (0,34)	460 (0,125)	0,23
E	11,4 (0,61)	390 (1)	<b>0,805</b>
F	9,6 (0,44)	470 (0)	0,220
G	8,9 (0,38)	450 (0,25)	0,315
H	7,0 (0,20)	440 (0,375)	0,287
I	4,8 (0)	440 (0,375)	0,185

RC: resistência à compressão

Após queima, foi realizado o ensaio de difratometria de raios X da argila expandida da formulação E, conforme apresentado na Figura 9. Foram identificadas as fases de quartzo e várias fases que provavelmente remetem ao feldspato.



**Figura 9.** Padrão de difratometria de raios X da argila expandida queimada (Fonte: Autor).

A Figura 10 mostra o agregado leve produzido no estudo.



**Figura 10.** Foto do agregado leve produzido (Fonte: Autor).

## 4. CONCLUSÕES

A argila utilizada na fabricação do agregado leve apresentou excelentes resultados de plasticidade, ideal para conformação cerâmica e ótima resistência mecânica após queima. O pó de serragem é um resíduo que normalmente é reaproveitado em indústrias como combustível, mas poderia ter uma aplicação mais nobre. Para atender a nossa meta inicial de elevada resistência mecânica e baixa densidade aparente do agregado, a porcentagem de pó de serragem em cerca de 5% foi suficiente.

Foram produzidas duas dimensões de argila expandida que não foram suficientes para se obter um arranjo granulométrico satisfatório, visto que a resistência obtida pela argila expandida é maior do que da argila expandida do mercado.

Outros trabalhos devem ser direcionados para disseminação da argila expandida, visto que otimizando um processo industrial é possível produzir esse agregado com argilas regionais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, ao programa PIBIC do Instituto Federal de Sergipe – IFS e ao NUPEG – Departamento de Física da UFS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FONTES, P. J. P., 1994. Auto-Suficiência Energética em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos [dissertação] Curitiba: Universidade Federal do Paraná (in Portuguese).
- [2] CERQUEIRA, A., PEDRO HENRIQUE, A. et al., 2012. Analysis of sawmill wood waste generated by mills in Eunápolis, State of Bahia, Brazil, *Floresta Ambiental*, vol. 19, n. 4 pp. 506-510. <http://dx.doi.org/10.4322/foram.2012.051>.
- [3] CHEMANI, B., CHEMANI, H., et al. Effect of adding sawdust on mechanical-physical properties of ceramic bricks to obtain lightweight building material, *Int. J. Mech. Mecatr. Eng.* 6, 2521-2525. 2012.
- [4] DANTAS, F., *Jornal da Unicamp*, Edição 75, 2004. Disponível em: [https://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/dezembro2004/ju275pag8a.html](https://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/dezembro2004/ju275pag8a.html).
- [5] CÂNDIDA, P. S., RENATO, S. V., IOLANDA, C. S. et al., 2017. Quantificação de Resíduos Produzidos nas Indústrias Madeireiras de Gurupi, TO, *Floresta e Ambiente*; 24: e00065, <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.065613>.
- [6] QUESADA, D. ELICHE, F. A. et al. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing, *Construction and Building Materials* 34, 275-284, 2012.
- [7] BENJEDDOU, O., ALYOUSEF, R., et al., 2018. MATEC Web of Conferences 149, 01040. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901040>.
- [8] GIUSEPPE, C., ITZIAR A., CARMEN C., ANNA A., 2020. Sawdust recycling in the production of lightweight bricks: How the amount of additive and the firing temperature influence the physical properties of the bricks, *Construction Building*, 235, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117436>.
- [9] GIL, H., ORTEGA, A., PÉREZ, J., 2017. Mechanical behavior of mortar reinforced with sawdust waste, *Procedia Engineering*, 200, 325-332. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.046>.
- [10] EKPUNOBI, U. E., AGBO, S. U., AJIWE, V. I. E., 2019. Evaluation of the mixtures of clay, diatomite, and sawdust for production of ceramic pot filters for water treatment interventions using locally sourced materials, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7, 102791.
- [11] SUJOY, B., CHANDAN, D., 2015. Sawdust: From wood waste to pore-former in the fabrication of ceramic membrane, *Ceramics International*, 41, 4070-4079. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.101>.
- [12] AYATI, B., FERRÁNDIZ, V-MAS, NEWPORT, D., C. CHEESEMAN. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate, *Construction and Building Materials* 162 (2018) 124–131.
- [13] MAELSON, M. S., MARCOS, A. S., ANJOSA, M. V. et al., 2020. Developing and classifying lightweight aggregates from sewage sludge and rice husk ash, *Case Studies in Construction Materials*, v.12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00340>.

- [14] SANTOS, P. S., 1989. *Ciência e Tecnologia de Argilas*. Blucher, São Paulo.
- [15] LOW, N. M. P., Development of Lightweight Insulating clay products from the clay-sandst-glass system. *Ceramics International*, 10(2), 1984
- [16] SANTIS, B. C., ROSSIGNOLO, O. J. A., 2015. Influence of calcined clay lightweight aggregates on the mechanical properties of structural concretes, *Revista Matéria*, v. 20, n. 2, 399-406. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0249>.
- [17] AMOROS, J. L., Sanches, G., Javier, M. M., Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas”, ITC Instituto de Tecnología Cerámica. 1998.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, In: ASTM D422-63-1998, US. 1998
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. Determinação do índice de granulometria, In: NBR 7181-2016.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. Determinação do limite de plasticidade de solos, Rio de Janeiro, In: NBR 6459-2016.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010. Standard test method for Liquid Limit, Plastic limit, and plasticity index of soils, In: ASTM D4318, US.
- [22] CELIK, H., 2010. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry, *Appl. Clay Sci.*, 50, 245-254. doi:10.1016/j.clay.2010.08.005.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2005. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water, In: ASTM C-20-2005, US.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013. Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials, In: ASTM C-634-2013, US.
- [25] CABRAL, E. M., SÁ, R. J., VIEIRA, R. K., VASCONCELOS, R. P., 2008. Use of ceramic bodies in the production of synthetic aggregate calcined clay for use in concrete”, *Cerâmica* 54, 404-410. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000400004>.
- [26] BENNOUR, A., MAHMOUDI, S., SRASRA, E. et al., 2015. Composition, firing behavior and ceramic properties of the Sejnène Clays (Northwest Tunisia), *Applied Clay Science*, 115, 30-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.025>
- [27] CAPUTO, H. *Mecânica dos Solos*, Editora Blucher, v.1 e 2, 2011.
- [28] MAESTRELLI, S. C., ROVERI, C. D., NUNES A. et al., 2013. Estudo da caracterização de argilas não plásticas da região de poços de caldas, *Cerâmica*, v. 59, n. 350, abril/junho.
- [29] HOLTZ, R. D., KOVACS, W. D., 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall, USA.
- [30] MACKENZIE, C. R., 1959. *The differential thermal investigation of clays*, Ed Cambridge, London.
- [31] ROSSIGNOLO, J. A., *Concreto Leve Estrutural*, 2011. 1ª Edição, Ed. Pini, São Paulo.

[32] SANTIS, B. C., ROSSIGNOLO, J. A., MORELLI, M. R., 2016. Cerâmica leve de argila calcinada fabricada com serragem para madeira e silicato de sódio. *Esteira. Res.* vol.19, n.6, pp.1437-1442. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0249>.

[33] YU, S. O. A., *Tomada de Decisão nas Organizações: Uma Visão Multidisciplinar*. São Paulo (2016).

# DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE REBOCO COM A INCORPORAÇÃO DE TALCO

*Johanata de Jesus Prudêncio  
Herbet Alves de Oliveira*

## RESUMO

O talco é um silicato de magnésio hidratado ( $4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) de baixa plasticidade de cores que variam do branco ao rosa, de aspecto sedoso, utilizado em diversas aplicações industriais, como na fabricação de refratários, como carga na produção de plásticos, na produção de tintas em cerâmicas de porcelana, entre outros. Portanto, o talco é material nobre que apresenta inúmeras propriedades tecnológicas, como elevada resistência ao choque térmico, baixa expansibilidade e elevada superfície específica. Nesse trabalho a proposta é avaliar o uso do talco na produção de argamassa de reboco. O talco foi submetido aos ensaios de caracterização: análise granulométrica, massa específica real e aparente. A partir de um traço de 1:6:2 (cimento: areia: cal) de uso comercial para reboco, o mesmo foi utilizado para substituir a areia de 20 a 80%. Os resultados apresentados mostram que o talco melhorou as propriedades tecnológicas, como resistência mecânica à compressão e absorção de água. Adicionalmente, as argamassas foram aplicadas na parede para avaliar o desempenho, e foi observado que as mesmas apresentaram bom acabamento, além de boa trabalhabilidade. Portanto, o talco pode ser utilizado na produção de argamassa com o fim de reduzir acabamentos adicionais para realizar pintura, o que pode favorecer a redução do custo final da parede.

**Palavras-chave:** argamassa, talco, acabamento.

## 1. INTRODUÇÃO

O talco é uma matéria-prima mineral rica em MgO e por esse motivo tem ampla aplicação industrial, como na indústria de cosméticos, refratários para proteção de estrutura de fornos, como carga na fabricação de plásticos de modo geral, e ainda na indústria cerâmica na produção de esmaltes, porcelanas e isoladores elétricos etc [1]. As principais ocorrências de talco no Brasil

encontram-se nos estados do Paraná, São Paulo e em Brumado, no estado da Bahia, que fornecem material de boa qualidade industrial, mesmo do tipo cosmético, o que mais agrega valor [2]. Por se tratar de uma matéria-prima de elevado valor agregado, não tem muito sentido testá-la em argamassas. No entanto, em função das suas propriedades, entre elas finura e boa trabalhabilidade e aspecto sedoso, foi proposto utilizar na fabricação de argamassas com o intuito de reduzir etapas de acabamento após aplicação como massa corrida para corrigir imperfeições.

As argamassas são utilizadas em muitas etapas ao longo da obra, entre elas assentamento de tijolos, e para revestimento de parede ou reboco [3]. As argamassas são obtidas por meio da mistura do cimento, areia, cal ou aditivo e água. Porém, para cada aplicação existe uma proporção certa destes ingredientes. Assim como no concreto, as proporções dos ingredientes das argamassas também são representadas por traços. Para cada aplicação existe um traço certo, pois a variação da quantidade de cimento, areia e água criam produtos com resistências e propriedades diferentes. Entre as propriedades desejadas de uma argamassa estão a baixa porosidade, alta resistência, baixa retração e estética.

Não se tem relatos na literatura da utilização de talco em argamassa de reboco. Em função das propriedades inerentes a essa matéria-prima, acredita-se que o mesmo pode melhorar a permeabilidade, reduzir as patologias e, acima de tudo, melhorar o acabamento, o que favorece a eliminar etapas posteriores como amassamento para regularizar imperfeições.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Matérias-primas**

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo Portland CP II F-32 RS. A cal foi adquirida no mercado na forma de pó da marca Trevo e foi passado na peneira abertura ABNT 100 (0,149 mm). A areia foi adquirida em jazidas da cidade de Estância (SE) a qual foi seco em estufa a  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  e passado na peneira ABNT 16 (1,2 mm). O talco foi adquirido no mercado e passado na peneira ABNT 100 (0,149 mm). As matérias-primas foram caracterizadas

pelos seguintes ensaios:

Distribuição do tamanho de partículas: foi utilizado o método de peneiramento seguido de sedimentação de acordo com NBR 7181[4].

Massa específica real: a massa específica representativa da densidade real de todas as matérias-primas, foram determinadas utilizando picnômetro de hélio, modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics.

Finura: a finura do cimento, resíduo e caulim foram determinados através de peneiramento manual, conforme a NBR 16605 [5].

Índice de plasticidade (IP): os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram determinados de acordo com a NBR 7180:84 [6] e NBR 6459:16 [7] e ASTM D 4318 [8]. O índice de plasticidade (IP) é o resultado da diferença aritmética entre os limites de liquidez e plasticidade.

## 2.2 Preparação dos corpos de prova e ensaios tecnológicos das matérias primas:

As matérias-primas, juntamente com a água, foram pesadas em balança de marca Marte com resolução de 0,01 g, misturadas em argamassadeira. Inicialmente, o teor de água foi determinado para a obtenção do índice de consistência padrão prescrito na NBR 13276 (ABNT, 2005) [9], chegando-se a uma consistência no intervalo de  $(210 \pm 5)$  mm. Foram produzidos 6 corpos de prova de cada formulação em formas cilíndricas de 5 x 10 cm de altura, e prismáticas de 5 x 20 cm. Para conversão dos traços se utilizou a expressão Eq. 1, em que:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x} \quad (1)$$

Sendo:  $\gamma_c$ ,  $\gamma_a$  e  $\gamma_b$ , e são as massas específicas do cimento, da areia e da brita, e 1:a:b:x o traço do concreto expresso em massa, e  $C$  é o consumo de cimento por metro cúbico de concreto ( $1000 \text{ dm}^3$ ).

Os corpos de prova após desmoldados foram deixados imersos em água por 28 dias. Na Tabela 1 são apresentadas as formulações propostas de reboco de parede externo e o talco foi utilizado para substituir a cal e a areia.

**Tabela 1:** Formulações propostas em (kg)

Matérias-primas	Padrão	A	B	C
Cimento	1	1	1	1
Areia	6	6	4	4
Cal	2	-	2	-
Talco	-	2	2	4
a/c	1,1	1,1	1,2	1,2

## 2.3 Ensaio no estado fresco da argamassa

Consistência: para realização deste ensaio foi utilizada a NBR 13276 [9]. O princípio do ensaio consiste em medir o espalhamento da argamassa após ser submetida a 30 golpes na mesa de consistência.

## 2.4 Ensaio com os corpos de prova no estado curado

Absorção de água: para realização deste ensaio, seguiu-se o método de ensaio descrito na NBR 15259 [10], representado na Eq. 2. Em que  $m_2$  é o peso da amostra saturada e  $m_1$  é o peso da amostra seca.

$$AA = (m_2 - m_1 / m_1) \cdot 100 \quad (2)$$

Resistência mecânica à compressão: a resistência à compressão foi determinada na idade de 28 dias, conforme procedimento descrito na NBR 13279 [11] em uma prensa Contenco, modelo Pavitest HD-200T.

Densidade aparente no estado endurecido: o ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias, em conformidade com a NBR 13280 [12] e está representado na Eq 2. Sendo que  $m_2$  é o peso da amostra saturada e  $m_1$  é o peso da amostra seca e  $m_3$  o peso da massa imersa:

$$DA = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \quad (3)$$

## 3. RESULTADOS

Na Tabela 2 são apresentados os ensaios de caracterização das matérias-

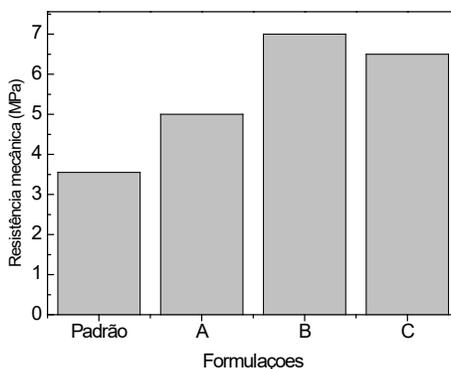
-primas. O talco, que é o material a ser testado, apresentou massa específica similar ao cimento, bem como finura.

**Tabela 2.** Ensaio tecnológicos das matérias-primas

Materialis	Mea g/cm <sup>3</sup>	MER g/cm <sup>3</sup>	Finura (%)	IP (%)	COR
Cimento	1,19	3,26	1,08	-	Cinza
Areia	0,94	2,72	-	-	Amarela
Cal	1,65	2,60	1,09	NP	Branco
Talco	1,16	2,74	1,32	NP	Branco

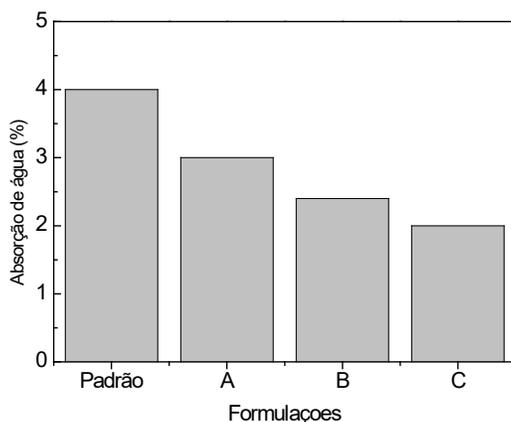
Mea: massa específica aparente; MER: massa específica real; NP: não-plástico

A consistência não apresentou variações significativas e oscilou de  $(210 \pm 10)$  cm. Na Figura 2 são apresentados os resultados de resistência mecânica das formulações. Foi observado que à medida que o talco substitui a cal e também a areia, houve aumento da resistência mecânica, provavelmente, devido ao talco ser mais fino, o que favoreceu o empacotamento, similar a outros trabalhos [13]. Partículas mais finas inertes agem como pontos de nucleação, provocando a precipitação de produtos hidratados, ativando a hidratação do cimento. Este maior empacotamento das partículas permite que a mistura se torne mais homogênea e compacta, fornecendo maior resistência e massa específica [14-15].

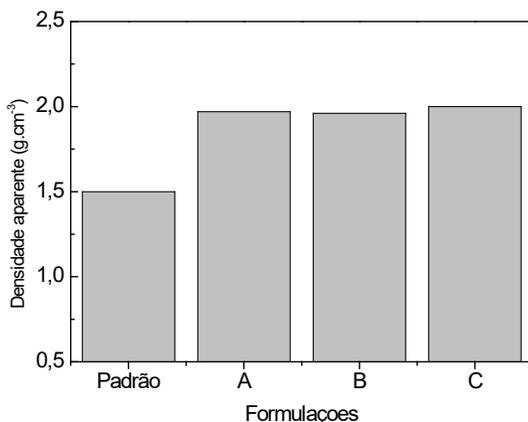


**Figura 2.** Resistência mecânica à compressão (Fonte: Autor).

Na Figura 3 é apresentada a absorção de água das formulações e na Figura 4 a densidade aparente. Proporcionalmente ao acréscimo da resistência mecânica, a absorção sofreu redução com a substituição da cal e areia pelo talco, bem como houve acréscimo da densidade. Os resultados indicam que o talco por ser mais fino, favoreceu o empacotamento reduzindo os espaços vazios e melhorando as propriedades tecnológicas.



**Figura 3.** Absorção de água das formulações (Fonte: Autor).



**Figura 4.** Densidade aparente das formulações (Fonte: Autor).

## 4. CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa foi mostrar a viabilidade da substituição parcial da cal e areia de uma formulação de reboco pelo talco e avaliar as propriedades tecnológicas para possível utilização.

Quanto as propriedades das argamassas no estado fresco, foi observado que a incorporação do talco na mistura, quando da produção das argamassas, não alterou de forma significativa a consistência das argamassas.

Quanto às propriedades das argamassas no estado endurecido, se observou que as argamassas produzidas com talco apresentaram bom desempenho nas propriedades de resistência à compressão, redução da absorção de água e acréscimo da densidade em todas as substituições. Por sua vez, ao aplicar na parede dificultou a trabalhabilidade, porém, a superfície apresentou-se melhor acabada. Dessa maneira, o talco se mostrou capaz de ser utilizado em argamassa, desde que não se utilize outros procedimentos para acabamento.

## REFERÊNCIAS

- [1] DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro, 2011.
- [2] PONTES, I. F., ALMEIDA, S. L. M. Talco in: Luz A. B. & Lins F. A. F. Rochas & Minerais Industriais. Usos e Especificações. CETEM-MCT-Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2ª ed, 793-815, 2008.
- [3] MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte et al. Utilização do resíduo de mármore na produção de argamassa. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 5, p. 44238-44247, 2021.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7181, Determinação do índice de granulometria (2016).
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica Rio de Janeiro, 2017.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7180, Determinação do limite de liquidez de solos, Rio de Janeiro (1984).
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6459, Determinação do limite de plasticidade de solos, Rio de Janeiro (2016).
- [8] ASTM D 4318-10e1, 2014. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13276 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.

- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR15259 de 09/2005 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13280, Determinação da densidade no estado endurecido (ABNT, 2005).
- [13] PIMENTEL, L. L., JUNIOR, P. L. Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas. Revista Matéria, 23, (1), 2018.
- [14] BENACHOUR, Y., DAVY, Y., SKOZZYLAS, C. A., et al. Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. Cement and Concrete Research, 38, 727–736, 2008.
- [15] SILVA, N., N. G. BUEST, V. C. CAMPITELI, *Argamassa com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas*. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Florianópolis, 2005.

# ESTUDO PARA REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO EM BLOCOS DE CONCRETO

*Karoline Vieira Santos,  
Leonardo Santos Caldas,  
Rhayra Guadalupe,  
Herbet Alves de Oliveira*

## RESUMO

Resíduos de corte de granito estão presentes em todas as marmorarias do Brasil, decorrentes do processo de beneficiamento de rochas de mármore e granito. Na maioria delas, esse resíduo é descartado em aterros provocando grande impacto ambiental. Na região de Estância, região sul de Sergipe, existem várias fábricas que produzem blocos de concreto que demandam areia, cimento para a produção, e que poderia aproveitar esse tipo de resíduo. Nesse trabalho foram elaboradas formulações em que se incorporou o resíduo em substituição ao cimento. Os blocos foram produzidos em forma manual e após cura de 28 dias foram submetidos aos ensaios tecnológicos de resistência mecânica à compressão, absorção de água e massa específica aparente. Os resultados obtidos mostram que o resíduo pode ser uma fonte de matéria-prima, além de reduzir o custo de processo e evitar o descarte do resíduo no meio ambiente.

**Palavras-chave:** resíduo, bloco de concreto, granito

## 1. INTRODUÇÃO

Os blocos de concreto estrutural são tijolos que têm boa aceitação na construção civil devido à uniformidade das dimensões, bem como a elevada resistência mecânica. No entanto, para comunidades carentes o custo desses é elevado, sendo necessário optar pelos tijolos de vedação. Na região de Estância (SE) existem diversas fábricas de blocos de concreto para atender a comunidade local.

É de conhecimento comum, que a construção civil é uma das atividades empresariais mais consumidoras de recursos naturais, conseqüentemente gera toneladas de lixo por dia atingindo gradativamente o reino animal, e poluindo

a atmosfera com liberações de gases como o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) [1].

Dentre os recursos mais explorados para construção civil destaca-se a areia, rochas e árvores. Vale ressaltar que somente na fabricação de concreto e argamassa, são consumidos aproximadamente 220 milhões de toneladas de recursos naturais por ano [2]. O resíduo de rocha de granito pode ser uma opção para reaproveitamento. Segundo Mello [3], na antiguidade as rochas ornamentais eram usadas na construção civil como elementos de vedação. Com o avanço da tecnologia, essas rochas são usadas apenas em elementos de cores e decorações. O beneficiamento do granito compreende três etapas: a primeira delas é responsável pela extração dos blocos a céu aberto nas grandes jazidas, iniciando-se pela escolha desta, na segunda se processa então o desdobramento dos blocos ou o também chamado beneficiamento primário. Nas serrarias ocorre a transformação dos blocos em chapas. Finalmente a próxima etapa é a transformação das placas em produto final através do uso de equipamentos chamados politrizes. A quantidade de resíduo gerado por cada processo depende da facilidade de corte de cada material. O mármore, por exemplo, possui maior facilidade de corte do que a dos granitos, ou seja, permite ser desgastado com maior eficiência, gerando uma quantidade de resíduo bem menor [4].

Os resíduos sólidos são um dos principais problemas da humanidade, principalmente pelo aumento na quantidade produzida e pela falta de alternativas para armazenamento e, conseqüentemente, possibilidade de contaminação. O armazenamento e o despejo em lugares inadequados de uma variedade de compostos gerados durante a fabricação de novos produtos, estão causando danos ambientais consideráveis [5-6].

No Brasil existem mais de 12000 indústrias no setor de rochas ornamentais. Em especial, em Sergipe existem mais de 20 unidades fabris de processamento de rochas cujos resíduos gerados são descartados em aterros de forma aleatória [7]. Uma das alternativas sustentáveis para o uso da lama de granito, juntamente com o cimento, está na preparação de blocos de concreto.

As preocupações ambientais relacionadas ao descarte de vários resíduos aumentaram para um nível preocupante em todo mundo. Diferentes tipos de resíduos são gerados pelas indústrias a cada ano e, conseqüentemente, a demanda por um desenvolvimento mais sustentável aumentou ainda mais a

importância da construção verde. Nos últimos anos, foram feitos extensos esforços de estudo para reciclar resíduos para possível uso na produção de produtos de concreto.

Os blocos podem ser produzidos manualmente por meio de formas ou podem ser produzidas em fábricas usando o método de prensagem a seco, em que os materiais constituintes são moldados sob cargas compactadas por meio da vibração [8]. Nos Estados Unidos, cerca de 23 a 30 milhões de peças de blocos de concreto são produzidos anualmente [9]. Aproximadamente 275 milhões de toneladas de agregado são extraídos anualmente no Reino Unido e estima-se um aumento de 1% a cada ano. Preocupações com os danos ao meio ambiente, destruição do equilíbrio ecológico e emissão de gases de efeito estufa tornaram-se cada vez mais graves [10] .

No processamento de mármore, como corte e polimento, uma quantidade considerável (20 a 25% do conteúdo total de pedras), são resíduos [11]. O Brasil está entre as seis maiores potências responsáveis pela produção mundial de rochas ornamentais, sendo o maior produtor e exportador nacional o estado brasileiro do Espírito Santo, onde podemos encontrar com maior facilidade e abundância a rocha geradora do granito.

Dependendo do tipo de rocha e do tipo de processo de corte e beneficiamento, resíduos com distintas características químicas podem ser gerados, provocando grandes estragos ao meio ambiente. Conhecidos em grande parte como lama abrasiva, esses insumos são depositados inadequadamente em aterros, margens de rodovias e rios, prejudicando a fauna e flora brasileira.

Diante dessa realidade cada vez mais presente, a sociedade vem buscando e se dedicando a achar soluções viáveis para o reaproveitamento desses resíduos, com o intuito de melhorar a elaboração de materiais sustentáveis, visando reduzir os danos causados por esses insumos [12]. Contudo, destaca-se o resíduo de granito, conhecido como lama, que é uma massa mineral composta, basicamente, por água, gralha, cal e rocha moída. Uma vez seca a lama granítica forma um pó de granulometria extremamente fina, não biodegradável, não tóxico e inerte. Estudos têm sido realizados, como de *Bachete* [13] em blocos de concreto, mas não testou as propriedades tecnológicas. O resíduo tem sido testado em matrizes cimentícias à base de cimento e areia, como Oliveira [14] que incorporou de 5 a 20% substituindo o cimento e ve-

rificou que a resistência diminuiu de forma exponencial. Feitosa [15] obteve bons resultados em blocos de concreto quando substituiu a areia pelo resíduo de granito.

Na produção de blocos de concreto parecem ser a opção mais popular para a incorporação de resíduos reciclados devido aos requisitos de qualidade mais baixos dos materiais. Em revisão bibliográfica realizada por Meng [16], ele relacionou as principais pesquisas realizadas com reaproveitamento de resíduo em blocos de concreto. Foi constatado que diversos tipos de resíduos têm sido pesquisados em todo o mundo, desde borracha de pneu, plásticos diversos, como até o resíduo do pó de granito. O resíduo apesar de mais fino, melhorou o empacotamento e aumentou a resistência mecânica. Gencel et al. [17] e Uygunoğlu et al. [18] revelaram que o uso de resíduos de mármore como um substituto do agregado fino (menos de 4 mm) favorece a queda na resistência à compressão de blocos de concreto.

Diante desses aspectos e da necessidade de meios alternativos para evitar a degradação do meio ambiente, o pó de granito pode ser reutilizado como insumo na construção civil, incorporado na composição de blocos de concreto, minimizando o descarte inadequado desse material, e visando à diminuição da emissão de poluentes. Adicionalmente, o reaproveitamento favorece a melhoria nas condições de saúde, segurança e moradia da população.

Os blocos são uma necessidade da comunidade que deseja construir casas de modo geral. Utilizando um equipamento manual de conformação, nesse projeto pretende-se produzir um tijolo resistente, durável e que possa ser produzido pela comunidade de modo geral, reaproveitando resíduos disponíveis na região [19-20].

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Preparação das matérias-primas**

O cimento utilizado na pesquisa foi o Portland CP II F-32 RS. O resíduo de granito foi coletado em uma fábrica de granito na cidade de Estância (SE), Brasil. O resíduo apresentava uma concentração de cerca de 30% de água para em seguida ser seco no secador a  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  e passado pela peneira

(0,42 mm). A areia utilizada foi uma areia grossa, de uma jazida da região de Estância (SE), a qual após secagem em estufa foi passada na peneira (4,00 mm) com o fim de retirar pedras.

## **2.2 Caracterização das matérias-primas**

Distribuição do tamanho de partículas: o método do peneiramento para areias foi utilizado para determinação da distribuição dos tamanhos das partículas, em conformidade com a norma NBR NM 248/200 [24].

O ensaio da determinação do módulo de finura do cimento é prescrito pela NBR 11579 [25]. Por sua vez, o resíduo foi realizado pela técnica de difração a laser no equipamento Mastersizer 2000 da Malvern.

Massa unitária: determinada pela norma NBR NM 45 [26].

Massa específica do agregado miúdo e do resíduo: de acordo com a norma NBR 9776 [27].

Massa específica real: da areia e do resíduo foram realizados de acordo com a norma DNER 093/94 [28], vide Figura 1. Por sua vez, a massa específica real do cimento foi determinada usando um picnômetro de hélio da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340.

Análise química por FRX: os percentuais dos óxidos constituintes das amostras de cimento, do resíduo e da areia foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X.

Caracterização mineralógica: a difração de raios X é uma técnica que permite determinar a estrutura cristalina do material, além de quantificar as fases cristalinas presentes, a perfeição e a orientação dos cristais que compõem o material. Esta técnica consiste na detecção de um feixe de raios X difratado após incidir sobre o material [21].



**Figura 1.** Determinação da massa específica real da areia (Fonte: dados da pesquisa).

### 2.3. Conformação dos corpos de prova

As matérias-primas, juntamente com a água, foram pesadas em balança da marca Marte com capacidade de 30 kg e resolução de 0,1 g. Em seguida, foram misturadas manualmente em bandeja plástica, e vertidos em fôrmas cilíndricas de 20 x 40 cm (Figura 2). Foram conformados cerca de quatro blocos de cada formulação para ensaios e após desmoldados, foram deixados protegidos do Sol e ar por 28 dias.



**Figura 2.** Fôrma para confecção dos blocos de concreto (Fonte: dados da pesquisa).

No Quadro 1 são apresentadas as formulações propostas com cimento e areia 1:X para produção de blocos de concreto. Os traços são usualmente indicados na literatura [15]. As massas indicadas correspondem a massa necessária para a confecção de pelo menos um bloco. A água foi calculada considerando a massa total. Foram utilizados traços tradicionais utilizados pelos fabricantes da região de Estância, mas deseja-se encontrar o traço que proporciona maior resistência para que os resíduos pudessem ser utilizados.

**Quadro 1:** Formulações de bloco de concreto

Traço	Traço em volume			Massa total seca		
	Cimento	Areia	Água (%)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (ml)
1:3	1	3	9	2,00	6,00	720
1:4	1	4	9	1,60	6,40	720
1:5	1	5	9	1,33	6,72	720

Fonte: dados da pesquisa.

## 2.4 Ensaio de caracterização dos tijolos após cura

Tensão de ruptura à compressão (TRC): após cura foi determinada a resistência à compressão em um tensiômetro da marca EMIC com capacidade de 100 ton, com velocidade de aplicação de carga de 50 N/min, seguindo a norma NBR 12118 [29], cujos resultados podem ser expressos pela Eq. 1, em que P é a carga aplicada em (N) e A é a área correspondente do bloco (mm<sup>2</sup>).

$$TRC = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Absorção de água (AA) e massa específica aparente (Mea): foram determinados por meio de ensaios adaptados da norma ASTM C-20 [30], com imersão em água por 24 h e pesagem seguindo o método hidrostático. Os resultados são expressos percentualmente pela Eq. 2, em que m<sub>1</sub> é a massa seca, e m<sub>2</sub> a massa saturada. A massa específica foi determinada pela Eq. 3, em que a massa m<sub>3</sub> é imersa.

$$AA = (m_2 - m_1 / m_1) \cdot 100 \quad (2)$$

$$Mea = (m_1 / m_2 - m_3) \cdot 100 \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 é apresentada a caracterização das matérias-primas. De acordo com a densidade aparente, o resíduo de granito apresenta-se mais fino do que o cimento e areia e, portanto, deve ser mais reativo em relação a areia. Por outro lado, por ser mais leve e fino, dificulta a compactação.

**Tabela 1.** Caracterização das matérias-primas

Matérias-primas	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )	Finura (%)	MF
Cimento	1,19 ± 0,1	3,268 ± 0,001	0,96	-
RG	1,07 ± 0,2	2,550 ± 0,002	0,80	-
Areia	1,52 ± 0,1	2,620 ± 0,001	-	2,54

MF: módulo de finura; RG: resíduo de granito.

Fonte: dados da pesquisa

Na Tabela 2 é apresentada a análise química das matérias-primas. O cimento e a areia são similares as matérias-primas comerciais. O resíduo está de acordo com outros trabalhos [14 e 16], sendo um silicato com a presença de carbonatos e albitas.

**Tabela 2.** Análise química das matérias-primas

Matéria-prima	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	PF
Cimento	8,60	-	81,20	5,30	1,42	-	0,36	3,9
Areia	85,00	3,72	1,02	3,02	0,50	-	5,32	1,0
Resíduo	48,67	2,86	19,67	14,05	10,90	0,25	2,49	5,0

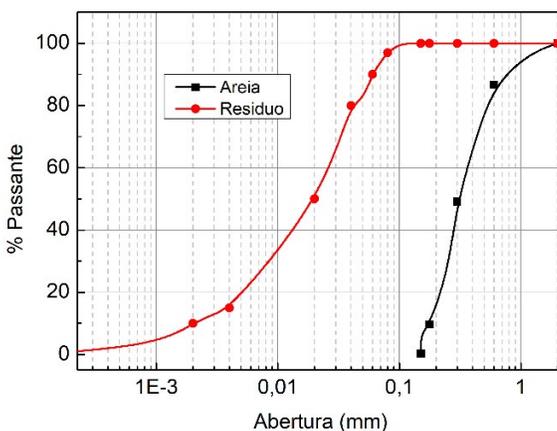
Fonte: Nascimento [31]

Na Figura 3 é apresentada a curva granulométrica do resíduo de granito e da areia. Foi determinado o coeficiente de uniformidade (Cu) por meio da Eq. 4 , em que D<sub>60</sub> é a abertura na qual passa 60% das partículas e D<sub>10</sub>, é a abertura por onde passa 10% das partículas [32].

$$Cu = D_{60} / D_{10} \quad (4)$$

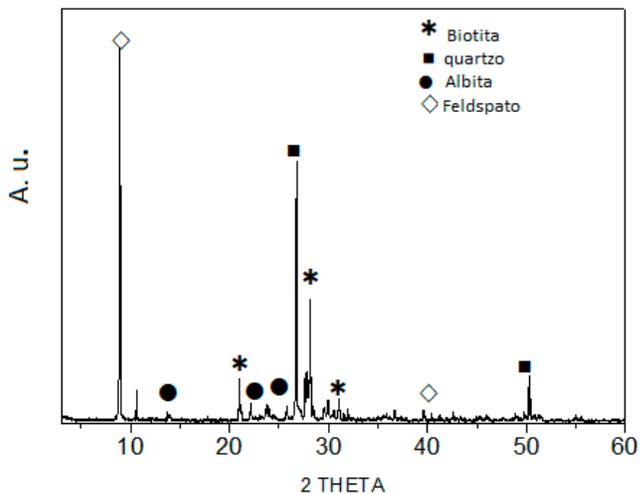
Com relação ao coeficiente de uniformidade  $C_u$  (1,9) é classificado como muito uniforme, ou seja, apresenta grande quantidade de partículas em uma faixa estreita de dimensões [32]. As matérias-primas foram também classificadas segundo o coeficiente de concavidade ( $C_c$ ) por meio da Eq. 5, em que  $D_{30}$  corresponde a abertura em que passa 30% das partículas. A areia apresentou  $C_c$  (1,20) e o resíduo apresentou  $C_c$  (1,3), classificados como bem graduados.

$$C_c = D_{30}^2 / D_{60} \cdot D_{10} \quad (5)$$



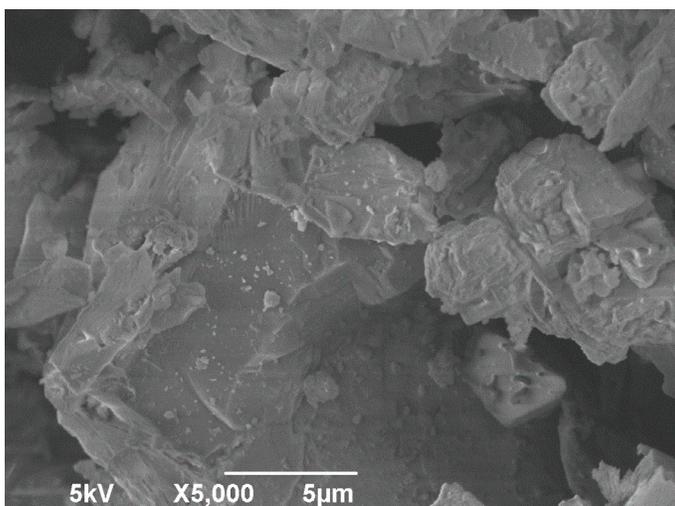
**Figura 3.** Curva granulométrica da areia (Fonte: dados da pesquisa).

Na Figura 4 é apresentada a difratometria de raios X do resíduo estudado. O mesmo é rico em feldspato, quartzo e biotita, típicos de granito [14].



**Figura 4.** Padrão de difratometria de raios X do resíduo de granito (Fonte: Autor).

Na Figura 5 é apresentada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) do resíduo. O mesmo apresenta placas de feldspato e biotita.



**Figura 5.** Microscopia eletrônica de varredura do resíduo com aumento de 5000 x (Fonte: Autor).

No Quadro 2 são apresentados os dados da NBR 6136 [33] em que se estabelece os parâmetros das propriedades físicas ideais para um bloco produzido de concreto.

Os blocos de concreto da classe A possuem função estrutural e são indicados para alvenarias acima ou abaixo do nível do solo. Esses blocos podem ser expostos a umidades e não recebem revestimentos como reboco. Eles possuem resistências maiores que 6 MPa. Os blocos da classe B, também possuem função estrutural, mas são indicados para alvenaria externa acima do nível do solo. Eles podem receber revestimento de argamassas para proteção contra intempéries. Ele apresenta resistências maiores que 4 MPa, porém, menores do que 6 MPa. Os blocos da classe C não possuem função estrutural e são indicados para alvenaria interna acima do nível do solo. Eles possuem resistências maiores que 3 MPa e podem ser revestidos com argamassas. Os blocos da classe D são aqueles que não possuem função estrutural, sendo utilizados somente para alvenarias de vedação. A resistência é baixa, em torno de 2 MPa.

**Quadro 2.** Requisitos da NBR 9062:2017 [34]

Classe	Resistência Característica (MPa)	Absorção de água (%)	
		Agregado normal	Agregado leve
A	≥6,0	≤ 10	≤13 (média)
B	≥4,0		Individual ≤16
C	≥3,0		
D	≥ 2,0		

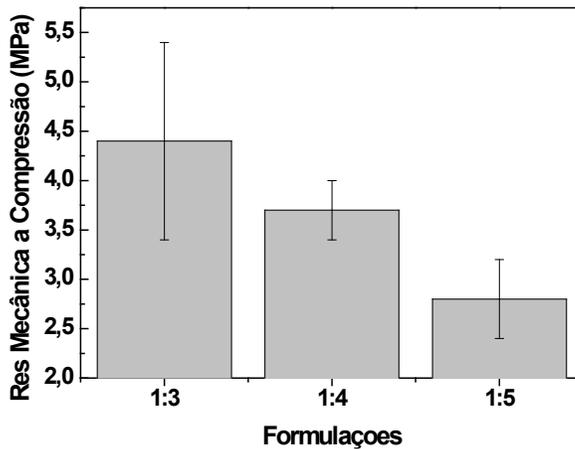
De acordo com a Tabela 3 e Figura 6, os resultados obtidos de resistência mecânica à compressão indicam que todas as formulações atendem a pelo menos a classe D, não estrutural, cuja resistência é no mínimo 2 MPa. Por sua vez, a formulação 1:3 foi a que apresentou melhores resultados de resistência (4,4 MPa) e absorção de água (4,4%) e foi escolhida para realizar testes com incorporação de resíduo.

**Tabela 3.** Resultados de resistência mecânica à compressão e absorção de água

Formulações	1:3	1:4	1:5
RMC (MPa)	4,4 ± 1,3	3,7 ± 0,1	2,8 ± 0,4
AA (%)	4,4 ± 1,2	5,1 ± 0,9	6,0 ± 1,1
Mea (kg/m <sup>3</sup> )	2,3 ± 0,3	2,3 ± 0,2	2,2 ± 0,9

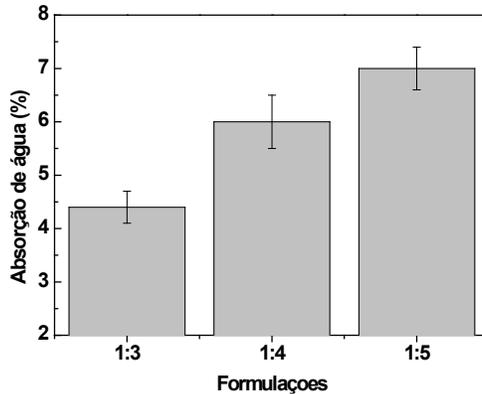
RMC: resistência mecânica à compressão; Mea: massa específica aparente; AA: absorção de água

Fonte: dados da pesquisa



**Figura 6.** Resistência mecânica à compressão das formulações (Fonte: Autor).

Na Figura 7 a absorção aumentou com o acréscimo da areia, proporcionalmente à queda da resistência.



**Figura 7.** Absorção de água das formulações dos blocos (Fonte: Autor).

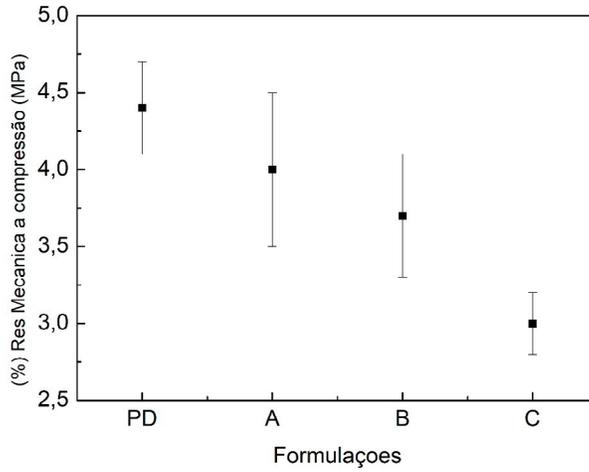
No Quadro 3 são apresentadas as formulações com traço 1:3, o qual apresentou os melhores resultados de caracterização mecânica. Adicionalmente, foi incorporado resíduo de pó de granito em substituição ao cimento nas proporções de 10, 20 e 40%.

**Quadro 3:** Formulações com argamassa com incorporação de resíduos de granito

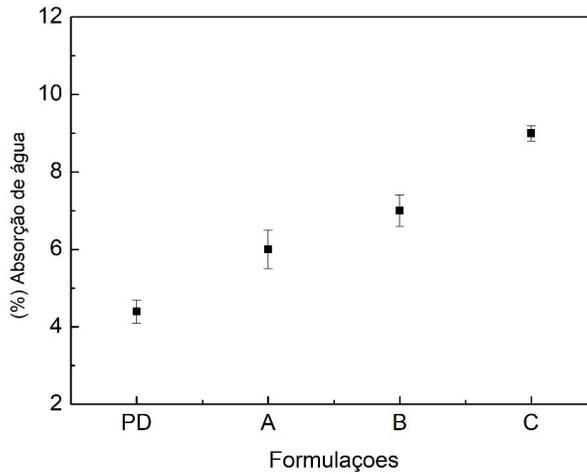
Traço	Traço em volume			Massa total seca		
	Cimento	Areia	Água (%)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (ml)
1:3	1	3	9	2,00	6,00	720
1:4	1	4	9	1,60	6,40	720
1:5	1	5	9	1,33	6,72	720

Fonte: dados da pesquisa

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os resultados de caracterização das formulações em que foi substituído o cimento pelo resíduo. Foi observado que à medida que o cimento foi substituído, a resistência sofreu um decréscimo, bem como houve um acréscimo da absorção de água e redução da densidade. Isso ocorreu porque foi substituído o aglomerante por um material inerte. Porém, todas as formulações atendem as especificações de resistência e absorção de água. No entanto, para blocos estruturais, até 10% de resíduo pode ser recomendado.



**Figura 8.** Resistência mecânica à compressão das formulações com incorporação de resíduo (Fonte: Autor).



**Figura 9.** Absorção de água das formulações com incorporação de resíduo (Fonte: Autor).

## 4. CONCLUSÕES

O resíduo, por ser muito fino e leve, além de apresentar cerca de 20% de umidade, deve ser previamente seco antes de ser utilizado. Os resíduos são constituídos por feldspato, cálcio e albita, considerado inerte e muito parecido com a areia, ou seja, inerte e pronto para ser reaproveitado.

Nos testes foram verificados que o resíduo de rochas pode substituir o cimento em até 10%, sem prejuízo das propriedades. Além disso, o resíduo acima de 20% incorporado no tijolo ficou com dificuldade de compactação. O resíduo pode ser uma excelente oportunidade de reaproveitamento para todas as fábricas que produzem blocos. Além de reduzir os custos do processo com redução do consumo de cimento, contribuirá de forma efetiva para uma produção sustentável.

## AGRADECIMENTOS

O(s) autor(es) são gratos pela infraestrutura do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológica da Universidade Federal de Sergipe – NUPEG (Semi nano).

## REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, D. M.; OLIVEIRA, T. N.; BEZERRA, A. C. et al. Utilização de resíduo de granito como substituição ao Cimento Portland em matrizes cimentícias. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011.
- [2] BARBOSA, M. T. G. et al. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. Porto Alegre. Universidade Federal de Juiz de Fora. p 52, 2008.
- [3] MELLO, M. R. Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufaturada de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha. São Paulo. Universidade de São Paulo, Dissertação de mestrado. p. 4-12, 2006.
- [4] GONÇALVES, J. P., Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2000.
- [5] ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. Materials Science and Engineering, n. 419, p. 306-309, 2006.
- [6] AKBULUT, H.; GÜRER, C.; ÇETIN, S.; ELMACI, A. Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. Construction and Building Materials, n. 36, p.

430-436, 2012.

[7] ABIROCHAS: Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais no período janeiro-setembro de 2016 – Informe 07/2016, 2016. 11 p.

[8] POON, C. S., KOU, S. C., LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Constr. Build. Mater.* v.16, n.5, p. 281–289, 2002.

[9] FAN, J. S., 1996. Foreign Concrete Block Production Equipment and Development Trend Vol. 6. Hebei Province Building Materials Bureau, Baoding City, pp. 41–42.

[10] BLANKENDALL, T., SCHUU, R. P. et al, 2014. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. *Journal Cleaner Production.* 66 (3), 27–36.

[11] SABOYA Jr, F., XAVIER, G.C., ALEXANDRE, J. The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Constr. Build. Mater.*, v.21, n.10, p.1950–1960, 2007.

[12] ZANATTA, P. Gestão ambiental e o desenvolvimento sustentável. Florianópolis. Instituto de Pós-Graduação (IPOG) e Universidade Federal de Pelotas (UFPel), p.296, 2017.

[13] BACHETI, G., MAZIERO, P. R., GARCIA, D. P. Elaboração e caracterização de blocos de concreto com a incorporação de resíduos de granito. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v.7, n. 3, p.273-296, jul/set. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v7e32018273-296>.

[14] OLIVEIRA, Djane de Fátima. Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Blocos de Concreto Produzidos com a Utilização de Entulho da Construção Civil. Universidade Federal de Campina Grande. Tese de Doutorado, 2004.

[15] FEITOSA, A. O. Utilização do resíduo da serragem de granito para uso em blocos de concreto sem função estrutural. Tese Mestrado em Engenharia Civil, UFCG, 2004.

[16] MENG, Y., CHAI T., MO, K. H. Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: overview. *Resources, Conservation & Recycling*, v.138, p. 298-312, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.029>

[17] GENÇEL, O., OZEL, C., KOLCSAL, F., et al., 2012. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal Cleaner Production*, v.21, p.62–70, 2012.

[18] UYGUNOĞLU, T., TOPCU, I. B., GENÇEL, O., BROSTOW, W., The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of prefabricated concrete interlocking blocks (PCIBs). *Constr. Build. Materials*, v 30, n.3 p. 180–187, 2012.

[19] BINICI, H.; SHAH, T.; AKSOGAN, O.; KAPLAN, H. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 208, p. 299-308, 2008.

[20] BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, v. 1, n. 3, p. 405-418, 2008.

[21] PADILHA, A. F., FILHO F. A., Técnicas de Análise Microestrutural, Editora Hemus, São Paulo (1985).

- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). NBR 7184 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº200). Rio de Janeiro, 2013.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - DNER 93/04 - Determinação da densidade real de sólidos, 1994.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12118. 2006. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Determinação da resistência à compressão.
- [30] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C-20-2005: Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water.
- [31] NASCIMENTO, ASS et al. Produção de argamassa de gesso com incorporação de resíduos de corte de granito. *Journal of Cleaner Production*, p. 121808, 2020.
- [32] CAPUTO, H. *Mecânica dos Solos*, vol1, Editora Blucher, São Paulo, 2011.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136, Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisito, 2014.

# ESTUDO DA VARIAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AGREGADO SINTÉTICO PARA FABRICAÇÃO DE PLACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO NÃO ESTRUTURAL

*Fagner F. Santos, Fernando Luiz de Andrade Santo  
José Nilton Soares Santos, Mandarlan H. N. Pereira  
Vanessa G. Almeida, Fernanda M. Cavalcante de Melo,  
Shevine Silva de Oliveira Risso  
Herbet Alves de Oliveira*

## RESUMO

Os concretos leves podem ser utilizados na construção civil como isolamento térmico e acústico, cobrimento de lajes e produção de placas, entre outros. O baixo peso específico apresentado pelo agregado leve garante redução do peso de estruturas, favorecendo a redução de cargas a serem transmitidas às fundações. Neste trabalho, foi estudado o melhor arranjo granulométrico de argilas expandidas de granulometrias nos diâmetros de 22, 15 e 5 mm com o intuito de produzir placas de concreto para substituir a brita. As matérias-primas foram caracterizadas por meio da massa unitária, massa específica, absorção de água, análise granulométrica, análise química e difratometria de raios X. Em seguida, foi utilizado o diagrama de Winkler para determinação da densidade a partir da mistura das três argilas. Foram escolhidos pontos do diagrama com diferentes massas unitárias e produziu-se corpos de prova de concreto, padrão e testes, sendo que os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência mecânica à flexão em três pontos e densidade aparente. Os resultados mostraram que houve redução de 30 a 40% no peso das peças sem alteração da resistência mecânica nas formulações A e D.

**Palavras-chave:** Argila expandida, concreto, placas.

## 1. INTRODUÇÃO

Placas de concreto são utilizadas amplamente em todo mundo para aplicações diversas, tanto no revestimento em paredes internas, como externas. Além disso, é utilizado para satisfazer às demandas da construção civil na

produção de caixas de ar-condicionado, tampas de bueiros de esgoto e de água e também na utilização de peças para decoração (como armários e guarda-roupas, por exemplo) [1]. Estas placas são produzidas por meio de uma mistura de brita, cimento, areia e água. No entanto, o manuseio, transporte e assentamento das placas tornam-se dificultosos devido ao seu elevado peso. Uma alternativa para solucionar este problema é utilizar argila expandida na sua formulação que apresenta baixo peso específico desde que não altere as propriedades das peças, como resistência mecânica e durabilidade [2].

Argila expandida ou agregado leve é definida como um conjunto de grãos naturais processados ou manufaturados que apresentam diferentes tamanhos. Sua sinterização é realizada entre 1100 e 1350 °C. Segundo [3], os agregados leves podem ser obtidos pelo processo de queima em forno rotativo e apresentam granulometria variada, formato arredondado regular e estrutura interna formada por uma massa esponjosa, envolto por uma camada com baixa permeabilidade, que diminui significativamente a absorção de água. Já os agregados produzidos pelo processo em queima intermitente apresentam altos valores de absorção de água e formato irregular, necessitando de britagem para atender todas as graduações granulométricas [4]. Os agregados sintéticos leves possuem elevada absorção de água e baixa densidade aparente, comparados com a pedra britada, o que facilita a aderência e cura interna [5-7]. Segundo [3] a argila expandida pode reduzir de 30 a 50% o peso de uma estrutura e a resistência pode ainda alcançar até 45 MPa, obtendo massas de 1700 kg/m<sup>3</sup> comparados com a brita, que oscila de 2100 a 2200 kg/m<sup>3</sup>.

Neste trabalho, uma empresa produtora de peças pré-fabricadas de concreto desejava reduzir a massa desses materiais devido a dificuldades que alguns clientes estão tendo no transporte e, sobretudo, manuseio durante o assentamento, sem que haja também a perda de sua resistência. Para isso, foram produzidas placas contendo variações de argila expandida, areia e cimento, mantendo constante o fator água/cimento. As matérias-primas foram caracterizadas por meio da densidade aparente, análise granulométrica e análise química. Foram produzidos corpos de prova de concreto submetidos ao ensaio de resistência mecânica à flexão em três pontos e densidade aparente após cura aos 28 dias.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram caracterizadas pelos seguintes ensaios tecnológicos: massa unitária (areia, cimento e argila expandida) analisada de acordo com a NBR 4506 [8]. A distribuição granulométrica (areia, brita e argila expandida) foi realizada conforme [9]. A massa específica (areia) foi executada pelo método do picnômetro [10] e os agregados graúdos brita e argila expandida, pela norma NBR NM 53: 2009 [11]. O ensaio de absorção de água (brita e argila expandida) pela norma NBR NM 53:2009 [11]. Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10,0 g que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

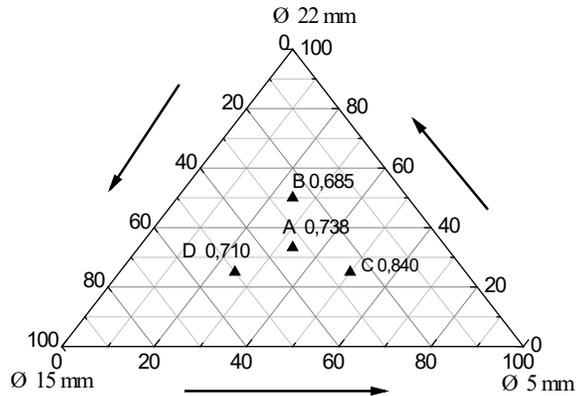
A caracterização microestrutural foi realizada por difratometria de raios X para identificação das fases cristalinas de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). Os padrões de difração foram obtidos com um equipamento da marca Rigaku D-MAX 100 usando radiação Cu K $\alpha$ 1 ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 3 a 80° com velocidade de varredura de 1°/min. Os ensaios mecânicos de resistência à flexão foram realizados em um equipamento da marca Instron, modelo 3565 de acordo com a norma [12], utilizando velocidade de carga de 1mm/min.

### 2.2 Formulações em estudo

Foi utilizada na pesquisa a argila expandida fornecida pela Cinexpan [13] com diâmetros de 25, 15 e 5 mm. Conforme a Tabela 1, foi elaborada quatro formulações. Inicialmente foi realizada a medida da densidade aparente utilizando as três argilas e foram escolhidas densidades que estão plotadas no diagrama de Winkler, conforme mostra a Figura 1.

**Tabela 1.** Formulações utilizadas em traço  $\text{kg}/\text{m}^3$ 

Matéria-prima	Padrão	A	B	C	D
Cimento IV	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Areia lavada	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0
Brita	3,0	-	-	-	-
Arg. Exp. $\varnothing$ 22 mm	-	1,0	2,0	0,5	0,5
Arg. Exp. $\varnothing$ 15 mm	-	1,0	0,5	0,5	2,0
Arg. Exp. $\varnothing$ 5 mm	-	1,0	0,5	2,0	0,5
a/c	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

**Figura 1.** Diagrama de Winkler (Fonte: Autor).

## 2.3 Caracterização dos corpos de prova de concreto

Ensaio mecânico: as massas foram produzidas em betoneira de capacidade de 200 l, obedecendo a uma relação de a/c de aproximadamente 0,60 [6]. As argilas expandidas utilizadas nas formulações foram previamente imersas em água pelo tempo de 24 h para evitar que a mesma absorvesse a água e alterasse a consistência da mistura [14]. Os agregados sintéticos leves são normalmente porosos e de baixa resistência à compressão [15]. Em função da elevada porosidade, o agregado deve ser umidificado antes de misturar ao cimento, sob risco de o mesmo absorver toda a água e, com isso, reduzir a fluidez. Ao umidificar o agregado previamente, melhora-se a cura interna,

reduzindo a retração por secagem [16,17].

Ao se adicionar água ao concreto, parte dela entra nos poros e acaba dificultando o desenvolvimento da resistência, além de comprometer a durabilidade [18]. Já os agregados pesados devem apresentar baixa absorção, não sendo necessário realizar a umidificação previamente. Foram produzidos corpos de prova em moldes prismáticos (5 x 5 x 16) cm, que foram imersos em água por 28 dias para realização do ensaio de resistência à flexão conforme a NBR 12142/2010 [19].

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Massa unitária, massa específica e absorção de água

A massa unitária das matérias-primas está de acordo com as especificações de [19]. A argila expandida apresenta resultados baixos de massa unitária e elevada absorção de água (6,5% a 9%), caracterizando se tratar de materiais leves. A argila expandida apresenta elevado teor de absorção de água devido a elementos expansivos utilizados no processo produtivo, vide Tabela 2.

**Tabela 2:** Ensaio de caracterização das matérias-primas

Matéria-prima	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Areia	1,63 ± 0,15	2,65 ± 0,01	-
Brita	1,51 ± 0,05	2,64 ± 0,01	0,4 ± 0,2
Cimento	1,18 ± 0,05	3,15 ± 0,01	-
Arg. Exp. Ø 22 mm	0,53 ± 0,05	2,58 ± 0,01	9,6 ± 0,1
Arg. Exp. Ø 15 mm	0,66 ± 0,03	2,59 ± 0,01	11,3 ± 0,2
Arg. Exp. Ø 5 mm	0,85 ± 0,03	2,60 ± 0,01	6,5 ± 0,1

#### 3.2 Análise química

Os resultados de análise química apresentados na Tabela 3 mostram que a brita é rica em sílica e álcalis, o que caracteriza ser material constituído basicamente

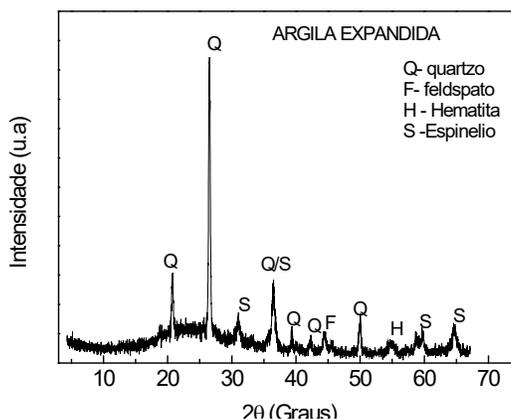
mente por quartzo e feldspato. A argila expandida como é produzida com argilas possuem elevado teor de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , além de  $Fe_2O_3$ , o que caracteriza pela cor vermelha após queima, acima de 5% [20].

**Tabela 3** Análise química (%)

Elementos	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$Fe_2O_3$	$K_2O$	$MgO$	$Na_2O$	$TiO_2$	$P_2O_5$	Outros
Arg. Exp.	60,5	20,3	0,4	7,9	5,0	3,7	0,6	0,9	0,2	0,20
Brita	68,2	14,4	3,4	3,5	3,5	2,1	3,5	0,5	0,2	0,30

### 3.3 Análise microestrutural

A análise mineralógica foi realizada por meio de difratometria de raios X. Conforme a Figura 2, a argila expandida apresenta a maioria de fases de quartzo, proveniente da sílica livre presente nas argilas. Foi identificada a fase hematita decorrente do elevado teor de  $Fe_2O_3$ , apresentado na análise química na Tabela 4, e ainda identificado a fase espinélio decorrente da presença da  $SiO_2$  e  $MgO$  [20].

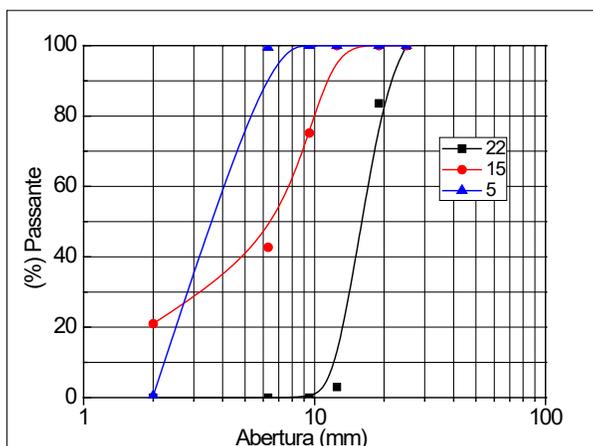


**Figura 2.** Padrão de difratometria de raios X da argila expandida (Fonte: Autor).

### 3.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica das argilas expandidas é apresentada na Figura 3. De acordo com a análise da uniformidade segundo a equação  $C_u = D_{60}/D_{10}$ , as argilas de 5 mm e 15 mm apresentam uniformidade média,

enquanto a argila de 15 mm é desuniforme, portanto, adequada para se conseguir empacotamento perfeito em uma mistura.



**Figura 3.** Análise granulométrica das argilas expandidas de diferentes diâmetros (Fonte: Autor).

### 3.5 Slump

Após mistura das matérias-primas na betoneira, foi determinado o *slump*, de acordo com a norma [22]. O abatimento das formulações apresentou diferenças, sendo que a massa B apresentou maior *slump*, o que pode influenciar na resistência final do concreto.

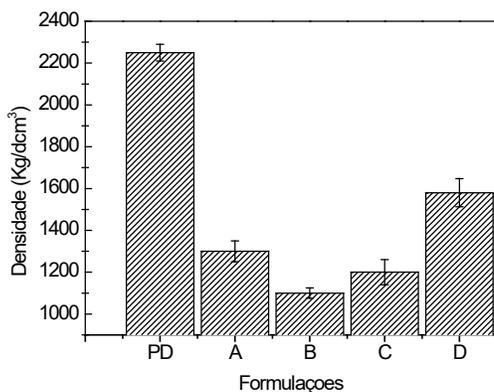
**Tabela 4:** *Slump* das formulações.

Formulações	Padrão	A	B	C	D
	12	8	24	14	5

### 3.6 Resistência mecânica: tensão de ruptura à flexão - TRF

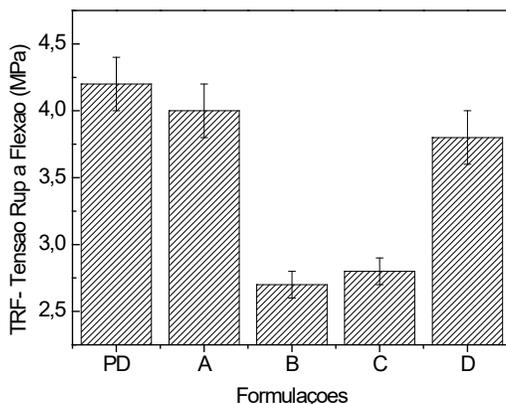
Os dados da densidade são apresentados na Figura 4. Foram analisados utilizando o *software* ANOVA com 5% de significância. Os dados mostram que apresentam diferenças significativas. A massa padrão (2250 kg/dcm<sup>3</sup>) em relação às demais, houve diferenças de peso de A (42%), B (52%), C (40%) e

D (30%). Portanto, a substituição do agregado leve pela brita apresentou alterações significativas no peso da placa.



**Figura 4.** Densidade das formulações (Fonte: Autor).

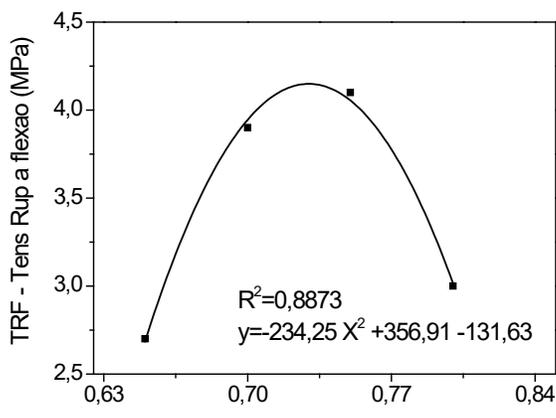
Na Figura 5 é apresentado a tensão de ruptura à flexão das amostras estudadas. De acordo com a norma [22] de placas de concreto, a tensão de ruptura à flexão mínima aceitável é 3,5 MPa. Os dados foram analisados pelo *software* ANOVA com 5% de significância e as formulações PD, A e D não apresentam diferenças significativas. Assim, as formulações A e D são adequadas para substituir as britas.



**Figura 5.** Resistência mecânica à flexão das placas (Fonte: Autor).

De acordo com a Figura 6, foi observado que existe uma correlação entre a distribuição granulométrica e a resistência final do concreto. Densidades

baixas (< 0,68) não obtiveram resultados satisfatórios. Foi encontrado uma faixa de 0,7 e 0,8 em que se obteve resultados de resistência dentro da norma.



**Figura 6.** Densidade de empacotamento x tensão de ruptura à flexão (Fonte: Autor).

Na Figura 7 é apresentada a placa produzida com a argila expandida nas dimensões de 50 x 50 x 5 cm.



**Figura 7.** Placas de concreto produzido com argila expandida.

## 4. CONCLUSÕES

A proposta da pesquisa foi produzir placas de baixo peso para facilitar o manuseio e transporte sem alteração da resistência mecânica. Considerando

que uma placa originalmente pesava cerca de  $(29 \pm 0,1)$  kg, houve uma redução de 30%, portanto, uma nova placa foi produzida com peso de cerca de  $(20,0 \pm 0,1)$  kg, o que atendeu o propósito da pesquisa.

O empacotamento determinado por meio da massa unitária influenciou de forma efetiva na resistência mecânica, cujos valores se apresentaram entre 0,7 e 0,8 g/cm<sup>3</sup>, conforme mostrado na Figura 6.

A resistência mecânica à flexão mínima exigida pela norma deve ser de 3,5 MPa [22]. As formulações A e D apresentaram resultados similares ao padrão. Adicionalmente, as formulações B e C apresentaram maior valor de *slump*, o que pode ter contribuído para redução da resistência, apesar de se manter a relação água-cimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNAL, O. et al., Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation, *Building and Environment*, v. 42, pp. 584-590, 2007.
- [2] KILIÇ, A. et al., High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, v.33, pp. 1595-1599, 2003.
- [3] BOGAS, A. GOMES, A., Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction, *Materials and Design*, v.46, pp.832–84, 2013.
- [4] 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, 2015.
- [5] LOPES, M.; KAH, L.F.; Kustis, K. E., Effect of Internally Stored Water on Creep of High-performance Concrete. *ACI Materials Journal*, v. 105, n. 3, pp. 303-311, 2008.
- [6] LOURENÇO, J. et al. New approach for shrinkage prediction of high strength lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, v. 35, pp. 84-91, 2012.
- [7] ROSSIGNOLO, J. A., Avaliação da zona de transição interfacial pasta agregado leve em concretos com sílica ativa e látex, *Revista Matéria*, v. 12, n. 3, 2007.
- [8] ABNT. ABNT/NBR 45:2006 - Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazio – procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2012. 8p.
- [9] ABNT. ABNT/NBR: 7181 - Solos – método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 13 p.
- [10] ABNT. ABNT/NBR 8916/2015 - Adesivos e selantes - determinação da densidade - via picnômetro. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.5p.
- [11] ABNT. ABNT/NBR NM 53: 2009 - Agregado graúdo - Determinação da massa específica

ca, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2009. 8p.

[12] ABNT. ABNT /NBR 5739 - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

[13] CINEXPAN. Disponível em <http://www.cinexpan.com.br/>. Acessado em 15.08.2016.

[14] WEISS, J. et al., The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing, *Construction and Building Materials*, v.35, pp. 52-62, 2012.

[15] OLLIVIER, J. C. Maso, B. Bourdette. Interfacial transition zone in concrete. *Advanced, Cement Based Materials*, v.2, pp.130-138, 1995.

[16] LOURENÇO, J. et al., New approach for shrinkage prediction of high strength lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, v.35, pp.84-91 84-91, 2012.

[17] LIJUAN, K., LIRONG, H., Chemical reactivity of lightweight aggregate in cement paste, *Construction and Building Materials*, v. 64, pp. 22–27. 2014.

[18] ABNT. ABNT/NBR 12142: concreto determinação da resistência à flexão de corpos de prova prismático-procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2010, 5p.

[19] ISAIA, G. C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações, In: Ibracon, São Paulo, PP. 953-983, 2005.

[20] CABRAL, E. M., Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto”. *Cerâmica*, v. 54, pp 404-410, 2008.

[21] ABNT. ABNT/NBR NM 67: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone- procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2011, 8p.

[22] ABNT. ABNT/NBR 15805: concreto - pisos elevados de placas de concreto - requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, ABNT, 2014. 21 p.

# DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE REBOCO COM A INCORPORAÇÃO DE CAULIM NATURAL

*Beatriz Rocha Silva,  
Hudson Santos Menezes Júnior,  
Any Manuela Soares Santos,  
Antônio José da Silva Filho,  
Herbet Alves de Oliveira*

## RESUMO

O caulim é um silicato de alumínio hidratado, isento de plasticidade e de cor branca, usado para diversas aplicações, entre elas na fabricação de papel, tinta e outros. Portanto, o caulim é um material nobre de importante valor agregado. Na produção de argamassa, normalmente o material é pouco utilizado devido a carência de jazidas no Brasil, ou cuja distância das jazidas existentes inviabiliza os custos de processamento para produção de argamassas. Nesse trabalho, a proposta é avaliar o uso do caulim na produção de argamassa de reboco. O caulim foi submetido aos ensaios de caracterização por difratometria de raios X, análise química por FRX e análise granulométrica. A partir de um traço de 1:5 (cimento: areia) utilizada para reboco, o mesmo foi utilizado para substituir a areia de 20 a 80%. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos de 10 x 5 cm os quais foram imersos em água potável contendo cal e deixados curando por 28 dias. Após cura, os mesmos foram submetidos aos ensaios de resistência mecânica à compressão, absorção de água e massa específica aparente. Os resultados apresentados indicam que à medida que o caulim foi incorporado, houve melhora da trabalhabilidade no estado fresco. Após cura, houve acréscimo da resistência, massa específica e redução da absorção de água. A argamassa foi aplicada na parede e foi observado melhora exponencial da textura, mas apresentam retração diferencial que pode promover fissura, portanto, deve ser utilizado de forma moderada.

**Palavras-chave:** argamassa. caulim. reboco. minério

# 1. INTRODUÇÃO

Caulim é um minério composto de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita, e apresenta características especiais que permitem sua utilização na fabricação de papel, cerâmica e tintas, entre outros. Este apresenta baixa plasticidade e resistência mecânica, a seco. O mineral é formado pela caulinita, em geral de cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de óxido de ferro. É um dos seis minerais mais abundantes da crosta terrestre e ocorre à profundidade de até 10 m, com ponto de fusão a 1800 °C. O caulim é um mineral que apresenta inúmeras propriedades tecnológicas, como quimicamente inerte, macio e não abrasivo, apresenta cor branca ou quase branca, tem capacidade de cobertura quando usado como pigmento, reforçador para as aplicações de carga e apresenta baixa condutividade térmica e elétrica [1].

As reservas de caulim no mundo são consideradas abundantes e bem distribuídas geograficamente. Cerca de 95% estão concentradas em apenas quatro países, que são Estados Unidos (53%), Brasil (28%), Ucrânia (7%) e Índia (7%). As reservas brasileiras encontram-se principalmente nos estados do Pará, Amazonas e Amapá, participando, respectivamente, com 56%, 41% e 2% do total. Esses são depósitos do tipo sedimentar, sendo assim grandes reservas com propriedades para diversas aplicações industriais [2].

O caulim tem muitas aplicações industriais e constantemente novas formas de utilização estão sendo pesquisadas e desenvolvidas. É considerado um mineral de características especiais, por ser quimicamente inerte em uma ampla faixa de pH. Quando usado como pigmento ou como extensor em aplicações de cobertura e carga, apresenta um ótimo poder de cobertura, conduz pouco calor e eletricidade e tem um baixo custo comparado com a maioria dos materiais concorrentes [2].

O caulim é um mineral de várias aplicações de segmentos, no entanto, em argamassas existem poucos relatos da sua utilização na forma natural, porém, o caulim calcinado é amplamente estudado devido a sua atividade pozolânica, que é a capacidade de se combinar com o hidróxido de cálcio [3-4]. Nóbrega [5] estudou *in natura* o resíduo de caulim argiloso como material plastificante em argamassas de múltiplos usos, e quanto às propriedades mecânicas avaliadas, ele se mostrou satisfatório. Independente da origem do caulim, é possível

obter um metacaulim de boa qualidade usando um tratamento adequado, como moagem e calcinação com temperaturas entre 700 e 900 °C, segundo estudos realizados por Péra e Amrouz [6], Oliveira e Barbosa [3] e Shvarzman [7].

Segundo a NBR-7200 [8], a argamassa é definida como mistura de aglomerantes e agregados com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência. As funções das argamassas estão diretamente associadas ao fim que se destinam. Segundo Nascimento [9] as funções podem ser definidas como: unir com solidez elementos de alvenaria e ajudar a resistir a esforços horizontais, absorver deformações que ocorrem naturalmente nas alvenarias, selar as juntas contra infiltrações de água, colar materiais de revestimento, dar acabamento em tetos e paredes, em regularização de pavimentos, na reparação de obras de concreto, etc. Sua denominação é em função do aglomerante utilizado. Assim têm-se argamassas de cimento, cal ou misturas de cimento e cal [10]. Existem pesquisas de argamassas, com adição de outros materiais com o objetivo de melhorar determinadas características, e para tanto, se adicionam na composição de outros produtos como polímeros, vermiculitas, rejeitos de caulim, carvão vegetal, etc.

Nesse trabalho foi estudado a incorporação de caulim no estado natural em uma argamassa de reboco com fim de melhorar suas propriedades e encontrar uma aplicação para o caulim existente na região.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Matérias-primas**

O caulim utilizado neste trabalho é originado de depósitos, no município do Cabo de Santo Agostinho, estado de Pernambuco, nordeste brasileiro. O caulim é um material argiloso de granulometria fina, de baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca, passado na peneira de 1 mm. O agregado miúdo ou areia, foi adquirido em uma jazida localizada no entorno do município de Estância/SE. A areia foi passada na peneira de 2 mm. O cimento utilizado foi do tipo CP II F-32 RS. Esse tipo de cimento foi escolhido por apresentar melhor relação água/cimento, por ter resistência a sulfatos e ter uma estrutura mais compacta, reduzindo assim, a incidência de fissuras.

## 2.2 Ensaios tecnológicos de caracterização das matérias-primas

Distribuição do tamanho de partículas: o agregado miúdo (areia) e caulim foram caracterizados por peneiramento seguido de sedimentação para determinação da distribuição dos tamanhos das partículas, em conformidade com a norma NBR 7181 [11].

Massa específica aparente: as matérias-primas foram ensaiadas segundo procedimento de Amorós [12] utilizando uma proveta.

Massa específica real: o ensaio com areia foi realizado pelo método de Chapman, segundo a NBR 16916 [13]. Já no cimento, a medida representativa da densidade real foi determinada utilizando picnômetro de hélio, modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics.

Análise mineralógica: a difratometria de raios X foi utilizada para a identificação das fases cristalinas do caulim de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) e a análise foi realizada utilizando o *software* Match. Os padrões de difração foram obtidos em um equipamento Rigaku D-MAX 100 usando radiação  $\text{Cu K}_{\alpha 1}$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 70° com velocidade de varredura de 1°/min [14].

Análise química: os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10,0 g que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

## 2.3 Preparação das formulações e argamassa

As argamassas utilizadas neste estudo foram produzidas no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IFS/SE. Conforme apresentado na Tabela 1, inicialmente foi produzida uma argamassa padrão utilizando traço 1:5 cimento e areia, posteriormente, foi-se introduzindo o caulim em substituição a areia de forma gradual. Para o cálculo do consumo de materiais utilizados, foi utilizado a fórmula, representada na Eq. 1 [15], em que  $C$  é o consumo de

cimento em gramas,  $\gamma_c$ ,  $\gamma_a$  e  $\gamma_b$  são as massas específicas do cimento, da areia e caulim,  $a$  e  $b$  representa a quantidade em partes de areia e caulim, enquanto  $x$  representa a relação água/cimento. O valor 1000 é correspondente ao volume de argamassa produzido em litros. Esse volume pode ser alterado conforme o número de corpos de prova que se deseja conformar.

Com a argamassa no estado fresco, mediu-se a densidade aparente e consistência. Os traços apresentados na Tabela 1 foram definidos em massa e a relação água/cimento ( $a/c$ ) foi definida inicialmente como 1,1 para atender a consistência de  $(210 \pm 10)$  mm.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + x} \quad (1)$$

**Tabela 1:** Formulações de argamassa, traço em volume.

Matérias-primas	Padrão	A	B	C	D
Cimento	1	1	1	1	1
Areia	5	4	3	2	1
Caulim	-	1	2	3	4
$a/c$	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2

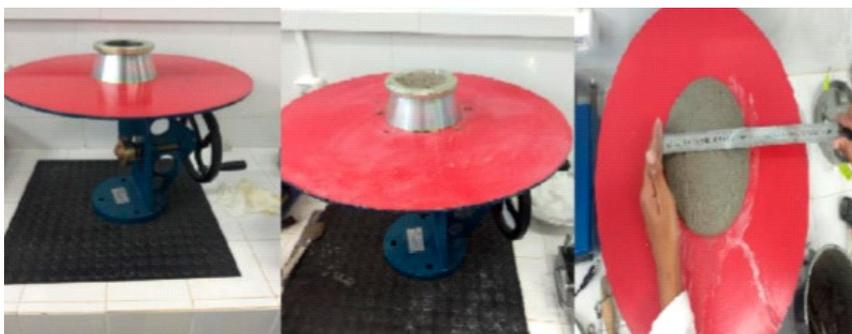
Na produção das argamassas, os materiais utilizados foram apropriadamente pesados em balança da marca Marte com uma capacidade de carga de 2100 g e resolução de 0,01 g, modelo JH2102. Neste experimento, as argamassas foram produzidas utilizando-se um misturador mecânico (argamassadeira) de eixo vertical com capacidade de 5 litros, da marca Edutec ilustrado na Figura 1.



**Figura 1.** Argamassadeira (Fonte: Autor).

## 2.4 Ensaio com a argamassa no estado fresco

Consistência: o princípio do ensaio consiste em medir o espalhamento da argamassa após ser submetida a 30 golpes na mesa de consistência. O princípio do ensaio consiste em medir o espalhamento da argamassa após ser submetida a 30 golpes na mesa de consistência, conforme a norma NBR 13276 [16]. A Figura 2, ilustra as etapas do ensaio.



**Figura 2.** Ensaio de Índice de consistência da argamassa no estado fresco (Fonte: Autor).

A densidade aparente foi determinada conforme a norma NBR 13278 [17].

## 2.5 Ensaio com os corpos de prova no estado curado

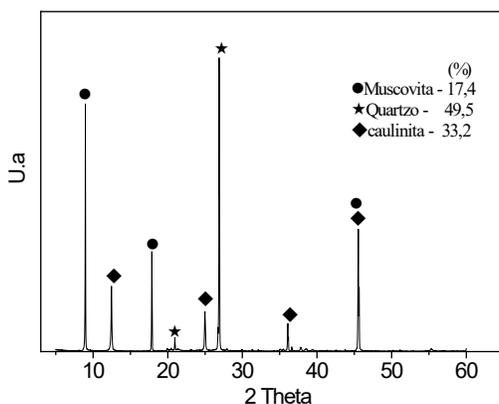
Absorção de água: para realização deste ensaio, seguiu-se o método de ensaio descrito na NBR 9778 [18].

Resistência mecânica à compressão: a resistência à compressão foi determinada na idade de 28 dias, conforme procedimento descrito na NBR 13279 [19].

Densidade aparente no estado endurecido: o ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias, em conformidade com a NBR 13280 [20].

## 3. RESULTADOS

De acordo com a Figura 3, o DRX apresentado do caulim, é constituído de feldspato, muscovita, quartzo e o argilomineral caulinita característico dos caulins [21].



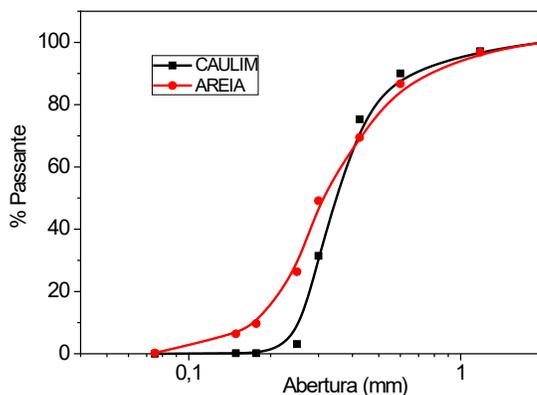
**Figura 3.** Difratometria de raios X do caulim (Fonte: Autor).

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise química realizados com caulim utilizados nas formulações de argamassa. O caulim apresenta composição química com a presença dos óxidos  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , além de apreciável quantidade de  $\text{K}_2\text{O}$ , característico dos caulins [22].

**Tabela 2:** Análise química do caulim (%)

Matéria- prima	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Total (%)
Caulim	55,1	27,0	---	2,9	13,8	---	100,0

Na Figura 4 é apresentada a análise granulométrica da areia e caulim. De acordo com o coeficiente de uniformidade (Cu) ambos são uniformes, ou seja, apresentam faixa estreita de granulometria. Com relação ao coeficiente de concavidade (Cc), a areia é bem graduada e o caulim mal graduado, ou seja, apresenta desordem da distribuição de partículas [23].

**Figura 4.** Análise granulométrica (Fonte: Autor).

Na Tabela 3 é apresentada a caracterização das matérias-primas. De acordo com a massa específica aparente, o caulim apresenta-se mais leve do que o cimento e areia [24].

**Tabela 3:** Caracterização das matérias-primas

Matérias-primas	Da (g/cm <sup>3</sup> )	Dr (g/cm <sup>3</sup> )	Finura (%)	MF
Cimento	1,19	3,26	0,96	-
Caulim	0,84	2,60	0,80	-
Areia	1,52	2,61	-	2,54

Da: massa específica aparente; Dr: massa específica real; MF: módulo de finura

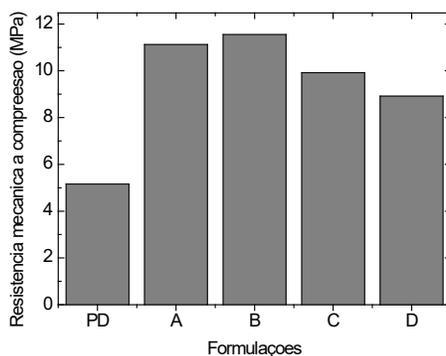
Os resultados das formulações no estado fresco estão apresentados na Tabela 4. A consistência permaneceu constante em todas as formulações. Com relação a densidade aparente ela foi menor na formulação C, provavelmente devido a maior quantidade de caulim que apresenta menor massa específica aparente.

**Tabela 4:** Resultados de ensaio no estado fresco

Formulações	PD	A	B	C	D
Consistência (mm)	200	210	201	196,5	200
Densidade aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	1,97	2,08	2,09	2,00	1,95

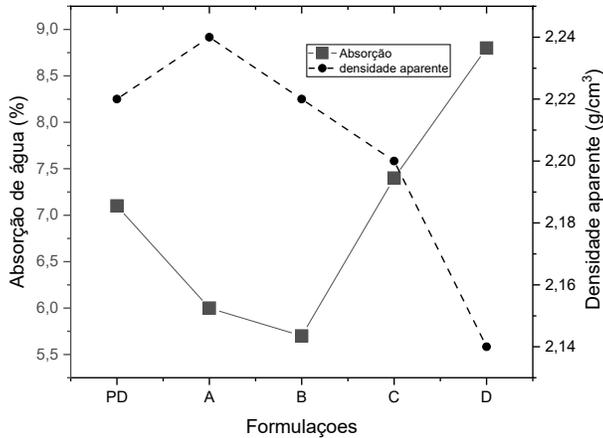
PD: padrão

Na Figura 5 é apresentada a resistência mecânica das formulações. O caulim incorporado melhorou a resistência mecânica e o empacotamento, provavelmente por ser mais fino.



**Figura 5.** Resistência mecânica das formulações com caulim (Fonte: Autor).

Os resultados da caracterização da absorção de água e densidade aparente estão apresentados na Figura 6. Os resultados da absorção de água foram mais baixos na formulação B, assim como a maior resistência e maior densidade aparente, provavelmente porque apresentou maior empacotamento com essa mistura.



**Figura 6.** Absorção de água e densidade aparente (Fonte: Autor).

## 4. CONCLUSÕES

O caulim se apresentou mais leve do que o cimento e areia. A presença do argilomineral caulinita conferiu trabalhabilidade e liga suficiente para não necessitar de CaO e tão pouca plasticidade na areia para aplicação na parede.

O caulim é uma opção para aplicação em argamassas, sobretudo em regiões em que a matéria-prima está disponível. Por ser uma matéria-prima de diversas aplicações, a argamassa fica normalmente para segundo plano. Assim ela é somente viável quando está próximo de jazidas em que o custo final se torna viável.

Os resultados demonstram que o caulim incorporado em argamassas de reboco, melhoram a textura, aumenta a resistência mecânica à compressão e reduz a absorção de água. No entanto, a plasticidade pode aumentar de forma a dificultar a aplicação e promover fissuras se não for utilizado na forma moderada.

## REFERÊNCIAS

[1] DA LUZ, A. B.; DAMASCENO, E. C. (1993) Caulim um Mineral Industrial Importante. CETM/CNPq, Série Tecnologia Mineral No. 65, Rio de Janeiro, RJ. 29p.

- [2] TOLENTINO JUNIOR, J. Potencial dos depósitos de caulim halloysítico associados aos pegmatitos da região de Juiz de Fora visando o seu aproveitamento econômico. 2019. 169 f. Tese (Doutorado em Análise de Bacias; Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [3] OLIVEIRA, M. P. e BARBOSA, N. P., Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição do cimento Portland em argamassas. *Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental*, vol. 10, p. 490-496, 2005.
- [4] ARAÚJO, J. M. Contribuição ao Estudo das Propriedades Físico Mecânicas das Argamassas de Revestimento. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2004, 175p.
- [5] NÓBREGA, A. F., Potencial de aproveitamento de resíduo de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso. In: Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 2007.
- [6] PERA, J.; AMROUZ, A. Development of Highly Reactive Metakaolin from Paper Sludge. *Advanced Cement Based Materials*, vol. 7, 1998.
- [7] SHVARZMAN, A.; KOVLER, K.; GRADER, SHTER, G. E. The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, p. 405-416, 2003.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7200 - Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento (1) 1998.
- [9] Nascimento, M. C. B., Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida. In: Tese de Pós-Graduação, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- [10] Fiorito, A.J.S., Manual de argamassas de revestimento: estudos e procedimento de execução. 2 ed. São Paulo, Pini, 2005
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7181, Determinação do índice de granulometria (2016).
- [12] AMOROS, J. L., SANCHES, G., JAVIER, M. M., Manual para elcontrol de localidad de materias primas arcillosas, ITC Instituto de Tecnologia Cerámica, 1998.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16916, Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (2021).
- [14] Celik, H., Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry, *Appl. Clay Sci.* 50, 245, 2010.
- [15] GOMES, A. O.; NEVES, C. M. M. Proposta de Método de Dosagem Racional de Argamassas Contendo Argilominerais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2002.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR13276 de 09/2016 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA De Normas Técnicas. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas.nbr 9778/2009. argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA De Normas Técnicas NBR13279 de 09/2005 Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão
- [20] MENEZES, R. R. et al. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 795-801, Dec. 2009.
- [21] KONAN, K. L., PEYRATOUT, C., SMITH, A., BONNET, J. et al. Comparison of surface properties between kaolin and metakaolin in concentrated lime solutions. J. Colloid Interface Sci. (2009), 339, 103e109.
- [22] caputo, h. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. Mecânica das Rochas, Fundações e Obras da Terra - Vol. 2 - 7ª Ed. 2015.
- [23] PETRUCCI, E. G. R. Materiais de construção, Editora Globo, Rio de Janeiro, 2011.

# TIJOLO DE SOLO-CIMENTO COM REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE GRANITO

*Elvia Soraya Santos Nascimento,  
Patrícia Campos de Souza  
Herbet Alves de Oliveira  
Carlos Mariano Melo Júnior  
Vanessa Gentil de Oliveira Almeida  
Fernanda Martins Cavalcante de Melo*

## RESUMO

Esta pesquisa propõe o estudo do reaproveitamento de resíduo do corte do granito na incorporação do tijolo solo-cimento. As formulações propostas foram a substituição do cimento pelo resíduo de corte de granito, em 5, 10 e 20%, e a substituição do solo pelo resíduo, em 20, 30 e 40%. Para isto, foram produzidos 13 corpos de prova, para cada formulação, em um traço de 1:8 de cimento e solo, que foram testados quanto a sua resistência à compressão, massa específica, absorção e durabilidade. O resíduo do corte de granito apresentou resultados benéficos quanto a durabilidade dos tijolos de solo-cimento. O traço com 5% de substituição parcial do cimento pelo resíduo apresentou o melhor desempenho, com uma perda de massa inferior às demais misturas e uma resistência à compressão superior, além de manter o valor de absorção de água próxima ao tijolo de referência. A viabilidade da produção de tijolos de solo-cimento, com substituição parcial do solo e do cimento, pelo resíduo do corte de granito mostrou-se uma alternativa exequível e sustentável ao verificar-se a melhoria nas propriedades, concluindo-se que o material residual permite uma destinação apropriada e, por conclusão, a redução do consumo da extração de matérias-primas.

**Palavras-chave:** Tijolo. Solo-cimento. Resíduo de granito. Materiais sustentáveis.

## 1. INTRODUÇÃO

O tijolo de solo-cimento é uma realidade para construções de baixo custo em todo mundo. O mesmo é produzido basicamente a partir da mistura de um solo arenoso e cimento. Esse tipo de tijolo representa uma alternativa em sintonia com o desenvolvimento sustentável, pois requerem baixo consumo

de energia na extração da matéria-prima, dispensam o processo de queima e reduzem a necessidade de transporte, uma vez que os tijolos podem ser produzidos com solo do próprio local da obra. Nesse segmento, ainda pode ser valorizado o reaproveitamento de diversos resíduos [1].

A construção civil, assim como outros setores, é um dos maiores e mais importantes ramos industriais do mundo e a sua atuação na utilização de matérias-primas é saliente, além de gerar quantidade significativa de resíduos. Entretanto, devido a pluralidade de produtos produzidos, esta área torna-se também uma grande incorporadora de seus próprios resíduos e de resíduos de outros setores industriais [2].

O Brasil possui inúmeras indústrias na área do beneficiamento de rochas ornamentais, tais como o granito, mármore, ardósia, entre outras, considerado o quarto produtor e o sexto exportador mundial de rochas, sendo um importador pouco expressivo [3]. Nesse cenário, os resíduos do processo de beneficiamento de rocha ornamental (casqueiros, cacos e outros resíduos como lâminas e granalhas desgastadas) e os lodos gerados pelo processo de fracionamento e polimento, entre outros, geram impactos ambientais em várias etapas do processo produtivo [4]. A destinação de tais resíduos gera um custo para as empresas, além do impacto que o descarte provoca na paisagem ambiental.

A incorporação de minerais a matrizes cerâmicas, betuminosas e cimentícias tem sido centro de diversas pesquisas quanto ao seu potencial, em que busca a melhoria do comportamento mecânico, aumento da durabilidade e redução do uso de agregados ou aglomerantes. Tais aplicações possuem embasamento no desempenho físico que materiais finos exercem, pois possuem a capacidade de atuar como filer, ou seja, preenchem os poros e promovem uma melhoria para o empacotamento do sistema [5].

Pesquisas têm sido realizadas objetivando o reaproveitamento de resíduos de rochas ornamentais em materiais da construção civil, especificamente na massa cerâmica. Silva et al. [6] analisaram a utilização da lama do corte de granito em massas argilosas. Em seu estudo, comprovaram que o resíduo é composto por partículas pequenas, entretanto, existe no mesmo uma grande variação de tamanhos, indicando que a granulometria do rejeito influenciará no comportamento plástico do solo, reduzindo sua plasticidade. Weizenmann

et al. [7], em seus estudos, também encontraram um alto teor de finos para o resíduo.

Miranda [8], que estudou a aplicação da mistura de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento, observou que com o aumento gradativo da quantidade de resíduo na formulação do tijolo, a massa específica dos grãos seguiu uma tendência de crescimento, demonstrando que o resíduo favoreceu o preenchimento dos vazios, o que resulta em um aumento da densidade da mistura. Ribeiro [9] realizou uma pesquisa que demonstrou a viabilidade da utilização de uma mistura de solo-cimento com resíduo de rocha ornamental. Foi possível constatar que a substituição do solo pelo resíduo tende a aumentar a resistência à compressão e diminuir a absorção de água para corpos de prova com 40% de resíduo.

Já Ribeiro e Holanda [10], em sua pesquisa sobre incorporação do lodo de corte de granito em tijolos de solo-cimento, substituíram o solo parcialmente por até 30% do lodo, obtendo como resultado uma resistência à compressão que apresentou apenas uma pequena diferença com a adição de lodo, mantendo constante os resultados de absorção de água. Portanto, percebe-se a escassez e resultados ainda não consolidados quanto às propriedades do tijolo de solo-cimento com a incorporação de resíduo do corte de granito em substituição ao solo e, principalmente, em substituição ao cimento. Aliado a abrangência do tema sustentabilidade e o conjunto de questões que podem surgir quando não se leva em consideração esse conceito nas mais diversas atividades, este trabalho procura cooperar com o setor da construção civil, através do estudo e proposições de uma prática que vise contribuir com o reaproveitamento de resíduos que são descartados na natureza de forma aleatória para a incorporação dos mesmos no desenvolvimento dos tijolos de solo-cimento.

Logo, a presente pesquisa tem como objetivo produzir tijolo de solo-cimento com incorporação do resíduo do corte do granito, em substituição ao cimento (5, 10 e 20%) e ao solo (20, 30 e 40%), a fim de analisar as propriedades físicas (massa específica e absorção de água), mecânica (resistência à compressão) e a durabilidade. A caracterização dos materiais componentes, bem como o tijolo de solo-cimento, foi obtida por meio de procedimentos experimentais realizados em laboratório e fundamentados em normas técnicas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Matérias-primas

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado nas imediações do Instituto Federal de Sergipe, Campus Estância. O solo foi seco em estufa na temperatura de  $(105 \pm 5)$  °C, destorroado manualmente para reduzir o diâmetro dos grãos, passado na peneira de 600  $\mu\text{m}$  e verificado quanto ao atendimento dos requisitos gerais da NBR 10833 (ABNT, 2013a). A granulometria foi determinada de acordo com a NBR 7181 [11], a massa específica aparente, conforme a NBR 7185 [12] e a massa específica real do solo natural foi determinada a partir das prescrições da norma DNER-ME-093/94 [13].

As propriedades plásticas (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) foram determinadas de acordo com a NBR 6459 [14] e NBR 7180 [15], respectivamente. A microscopia eletrônica de varredura do solo foi realizada pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em um microscópio eletrônico de varredura marca Jeol, modelo JSM-6510LV. O cimento utilizado para compor a mistura foi o CP V-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), caracterizado quanto à determinação da pasta de consistência normal pela NBR 16606 [16], do tempo de pega de acordo com a NBR 16607 [17], massa específica real segundo a NBR 16605 [18], índice de finura (NBR 11579) [19] e o ensaio de determinação da resistência à compressão normal pela norma NBR 7215 [20].

O resíduo do corte do granito (RCG) foi fornecido pela Marmoraria Santana, localizada no município de Estância/SE. O resíduo utilizado neste trabalho primeiramente foi seco em estufa,  $(105 \pm 5)$  °C, posteriormente foi armazenado em recipientes plásticos e vedados, onde os mesmos permaneceram protegidos de intempéries. Assim, para a substituição do cimento foi utilizado o resíduo passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$ . Para a substituição do solo, o passante na peneira 600  $\mu\text{m}$  e para substituição da areia (usada para correção do solo) foi utilizado o resíduo passante na peneira de 1,18 mm, conforme Figura 1. Toda caracterização física do resíduo foi realizada utilizando as normas adotadas para o solo e o cimento.



**Figura 1.** Materiais utilizados na produção dos tijolos (Fonte: Autor).

Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras de argilas foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10,0 g que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

A difratometria de raios X foi utilizada para a identificação das fases cristalinas de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*), e os percentuais de fases da composição mineralógica foram estimados através do *software* Match! versão Demo. Os padrões de difração foram obtidos em um equipamento da marca Rigaku, modelo D-MAX 100 usando radiação  $\text{Cu K}_{\alpha 1}$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a  $70^\circ$  com velocidade de varredura de  $1^\circ/\text{min}$ .

## 2.2 Preparação das formulações e ensaios de caracterização

Inicialmente, a partir do solo selecionado, foi realizado teste para determinação da umidade ótima segundo a norma DNER-ME 162/9 [21] e foi obtido o teor de 19% de umidade. Em seguida, incorporou-se areia ao solo para avaliação da trabalhabilidade e resistência mecânica. Assim, após vários testes para determinação de percentuais ideais para correção do solo com areia, a presente pesquisa adotou o percentual de 70%. Logo, o solo, corrigido com 70% de areia, foi o utilizado na produção dos tijolos, com umidade ótima de 14%. Outros autores, como Mendes et al. [22], também encontraram que

a mistura contendo 70% de areia e 30% de argila e silte é uma composição indicada para a produção de tijolo de solo-cimento.

Conforme apresentado na Tabela 1, foram dosadas sete formulações. Adotou-se o traço de 1:8 (cimento: solo), sendo a primeira de referência, três com substituição parcial do cimento por resíduo de granito, em 5, 10 e 20%, e três com substituição parcial do solo por resíduo de granito, em 20, 30 e 40%. Para cada formulação, foram moldados treze tijolos com dimensões de 24,6 cm de comprimento, 6,1 cm de altura, 12,1 cm de largura e abertura do furo de 5,8 cm.

**Tabela 1.** Formulações dos tijolos de solo-cimento

Nomenclatura	Material substituído	Resíduo	Traço do tijolo (C:S:RCG)
Ref.	-	-	1:8
Tsc/5	Cimento	5%	0,95:8:0,05
Tsc/10	Cimento	10%	0,9:8:0,1
Tsc/20	Cimento	20%	0,8:8:0,2
Tss/20	Solo	20%	1:6,4:1,6
Tss/30	Solo	30%	1:5,6:2,4
Tss/40	Solo	40%	1:4,8:3,2

Nota: C: cimento; S: solo corrigido; RCG: resíduo do corte de granito

As matérias-primas foram pesadas em balança da marca Marte com capacidade de 30 kg e resolução de 0,1 g. As misturas foram realizadas manualmente com bandeja plástica, com auxílio de uma espátula. Inicialmente foi realizada a mistura do cimento, solo e resíduo, posteriormente, foi acrescentada a água com auxílio de um borrifador. Os tijolos foram conformados em uma prensa manual de tijolos ecológicos (Figura 2), modelo Contenco HD-200T.



**Figura 2.** Prensagem dos tijolos (Fonte: Autor).

Após a cura dos tijolos, abrigados do sol e do vento por um período de sete dias, os tijolos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, absorção de água e massa específica, conforme prescrições da NBR 8492 [23]. Posteriormente, foi realizado o ensaio de durabilidade por molhagem seguido de secagem, de acordo com a NBR 13554 [24].

Para análise dos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se a normalidade dos dados e, assim, realizou-se uma análise de variância (ANOVA), seguida do Teste de Tukey, a fim de verificar a influência dos percentuais de incorporação do resíduo nas propriedades do tijolo de solo-cimento.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Tabela 2 são apresentados os dados obtidos na caracterização do cimento e das misturas com substituição parcial do mesmo pelo resíduo do corte de granito. Observa-se que quanto ao início de pega, houve um aumento considerável na mistura com 20% do RCG, porém, o resíduo não comprometeu a reação de endurecimento do cimento, pois todas as misturas atenderam o limite prescrito em norma. Ainda, é possível notar uma redução da resistência à compressão quando há substituição do cimento pelo RCG no teor de 20%, indicando assim que a mistura perde a capacidade de resistir a cargas

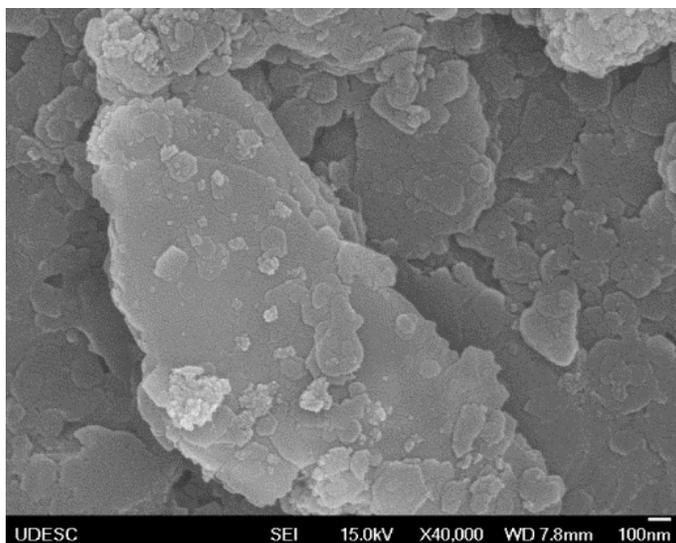
axiais. Porém, é importante salientar que as misturas de 5% e 10% permaneceram em uma faixa satisfatória se comparada a resistência que foi obtida apenas com o cimento.

**Tabela 2.** Propriedades físicas e químicas do cimento

Características	Cimento	RCG	Substituição do cimento por RGC		
			5%	10%	20%
Índice de finura (%)	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Início de pega (min)	130	-	116	138	170
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	3,037	2,750	3,067	3,097	3,128
RC (7 dias) MPa	34,3	-	34,0	35,7	29,4

RC: resistência à compressão

Na Figura 3 é apresentada a microscopia eletrônica de varredura do solo coletado, observando que o mesmo é constituído de placas de caulinita.

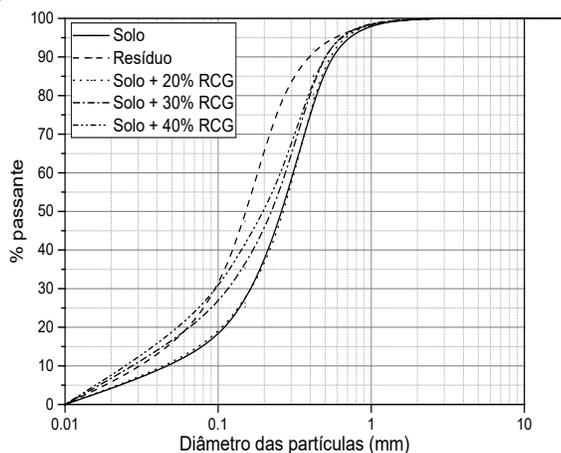


**Figura 3.** Microscopia eletrônica de varredura do solo (Fonte: Autor).

A curva granulométrica das matérias-primas e suas misturas são plotadas na Figura 4, sendo todos os materiais classificados como bem graduados e medianamente uniformes, considerando os coeficientes de

uniformidade e de curvatura. Os ensaios foram realizados com os materiais nas granulometrias utilizadas na composição dos tijolos de solo-cimento.

Assim, observa-se que à medida que se aumentou a percentagem de substituição, do solo pelo resíduo, houve um aumento na quantidade de finos, demonstrando assim que o resíduo influenciou na composição granulométrica das misturas. Resultados semelhantes foram obtidos em trabalhos anteriores [6,25-26]. Ainda, vale ressaltar que a granulometria abaixo de 0,05 mm influenciou na plasticidade e compactação do material. O solo apresentou 10% e o RCG, 17%. Assim, as misturas (solo + RCG) tendem a melhorar o empacotamento.



**Figura 4.** Curvas granulométricas do solo, resíduo e as misturas (Fonte: Autor).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física, realizados com as matérias-primas. Nota-se, com a análise dos resultados, que o resíduo é considerado não plástico (NP) e não líquido. Os resultados obtidos demonstram que o solo apresenta plasticidade média e a mistura com 40% do resíduo reduziu consideravelmente o índice de plasticidade, dificultando a trabalhabilidade da mesma. As demais composições (20 e 30%) obtiveram resultados de IP próximos, no entanto, abaixo do solo, evidenciando assim que nessas mesmas porcentagens, o resíduo não influenciará de maneira significativa a plasticidade da composição.

**Tabela 3.** Caracterização física do solo, resíduo e misturas do solo com resíduo

Ensaio	Solo	RCG	Substituição do solo por RCG		
			20%	30%	40%
IP (%)	7,34	-	6,52	5,46	1,06
LL (%)	18,31	-	14,91	16,28	15,14
MEA (g/cm <sup>3</sup> )	1,430	1,020	1,229	1,517	1,619
MER (g/cm <sup>3</sup> )	2,640	2,641	2,646	2,650	2,645

IP: índice de plasticidade; LL: limite de liquidez; MEA: massa específica aparente; MER: massa específica real

Os dados da Tabela 3 demonstram que as misturas não alteraram significativamente as massas específicas reais. Para a massa específica aparente, os valores obtidos variaram para as amostras do resíduo e suas respectivas misturas, com aumento dessa propriedade em relação ao solo, demonstrando uma menor redução de vazios.

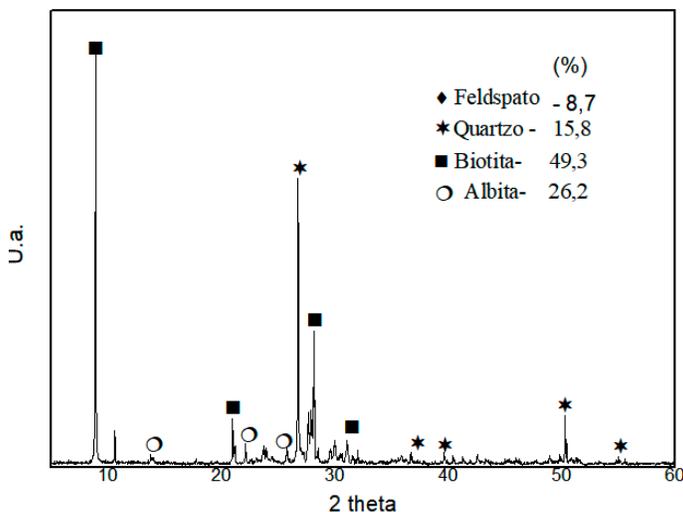
Na análise química dos óxidos presentes no resíduo de granito apresentados na Tabela 4, verifica-se elevados teores de sílica (48,67%), presença de óxidos de ferro (14,05%) e de cálcio (19,67%), tornando o resíduo um material pozolânico, com sílica na sua forma ativa ou amorfa (SiO<sub>2</sub>) e que, por sua vez, contribui para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos tijolos [27]. O óxido de ferro e de cálcio encontrados foram provenientes provavelmente da granalha de ferro e da cal moída que são utilizadas nas etapas de corte e polimento de rochas graníticas. Outros pesquisadores encontraram resultados semelhantes [28].

**Tabela 4.** Composição química do resíduo

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Total
48,67	2,86	19,67	14,05	10,90	0,25	2,49	1,09	99,87

A difração de raios X é uma valiosa técnica para o estudo de materiais pozolânicos, em que é possível avaliar o grau de desordem de sua estrutura [5]. A Figura 5 ilustra o difratograma de raios X do resíduo de corte de granito. A partir da análise, é possível notar que há uma predominância das fases biotita, albita e quartzo. Logo, a forma apresentada no difratograma revela que os compostos

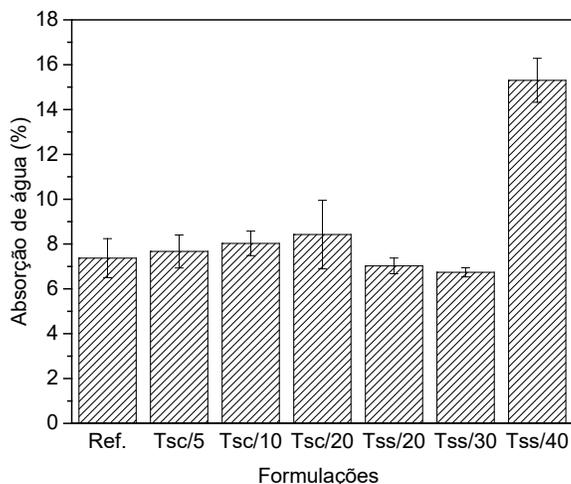
químicos presentes no RCG se apresentam particularmente na forma cristalina. É válido ressaltar que algumas características são importantes para uma avaliação pozolânica, tanto o grau de amorfismo de um material rico em sílica e alumina, bem como sua finura. A portlandita na hidratação do cimento relaciona-se com a reatividade que a instabilidade estrutural de uma pozolana possui [29-30]. Faz-se necessário ressaltar que para uma melhor avaliação da atividade pozolânica devem ser observados os aspectos físicos e químicos do material.



**Figura 5.** Padrão de difratometria de raios X do resíduo de granito (Fonte: Autor).

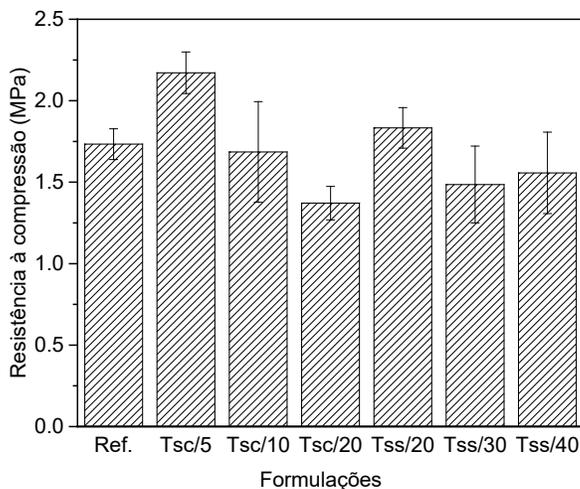
## Caracterização do tijolo de solo-cimento com resíduo de granito

Na Figura 6 são apresentados os resultados de absorção de água dos tijolos produzidos. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 24,685$ ,  $f_{\text{crítico}} = 2,845$  e valor de  $p = 1,1 \cdot 10^{-6}$ ). Com o teste de Tukey verificou-se que diferença significativa foi somente para a mistura com substituição parcial do solo com 40% de RCG (Tss/40), aumentando em 100% essa propriedade. Os percentuais consideráveis de quartzo e feldspato, presentes no resíduo de granito, podem contribuir no aumento da porosidade dos tijolos de solo-cimento [32].



**Figura 6.** Resultados de absorção de água (Fonte: Autor).

Ainda verifica-se que é possível substituir o cimento em até 20% (Tsc/20) e o solo em até 30% (Tss/30), sem alteração significativa na absorção de água do tijolo de solo-cimento. Todas as formulações atenderam ao requisito estabelecido na NBR 10834 [33], que determina o limite de 20%. A Figura 7 apresenta os valores encontrados no ensaio de resistência à compressão, realizado aos 7 dias de idade. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 10,505$ ,  $f_{\text{crítico}} = 2,336$  e valor de  $p = 5,56 \cdot 10^{-7}$ ). Com o teste de Tukey verificou-se que a substituição do solo pelo resíduo, em porcentagens até 40%, não resultou em perdas significativas de resistência à compressão, em comparação com o tijolo de referência. Outros autores, utilizaram o resíduo de granito, em substituição de até 30% pelo solo, e encontraram resultados semelhantes ao tijolo de referência [9-10].

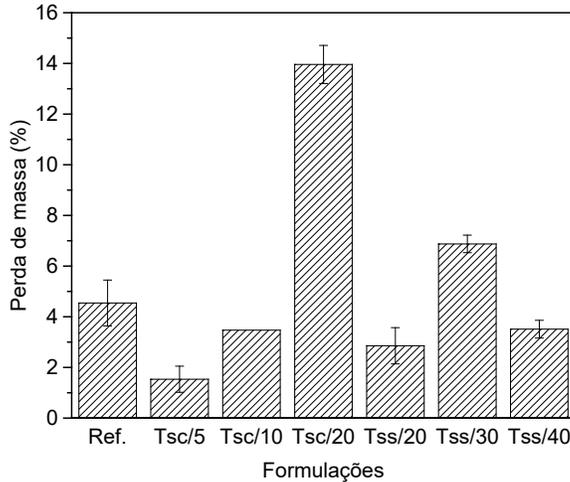


**Figura 7.** Resistência à compressão das formulações de tijolos (Fonte: Autor).

A substituição pelo cimento gerou diferenças significativas, é possível afirmar que o aumento do teor de resíduos, em substituição ao cimento, acima dos citados e estudados nessa pesquisa, tende a reduzir a resistência à compressão dos tijolos. Embora a substituição do cimento pelo resíduo de granito possa diminuir a resistência. Do ponto de vista da sustentabilidade, a maior quantidade possível de cimento deve ser substituída, enquanto a resistência do material produzido pode ser mantida [34-36].

No entanto, o melhor resultado de resistência à compressão foi obtido com o traço Tsc/5 (5% de resíduo, em substituição ao cimento), alcançando resistência média de 2,2 MPa, com acréscimo de 25% em comparação à referência, valor superior ao requerido pela NBR 10834 [37].

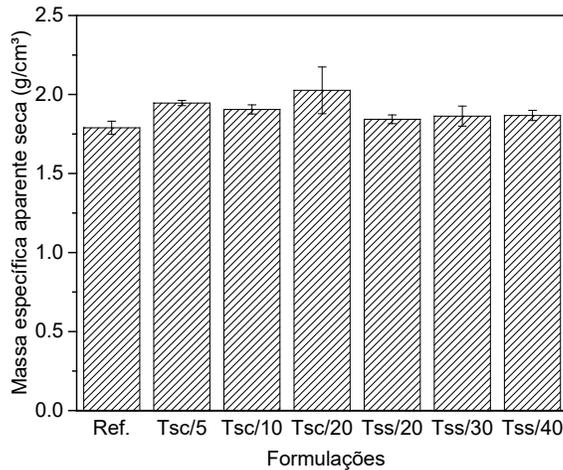
A Figura 8 apresenta os valores encontrados no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, realizado aos 7 dias de idade, em que foi avaliada a perda de massa (%). Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 50,924$ ,  $f_{\text{crítico}} = 3,866$  e valor de  $p = 2,0 \cdot 10^{-5}$ ). Através do teste de Tukey, verificou-se que ao substituir o solo pelo resíduo houve uma redução da perda de massa nos traços dos tijolos, com exceção da mistura Tss/30, onde ocorreu um aumento dessa perda.



**Figura 8.** Perda de massa dos tijolos aos 7 dias (média após 6 ciclos) (Fonte: Autor).

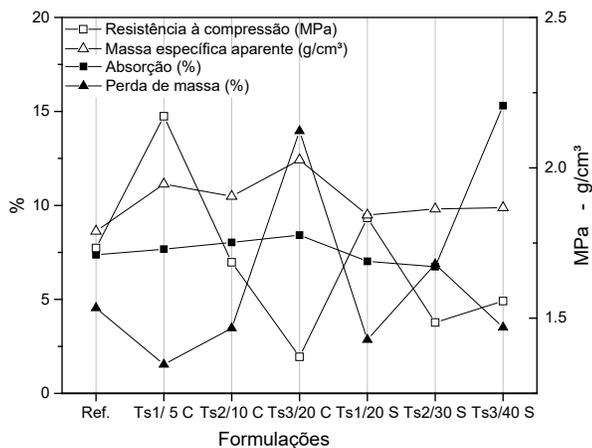
Nas substituições do resíduo pelo cimento, em até 10%, registrou redução da perda de massa; com o acréscimo para um percentual de 20% (Tsc/20) há um aumento significativo, indicando que a diminuição da porcentagem de cimento e o aumento da quantidade de resíduo pode influenciar nesta propriedade. Considerando que o limite sugerido de perda de massa para construção de solo-cimento é de 10% [36], é possível afirmar que com exceção do traço Tsc/20, todos os demais atenderam esse parâmetro.

Na Figura 9 são apresentados os valores de massa específica aparente seca. Os resultados mostraram que não existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 2,723$ ,  $f_{\text{crítico}} = 2,848$  e valor de  $p = 0,0574$ ). Assim, constatou-se que para nenhuma das misturas utilizadas houveram grandes variações da massa específica, o que ressalta que a substituição do resíduo não influenciou nessa característica, assim como relatado em pesquisas anteriores [31].



**Figura 9.** Massa específica aparente seca dos tijolos produzidos (Fonte: Autor).

A Figura 10 apresenta um comparativo entre as características físico-mecânicas dos tijolos e a melhor formulação, considerando as propriedades estudadas. Assim, constatou-se que o melhor traço foi o Tsc/5, com uma perda de massa inferior às demais misturas e uma resistência à compressão superior, além de manter o valor de absorção de água próxima ao tijolo de referência. O traço Tss/20 apresentou os resultados mais próximos ao traço de referência, comprovando que é possível conciliar sustentabilidade e atendimento aos padrões técnicos. A sustentabilidade quanto à redução do teor de areia, teor de cimento e aproveitamento de resíduos, pois a fabricação de cimento consome muita energia e combustível fóssil, o que dá origem a grandes pegadas de energia e carbono e causa o aquecimento global, enquanto a mineração de areia causa consideráveis riscos ecológicos. O esgotamento maciço da areia natural destrói terras agrícolas, danifica o habitat da fauna, levando a deficiências de água doce e alimentos para os humanos. Além disso, a dragagem de areia da bacia do rio pode potencialmente desestabilizar as margens dos rios e minar os aterros de estradas e pontes [34].



**Figura 10.** Comparativo das propriedades estudadas no tijolo de solo-cimento (Fonte: Autor).

## 4. CONCLUSÃO

O objetivo dessa pesquisa foi produzir tijolo de solo-cimento com incorporação do resíduo do corte de granito, a partir de substituições parciais do solo e do cimento, e verificar a influência dessa incorporação nas propriedades massa específica, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade do tijolo.

Durante a realização dos ensaios, observou-se a importância que deve ser dada ao controle de umidade da composição da mistura de solo-cimento, pois a mesma possui intensa influência sob a prensagem do tijolo e, conseqüentemente, na sua resistência à compressão.

Quanto à capacidade de absorção de água, é exequível notar que há um aumento gradativo na absorção dos tijolos à medida que é aumentada a percentagem de resíduo na composição, indicando que o resíduo possui uma capacidade maior de absorção, o que modificou essa característica no produto final. Existe a probabilidade de que a modificação da capacidade de absorção do tijolo, com o aumento da quantidade de resíduo na mistura, possua influência na resistência à compressão dos mesmos.

Em termos de resistência à compressão, a melhor combinação foi atingida pelo traço Tsc/5, com resultados superiores aos apresentados pelo traço de referência. Isso indica que a incorporação do resíduo na proporção de 5%, em substituição ao cimento, conferiu maior resistência ao componente. Até 10% (em substituição ao cimento) e 20% (para substituição pelo solo) não houve uma variação significativa em relação ao tijolo de referência, destacando que a substituição do resíduo do corte de granito confere ao material final bons resultados. É possível afirmar que se aumentar a substituição do cimento, acima dos citados e estudados nessa pesquisa, resultará em perda da resistência à compressão.

Quanto à durabilidade, todos os traços, exceto o Tsc/20, apresentaram valores aceitáveis quanto à perda de massa. A melhor combinação foi para os traços Tsc/5, quando realizada a substituição pelo cimento e Tss/20, quando feita a substituição pelo solo. O resíduo do corte de granito apresentou resultados benéficos quanto a durabilidade dos tijolos de solo-cimento.

A viabilidade da produção de tijolos de solo-cimento com substituição parcial do solo e do cimento, pelo resíduo do corte de granito, mostrou-se uma alternativa exequível e sustentável, pois além de possibilitar uma destinação adequada ao RCG, permite a redução do consumo da extração de matérias-primas. Nessa pesquisa, foi possível produzir tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo de granito, com melhoria nas propriedades e com resultados semelhantes ao tijolo convencional.

## REFERÊNCIAS

- [1] SEGANTINI, A. A. S., WADA, P. H. An evaluation of the composition of soil cement bricks with construction and demolition waste. *Acta Scientiarum Technology*. 33 (2011) 179-183. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i2.9377>
- [2] BASTOS, R. S., ULIANA, J. G., CALMON, J. L., TRISTÃO, F. A., VIEIRA, G. L., DEGEN, M. K. Revisão Bibliográfica dos Estudos Sobre a Aplicação da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais na Produção de Materiais de Construção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55, Gramado, 2013. Anais. São Paulo: IBRACON, 2013, p. 1-16.
- [3] ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. O setor brasileiro de rochas ornamentais. Geól. Cid Chiodi Filho. Brasília: DF. Julho de 2018.
- [4] OLIVEIRA, L. S. de. Reaproveitamento de resíduos de marmoraria em compósitos ci-

mentícios. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) - Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais, 2015.

[5] BARBOSA, J. M. A influência da moagem na atividade pozolânica do resíduo de granito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2017.

[6] SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADAES, A. M., ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. *Cerâmica*. 51 (2005) 325-330. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000400004>.

[7] WEIZENMANN, M., BRUXEL, F. R., SANTANA, E. R. R., OLIVEIRA, E. C. Avaliação da incorporação de resíduo gemas na massa cerâmica vermelha: um estudo de caso. *Cerâmica*. 59 (2013) 442-447 <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000300014>

[8] MIRANDA, R. A. C. Viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2007.

[9] RIBEIRO, S. V. Reutilização de resíduo de rocha ornamental na produção de tijolo solo- cimento. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.

[10] RIBEIRO, S. V.; HOLANDA, J. N. F. Soil-Cement Bricks Incorporated with Granite Cutting Sludge. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. v. 3, n. 2, p. 401-408, 2014.

[11] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018a.

[12] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7185: Solo: determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016b.

[13] DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 093/94: solos: determinação da densidade real. 1994a.

[14] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017a.

[15] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016a.

[16] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16606: Cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018b.

[17] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16607: Cimento Portland - determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018c.

[18] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017b.

[19] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579: Cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, 2013c.

[20] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215: Cimento Portland - de-

terminação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

[21] DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 162/94: Solos: ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. 1994b.

[22] MENDES, R.; ZANOTTI, R. A. R.; MENEZES, J. C. S. dos S. Produção de solo-cimento (tijolo ecológico) utilizando resíduo do polimento de grés de porcelanato como fonte de sílica. *Revista de Engenharia Civil IMED*. 1 (2014) 50-55. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v1n1p50-55>

[23] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8492: tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.

[24] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13554: solo-cimento: ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012b.

[25] ASHOUR, T., KORJENIC, A., KORJENIC, S., WU, W. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings*. 104 (2015) 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>.

[26] BRUXEL, F. R. A problemática dos resíduos provenientes do setor de gemas: avaliação da incorporação de lodo de gemas na massa cerâmica. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) – Centro Universitário UNIVATES, Rio Grande do Sul, 2011.

[27] GRANDE, F. M. Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-Cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

[28] ALMADA, B. S., MELO, L. S., DUTRA, J. B., BUBANI, L. C., SILVA, G. J. B., SANTOS, W. J., AGUILAR, M. T. P. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. *Constr. Build. Mater.* 262 (2020). 120036. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120036>

[29] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

[30] VILELA, A. P., EUGÊNIO, T. M. C., OLIVEIRA, F. F., MENDES, J. F., RIBEIRO, A. G. C., VAZ, L. E. V. S. B., MENDES, R. F. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. *Construction and Building Materials*. 262 (2020) 120883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

[31] NASCIMENTO, A. S., SANTOS, C. P., MELO, F. M. C., OLIVEIRA, V. G. A., OLIVEIRA, R. M. P. B., MACEDO, Z. S., OLIVEIRA, H. A. Production of plaster mortar with incorporation of granite cutting wastes. *Journal of Cleaner Production* 265 (2020) 121808. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121808>

[32] LIMA, R. C. O.; NEVES, G. A.; CARVALHO, J. B. Q. Durabilidade de tijolos de solo-cimento produzidos com resíduo de corte de granito. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 5.2, p. 24-31, 2010.

[33] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10834: bloco de solo-cimento

sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2013b.

[34] CHEN, J. J., LI, B. H., Ng, P. L., KWAN, A. K. H. Adding granite polishing waste to reduce sand and cement contents and improve performance of mortar. *Journal of Cleaner Production*. 279 (2021) 123653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123653>

[35] SIQUEIRA, F. B., HOLANDA, J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil–cement bricks. *Journal of Environmental Management*. 131 (2013) 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>

[36] CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia. Cartilha para construção de paredes monolíticas em solo-cimento. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: BNH/DEPEA, 1984, 32p.

[37] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10834: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos, Rio de Janeiro, 2012b.

# ESTUDO PARA INCORPORAÇÃO DE CINZA DE MADEIRA EM TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

*Patricia C. Souza,  
Elvia S. S. Nascimento,  
Luciano Melo,  
Herbet A. Oliveira,  
Vanessa G. O. Almeida,  
Fernanda M. C. Melo*

## RESUMO

Esse estudo teve como objetivo produzir tijolo de solo-cimento com incorporação de cinza de madeira, proveniente da indústria têxtil. O resíduo foi substituto parcial do solo e do cimento na fabricação dos tijolos. Foram confeccionados 91 corpos de prova e 7 formulações, em diferentes proporções de substituição: 10, 20 e 30%. Os materiais componentes da mistura foram caracterizados. Os tijolos de solo-cimento foram submetidos aos ensaios de massa específica, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade. Constatou-se que a substituição de 10% do cimento pelo resíduo resultou em um tijolo com melhor resistência à compressão, durabilidade e menor absorção. Concluindo-se que a reutilização da cinza de madeira na produção do tijolo de solo-cimento é uma opção viável e sustentável, por ser uma alternativa para destinação do resíduo e redução do consumo do cimento Portland, que gera um alto volume de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante sua produção.

**Palavras-chave:** Materiais sustentáveis. Tijolo de solo-cimento. Cinza de madeira.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem uma grande importância para humanidade, pois atrelado a ele se investe economicamente em uma sociedade. Junto com esse crescimento, nasce a necessidade de produzir materiais sustentáveis, que atendam aos requisitos técnicos, assim como os materiais convencionais e, contribuam para redução dos resíduos sólidos e da extração de materiais naturais. Para que isso aconteça, é necessário um melhor aproveitamento dos resíduos, seja os gerados pela própria construção civil ou os resíduos de outros segmentos, como os industriais.

Sabe-se que muitas indústrias adotam a geração de energia em forma de calor através da queima de madeira, produzindo assim, uma grande quantidade de resíduos, dentre eles as cinzas de madeira [1]. Pesquisadores vêm aprimorando seus estudos, demonstrando a possibilidade de utilização das cinzas de madeira em materiais da construção civil, sendo apresentada como uma oportunidade de reaproveitamento, a partir do estudo da sua composição físico-química e mineralógica [2]. Porém, vale ressaltar que a incorporação de cinzas da madeira, como substituição parcial do cimento, interfere na trabalhabilidade do material [3].

Chen e Wu [4] pesquisaram sobre os tijolos leves fabricados a partir de solo moído, lodo têxtil e cinza de carvão. Foi possível produzir tijolos com uma resistência à compressão de 13,7 MPa, densidade aparente de 1,47 g/cm<sup>3</sup>, absorção de água de 14,6% e contração volumétrica de 13,61%, após a sinterização.

Ribeiro [5] utilizou a cinza de madeira proveniente do processo de queima, da indústria de cerâmica vermelha, na incorporação em tijolos de solo-cimento. Resultando nos valores recomendados pela NBR 10834 [6] para resistência à compressão, e para valores individuais absorção de água abaixo de 22%, nas proporções de 10 e 30%, sendo que a incorporação de 30% apresentou os resultados mais satisfatórios.

Dentre os materiais que possibilitam a incorporação de resíduos estão os tijolos de solo-cimento [5,7-14], obtido da mistura de solo, cimento e água. O tijolo é um dos componentes básicos da construção civil, seja de qualquer tipo, local ou classe. Porém, o tijolo convencional agride muito o meio ambiente com seu processo de fabricação devido aos fornos de olarias para realizar o cozimento [15]. Em contrapartida, tem-se o tijolo de solo-cimento que no seu processo de fabricação, a secagem é feita apenas de forma natural, assim minimizando o consumo energético; além de ser um material alternativo [16].

Dentre as vantagens de se utilizar o solo-cimento, podemos citar tecnologia simples, disponibilidade do solo nas regiões, possibilidade de correções na sua granulometria, conforto térmico e acústico, durabilidade e redução de realização de manutenções, além de eliminar etapas construtivas, tais como chapisco, emboço e reboco.

A fim de contribuir para ampliação de estudos que contemplam materiais sustentáveis, e considerando a escassez de pesquisas que incorporam o

resíduo de madeira em tijolos de solo-cimento, não havendo quantidade de dados que validem sua influência nas propriedades do tijolo, essa pesquisa tem como o objetivo produzir tijolos de solo-cimento com incorporação de cinza de madeira, resíduo proveniente da indústria têxtil, considerando a predominância desse ramo industrial no município de Estância – SE. Para isso, foram então produzidas sete formulações, adotando-se o traço de referência 1:8 (cimento: solo). O solo e o cimento foram substituídos parcialmente pelo resíduo da cinza de madeira nas proporções de 10, 20 e 30%. Os materiais componentes da mistura foram caracterizados, conforme normas técnicas. Os tijolos de solo-cimento foram submetidos aos ensaios de massa específica, absorção de água e resistência à compressão.

## **2. EXPERIMENTAL**

### **Materiais empregados na composição dos tijolos**

O cimento utilizado foi do tipo CP V-ARI-RS (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial com Resistência a Sulfatos). Foram realizados os seguintes ensaios com o cimento: determinação do índice de finura [19], determinação da pasta de consistência normal [20], determinação do tempo de pega [21], determinação da massa específica [22] e determinação da resistência à compressão [23].

O solo utilizado na confecção do tijolo de solo-cimento foi coletado do terreno do Instituto Federal de Sergipe (IFS), localizado no município de Estância, estado de Sergipe. Em seguida, o solo foi depositado em recipientes para secagem em estufa a 110 °C, durante 24h. Posteriormente, foi destorroado, manualmente com mão de gral, recoberta de borracha, no almofariz de porcelana, em seguida, separou-se o solo passante na peneira de 600 µm. O material foi depositado em recipientes fechados para não absorver umidade do ar, até o momento de ser utilizado.

Seguindo os requisitos gerais da NBR 10833 [24] foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: análise granulométrica [25], determinação da massa específica aparente do solo [26], determinação da massa específica real [27], determinação do limite de liquidez [28] e limite de plasticidade [29].

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) do solo e da cinza de madeira foi realizada em um microscópio de marca Jeol, modelo JSM-6510LV.

A cinza utilizada nesta pesquisa foi fornecida pela Indústria Atual Têxtil, localizada no município de Estância/SE. A madeira utilizada na queima é resultante do eucalipto. O material foi coletado em forma de pó fino, depositado em recipientes e colocado na estufa por 24 h na temperatura de 110 °C. Em seguida, peneirado (1,18 mm, 600 µm e 75 µm) para posteriormente ser utilizado na realização dos ensaios de caracterização e na produção dos tijolos de solo-cimento. A caracterização do resíduo foi realizada adotando as normas utilizadas nos ensaios do solo e cimento. Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras de cinza foram determinados através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento no EZ Scan, do Primini Rigaku, utilizando amostras com massa em torno de 12 g, que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 60 mm e espessura de 5 mm, aproximadamente.

## **Dosagem e preparação das amostras**

A partir da análise granulométrica do solo coletado, constatou-se que o mesmo se tratava de um solo muito argiloso, apresentando baixa resistência à compressão dos tijolos, portanto, com necessidade de correção. Assim, após a realização de vários testes experimentais, determinou-se que o solo a ser utilizado como referência seria corrigido com 70% de areia, com teor de umidade de 14%. Destaca-se que os solos ricos na fração areia e com baixa plasticidade são os mais indicados para produção de tijolo solo-cimento, pois estabilizam com menor quantidade de cimento [9].

Foram então produzidas sete formulações, conforme Tabela 1, adotando-se o traço de referência 1:8 (cimento: solo), assim formando as misturas. Nas formulações Ts<sub>10%</sub>, Ts<sub>20%</sub> e Ts<sub>30%</sub>, o solo foi substituído parcialmente pelo resíduo da cinza de madeira, tendo na sua mistura variação na porcentagem de água, conforme aumentava-se a quantidade de resíduo, a mistura apresentava-se mais seca, assim inviabilizando a prensagem. Nas formulações Tc<sub>10%</sub>, Tc<sub>20%</sub> e Tc<sub>30%</sub>, o cimento foi substituído parcialmente pelo mesmo resíduo, porém, sem necessidade de variação de umidade.

**Tabela 1.** Formulações dos tijolos de solo-cimento.

Nomenclatura	Cimento (%)	Solo (%)	Resíduo (%)	Teor de umidade (%)	Teor de resíduo (%)
Ref.	10	90	-	14	-
Ts <sub>10%</sub>	10	81	9	14	10
Ts <sub>20%</sub>	10	2	18	18	20
Ts <sub>30%</sub>	10	63	27	20	30
Tc <sub>10%</sub>	9	90	1	14	10
Tc <sub>20%</sub>	8	90	2	14	20
Tc <sub>30%</sub>	7	90	3	14	30

A produção dos tijolos foi realizada utilizando uma prensa manual da marca Tec Máquinas, modelo Tec11, de cada formulação foram moldados 13 tijolos com dimensões de 25 cm x 12,5 cm x 6,5 cm, atendendo as especificações da NBR 10834 [6]. A mistura foi realizada manualmente: primeiro a mistura do cimento, solo e resíduo e, posteriormente, acrescentou-se a água com auxílio de um borrifador. Após realização desse processo, foi pesado 3700 g da mistura para a prensagem de cada tijolo, determinadas após tentativas para obter a quantidade máxima de mistura possível de ser prensada manualmente. Com os tijolos confeccionados, foi verificada sua respectiva massa específica aparente e, em seguida, separados sete tijolos, para realização do ensaio de resistência à compressão, três tijolos para o ensaio de absorção de água e três tijolos para o ensaio de durabilidade.

Após a prensagem, os tijolos foram dispostos em um recipiente retangular e, em seguida, colocados em uma superfície plana para cura, onde permaneceram por sete dias, protegidos do vento e da insolação direta. Para a análise dimensional dos treze tijolos produzidos, foi verificada a tolerância de  $\pm 1$  mm para comprimento, largura e altura.

## Ensaio de caracterização dos tijolos no estado endurecido

Passados sete dias de cura, os tijolos foram submetidos aos ensaios de caracterização no estado endurecido, conforme a NBR 10834 [6] e NBR 13554 [18]. Para análise dos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se a normalidade dos dados e, assim, realizou-se uma análise estatística através da metodologia análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey.

Para realizar o ensaio de resistência à compressão, os sete tijolos foram capeados conforme a NBR 8492 [17] e cortados ao meio perpendicularmente à maior dimensão, conforme Figura 1. Após 12 h, obtendo total endurecimento da pasta cimentícia, os prismas foram rompidos, em prensa, do modelo Contenco HD-200T, utilizada para realizar o ensaio de resistência à compressão.



**Figura 1.** Preparação dos tijolos para o ensaio de resistência à compressão (Fonte: Autor).

O ensaio de absorção de água foi determinado segundo a NBR 8492 [17]. Após a cura de sete dias, os tijolos foram colocados na estufa por 24 h e, posteriormente, pesados para obter seus pesos secos. Em seguida, depois de atingir temperatura ambiente, foram submersos em água por mesmo período de tempo e pesados para obter seus pesos saturados. A massa específica aparente seca dos corpos de prova foi determinada pela relação entre a massa do corpo cerâmico, em gramas, e seu volume, em  $\text{cm}^3$ . O ensaio de durabilidade foi realizado conforme a NBR 13554 [18], utilizando três corpos de prova, no qual o ensaio consiste em um ciclo de 48 h, entre molhagem e secagem, com seis repetições.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos ensaios executados e descritos no tópico 2, para os materiais individualmente, e para o tijolo de solo-cimento, já como componente construtivo.

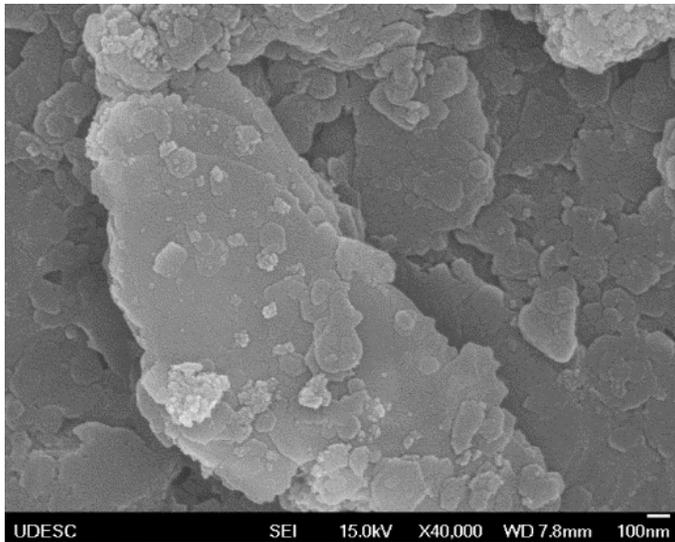
#### **Caracterização físico-química dos materiais empregados na composição dos tijolos**

Na Tabela 2 são apresentados os resultados encontrados para o cimento, resíduo e as misturas do cimento com resíduo. O resíduo utilizado nessa composição foi o passante na peneira 75  $\mu\text{m}$ . É possível identificar que o resíduo influenciou no tempo de início de pega, para um percentual de água de 35%, determinado para o cimento e adotado para as misturas, porém, ainda dentro dos limites estabelecidos em norma ( $< 60$  min). A resistência à compressão diminui gradativamente conforme aumenta-se a quantidade de resíduo de cinza de madeira. A massa específica real não teve variação significativa conforme foi se acrescentando o resíduo de cinza de madeira.

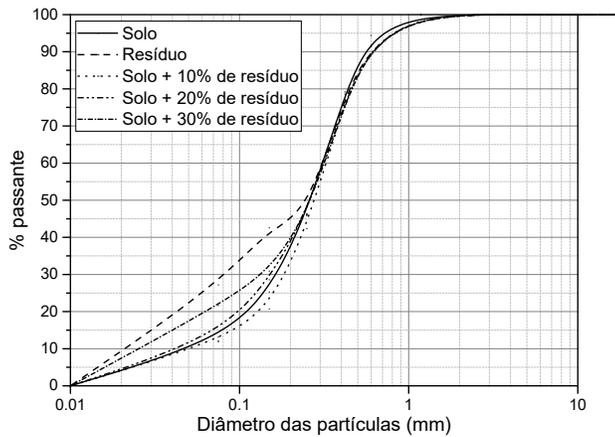
Na Figura 2 é apresentada a microscopia eletrônica de varredura do solo coletado, onde observa-se a presença de placas de caulinita. A curva granulométrica das matérias-primas e suas misturas são plotadas na Figura 3, sendo todos os materiais classificados como bem graduados e mediantemente uniforme, considerando os coeficientes de uniformidade e de curvatura. Assim, verificou-se que o solo corrigido e suas misturas atendem aos critérios normativos, apresentando um passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$ , de no mínimo 10%. A mistura com substituição de 30% do resíduo apresentou maior quantidade de material fino (21,61%) devido a granulometria do resíduo, que possui um maior percentual de finos (27,19%) em comparação ao solo (12,03%).

**Tabela 2.** Resultados obtidos com os ensaios físicos do cimento.

Ensaio	Cimento	Resíduo	Cimento + 10% de resíduo	Cimento + 20% de resíduo	Cimento + 30% de resíduo
Pasta de consistência normal (A%)	35	35	35	35	35
Início de pega (min)	140	-	78	96	93
Resistência à compressão (MPa)	34,25	-	30,99	26,05	18,98
Índice de finura (%)	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	3,037	2,556	3,063	3,033	2,952



**Figura 2.** Microscopia eletrônica de varredura do solo (Fonte: Autor).



**Figura 3.** Curvas granulométricas do solo, do resíduo e das misturas solo+resíduo  
(Fonte: Autor).

Na Tabela 3 constam os resultados obtidos para esses ensaios realizados com o solo e o solo com resíduo. Os resultados encontrados certificaram que o solo e as misturas atendem a NBR 10833 [24], resultando em um  $LL \leq 45\%$  e  $IP \leq 18\%$ . O solo estudado pode ser classificado como um material com baixa plasticidade e, portanto, adequado para solo-cimento.

Com relação ao resíduo de cinza de madeira, foi verificado que o resíduo é um material considerado não plástico (NP), ideal para ser utilizado na produção de massas cimentícias de solo-cimento, uma vez que o resíduo pode influenciar positivamente nas propriedades tecnológicas [5]. O resíduo apresentou massa específica aparente (MEA) menor que o solo, o que resultou na redução da MEA das misturas. Os resultados encontrados mostram que não houve uma variação significativa na massa específica real quando o solo foi substituído pelo resíduo.

**Tabela 3.** Caracterização física do solo, resíduo e misturas do solo com resíduo.

Parâmetros	Solo corrigido	Resíduo	Solo + 10% de resíduo	Solo + 20% de resíduo	Solo + 30% de resíduo
IP	7,34	-	NP	NP	NP
LL	17	-	16,6	13,41	14,05
MEA (g/cm <sup>3</sup> )	1,430	0,563	1,261	1,146	1,206
MER (g/cm <sup>3</sup> )	2,635	2,465	2,702	2,664	2,638

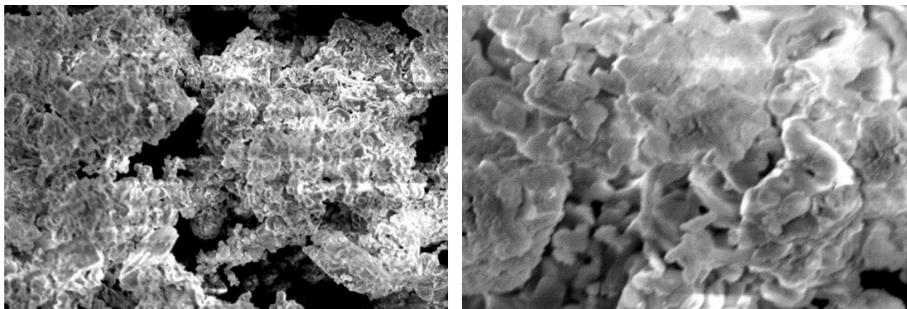
IP: índice de plasticidade; LL: limite de liquidez; MEA: massa específica aparente; MER: massa específica real; NP: Não plástico.

A composição química e mineralógica das cinzas de madeira é apresentada na Tabela 4. Há predominância do óxido de cálcio (69,643%) em sua composição, a exemplo de outros estudos que utilizaram cinzas de madeira de eucalipto [5, 27]. Os silicatos de cálcio hidratado e o óxido de cálcio, são os principais produtos de hidratação do cimento Portland [34]. Nota-se que as cinzas de madeira, contendo 6,69% de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> não atendem a um dos requisitos químicos mínimos para serem classificados como material pozolânico [30]. Outros autores [31] que utilizaram cinza de madeira semelhante ao dessa pesquisa também encontraram outros parâmetros que não atendem aos requisitos da NBR, como perda ao fogo de 23,40%, maior que 10%.

**Tabela 4.** Caracterização química das cinzas de madeira.

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	SrO
-	69,643	7,416	-	5,302	1,441	1,389	6,063	7,795	0,527	0,424
Fe	Ca	K	Na	Si	S	Al	Mg	P	Cl	Sr
-	76,740	8,479	-	3,049	0,739	0,985	4,339	4,327	0,702	0,641

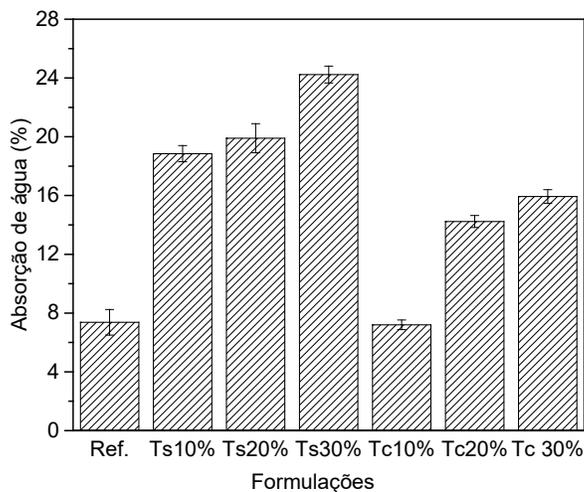
Os aspectos morfológicos das partículas do resíduo de cinzas de madeira foram obtidos através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), ilustrados na Figura 4. Observou-se que o resíduo cinza de madeira é composto principalmente por partículas homogêneas, com formatos irregulares, semelhante a pesquisas anteriores [1,5].



**Figura 4.** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aumento de 1000x e 5000x.  
(Fonte: Autor).

## Ensaio de caracterização dos tijolos no estado endurecido

Na Figura 5 estão os resultados obtidos no ensaio de absorção de água, realizado com sete dias de idade. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 187,94$ ;  $f_{\text{critico}} = 2,92$  e valor de  $p = 7,3 \cdot 10^{-12}$ ). Com o teste de Tukey, verificou-se as diferenças significativas.

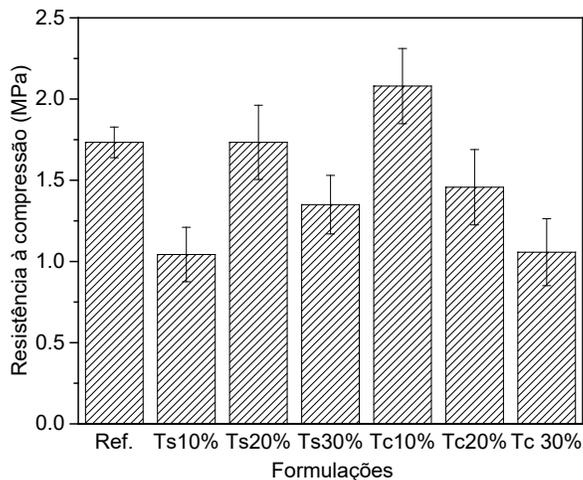


**Figura 5.** Resultados dos ensaios de absorção de água (Fonte: Autor).

Logo, fazendo um comparativo entre as substituições, tanto pelo solo, quanto pelo cimento é notório que em ambas as substituições, há um aumento da absorção de água à medida que se aumenta o teor de adição do resíduo. Isso pode estar relacionado à superfície rugosa do resíduo que conseqüentemente reteve mais água na composição, gerando maior quantidade de vazios. Outros autores [31] observaram que a absorção da cinza de madeira foi de 13,3%, valor bem superior ao da areia 0,76% (que corresponde a 70% da composição do solo da presente pesquisa). Além disso, a cinza é mais porosa do que a areia de quartzo. No estudo de Teixeira et. al. (2019), observou-se que os maiores valores do aumento do teor de vazios de ar foram para as misturas com a incorporação cinzas.

A formulação  $Ts_{30\%}$  apresentou a maior absorção (24,2%), porém, os demais traços resultaram em valores de absorção menores que o especificado na NBR 10834 [6], cujos valores médios de absorção devem ser menores ou igual a 20% e valores individuais menores ou igual a 22%, com idade mínima de até sete dias. Vale ressaltar que o  $Tc_{10\%}$  apresentou o resultado mais satisfatório, semelhante ao tijolo de referência.

A Figura 6 ilustra os resultados de resistência à compressão dos tijolos produzidos, com substituição do solo e do cimento. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 19,01$ ;  $f_{\text{critico}} = 2,36$  e valor de  $p = 5,91.10^{-10}$ ). Com o teste de Tukey, verificou-se que diferença significativa foi registrada para o  $Ts_{10\%}$  e  $Tc_{30\%}$ , com redução de 40% da resistência em relação ao tijolo de referência.



**Figura 6:** Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (Fonte: Autor).

Nessa pesquisa não foi possível definir um padrão de comportamento com o acréscimo de incorporação das cinzas em substituição ao solo, no entanto, verifica-se que o Ts<sub>20%</sub> apresentou resistência igual ao tijolo de referência. Já nas substituições do cimento pelo resíduo, observa-se decréscimo na resistência à medida que se aumenta o teor de incorporação. Outros autores [31] estudaram que o teor de álcalis nas cinzas de madeira parece ser um parâmetro limitante para o uso de grandes quantidades como substituto do cimento. Em sua pesquisa encontraram que a quantidade de álcalis disponíveis na cinza utilizada não permitiu a substituição do cimento Portland em teores acima de 17% em peso. Porém, nessa pesquisa, o traço Tc<sub>10%</sub> resultou em um tijolo com resistência à compressão superior, em 20%, ao tijolo de referência, superando ao requerido pela NBR 10834 [6], que determina resistência média de 2,0 MPa e individual de 1,7 MPa.

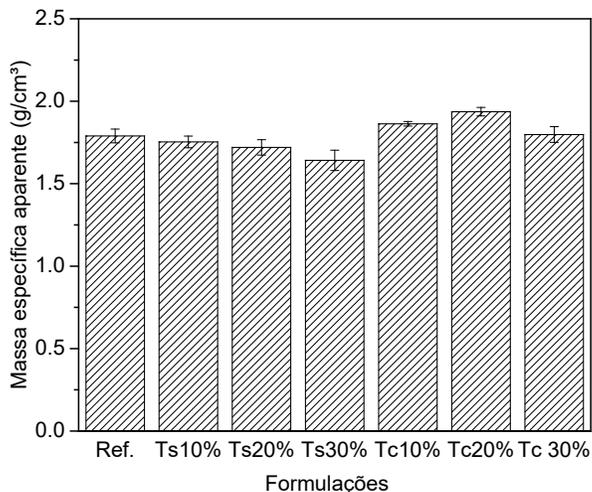
O resultado do desempenho mecânico pode ser correlacionado com a composição química da cinza. Na pesquisa de Acordi [31], que utilizaram três tipos de cinza de madeira com composições químicas diferentes, foi possível observar que os maiores valores de resistência mecânica à compressão ocor-

reram com cinzas que tinham um maior teor de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e menor perda ao fogo. O pior resultado foi obtido para a condição oposta, para cinza de madeira da indústria têxtil, com caracterização semelhante a cinza utilizada nesta pesquisa.

No entanto, até 5% de substituição pelo cimento essa resistência foi melhorada, o que pode ser atribuído a massa específica aparente mais baixa ( $563 \text{ kg/m}^3$ ) e alta absorção de água (relatadas em outras pesquisas [31]), em comparação com o solo utilizado. A cinza, até 5%, pode ter ajudado no aumento da resistência à compressão. Este resultado pode estar ligado a um fenômeno denominado cura interna, creditado à água retida nos poros dos agregados e sua ação promotora da hidratação do cimento ao longo do tempo [31].

Teixeira et al[32] observaram que até 90 dias de cura, a argamassa de referência apresentou os maiores valores de resistência à compressão. Após esse período, formulações contendo a cinza em substituição ao cimento apresentaram valores semelhantes a 100% de argamassa somente com cimento. Concluindo que a introdução de cinzas volantes leva a um atraso no processo de hidratação, o que leva a um retardo no aumento da resistência à compressão [32]. Pode-se observar que, com o aumento do tempo de cura (90 e 180 dias), não foram observadas diferenças significativas entre as argamassas com cinza. O uso de cinzas volantes em materiais de construção retarda a reação de hidratação do cimento e, durante o tempo de cura, o hidróxido de cálcio dissolvido na água presente na argamassa reage com as cinzas volantes para formar produtos de reação sólidos, que preencherão os poros capilares, parcial ou totalmente.

Na Figura 7 são apresentados os valores de massa específica aparente seca dos tijolos. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 10,63$ ,  $f_{\text{crítico}} = 2,85$  e valor de  $p = 1,6.10^{-4}$ ).



**Figura 7.** Massa específica aparente seca dos tijolos (Fonte: Autor).

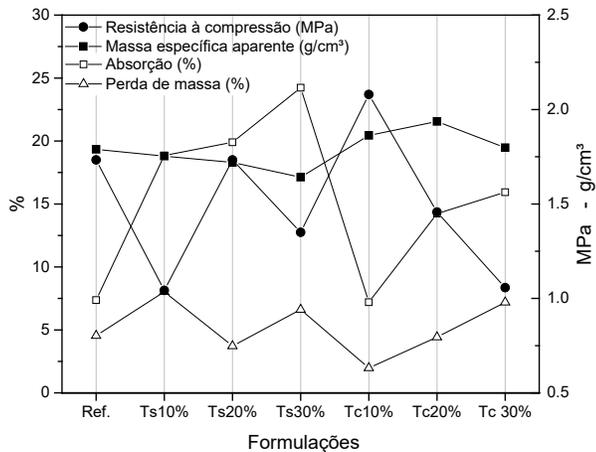
Os traços Ts<sub>30%</sub> e Tc<sub>20%</sub> apresentaram uma redução de 8% na massa específica dos tijolos produzidos. Constata-se que analisando o aumento do teor de substituição, tanto pelo cimento como pelo solo, não alterou significativamente a massa específica dos tijolos, o que pode ser atribuído ao padrão de massa utilizado para prensagem dos tijolos. Assim, como Teixeira et al [32] não observaram diferenças significativas na densidade a fresco entre as misturas contendo cinzas.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de perda de massa dos tijolos, utilizado como parâmetro para avaliação da durabilidade. Os resultados mostraram que não existe uma diferença significativa entre as médias ( $F = 2,56$ ;  $f_{\text{crítico}} = 3,87$  e valor de  $p = 0,12$ ), soma-se a essa análise o desvio das amostras e o número reduzido de amostras especificados em norma dos tijolos para determinação da perda de massa. No entanto, vale ressaltar que todas as formulações apresentaram percentual de perda de massa dentro do valor limite considerado para construção de solo-cimento que é 10% [35].

**Tabela 5.** Resultados obtidos com ensaio de durabilidade.

Traço	Ref.	Ts <sub>10%</sub>	Ts <sub>20%</sub>	Ts <sub>30%</sub>	Tc <sub>10%</sub>	Tc <sub>20%</sub>	Tc <sub>30%</sub>
Perda de massa (%)	4,55 ± 0,9	8,03 ± 0,7	3,73 ± 1,0	7,20 ± 0,8	1,98 ± 0,9	4,42 ± 2,0	7,19 ± 2,2

Na Figura 8 estão apresentados graficamente os resultados obtidos para absorção de água, resistência à compressão, durabilidade e massa específica. Constata-se que a substituição de 10% de cinza de madeira pelo cimento (Tc<sub>10%</sub>) foi a que resultou na melhor resistência à compressão, menor perda de massa, absorção e massa específica semelhantes ao tijolo de referência. A substituição de 20% do solo pelo resíduo, apresentou resistência à compressão semelhante ao de referência, e valores de perda de massa e absorção aceitáveis. Portanto, é possível atender à sustentabilidade e aos critérios técnicos. A sustentabilidade quanto à redução do teor de areia, teor de cimento e aproveitamento de resíduos, pois a fabricação de cimento consome muita energia e combustível fóssil, o que dá origem a grandes pegadas de energia e carbono e causa o aquecimento global, enquanto a mineração de areia causa consideráveis riscos ecológicos. O esgotamento maciço da areia natural destrói terras agrícolas, danifica o habitat da fauna, levando a deficiências de água doce e alimentos para os humanos. Além disso, a dragagem de areia da bacia do rio pode potencialmente desestabilizar as margens dos rios e minar os aterros de estradas e pontes [36].



**Figura 8.** Resultados obtidos das propriedades estudadas para o tijolo de solo-cimento (Fonte: Autor).

## 4. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi estudada a influência da incorporação do resíduo de cinza de madeira, proveniente da indústria têxtil, nas propriedades dos tijolos de solo-cimento. Os resultados experimentais obtidos neste trabalho permitiram algumas conclusões.

O resíduo cinza de madeira quando incorporado à massa de solo-cimento modifica as propriedades físicas, mecânicas e sua durabilidade. Não foram registradas fissuras ou outras anomalias nos tijolos, após o processo de cura.

A incorporação de cinza de madeira nas formulações dos tijolos de solo-cimento provocou alterações nas propriedades mecânicas. Substituições com 10% do resíduo pelo cimento resultaram em resistência superior ao de referência. No entanto, conforme o teor de resíduo aumenta, menor é a resistência à compressão simples. As substituições pelo solo apresentaram comportamentos diversificados em relação ao tijolo de referência.

Todas as formulações apresentaram percentual de perda de massa menor que 10%, ideal para construção de solo-cimento.

A substituição de 10% de cinza de madeira pelo cimento ( $Tc_{10\%}$ ) foi a que resultou na melhor resistência à compressão, menor perda de massa, absorção

e massa específica semelhantes ao tijolo de referência. Já a substituição de 20% do solo pelo resíduo, apresentou resistência à compressão semelhante ao de referência, e valores de perda de massa e absorção aceitáveis.

Conclui-se que a utilização da cinza de madeira na produção do tijolo de solo-cimento é uma alternativa viável considerando as propriedades requeridas para o tijolo. Contribuindo para uma destinação adequada para o resíduo e redução de extração de recursos naturais. Vale destacar que a incorporação de cinzas de madeira, em substituição ao cimento Portland, contribui para a redução da emissão de dióxido de carbono gerado durante sua produção.

## REFERÊNCIAS

- [1] Bennack, V., Dalla Valentina, L. V. O., Folgueras, M. V. *Materials Science Forum* (online). 881 (2016) 341.
- [2] Siddique, R. *Resources Conservation and Recycling*. 67 (2012) 27.
- [3] Chowdhury S., Mishra, M. Sujan, yO. a. *Ain Shams Engineering Journal*. 6 (2015) 429.
- [4] Chen, C., Wu, H.. *Environmental Technology*. 39 (2018) 1359.
- [5] Ribeiro, S. V. *Doctoral Thesis, UENF- PPGECM, Campos dos Goytacazes, RJ* (2017).
- [6] NBR 10834, *Soil-cement block without structural function - requirements*, ABNT, Rio de Janeiro (2013).
- [7] Eko, R. M., E. D. Offa, T. Y. Ngatcha, L. S. Minsili. *Construction and Building Materials*. 35 (2012) 340-346.
- [8] Siqueira. B., Holanda, N. F. J. *Environ. Manage.* 131 (2013) 1.
- [9] Rodrigues, L. P., Holanda N. F. *Cerâmica*. 59 (2013) 551.
- [10] Rodrigues L. P., J. Holanda N. F. *Procedia Materials Science*. 8 (2015) 197.
- [11] Ashour T., Korjenic A., S. Korjenic, W. Wu. *Energy and Buildings*. 104 (2015) 139-146.
- [12] Vilela A. P., Eugênio, T. M. C., Oliveira F. F., J. F. Mendes, A. G. C. Ribeiro, L. E. V. S. B. Vaz, R. F. Mendes. *Construction and Building Materials*. 262 (2020) 120883.
- [13] Barros, M. M., Oliveira, M. F. L., Ribeiro, R. C. C., Bastos D. C., Oliveira M. G. *Construction and Building Materials*. 232 (2020) 117252.
- [14] Xiao J., Shen J., Bai M., Gao Q., Wu Y. *Journal of Cleaner Production*. 290 (2021) 125742.
- [15] Agrafiotis, C., Tsoutsos, T. *Applied Thermal Engineering*. 21 (2001) 1231.
- [16] Torgal F. P. , Jalali, S. S. *Arte & Construção*. (2011).
- [17] NBR 8492, *Soil-cement brick - dimensional analysis, determination of compressive strength and water absorption: test method*, ABNT, Rio de Janeiro (2012).

- [18] NBR 13554, Soil-cement - wetting and drying durability test: test method, ABNT, Rio de Janeiro (2012).
- [19] NBR 11579, Portland Cement - determination of the fineness index by means of a 75  $\mu\text{m}$  sieve (n° 200), ABNT, Rio de Janeiro (2013).
- [20] NBR 16606, Portland Cement - determination of normal consistency paste, ABNT, Rio de Janeiro (2018).
- [21] NBR 16607, Portland Cement - Determination of setting times, ABNT, Rio de Janeiro (2018).
- [22] NBR 16605, Portland Cement and other powdered materials - determination of specific gravity, ABNT, Rio de Janeiro (2017).
- [23] NBR 7215, Portland Cement - determination of the compressive strength of cylindrical specimens, ABNT, Rio de Janeiro (2019).
- [24] NBR 10833, Manufacture of brick and soil-cement blocks using a manual or hydraulic press - procedure, ABNT, Rio de Janeiro (2013).
- [25]. NBR 7181, Soil - granulometric analysis, ABNT, Rio de Janeiro (2018).
- [26] NBR 7185, Soil - determination of apparent specific gravity, in situ, using the sand flask, ABNT, Rio de Janeiro (2016).
- [27] DNER-ME 093/94, Soils - determination of specif gravity (1994).
- [28] NBR 6459, Solo - determination of the liquid limit, ABNT, Rio de Janeiro (2017).
- [29] NBR 7180, Soil - determination of the plasticity limit, ABNT, Rio de Janeiro (2016).
- [30] NBR 12653, Pozzolanic materials - requirements, ABNT, Rio de Janeiro (2015).
- [31] Acordi J., Luza A., Fabris D. C. N., Raupp-Pereira, F. A., Noni De Jr, O. R. K. Montedo. Construction and Building Materials. 240 (2020) 117877.
- [32] Teixeira E. R., Mateus R., Camões, A. Branco F. G. Construction and Building Materials. 197 (2019) 195-207.
- [33] Borges, D. ,Valverdes, G., Bianchi, J. L. Akasaki, T.F.S. Trentin. Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes. 5 (2017) 89.
- [34] Panzera, A. L. R. Sabariz, K. Strecker, P. H. R. Borges, D. C. L. Vasconcelos, W. L. Wasconcelos. Cerâmica. 56 (2010) 77.
- [35] Research and Development Center. Construction Manual with Soil-Cement. Camaçari: CEPED, ABCP, (1984).
- [36] Chen J. J., Li B. H., P. L. A. K. H., N. g., Kwan. Journal of Cleaner Production. 279 (2021) 123653.

# PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE ESTRUTURAL COM ARGILA EXPANDIDA E RESÍDUO DE CORTE DO GRANITO

*Hayala Karoline Santos Rodrigues,  
Herbet Alves de Oliveira,  
Fernanda Martins Cavalcante Melo,  
Vanessa Gentil de Oliveira Almeida*

## RESUMO

O concreto leve tem sido utilizado para fins estruturais, assim como para redução do peso próprio das estruturas de concreto. A utilização da argila expandida como agregado graúdo é economicamente viável na fabricação desses concretos, devido à redução de massa específica que estes agregados proporcionam. Em busca de um desenvolvimento sustentável, a indústria da construção civil vem utilizando resíduos gerados em empresas do setor de rochas ornamentais, como uma alternativa de minimizar os impactos ambientais. Nesta pesquisa, foram produzidos concretos leves com a incorporação do resíduo proveniente do corte de granito, em substituição parcial ao agregado miúdo (areia), nas proporções de 5, 10 e 15%. Foi produzida uma mistura de referência do concreto leve, utilizando argila expandida, areia e cimento, e misturas com substituições das porcentagens do resíduo do corte do granito, pelo agregado miúdo natural, mantendo constante o fator água/cimento, a sílica ativa e o superplastificante. Os corpos de prova produzidos foram caracterizados por meio dos ensaios físicos determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, ensaio de resistência mecânica (compressão axial) e durabilidade. As formulações realizadas apresentaram valores de massa específica e resistência à compressão compatíveis com o concreto leve estrutural. Com os resultados dos ensaios, concluiu-se que a substituição de 15% do resíduo foi a que apresentou maior resistência à compressão, massa específica satisfatória e melhor fator de eficiência. Adicionalmente, com relação à durabilidade do concreto, as formulações com a incorporação do resíduo de granito se apresentaram menos suscetíveis ao ataque de agentes químicos.

**Palavras-chave:** Concreto Leve. Argila Expandida. Resíduo de Granito.

# 1. INTRODUÇÃO

O concreto convencional é um dos materiais mais utilizados na construção civil. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) [1], o valor adotado da massa específica é de  $2400 \text{ kg/m}^3$ , representando uma grande parcela das ações totais de carga na estrutura, o que implica em construir fundações cada vez mais resistentes e, por sua vez, de elevado custo. Sendo assim, é benéfico que sua massa específica seja reduzida [2].

A substituição do agregado graúdo por argila expandida é uma das alternativas para reduzir o peso da estrutura, o qual quando comparado ao concreto convencional, apresenta uma maior taxa de absorção de água, menor densidade relativa, porém, apresenta boa resistência mecânica, resistência ao fogo, além de bom isolamento térmico e acústico [3,4]. De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015) [5] o concreto pode ser classificado como normal, leve, pesado ou denso. O concreto normal apresenta massa específica seca compreendida entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  e  $2800 \text{ kg/m}^3$ , o leve apresenta massa específica seca inferior a  $2000 \text{ kg/m}^3$  e o pesado com massa específica seca superior a  $2000 \text{ kg/m}^3$ .

Por possuir uma baixa massa específica, o concreto leve reduz consideravelmente o peso próprio dos elementos cimentícios, influenciando diretamente na economia da etapa de infraestrutura em uma obra [6]. A utilização deste concreto, quando comparado ao concreto convencional, proporciona também, uma redução nos custos com fôrmas e cimbramentos, devido à redução das solicitações. Uma vez que ocorre a redução no peso dos materiais manuseados e aumento da produtividade, pode-se obter uma economia com transporte e montagem de construções pré-fabricadas [7].

Na sociedade atual existe uma preocupação com o universo ambiental, onde as empresas necessitam desenvolver atividades que não agridam o meio ambiente. O setor da construção civil, preocupado com a sustentabilidade, vem desenvolvendo pesquisas destinadas a criação de fontes alternativas de matérias-primas. Uma das alternativas é a reutilização dos resíduos do beneficiamento das rochas ornamentais, especialmente o granito, em matrizes cimentícias [8].

Os resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais geram uma

grande quantidade de material, que na maioria das vezes são descartados de maneira irregular. No processo de corte, serragem e polimento são gerados uma lama com cerca de 20% de umidade, a qual é prejudicial ao meio ambiente, quando descartada diretamente nos rios, pois pode ocasionar o assoreamento, poluindo suas águas, ocasionando impactos ambientais [9, 10, 11]. Ainda, a eliminação do resíduo do pó do granito gera um grande problema, por ser um resíduo não biodegradável. Adicionalmente o resíduo acaba poluindo o ar (causando infecções dos olhos e problemas asmáticos) e da terra (o pó preenche os poros do solo impedindo o deslocamento das águas subterrâneas e reduzindo a produtividade do solo) [12]. Diante dos fatos, é observada a necessidade de encontrar destinos alternativos para seu reaproveitamento.

A utilização de materiais com características de filler (a exemplo do pó do granito) preenche os vazios existentes no concreto na zona de transição, sendo responsável pelo aumento ou diminuição da resistência. As adições minerais geram alterações nas propriedades do concreto, tanto no seu estado fresco quanto no endurecido [13].

Diversos autores [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] veem pesquisando sobre a utilização deste tipo de resíduo na construção civil, porém, o estudo desta aplicação em concreto leve com argila expandida ainda é escasso na literatura. Assim, esta pesquisa tem como objetivo produzir um concreto leve estrutural com a incorporação do resíduo proveniente do corte de granito em substituição parcial ao agregado miúdo (areia), nas proporções de 5, 10 e 15%, bem como avaliar suas propriedades físicas, mecânicas e a sua durabilidade.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização das matérias-primas**

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, resistente a sulfatos (CPV-ARI-RS). O agregado miúdo utilizado foi proveniente da cidade de Estância/SE. Foi utilizado resíduo do corte de granito, coletado na Empresa Mármore e Granitos Santana, Estância/SE, sendo que o mesmo foi passado na peneira 0,074 mm. O agregado leve utilizado foi argila expandida, cedido pela Empresa Cinexpan, são de dimensões de 5 mm

(C0500) e 15 mm (C1506).

Os agregados foram caracterizados por meio de ensaios físicos de análise granulométrica, conforme a NBR 248 (NM, 2003) [21] e massa unitária, segundo a NBR 45 (NM, 2006) [22]. A massa específica do resíduo do corte granito e do cimento foi determinada de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017) [23] e para o agregado miúdo, por meio da NBR NM 52 (ABNT, 2009) [24].

Foi realizada a caracterização química do resíduo de granito por meio da difratometria de raios X, em um equipamento da Rigaku, utilizando espaçamento de 1°/min. Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas semiquantitativas, pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10,0 g, que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

## **2.2 Preparação das Formulações**

A dosagem do concreto leve realizada no presente trabalho foi uma adaptação experimental do traço utilizado por Santos [25]. Na Tabela 1, são apresentadas as misturas realizadas nessa pesquisa, sendo uma mistura de referência, sem a substituição do resíduo do granito, e mais três misturas com as substituições do agregado miúdo em 5, 10 e 15%, respectivamente, pelo resíduo. Foram adicionados, em todas as formulações, 1,25% de superplastificante e 10% de sílica ativa, em relação ao peso do cimento. Testes experimentais, realizados inicialmente nessa pesquisa, indicaram que 20% ou mais de resíduo incorporado reduz drasticamente a consistência, inviabilizando a confecção de corpos de prova. A utilização da sílica ativa, na composição dos concretos leves estruturais, além de evitar o fenômeno de segregação do agregado de argila expandida, também contribui para redução da espessura da zona de transição entre agregado e a matriz de cimento [26].

**Tabela 1:** Traço em massa do concreto leve.

Formulação	Cimento	Areia	Argila C0500	Argila C1506	Resíduo	Relação a/c	SP	SA
MR	1	2,11	0,86	0,33	-	0,45	0,0096	0,077
5%	1	1,90	0,86	0,33	0,21	0,45	0,0096	0,077
10%	1	1,79	0,86	0,33	0,31	0,45	0,0096	0,077
15%	1	1,69	0,86	0,33	0,41	0,45	0,0096	0,077

MR: mistura de referência; a/c: relação água/cimento utilizado na preparação das misturas; SP: superplastificante em relação ao peso do cimento, 1,25%; SS: sílica ativa em relação ao peso do cimento, 10%

As etapas de mistura dos materiais na betoneira, para o concreto de referência, foram baseadas no estudo feito por Rossignolo [27]: primeiramente adicionou-se cimento, areia e 50% da água, misturados por 1 minuto. Sem parar a betoneira, adicionou-se a sílica ativa e o superplastificante, diluído em 50% do restante da água, misturados por mais 1 min, para, por último, ainda com a betoneira em movimento, adicionar-se as argilas C0500 e C1506, misturadas por mais 1 min. Por apresentar uma alta absorção de água, as argilas expandidas precisaram ser saturadas em água, por 24 h antes da concretagem, caso contrário, a trabalhabilidade seria comprometida. Para as misturas do concreto leve de argila expandida com o resíduo do corte de granito, seguiu-se as etapas prescritas para o concreto de referência, sendo que na segunda etapa, foi acrescentado o resíduo de granito.

Após o adensamento, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco cone, segundo a NBR 67 (ABNT, 1998) [28]. Para cada traço, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos, referentes aos ensaios de resistência à compressão axial, determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica e para o ensaio de durabilidade foram moldadas três fôrmas prismáticas. Após 24 h, foram desmoldados e imersos em água, onde permaneceram por 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016) [29].

## 2.3 Ensaios Realizados no Estado Fresco e Endurecido

Os concretos leves foram caracterizados em seu estado fresco, através do teste conhecido por *slump*, segundo as prescrições da NBR 67 (NM, 1998)

[28] e no estado endurecido, após os 28 dias de cura, foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de resistência à compressão axial, através da NBR 5739 (ABNT, 2018) [30], determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica pela NBR 9778 (ABNT, 2009) [31], e o ensaio de durabilidade que foi determinado através de uma adaptação da norma DNER – ME 089/94 [32].

As propriedades do concreto no estado endurecido foram analisadas com o auxílio de técnicas estatísticas. Fez-se uma análise de variância através do método estatístico ANOVA, no qual é gerado um parâmetro  $p$  que se for menor que o nível de significância adotado pelo teste (0,05), o fator em estudo influencia significativamente no resultado analisado, caso contrário, o fator não exerce influência significativa [35]. Para as diferenças significativas, foi realizado o teste Tukey para verificar entre quais formulações ocorria as diferenças. Essas análises visam uma melhor compreensão da influência dos parâmetros avaliados.

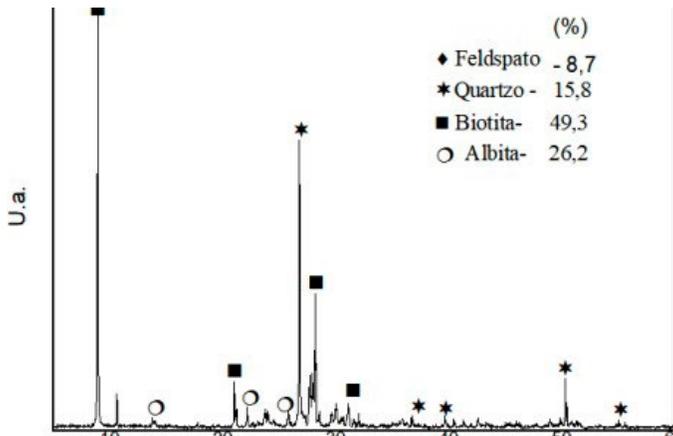
### **3. RESULTADOS**

#### **Caracterização das matérias-primas**

O resultado da caracterização dos materiais é apresentado na Tabela 2. Vale destacar que as massas unitárias do resíduo do corte de granito são mais baixas em relação às da areia, o que favorece a redução da massa específica do concreto. Na Figura 1 é apresentada a difratometria de raios X do resíduo. O resultado da análise mostra que há uma predominância das fases biotita, albita e quartzo, conforme apresentado na pesquisa de Moreira e Holanda [33].

**Tabela 2.** Caracterização física das matérias-primas utilizadas no concreto leve.

Matéria-prima	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura
Cimento	3,037 ± 0,010	-	-	-	-
Areia	2,632 ± 0,000	1,630 ± 0,013	1,595 ± 0,016	2,36	1,79
Resíduo do corte de granito	2,766 ± 0,018	1,267 ± 0,013	1,192 ± 0,007	2,36	0,83
Argila Exp C0500	2,592 ± 0,010	0,909 ± 0,000	0,823 ± 0,003	4,75	3,60
Argila Exp C1506	2,642 ± 0,020	0,522 ± 0,009	0,532 ± 0,003	19	6,56
Silica ativa	2,174 ± 0,000	-	-	-	-



**Figura 1.** Padrão de difratometria de raios X do resíduo de granito (Fonte: Autor).

Na Tabela 3 é apresentada a análise química do resíduo. O resíduo de granito apresenta composição química com a presença dos óxidos SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, além dos alcalis K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O, presentes na albita e feldspato, e é compatível para a utilização em argamassas na construção civil, entre outras aplicações, por ser inerte [34].

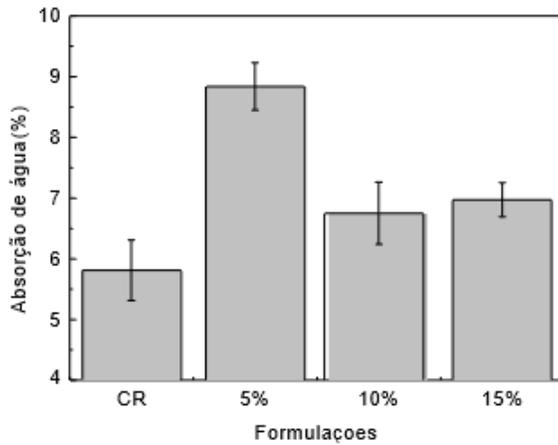
**Tabela 3.** Análise química do resíduo

Matéria-prima	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	ZrO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Resíduo	48,67	2,86	19,67	14,05	10,90	-	0,25	0,24	2,49	10,90

## Ensaio Realizados no Estado Fresco e Endurecido

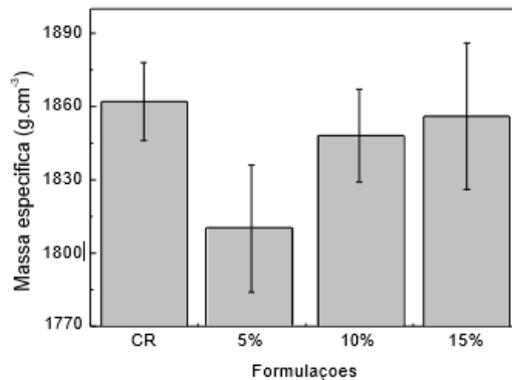
O concreto no estado fresco foi avaliado por meio da consistência e ensaio de abatimento. Os resultados obtidos foram entre 110 e 320 mm. Foi observado um aumento da consistência à medida que se aumenta a quantidade de resíduo nas misturas, devido a maior finura do resíduo por apresentar maior área específica e consumir mais água.

Na Figura 2 consta os resultados de absorção de água por imersão para todas as formulações, que representam a média de seis valores encontrados nos ensaios. Os resultados mostraram-se significativos, de acordo com o *software* ANOVA, ou seja,  $F = 50,8$ ,  $f_{\text{crítico}} = 3,49$  e  $p = 4,26 \cdot 10^{-7}$ . Logo, os resultados são diferentes, podendo afirmar que as variações não são iguais. Assim pode-se observar que houve um aumento no valor de absorção para todos os percentuais de substituição, o que pôde ser verificado por Gameiro [36] que avaliou o desempenho de durabilidade de um concreto estrutural contendo resíduos gerados pela indústria da marmoraria. Segundo o autor, a compactação da mistura é comprometida pela rugosidade do resíduo, resultando no pior empacotamento e maior retenção de ar, gerando uma união porosa, produzindo um concreto com maior absorção de água por imersão.



**Figura 2:** Absorção de água das formulações investigadas (Fonte: Autor).

Os resultados de massa específica estão plotados na Figura 3. De acordo com o ANOVA, o  $F = 1,14$ ,  $f_{\text{crítico}} = 3,2$  e  $p = 0,36$ . Pode-se concluir que o resíduo de granito não apresentou influência significativa de massa específica. Ainda, registra-se que mesmo para um percentual de incorporação de 15% de resíduo é possível produzir um concreto leve, pois todas as formulações obtiveram massa específica inferior a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , sendo assim, são considerados concretos leves, de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015) [5].



**Figura 3:** Massa específica das formulações investigadas (Fonte: Autor).

A Tabela 4 apresenta a média dos resultados da resistência à compressão axial, os resultados através do ANOVA mostraram que não são significativos, ou seja,  $F = 0,92$ ,  $f_{\text{crítico}} = 3,22$  e  $p = 0,456$ . Portanto, a substituição do resíduo não compromete a resistência do concreto leve. Semelhante a essa pesquisa, Vijayalakshmi, Sekar e Prabhu [15] verificaram que a substituição de até 15% da areia pelo resíduo, não altera a resistência do concreto. Portanto, todas as formulações podem ser aplicadas para fins estruturais, pois, segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) [5], o concreto leve para ser utilizado como elemento estrutural, deve apresentar resistência à compressão, aos 28 dias de idade, acima de 20 MPa.

**Tabela 4:** Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade dos concretos leves

Formulações	Resistência à compressão axial (MPa)
Concreto Referência	32,80 ± 0,60
Concreto com 5% do RCG	31,76 ± 2,03
Concreto com 10% do RCG	33,46 ± 1,88
Concreto com 15% do RCG	34,88 ± 2,97

RCG: Resíduo do corte do granito

A Tabela 5 apresenta a média dos resultados do Fator de Eficiência dos concretos leves.

**Tabela 5:** Fator de eficiência dos concretos leves

Formulações	Fator de eficiência (MPa.dm <sup>3</sup> /kg)
Concreto Referência	17,68 ± 0,26
Concreto com 5% do RCG	17,36 ± 1,19
Concreto com 10% do RCG	18,16 ± 1,01
Concreto com 15% do RCG	18,84 ± 1,71

RCG: Resíduo do corte do granito

De acordo com Rodrigues [37], o fator de eficiência (FE) é aplicado especialmente aos concretos leves de alto desempenho (CLAD). Diante da avalia-

ção realizada dos traços utilizados em obras, o concreto leve foi classificado, e diante dessa análise, pode-se concluir que o fator de eficiência encontrado em todos os concretos desta pesquisa estão na faixa de concreto leve estrutural que tem valores compreendidos entre 10 MPa.dm<sup>3</sup>/kg e 25 MPa.dm<sup>3</sup>/kg.

Ao analisar o fator de eficiência na Tabela 6, com os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias em função da massa específica para concreto leve estrutural, determinados pela NBR 35 (NM, 1995) [38], pode-se observar que os valores encontrados nesta pesquisa foram superiores.

**Tabela 6:** Fator de Eficiência dos concretos leves NM 35/95

Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Fator de eficiência (MPa.dm <sup>3</sup> /kg)
1840	28	15,22
1760	21	11,93
1680	17	10,12

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de durabilidade das formulações dos concretos leves de referência e com o resíduo do corte de granito. O valor da massa inicial e final de cada formulação foi calculado utilizando a média das três placas utilizada para cada traço.

**Tabela 7:** Perda de massa no ensaio de durabilidade em sulfato de sódio

Formulações	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Ganho de massa (%)
Concreto Referência	1527,30	1685,40	10,35 ± 0,83
Concreto com 5% do RCG	1579,47	1605,74	1,66 ± 0,17
Concreto com 10% do RCG	1502,62	1542,35	2,64 ± 0,85
Concreto com 15% do RCG	1625,42	1661,07	2,19 ± 0,37

RCG: Resíduo do corte do granito

Os resultados foram analisados e são significativos, ou seja, as variações não são iguais. O resultado de  $F = 128$ ,  $f_{\text{crítico}} = 4,06$  e  $p = 4,0 \times 10^{-4}$ . A incorporação do resíduo o ganho de massa, ao se comparar com o concreto de referência, é menor, evidenciando que todas as formulações com o resíduo

de granito mostraram- se resistentes ao sulfato de sódio, após o processo de imersão. Portanto, a substituição aumentou a durabilidade do concreto leve.

O ganho de massa ao finalizar o ciclo do ensaio, pode ser explicado pelo uso da sílica, pois as adições minerais proporcionam uma organização mais densa das partículas microcristalinas [39]. Com a imersão do concreto na solução do sulfato de sódio, ocorreu a cristalização dessa substância na estrutura interna do concreto, fazendo com que ocasionasse o ganho de massa do material.

Na avaliação da durabilidade dos corpos de prova, em que os mesmos foram imersos na solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , foi constatado que ao entrar em contato com a solução, ocorreu uma reação com o hidróxido de cálcio presente no cimento, formando um precipitado (quando na junção de duas substâncias, surgiu uma nova). Os resultados mostraram que as amostras expandiram, com conseqüente aumento da sua massa. Foi observado que as formulações com o resíduo de granito absorveram menos massa do que a de referência, indicando que houve menos perda, logo evidencia maior durabilidade [40].

## 4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, concluiu-se que a proposta de dosagem atendeu as expectativas de produzir concreto leve estrutural utilizando dois tipos de granulometrias de argila expandida, a C0500 e a C1506, com reaproveitando do resíduo de corte de granito.

Conforme aumentou-se a porcentagem de substituição do resíduo, ocorreu um aumento no índice de consistência do concreto, resultando na melhoria da trabalhabilidade. Foi verificado que com a incorporação do resíduo, a absorção de água aumentou e a massa específica não sofreu influência significativa em relação ao concreto de referência.

Com base nos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, a adição do resíduo não influenciou de forma significativa essa propriedade, em relação ao concreto de referência. Os resultados do fator de eficiência mostraram que a substituição de 15% do agregado miúdo pelo resíduo do corte do granito, foi a substituição mais eficiente, sendo que todos os concretos possuem o fator de eficiência dentro da faixa estabelecida por outros autores.

O ensaio de durabilidade mostrou que o concreto com o resíduo é menos suscetível ao ataque de agentes químicos quando comparado ao concreto leve de referência. Porém, para se obter resultados mais significativos, sugere-se fazer o ensaio de resistência à compressão, após todos os ciclos de desgaste químico.

Portanto, foi possível nessa pesquisa por meio do estudo das propriedades do concreto leve com argila expandida e o resíduo do corte de granito, em substituição parcial do agregado miúdo natural, produzir um concreto leve, estrutural, sustentável e com maior resistência a ataque químico por sulfatos. Vale salientar que o uso do resíduo em materiais de construção contribui com a redução dos impactos ambientais ocasionados pela construção civil, diminuindo a quantidade do consumo de agregado natural que possuem jazidas limitadas, além de evitar técnicas de extração danosas e economicamente dispendiosas.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Federal de Sergipe (IFS), por meio dos projetos PIBIC e da PROPEX, pela estrutura disponibilizada, ao Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) pelo consentimento do uso dos equipamentos de ensaios químicos e suporte técnico para a realização desta pesquisa, bem como às empresas Cinexpan S.A e Mámores e Granitos Santana pela doação dos materiais utilizados no trabalho.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] BOGAS, J. A.; BRITO, J. DE; FIGUEIREDO, J. M. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*. v. 89, p. 187– 195, 2015.
- [3] WONGSA, A.; SATA, V.; NUAKLONG, P.; CHINDAPRASIRT, P. Use of crushed clay brick and pum-ice aggregates in lightweight geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, v. 188, p. 1025-1034, 2018
- [4] BORJA, E. V. Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- [6] ANGELIN, A. F. Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, SP, 2014.
- [7] CATOIA, Thiago. Concreto ultraleve estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material de estudo de sua aplicação em lajes. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [8] VAZZOLER, J. S. Investigação de potencialidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico para produção de pasta cimentícia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.
- [9] MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. Rem: Revista Escola de Minas, v. 64, n. 2, p. 147-154, 2011.
- [10] DEGEN, MAXWELL KLEIN et al. Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento. In: anais do 55º Congresso brasileiro de concreto. IBRACON. 2013. p. 1-12.
- [11] D'AGOSTIN, L., VIDAL, F. W. H., CASTRO, N. F. Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de concreto. In: *Jornada de Iniciação Científica, 24. Anais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016. 5p.
- [12] GUPTA, L. K.; VYAS, A. K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*. v. 191, p. 155-164, 2018. ISSN 0950-0618.
- [13] PETRY, N. S.; DELONGUI, L.; MULLER, L. A.; MASUERO, A. B.; MOLIN, D. C. C. D. Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos. *Revista de arquitetura IMED*, Passo Fundo, v. 6, n. 2, p. 71-92, dez. 2017. ISSN 2318-1109.
- [14] OLIVEIRA, D. M.; BEZERRA, A. C. S.; GOMES, V. J.; PEIXOTO, R. A. F. Utilização de resíduo de granito como substituição ao cimento Portland em matrizes cimentícias. In: congresso brasileiro do concreto, 53., 2011, Florianópolis. Anais... Florianópolis: IBRACON, 2011. p. 1 - 13.
- [15] VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. S. S.; PRABHU, G. G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, v. 46, pp. 1-7, 2013, ISSN 0950-0618.
- [16] SOARES, R. B. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- [17] SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V. A Review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. *Journal of Cleaner Production*, v. 126, p. 74-87, 2016.

- [18] MEDINA, G.; SÁEZ DEL BOSQUE, I.F.; FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; MEDINA, C. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, p. 467 - 476, 2017.
- [19] MASHALY, A. O.; BASEL N.; SHALABY, B. N.; RASHWAN, M. A Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*. v. 169, p 800- 818, 30,2018. ISSN 0950-0618.
- [20] GHORBANI, S.; TAJI, I.; BRITO, J.; NEGAHBAN, M.; GHORBANI, S.; TAVAKKOLIZADEH, M.; DAVOODI, A. Mechanical and durability behavior of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. *Construction and Building Materials*. v. 194, p. 143–152, 2019.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [25] SANTOS, J. N. S. *Desenvolvimento de concreto leve de argila expandida modificado com resíduo de borracha de pneu*. Dissertação (Monografia) – Instituto Federal de Sergipe, Estância, 2019.
- [26] ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. Uso da argila expandida e sílica ativa no melhoramento dos desempenhos mecânicos, físicos e térmicos de concretos leves estruturais. *Revista matéria*, v. 22, Rio de Janeiro, 2017.
- [27] ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura*. 2003. Tese (Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67: Cimento Portland: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- [32] DNER-EM. Agregado: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de

solido ou de magnésio, 089/1994.

[33] MOREIRA, J. HOLANDA, Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica* 49 (2003) 262-267

[34] FREIRE, SAYEG; J. MOTTA, J. FRANCISCO. Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. *Revista Rochas de Qualidade*. São Paulo. Ano XXV. Edição 123, p.98-108, julho/ago. 1995

[35] OLIVEIRA, J. D. Análise de propriedades mecânicas e reológicas de matrizes cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente. Dissertação (mestrado) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

[36] GAMEIRO, F.; DE BRITO, J.; DA SILVA, D. CORREIA. Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. *Engineering Structures*. v. 59, p. 654-662, 2014.

[37] RODRIGUES, A. V. Aplicação de uma argila expansiva de jazida do rio grande do sul à produção de agregados para concretos leves. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2018.

[38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 35: Agregados leves para concreto estrutural. Rio de Janeiro, 1995.

[39] HEIKAL, M.; ZOHDY, K. M.; ABDELKREEM, M. Mechanical, microstructure and rheological characteristics of high performance self-compacting cement pastes and concrete containing ground clay bricks. *Construction and Building Materials*. v. 38, p. 101–109, 2013.

[40] HARBI, R.; DERABLA, R.; NAFA, Z. Improvement of the properties of a mortar with 5% of kaolin fillers in sand combined with metakaolin, brick waste and glass powder in cement. *Construction and Building Materials*, v. 152, p.632–641, 2017.

# DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO LEVE DE ARGILA EXPANDIDA MODIFICADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU

*José Nilton Soares Santos,  
Cochiran Pereira dos Santos,  
Zélia Soares Macedo,  
Herbet Alves de Oliveira  
Vanessa Gentil de Oliveira Almeida*

## RESUMO

O concreto leve, assim como a argila expandida, é utilizado para reduzir o peso das estruturas, além de proteção acústica. Na cidade de Aracaju-SE, existem empresas que promovem condicionamento de pneus, gerando grande quantidade de pó de resíduo. Foi desenvolvido um programa experimental para análise desses concretos, variando o percentual de 1, 2,5 e 5% do resíduo de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo natural e substituindo 100% o agregado graúdo natural por argila expandida (50% de argila expandida C1506 e 50% de C2215). Os materiais foram caracterizados através dos ensaios de análise granulométrica e massa unitária. O concreto no estado endurecido foi avaliado através de ensaios mecânicos. A utilização da argila expandida com incorporação de 1% de resíduo de borracha de pneu garantiu melhores resultados de resistência mecânica, menor absorção de água e maior massa específica do que as misturas com 2,5 e 5%. Assim, o resíduo de borracha de pneu pode ser reaproveitado em concretos leves, além de reduzir o impacto ambiental devido ao descarte aleatório.

**Palavras-chave:** concreto leve, argila expandida, resíduo, borracha de pneu.

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto convencional produzido a partir do cimento Portland e agregados naturais (areia e brita) é o mais utilizado na construção civil em todo o mundo, devido aos seus componentes serem facilmente encontrados e sua aplicação ser adaptável em qualquer condição. Desde a década de 1970, o concreto é conhecido como uma mistura simples de cimento, agregados e água,

e com os avanços tecnológicos, houve uma grande evolução desse material, incorporando novas técnicas e equipamentos para seu estudo [1].

Um desses avanços tecnológicos foi o surgimento do concreto com agregados leves artificiais (argila expandida), caracterizado por ser um tipo de concreto amplamente utilizado na construção civil pelo fato de possuir baixa massa específica entre 300 e 900 kg/m<sup>3</sup> e altos índices de resistências mecânicas, podendo chegar a 50 MPa [1], sendo aplicado para fins estruturais, não estruturais e vedação [2].

De acordo com Mehta [3], a introdução de agregados leves às matrizes cimentícias possibilita a obtenção de concretos leves com peso específico de cerca de 1600 kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão entre 25 e 40 MPa. Além disso, a argila expandida é caracterizada por apresentar boa resistência ao fogo e a ambientes agressivos, bom isolante térmico e acústico, superfície vítrea e rígida e alto nível de absorção de água, sendo objeto de pesquisas como alternativa de substituição dos agregados convencionais sem comprometer a resistência mecânica do concreto [4, 5, 6].

Nos últimos tempos, a preocupação com a sustentabilidade vem fazendo com que o setor da construção civil desenvolvesse novas pesquisas destinadas a criação de fontes alternativas de matérias-primas, o que resultou na reutilização de resíduos de borracha de pneus em concretos [7].

Para Fioriti [8], o emprego de resíduos de borracha de pneu proveniente de recauchutagem traz uma série de benefícios, como redução do volume de resíduo que pode causar problemas de saúde e degradação ambiental, otimização do prolongamento da vida útil dos aterros sanitários, redução do consumo de fontes naturais de agregados utilizados na produção do concreto e redução da emissão de poluentes na atmosfera pela queima desse material.

Segundo Giacobre [9], o resíduo de pneu apresenta uma decomposição muito lenta e baixa compressibilidade, o que resulta na ocupação de grandes espaços para armazenamento. Sua queima provoca a chamada fumaça negra, que é altamente poluidora devido à diversidade de compostos liberados na combustão, o que provoca danos à saúde, e o material oleoso, derivado do petróleo, que são conduzidos para os corpos d'água, contaminando-os e tornando-os impróprios para o consumo. A utilização do resíduo de pneu surge como uma alternativa para o descarte de pneus inservíveis, sendo uma opção

inovadora e que traria benefícios ambientais, econômicos e de desempenho ao concreto [10].

De acordo com a ANIP [11], cerca de 50 milhões de pneus novos são produzidos anualmente no Brasil, e somente 26,5% têm destinação ambientalmente adequada e regulamentada. Segundo Boaveventura [12], a utilização de resíduos de pneus inservíveis vem sendo aplicada na construção civil para a produção de concreto, pavimentação asfáltica, meios-fios, entre outros, o que garante a redução da extração de recursos naturais para a produção desses artefatos.

Nessa pesquisa o objetivo foi investigar a influência nas propriedades tecnológicas do resíduo da borracha de pneu quando incorporado no concreto leve produzido com argila expandida. A incorporação de resíduo de borracha de pneu na formulação contribui para reduzir o peso da estrutura em função da queda da densidade como reduz o impacto ambiental provocado pelo descarte ou ainda transforma o resíduo em uma opção de reaproveitamento na construção civil.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização das matérias-primas**

Os materiais utilizados na produção do concreto leve foram o cimento Portland do tipo CP II F-32, areia natural de origem do município de Estância/SE, resíduo de borracha de pneu, proveniente do processo de recauchutagem de pneu da empresa Sergityres Industrial, do município de Nossa Senhora do Socorro/SE e argila expandida (C1506 e C2215), produzidas pela Empresa Cinexpan, localizada em São Paulo/SP, além de água do sistema de abastecimento da cidade de Estância/SE, sílica ativa da marca Ferbasa e aditivo superplastificante tipo II da marca Matchem, modelo Maxifluid PX 1185.

A determinação da granulometria dos agregados foi realizada de acordo com a NBR NM 248 [13], e suas classificações foram determinadas de acordo com a NBR 7211 [14]. As massas unitárias e massas específicas do agregado miúdo e do resíduo de borracha de pneu foram determinadas de acordo com a NBR 9776 [15]. Para as argilas expandidas, a massa unitária foi determinada

de acordo com a NBR NM 45 [16]. A massa específica do cimento foi determinada de acordo com a NBR 16605[17]. Os resultados das caracterizações dos materiais são apresentados na Tabela 1. Como esperado o pneu apresenta massa específica e massa unitária bem inferior aos demais materiais, o que deve contribuir para a redução da densidade do concreto.

**Tabela 1.** Caracterização física das matérias-primas utilizadas no concreto.

Matéria-prima	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro máx. (mm)	Módulo de finura
Cimento	3,27	-	-	-
Areia	2,59	1,52	4,75	2,32
Argila Exp C1506	2,55	0,66	19,00	2,65
Argila Exp C2215	2,64	0,52	25,00	3,22
Resíduo de pneu	1,18	0,38	1,18	2,16

## 2.2 Preparação do concreto

A metodologia de cálculo dos traços foi com base de dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Foram estabelecidos quatro traços, isto é, a referência sem a adição de resíduo de borracha de pneu, e outros três com a substituição de 1, 2,5 e 5% da areia pelo resíduo de borracha de pneu. Optou-se por essas formulações visto que em outros trabalhos [10,18]. A resistência do concreto com a borracha incorporada já diminuiu com 5 a 9% de borracha. Além disso, foi adicionado 10% de sílica ativa em relação ao peso do cimento nas misturas com resíduo de borracha, e 0,5% de superplastificante em todas as misturas de concreto. As dosagens dos materiais estão na Tabela 2.

**Tabela 2.** Traço do concreto (kg/m<sup>3</sup>)

Materiais	Traço			
	REF	1%	2,5%	5%
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00
Areia	3,12	3,09	3,04	2,96
Argila Exp C1506	0,53	0,53	0,53	0,53
Argila Exp C2215	0,43	0,43	0,43	0,43
Resíduo de pneu	-	0,03	0,08	0,16
Relação a/c	0,50	0,50	0,50	0,50
Sílica ativa (%)	-	10	10	10
Plastificante (%)	0,5	0,5	0,5	0,5

Segundo Angelin [18], é recomendado adicionar 10% de sílica ativa em relação ao peso do cimento nas misturas com resíduo de borracha, com o fim de melhorar a aderência e zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, aumentando a resistência mecânica, além de 0,5% de superplastificante que favorece a trabalhabilidade. Nesta pesquisa foram feitos testes iniciais com um só diâmetro de argila expandida (C2215) com um diâmetro máximo de 25 mm substituindo o agregado graúdo natural, e foi verificado que com a utilização da mesma formavam muitos vazios entre os grãos, o que comprometeria a resistência do concreto.

Diante desse fato, foi adotado o uso de uma granulometria imediatamente menor a utilizada (C1506) com diâmetro máximo de 19 mm para que esse problema fosse minimizado. Portanto, optou-se em utilizar 50% da C1506 e 50% da C2215.

## 2.3 Moldagem e cura do concreto

Os materiais foram misturados em uma betoneira com capacidade de 200 l. Para o concreto referência, primeiro foi introduzido 50% do cimento, areia, argila expandida (C1506 e C2215) e água, misturados durante 3 min. Os outros 50% dos materiais foram colocados logo em seguida e misturados por mais 3 min, e adicionado o superplastificante, misturando os materiais por mais 5 min. Para o concreto com resíduo de borracha de pneu, foram

colocados 50% de cada material na betoneira e misturados por 3 min. Em seguida, colocado os demais 50% dos materiais, incluindo toda a sílica ativa, e misturada por mais 3 min.

O superplastificante foi adicionado ao final, e misturado por mais 5 min por meio da NBR NM 67/1998 [19] antes da moldagem dos corpos de prova. Para cada mistura de concreto, foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para os ensaios físicos e mecânicos. Após 24 h de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos ao processo de cura por imersão em água. Para a moldagem e cura dos corpos de prova foram seguidas as recomendações da norma NBR 5738/2016 [20].

## **2.4 Caracterização do concreto**

Para a caracterização dos concretos, foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone pela NBR NM 67/1998 [19], para verificação de trabalhabilidade e consistência do concreto fresco, absorção de água e massa específica com 28 dias de cura do concreto de acordo com a NBR 9778/2009 [21], resistência à compressão axial dos concretos com 28 dias de cura pela NBR 5739/2019 [22], módulo de elasticidade para os concretos com 28 dias de cura pela norma NBR 8522/2017 [23] e resistência à tração por compressão diametral para os concretos com 28 dias de cura pela NBR 7222/2011 [24]. As micrografias foram obtidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM 5700. As amostras foram metalizadas com ouro e fixadas em uma fita de carbono para análise da superfície da fratura.

## **3. RESULTADOS**

Os resultados do abatimento do tronco de cone variaram em torno de  $(10,5 \pm 2,0)$  cm referente à média das amostras (referência e com resíduo de borracha de pneu).

A Tabela 3 apresenta os resultados de absorção de água e massa específica para todas as formulações. Os resultados médios e os desvios padrões foram analisados por meio do método estatístico ONE WAY ANOVA, demonstrando que não são significativos, podendo afirmar que as variações são

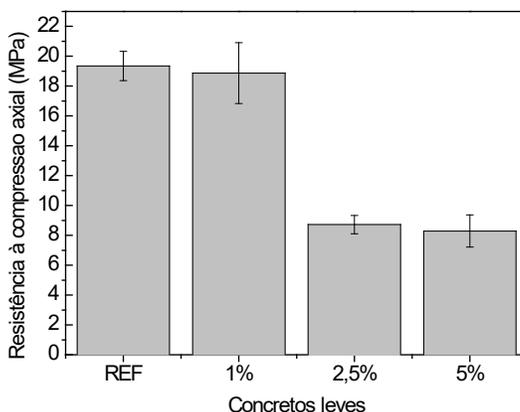
iguais para um nível de confiabilidade de 95%. Foi observada uma tendência de aumento de valores de absorção de água quando há a incorporação do resíduo de borracha de pneu no concreto em relação ao concreto leve referência. Segundo Angelin [18], isso ocorre pelo fato da borracha apresentar natureza hidrofóbica e superfície áspera, que faz aumentar o volume de vazios.

**Tabela 3.** Absorção de água e massa específica do concreto endurecido.

Concreto	Ensaio de caracterização	
	Absorção de água (%)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
REF	7,69 ± 0,15	1680 ± 30
1%	8,28 ± 0,25	1577 ± 31
2,5%	9,55 ± 1,44	1280 ± 40
5%	11,69 ± 1,69	1277 ± 15

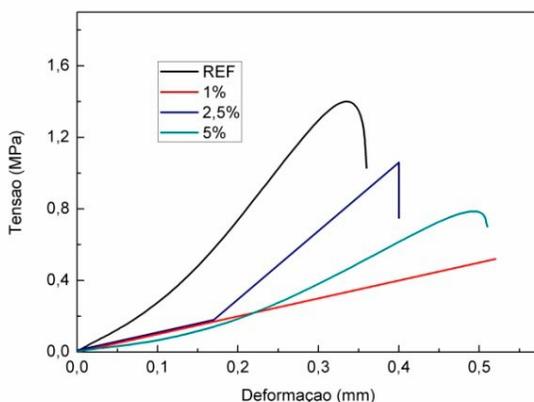
Nota-se que houve uma redução na massa específica com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha de pneu em relação ao concreto leve contendo somente argila expandida. Isso se deve ao fato da borracha possuir massa específica (1,18 g/cm<sup>3</sup>) menor do que a areia (2,59 g/cm<sup>3</sup>), ou seja, é menos denso, logo ocupará menos espaço, e conseqüentemente, reduzirá o peso do concreto.

Os resultados de resistência à compressão axial são apresentados na Figura 1.



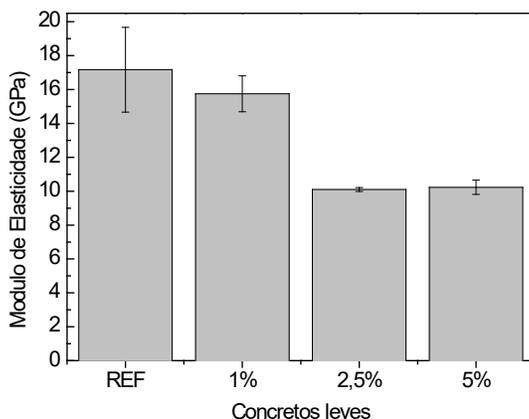
**Figura 1.** Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura.

O concreto leve referência (REF) foi o que apresentou maiores valores de resistência à compressão axial aos 28 dias. A partir da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo resíduo de borracha, houve um decréscimo nos valores de resistência, sendo que era esperado, de acordo com trabalhos anteriores mostrarem essa diminuição na resistência do concreto [25, 26, 27]. No entanto, o concreto pode ser utilizado na produção de peças não-estruturais como placas para esgoto e de adorno de modo geral [2]. A Figura 2 apresenta a curva de tensão x deformação para a resistência à compressão axial, em que no concreto referência foi verificada a ruptura brusca pós-pico, o que constata a sua fragilidade.



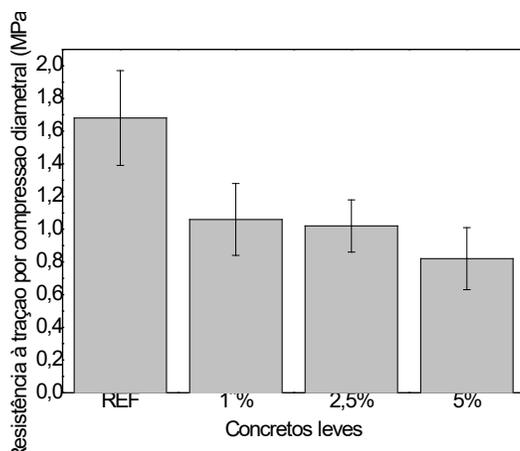
**Figura 2.** Curvas de tensão x deformação dos concretos aos 28 dias de hidratação.

Nas misturas com resíduo de borracha de pneu, o gráfico mostra que após a carga ser aplicada no concreto, o mesmo apresenta ligeiro acréscimo na deformação em relação ao concreto de referência devido à borracha ser um polímero artificial, apresentando comportamento dúctil. Em sua pesquisa, Santos [27] analisou o concreto com resíduo de borracha de pneu, em que apresentou uma ruptura suave no ramo descendente da curva tensão-deformação, diferente do concreto convencional, que apresentou ruptura brusca. A Figura 3 apresenta os dados médios do ensaio de módulo de elasticidade, aos 28 dias, com os traços produzidos.



**Figura 3.** Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias de idade.

O maior valor de módulo de elasticidade encontrado foi do concreto referência, favorecido pelo fato deste concreto apresentar em sua composição somente argila expandida, o que lhe garantiu maior rigidez. Ao adicionar partículas menos rígidas, como o resíduo de borracha de pneu, o módulo fica menor na região de deformação elástica. Na pesquisa de Ling [28], em que se substituiu 5 e 20% de areia por resíduo de borracha de pneu, obteve uma redução de 17,0 e 56,8%, respectivamente, no módulo de deformação em relação ao concreto referência, o que comprovou que o aumento no teor de resíduo de borracha de pneu implicou na diminuição no módulo de elasticidade do concreto.



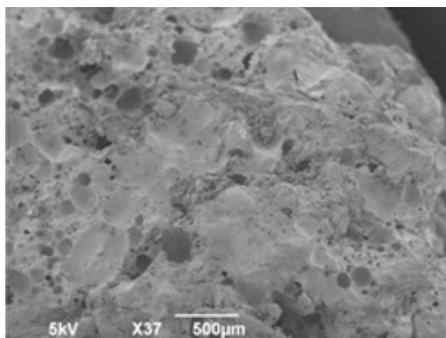
**Figura 4:** Resistência à tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias de cura.

A Figura 4 apresenta os valores resultantes do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para cada traço. Assim como nos resultados do ensaio de resistência à compressão axial, foi possível observar que houve uma diminuição na resistência à tração por compressão diametral nos concretos leves com resíduo de borracha em relação ao concreto leve referência.

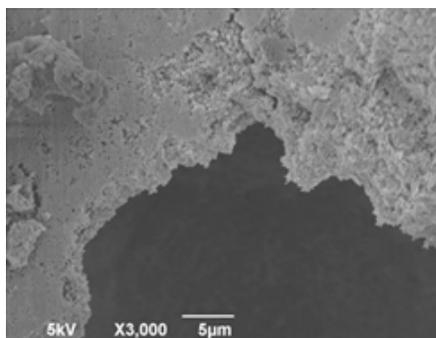
Autores como [25, 28, 29, 30], também observaram esse decréscimo de resistência quando se adicionava resíduo de borracha de pneu. Os resultados obtidos condizem com o esperado, visto que em trabalhos realizados com substituição da areia por resíduo de borracha de pneu em concretos e argamassas mostraram uma diminuição nas resistências mecânicas com o aumento na quantidade desse resíduo [28, 31].

Nas Figuras 5a 5b são apresentadas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície da fratura do concreto contendo 5% de borracha, em que pode ser observada a presença da borracha na mistura, além de revelar aglomeração de partículas de formato irregular e tamanhos variados.

Na Figura 6 pode-se observar a boa aderência na interface borracha-concreto.



**Figura 5a.** Micrografia da superfície de fratura do concreto



**Figura 5b.** Micrografia da superfície de fratura evidenciando a interface concreto-partícula

## 4. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi possível produzir concretos leves utilizando dois tipos de granulometrias de argila expandida, a C1506 e a C2215, e concretos leves de argila expandida com substituição parcial do agregado miúdo natural por 1, 2,5 e 5% de resíduo de borracha de pneu. O concreto referência mostrou menor absorção de água e maior massa específica. Foi verificado que quanto maior a incorporação de resíduo de borracha de pneu no concreto, maior era a absorção de água por imersão e menor era a sua massa específica.

Com os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, verificou-se que quanto maior a incorporação de resíduo de borracha no concreto resultava na diminuição das resistências mecânicas. Os resultados do módulo de elasticidade do concreto referência mostraram que o mesmo se apresenta como um material mais rígido se comparado com as demais misturas com 1, 2,5 e 5% de resíduo de borracha de pneu. As misturas com resíduo de borracha mostraram uma deformação pós-pico, sem ruptura brusca como aconteceu com o concreto referência, devido à borracha ser um material polimérico com comportamento dúctil.

Com esses dados, o uso do resíduo de borracha, em substituição parcial do agregado miúdo natural provoca mudanças de comportamento no concreto, porém, mesmo com os valores reduzidos de resistência em relação ao

concreto referência, seu emprego seria viável, podendo ser aplicado para fins não estruturais, sendo uma alternativa viável em relação ao ponto de vista ambiental e quanto ao desempenho sustentável e econômico. Além disso, o reaproveitamento pode oferecer uma forma de uso para este tipo de resíduo.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Sergipe - Campus Estância, pelo apoio a pesquisa, ao Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Sergipe pelo uso dos equipamentos de ensaios mecânicos, a Empresa Sergytires Industrial pela doação do resíduo de borracha de pneu, a Cínexpan S.A pela doação das argilas expandidas e a CAPES pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROSSIGNOLO, J. A. Concreto Leve Estrutural. 1ª Edição. São Paulo. Ed. Pini. 2011.
- [2] BOGAS, J. A., Gomes, A., Pereira, M. F. Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*. pp. 1013-1022, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.111>
- [3] MEHTA, P. K., Monteiro, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1994.
- [4] PEREIRA, M. G. F. Potencial de utilização de agregados leves na produção de concretos estruturais [Trabalho de conclusão de curso] São Paulo: Universidade Federal de São Carlos, 2012.
- [5] ABREU, F. S. Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetido a meio agressivo ácido. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 2014.
- [6] BORJA, E. V. Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011.
- [7] PCZIECZEK, A. Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina. 2017.
- [8] FIORITI, C. F., INO, A., AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 7 (4), 43-54. 2007.
- [9] GIACOBRE, S., Figueiredo, A. D. Concreto de cimento Portland com borracha de pneus. *Boletim técnico*, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008.

- [10] ANGELIN, A. F., Gachet-Barbosa, L. A., Desempenho do concreto leve auto adensável: influência da adição do resíduo de recauchutagem de pneus. In: Workshop da Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2016. Limeira, SP.
- [11] ANIP. Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, São Paulo, Ecopontos, <http://www.anip.com.br>, acessado em julho de 2018.
- [12] BOAVENTURA, C. M. Avaliação da resistência à compressão de concretos produzidos com resíduos de pneus [Trabalho de conclusão de curso] Bahia: Universidade Estadual de Feira de Santana. 2011.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 248 - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro. 2003.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211: Agregados para concreto - especificação, Rio de Janeiro. 2009.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9776: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - método de ensaio, Rio de Janeiro. 1988.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro. 2006.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16605: Cimento Portland - Determinação da massa específica, Rio de Janeiro. 2017.
- [18] ANGELIN, A. F. Análise dos desempenhos físicos, mecânicos, térmico acústico da microestrutura do concreto leve autoadensável emborrachado. Limeira: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. 2018.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 67: Cimento Portland - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro. 1998.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova, Rio de Janeiro. 2016.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro. 2009.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro. 2018.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, Rio de Janeiro. 2017.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro. 2011.
- [25] FIORITI, C.F. Interlocking concrete pavements using waste tires as an alternative material. São Carlos: School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, 202 p. 2007.
- [26] FREITAS, C. Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas

de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2007.

[27] SANTOS, A. Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneu com aplicação em placas pré-moldadas. Universidade Federal de Alagoas. 2005.

[28] LING, T. C. Effects of compaction methods and rubber content on the properties of concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, pp. 28:164-75. 2012. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.069](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.069).

[29] YUNG, W. H., Yung, L. C., Hua, L. H. A study of the durability of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. pp. 665-72. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019).

[30] LING, T. C. Prediction of density and compressive strength for rubberized concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 25:4303, 2011, [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.074](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.074).

[31] SILVA, F. M., BARBOSA, L., LINTZ, R. C. C., JACINTHO, A. E. Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, v. 91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027>.

# TIJOLO DE SOLO-CIMENTO: ANÁLISE CRÍTICA – REVISÃO

*Hudson Santos Menezes Junior  
Beatriz Rocha Silva  
Antônio José da Silva Filho  
Any Manuela Soares Santos  
Vanessa Gentil A. de Oliveira  
Fernanda Martins C. de Melo  
Herbet Alves de Oliveira*

## RESUMO

O tijolo de solo-cimento é um dos materiais mais comuns para construção de alvenaria, embora não seja o mais antigo como material de construção. Por ser um produto constituído basicamente por solo e cimento, esse produto existe no Brasil desde o surgimento do cimento em meados de 1888. Apesar de ser um produto normatizado, os procedimentos de produção e propriedades necessitam atualização. Assim, este artigo fornece uma revisão bibliográfica a partir de pesquisas sobre a produção de tijolos de solo-cimento. Os materiais e métodos de pesquisas utilizados no processo de fabricação do tijolo de solo-cimento, bem como diversas propriedades são discutidos. Os resultados mais comuns, são agrupados. Em conclusão, o processo produtivo do tijolo bem como suas propriedades ainda precisa ser aprimorado para que o produto ganhe espaço no mercado de forma definitiva.

**Palavras-chave:** Tijolo de solo cimento. Resíduo. Reciclagem.

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil vem buscando alternativas para produção sustentável principalmente para reduzir custos de processo. A necessidade por moradias é crescente em todos os países em função do crescimento da população. Para construções atuais, existem pelo menos três tipos de tijolos, os cerâmicos fabricados a partir de argila, os quais após beneficiamento e conformação, devem ser queimados, os blocos de cimento, produzidos com areia ou resí-

duos de pedra utilizados na construção civil e cimento além dos tijolos de solo-cimento também denominados de tijolos ecológicos [1].

A produção dos tijolos ecológicos de solo-cimento resulta em menores danos para o meio ambiente, por evitar a queima das matérias-primas e geração de poluentes na atmosfera como ocorre na produção do tijolo cerâmico.

De acordo com Battagin [2] e Souza [3] estudos relacionados à fabricação do cimento Portland tiveram início no Brasil em 1888, com a instalação de uma fábrica na fazenda Santo Antônio, situada em Sorocaba-SP. Somente a partir da década de 1970, o solo-cimento passou a ser objeto de pesquisas no Brasil, sobretudo por meio da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Antes disso, tem-se poucos registros de sua utilização no país, como na cidade de Petrópolis (RJ) em 1948, com a construção de casas residenciais e em Manaus (AM) em 1953, com a construção de um hospital totalmente em paredes de solo-cimento. O bom estado de conservação destas obras após vários anos de utilização, atestam a qualidade do produto e da técnica construtiva.

Uma das características da construção utilizando o tijolo de solo-cimento é a possibilidade de utilização de diferentes tipos de solos. Além disso, os equipamentos utilizados são simples e de baixo custo, possibilitando a operação no próprio canteiro de obra. Isso reduz os custos com transporte, energia, mão-de-obra e impostos. Além dessas vantagens, o tijolo de solo-cimento favorece também do ponto de vista ecológico, pois não passa pelo processo de queima, no qual se consomem grandes quantidades de madeira ou de óleo combustível, como é o caso dos tijolos produzidos em cerâmicas e olarias [4-5].

Segundo Minke [6], a preparação, o transporte e manuseamento do solo no local de construção, requer cerca de 1% da energia necessária à produção. O tijolo de solo-cimento ressurge não só como uma solução sustentável para construções, mas também como solução para o aproveitamento de diversos resíduos, inserindo-os em sua formulação. Diversos grupos como a Associação dos Empreendedores em Soluções Sustentáveis (AESS), Associação Nacional da Indústria do Tijolo Ecológico (Aniteco) e Universidades, vem desenvolvendo pesquisas com o tijolo de solo-cimento com adição de resíduos para produção do denominado tijolo ecológico vide Figura 1.



**Figura 1.** Tijolo de solo-cimento (Fonte: Autor).

O tijolo apresenta inúmeras vantagens como: a facilidade de passagem de tubulação destinada as instalações hidráulicas [5], visto que os tijolos possuem furos que ficam sobrepostos no assentamento e formam dutos por onde são passados os fios e as tubulações hidráulicas, reduzem o consumo de argamassas de assentamento e de regularização, e tem ainda a vantagem de oferecer conforto térmico e acústico superior ao das construções convencionais [7].

O tijolo de solo-cimento pode ser moldado por meio de prensas manuais ou hidráulicas, o que lhe garante resistência mecânica igual ou superior aos tijolos cerâmicos e blocos de concreto convencionais [8]. As prensas hidráulicas são melhores em relação os manuais, pois existe a possibilidade de automação, além de poder regular a pressão de conformação.

O tijolo deve apresentar arestas vivas e não pode apresentar fissuras, fraturas ou outros defeitos que possam comprometer o assentamento, a resistência e durabilidade da alvenaria. O tijolo deve possuir a forma externa de um paralelepípedo retangular. Além disso, o tijolo de solo-cimento tem destaque pela sua composição, ou seja, ser formulado por majoritariamente por solo, como também possibilitar a substituição de parte dessa matéria-prima por resíduos. Desse modo, ainda pode-se destacar todas as vantagens do tijolo de solo-cimento perante o sistema construtivo tradicional: redução na espessura

dos revestimentos, economia de fôrmas, racionalização das instalações elétricas e hidráulicas, e redução no desperdício de materiais [9].

O tijolo é considerado resistente a compressão visto que inúmeros fatores influenciam, como distribuição de grãos, qualidade dos grãos, tipo dos argilominerais presente, quantidade de minerais, força de ligação dos minerais de argila, preparação, quantidade de água usada na produção e compactação etc [10-11]. O tijolo de solo-cimento apesar de ser utilizado a muito tempo, algumas propriedades, bem como parâmetros de processo, ainda são pouco estudadas. Assim, esse trabalho tem como objetivo apresentar o que existe de pesquisas com relação ao processo de fabricação do tijolo de solo-cimento, de modo a incentivar pesquisadores a direcionar estudos para produção de produtos de melhor qualidade.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Solo**

#### **2.1.1 Argilas, areia e silte**

Na composição do tijolo de solo-cimento, o solo é o material que entra em maior porcentagem, devendo ser selecionado de modo que permita utilizar o menor consumo possível de cimento. O solo é constituído por argila, silte e areia, podendo ainda conter contaminantes como calcáreo, feldspato e outros [12-13]. Existe uma diversidade de sugestões a respeito da formulação ideal para produção do tijolo de solo-cimento. Por sua vez existe uma grande diversidade de solos existentes, mas não é qualquer tipo que pode ser usado na produção do tijolo. Solos compostos preponderantemente por frações de argila ou silte não são aconselháveis, pois além de dificultar a cura, diminui a durabilidade [12-13].

A fração argilosa existente na composição de um solo é responsável pela trabalhabilidade e coesão da mistura para garantir a conformação por prensagem, e pela resistência mecânica após cura. Por sua vez, é necessário conhecer o argilo mineral constituinte na fração argilosa, pois das características e propriedades do argilomineral vão definir as propriedades finais do tijolo.

Argilas que apresentem na sua composição argilominerais do tipo montmorilonitas (esmetitas) são desaconselháveis, pois são altamente expansivas e necessitam de muito cimento para a estabilização, além de promover fissuras [14]. Adicionalmente solos que contém matéria orgânica devem ser evitados, já que tal componente influencia na hidratação do cimento e estabilização do solo favorecendo a redução drástica da durabilidade com tempo. A formulação do tijolo solo cimento é inadequada com solos de elevada percentagem de argila (> 30%), devido à grande absorção de água por parte destas partículas, o que causa retrações elevadas em processo de secagem conduzindo ao aparecimento de fissuras. Contudo pequenas percentagens de argila são benéficas para assegurar coesão nos blocos frescos moldados [14]. No entanto, em função da formação geológica de todos os solos partirem de rochas, praticamente em todos os solos em sua composição está presente a areia.

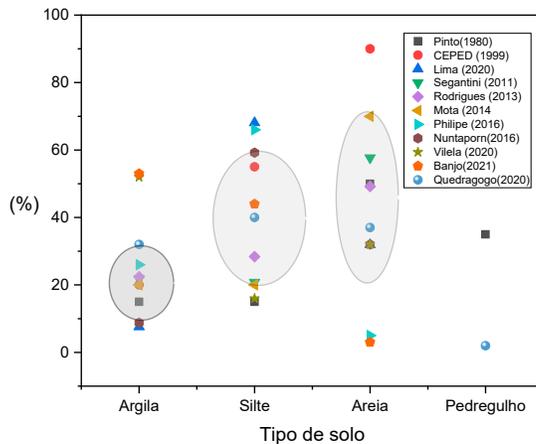
A areia são silicatos ( $\text{SiO}_2$ ) proveniente da erosão de rochas, caracteriza-se por ser inerte, de elevada massa específica, o que favorece a uma maior estabilidade e resistência finais do tijolo de solo-cimento. A areia não é adicionada como matéria-prima isolada, e sim está misturada com solos argilosos [15]. Na fração arenosa encontraremos uma distribuição granulométrica mais adequada que proporciona uma alta massa específica aparente na prensagem da mistura, responsável pelas propriedades mecânicas e que garante uma resistência mecânica bem mais elevada do que solos contendo basicamente argila [16]. Entretanto, os solos com grande predominância de areia exigem mais tempo de espera para que adquiram resistência suficiente para garantir a integridade do tijolo [17-18].

Conforme observado na Tabela 1, é importante que na composição do solo de modo geral esteja presente a areia. No entanto, o material argiloso bem como o silte são fundamentais para conseguir a conformação por prensagem, visto que a argila é que fornecerá a plasticidade e o silte além de apresentar elevada área específica favorece o empacotamento. O solo pode ser constituído de uma argila ou mistura de argilas podendo conter areia ou ainda um filito [16-18].

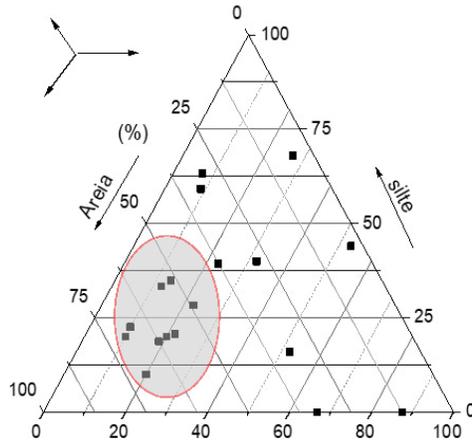
**Tabela 1:** Composição do solo (%)

Argila	Silte	Areia	Pedregulho	Referências
< 15	< 15	< 50	< 35	Pinto [12]
< 20	10-55	45-90	-	Ceped [15]
7,6	68,1	31,9	-	Lima [23]
21,8	20,8	57,7	-	Segantini [7]
22,4	28,4	49,2	-	Rodrigues [25]
10-20	10-20	50-70	-	Motta [19]
8,8	59,2	32	-	Nuntaporn [20]
52	16	32	-	Vilela [8]
22,5-32	38,5-40	28-37	2,0	Quedrago [21]
53	44	3	-	Banjo [22]
55	20	30	-	Hany [24]

Os dados levantados na Tabela 1 foram plotados na Figuras 2 e em um diagrama ternário na Figura 3, e proposto a fórmula ideal de solo para se produzir um tijolo com intervalo de confiança de IC = 95%. Assim, a proposta pode ser assim definida: silte (15-35%), areia (50-70%) e argila (10-20%).



**Figura 2:** Composição ideal de um tijolo de solo-cimento (Fonte: dados da pesquisa).



**Figura 3.** Diagrama ternário da composição ideal de um tijolo solo cimento (Fonte: Autores).

## 2.2 Propriedades do solo

Análise granulométrica: segundo a ABCP-1985 [26] e NBR 10833[27], para a fabricação de tijolos de solo-cimento, os solos mais adequados apresentam as seguintes características: passa 100% pela peneira ABNT de 4,8 mm, de 10 a 50% da amostra passa pela peneira ABNT de 0,075 mm. No entanto, parece que o processo de beneficiamento não evoluiu, e o solo é bastante grosseiro. É recomendável se utilizar processos de beneficiamento mais avançados como moagem em moinhos de martelo cuja matéria prima passa 100% na peneira ABNT 48 (0,298 mm) afim de reduzir a ação das impurezas conforme já é de praxe na fabricação de revestimento cerâmico via seca. Em seguida, o solo deve ser misturado com o cimento e ser umidificado por meio de borrifadores ou se automatizados, granuladores rotativos para garantir a granulometria ideal de prensagem.

Composição mineralógica: de acordo com a Tabela 2, os solos argilosos utilizados na produção de tijolo de solo-cimento são constituídos pelos argilominerais caulinita, illita e raramente esmectita ou montmorilonita, podendo conter acessórios como mica, calcita, quartzo e feldspato. Conforme já discutido por Barbosa e Martone [28] deve-se evitar o uso de argilas contendo montmorilonita pois em contato com água observa-se um aumento de volume, podendo provocar fissuras, além de apresentar grande retração diferencial.

**Tabela 2:** Composição mineralógica do solo

E	K	I	G	V	M	C	F	Q	Referências	
	X	X			X		X	X	Amaral	[29]
-	X	-	-	-	-	-	-	X	Rodrigues	[25]
-	X	X	-	-	X	X	X	-	Lima	[23]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Nuntaporn	[20]
-	X	-	-	-	-	-	-	X	Vilela	[8]
	X	X			X	X	X	X	Querabdogo	[22]

E: esmectita; K: caulinita; G: goethita; V: vermiculita; M: mica; C: calcário; F: feldspato; Q: quartzo

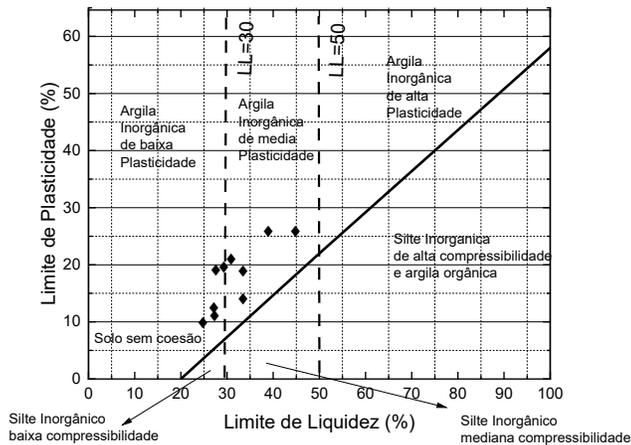
Índice de plasticidade e matéria orgânica: na Tabela 3 são apresentados os resultados de limite liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) de solos utilizados na produção de tijolos de solo-cimento. Os dados foram plotados em uma carta de plasticidade, e apresentados na Figura 4 [30].

A ABCP [26] e NBR 10833[27], recomendam que o limite de liquidez (LL) seja inferior a 45% e que o índice de plasticidade (IP) seja inferior a 18% os quais foram determinados segundo as normas NBR 6459[31], NBR 7180 [32] e ASTM D4318 [33]. Pode-se concluir que os solos utilizados para produção de tijolo de solo-cimento podem ser classificados em argilas de baixa e média plasticidade em que predominam os argilominerais a caulinita e ilita. Os resultados podem oscilar entre 20 a 45% para (LL) e 10 a 20% para (LP). Com relação a matéria orgânica, Hany [24] recomenda que deve ser inferior a 1%.

**Tabela 3:** Propriedades tecnológicas

LL (%)	IP (%)	MO (%)	Referências
27,6	15,6	0,87	Banjo [22]
31	9,9	-	Vilela [8]
< 45	< 18	-	ABCP [26]
27,9	9,5	-	Rodrigues [25]
27,7	9,4	-	Segantini [7]
20,8	8,2	-	Lima [23]
< 45	-	0	Ceped [15]
34	15-21	-	Queradogo [21]
41,5	14,3	-	Jose (2021) [34]

Fonte: autores



**Figura 4.** Carta de plasticidade, (Caputo [30])

## 2.3 Cimento

Na literatura existe uma diversidade de cimentos que são utilizados na produção de tijolos de solo- cimento, que vai desde o cimento Portland comum CPI, ao alta resistência inicial ARI. Esses podem ser resistentes a sulfatos ou baixo calor de hidratação [18,35]. Com relação ao percentual de cimento ideal para produção de tijolo solo-cimento, Nagaraj [36] recomenda que o

mesmo deve oscilar de 6 a 10%, sendo suficiente para garantir a resistência e durabilidade necessárias, sendo que mais do que 15% se torna inviável economicamente. Outros pesquisadores, recomendam que o teor de cimento em uma formulação constituída basicamente por areia varia de 5 a 9% [37-38]. Segundo Moriarty et al. [39], a quantidade de cimento mínima a ser utilizado em formulações de tijolos para paredes internas, é de cerca de 5%, para assegurar o manuseamento e o suporte dos elementos superiores, enquanto para paredes externas, os requerimentos de durabilidade sugerem percentagens de 7% e para fundações, requer valores de 8%.

De acordo com a Tabela 4, o percentual ideal de cimento para produção de tijolo deve oscilar em função tipo de solo e deve ficar entre 5 a 10%. Embora não relatado na literatura, ao se conformar tijolos em prensa hidráulica que apresentem dispositivo para acréscimo da pressão, a (%) de cimento pode ser reduzida e, portanto, deve ser investigada.

**Tabela 4:** (%) de cimento utilizado na produção de tijolo solo-cimento

Tipos de solo	Tipo de construção	(%) Cimento	Referência
Solo arenoso	-	5-9	Sehk [37]
Solo siltoso	-	7-10	Sehk [37]
Solo argiloso	-	8-10	Dao [38]
-	-	6-10	Nagaraj [36]
-	Paredes internas	Min 5	Moriarty [39]
-	Paredes externas	Min 7	Moriarty [39]
-	Fundações rasas	Min 8	Moriarty [39]

Fonte: dados da pesquisa

## 2.4 Processo produtivo

### 2.4.1 Caracterização dos solos e resíduos

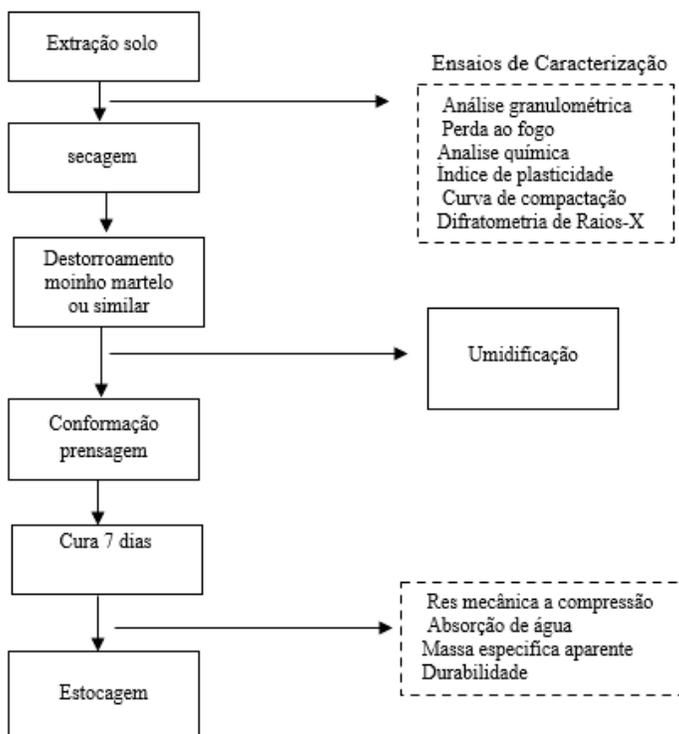
Após coletado o solo ou resíduo, o mesmo deve ser seco em estufa a (105 ±5) °C, desagregados e passados na peneira ABNT nº 4 (4,8 mm). Para realizar a caracterização química e mineralógica, o solo deve ser peneirado em peneira de malha ABNT Nº 200 (0,074 mm) [40]. Alguns ensaios de

caracterização do solo são recomendados, como a composição química dos materiais a qual deve ser realizada para se conhecer os componentes do solo. A análise química pode ser realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). A perda ao fogo (PF) das amostras pode ser realizada em um forno elétrico para se determinar a porcentagem de matéria orgânica. A análise granulométrica das matérias-primas pode ser determinada através de uma série de procedimentos conforme a norma NBR 7181 [40]. Por meio da análise granulométrica se determina a porcentagem dos componentes do solo [18]. A massa específica pode ser determinada pelo método do picnômetro, enquanto a área superficial específica pode ser obtida pelo método de Blaine ou similar. Alguns pesquisadores recomendam que se levante a curva de compactação para definir a umidade ótima de prensagem, embora essa é apenas uma referência, visto que na prensagem essa umidade deve ser menor [8,17].

#### **2.4.2 Produção das misturas**

O traço é a proporção entre o solo e o cimento na composição dos tijolos, e é determinado através de procedimento descrito na ABNT NBR 10833 [27]. A mistura deve ser realizada juntando-se primeiramente os materiais secos, normalmente realizado ao ar, e em seguida os mesmos são misturados normalmente em betoneira ou similar, até a completa homogeneização, constatada pela coloração uniforme. Logo após, é adicionada a água por meio de borrifadores até que a mistura atinja a umidade desejada. Recomenda-se um novo peneiramento para melhor homogeneização da água na mistura solo-cimento, antes da prensagem [42]. Em seguida, a mistura deve passar completamente por uma peneira de ABNT no 4 (4,8 mm) para ajuste da granulometria [8].

Os tijolos são compactados em uma prensa manual ou hidráulica, controlando-se a energia de compactação, sendo que ocorre o devido controle da quantidade dos materiais, de modo a se obter tijolos rigorosamente fabricados de acordo com o que foi previamente estabelecido [3,17]. Após cura de 7 dias o tijolo poderá ser submetido aos ensaios de caracterização de resistência mecânica a compressão, absorção de água, densidade aparente e ainda durabilidade. Na Figura 5 é apresentado uma sugestão de fluxo de processos de produção de tijolo de solo- cimento.



**Figura 5:** Fluxo do processo de produção de tijolos solo cimento.

### 2.4.3 compactação

Segundo Barbosa e Mattone [28], dentre os fatores que influenciam o processo de produção de tijolos, a força de compactação é o mais importante. Quanto maior a pressão de compactação, menor a quantidade de cimento e maior a resistência do tijolo. No mercado existem diversos tipos de prensa com várias opções de pressões de compactação. Algumas moldam mais de um tijolo de cada vez. Esta característica que inicialmente aparenta ser uma vantagem, no que diz respeito à resistência do tijolo é desvantagem. Ao compactar (prensar) mais de um tijolo, a pressão de compactação é reduzida pois ocorre o aumento da área de distribuição da força aplicada.

A porcentagem de água e a quantidade de material a serem utilizadas na prensa são determinadas a partir de um processo de otimização feito com

base na máxima densidade seca [27]. Normalmente, essa umidade não é exatamente aquela obtida no ensaio de compactação Proctor Normal [28]. Na literatura alguns pesquisadores adotam a alguns intervalos para a água, como 5-15% de água [43]. No entanto, a umidade ótima está relacionada ao índice de plasticidade da mistura e, portanto, pode oscilar. Nele, a partir de uma compressão dinâmica, são obtidos a densidade seca máxima e a umidade a ser adotada. Caso a umidade ótima do Proctor Normal seja conhecida, é a partir dela que se iniciará a determinação da umidade da mistura.

No trabalho de Bhairappanavar [44] em que produziu tijolo de 10 x 20 x 5 cm, variou a pressão de conformação de 2 a 4 MPa. Ele observou que para tijolos contendo 8% de cimento a resistência aumentou até 40% ao aumentar a pressão de 2 a 4 MPa. Este aumento se deve ao acréscimo da densidade. A melhoria da resistência se deve a formação do silicato de cálcio C-S-H e mono aluminato de cálcio  $C_4ASH_{12}$  devido a hidratação do cimento. No entanto, o ideal era utilizar prensas hidráulicas em que a pressão poderia ser alterada para se obter um produto cada vez mais resistente utilizando o menor consumo de cimento possível.

#### 2.4.4 Cura

A NBR 12024 [45] especifica que após a moldagem, os corpos-de-prova de tijolo de solo-cimento devem ser colocados em câmara úmida à temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ C$  e umidade relativa do ar não inferior a 95%. No entanto, os fabricantes não dispõem de câmara, e a cura acontece em galpões fechados. A norma especifica, ainda, que para fins exclusivos de dosagem de solo-cimento, o período de cura deve ser, obrigatoriamente mínimo de sete dias. Porém, outras idades de cura podem ser consideradas para controle de obra. Segundo Ceratti e Casanova [46] a hidratação do solo cimento nos primeiros 7 dias após a moldagem é fundamental para garantir a resistência do cimento. Eles afirmaram que o período mínimo para completar a interação solo-cimento variou de 3 a 7 dias alcançando 15 dias em solos de plasticidade elevada. Em caso de secagem rápida, pode ocorrer uma redução na resistência de aproximadamente 40%, o que torna a cura um processo indispensável.

A cura mal feita pode influir também no acabamento final, podendo as superfícies de solo-cimento apresentar um esfarelamento superficial tornan-

do-as vulneráveis às intempéries e à qualquer ação mais rigorosa. Um processo eficiente de cura consiste de algumas molhagens diárias, por um período mínimo de 7 dias. Este processo mantém a umidade dos tijolos, garantindo a ausência de trincas e a qualidade final desejada. Um fator importante a ser considerado é o armazenamento das peças. As mesmas deverão após a prensagem e desmoldagem, ser empilhadas sobre um piso plano à sombra ou em local coberto e protegido. Depois de curado, o tijolo ou bloco de solo-cimento possui alta resistência à compressão e baixa absorção [26]. Na Tabela 5 é apresentada as técnicas de curas mais utilizadas. A molhagem sempre ocorre com uso de borrifadores ou regadores de água.

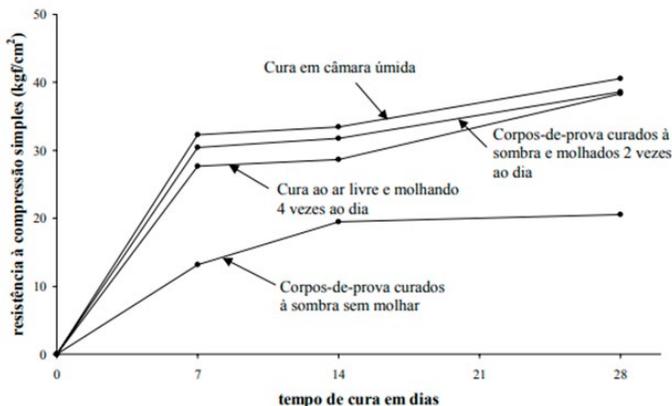
**Tabela 5:** Metodologias de cura do tijolo solo cimento adotadas

Processo de cura adotado	Referências
Molhagem diária todos os dias	CEPED [47]
Molhagem sucessivas para manter tijolo úmido por 7 dias	ABCP [26]
Após 12 h de conformação, molhar durante três vezes ao dia por 8 dias	CEPED [15]
Cura por imersão em água durante 7 dias e ao ar	Savastano e Agopyan [48]
Cura em câmara com temperatura e umidade controlada durante 3 dias	Montardo, Consoli [49]
Cura em laboratório por 28 dias	Beraldo [50]
Cura a vapor a 60 °C por 3, 10 e 24 dias	Latorraca e Silva [51]

Fonte: dados da pesquisa

Embora o tipo de cura utilizada tenha influenciado a resistência à compressão, não se tornou evidente o benefício da utilização da cura úmida. A maior parte dos materiais tem seu desempenho prejudicado quando é ensaiado em condições de umidade elevada [50]. Além disso se as condições de cura forem inadequadas ocorre a formação de trincas transversais de retração na camada cimentada [51]. A Figura 6 apresentada pelo CEPED [15] demonstra que a cura ideal deve ser de pelo menos 7 dias protegidos do ar livre e umidificados pelos menos 2 vezes ao dia.

O procedimento correto e ideal seria promover a secagem em estufas de fluxo contínuo e o vapor retirado da câmara produto da água evaporada poderia ser usado para cura dos tijolos, com isso o tempo de cura poderia ser acelerado.



**Figura 6.** Procedimento de cura do tijolo solo cimento (Fonte: [15].)

## 2.5 Ensaios de caracterização do tijolo

### 2.5.1 Resistência à compressão

Para realização do ensaio de resistência à compressão, utiliza-se a prensa hidráulica e a Eq. 1, em que  $R$  é a resistência em MPa,  $P$  é a carga em  $N$  e  $A$  é a área transversal em  $mm^2$ :

$$R = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Os tijolos devem ser rompidos após 7 e 28 dias de cura. Os resultados da resistência mecânica a compressão, devem ser maiores do que 2 MPa [52]. De acordo com as especificações ASTM C67 [53], os tijolos aceitáveis devem ter um valor de resistência à compressão mínimo de 28 dias de 10,3 MPa. Morel et al. [54] resumiu que, o comportamento mecânico de tijolos produzidos em prensa manual, geralmente apresentam resistências à compressão em uma faixa de 1,5-3,0 MPa e que valores mais altos, podem ser alcançadas usando prensa hidráulica e/ou incorporando maior conteúdo de cimento na formulação. Na Tabela 6 e Figura 7 estão apresentados os resultados de vários pesquisadores que produziram tijolo solo-cimento, conclui-se que a resistência mínima após 7 dias de cura deve ser 2 MPa e o máximo chega a 6 MPa.

## 2.5.2 Absorção de água

A absorção de água é uma propriedade que, de acordo com a norma NBR 8492 [55], deve ter limite de 20% após cura após 28 dias. A absorção de água é a propriedades mais importante do tijolo, visto que ela definira o grau de possibilidade de percolar água no tijolo além de favorecer a ou não a redução da durabilidade do tijolo [18,52]. A absorção de água é frequentemente usada como um indicador de porosidade aberta [56,57]. A absorção dos tijolos é significativamente afetada pelas matérias-primas e métodos de fabricação. Geralmente, quanto menor a absorção de água dos tijolos, maior será sua resistência aos danos causados pela água.

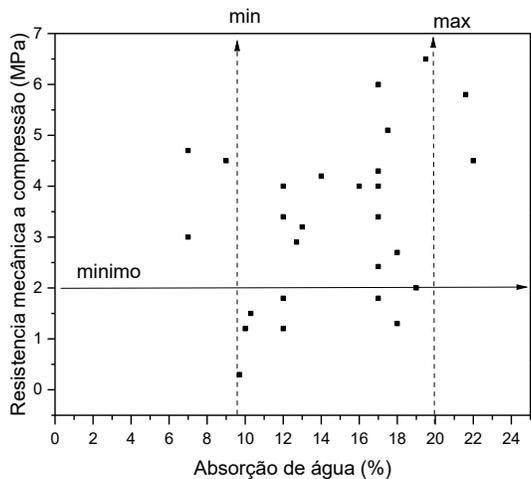
Para o teste de absorção de água, os tijolos devem ser pesados e imersos em água 24 h. A absorção de água pode ser determinada por meio da Eq. 2, em que  $M_2$  é o peso após imersão em água por 24 h,  $M_1$  é peso do tijolo seco e  $A$  é a absorção em %.

$$AA\% = (M_2 - M_1 / M_1) \cdot 100 \quad (2)$$

Na Tabela 6 e Figura 7 estão apresentados os resultados de absorção de água. Calculando-se a média e o intervalo de confiança com 95%, pode-se afirmar que a absorção média utilizada pelos fabricantes e pesquisadores tem variado de 10 a 20%. No entanto, estudos relacionados com a durabilidade devem ser implementados com tijolos com absorção de água próximo de 20%, visto que favorece a percolação de água o que compromete a durabilidade.

## 2.5.3 Densidade aparente

Os valores de densidade do tijolo recomendados oscilam de 1540 kg/ m<sup>3</sup> a 1950 kg/m<sup>3</sup> [58]. Segundo Khoudija [59] a densidade é proporcional a resistência mecânica. Quanto maior a resistência mecânica maior a densidade. Na Tabela 6 e Figura 7 estão apresentados os resultados de densidade de alguns pesquisadores.



**Figura 7:** Absorção de água x resistência mecânica dos tijolos solo-cimento (Autores).

**Tabela 6.** Características de tijolos solo-cimento

MEA (kg.cm <sup>-3</sup> )	AA (%)	MRC (MPa)	Referências
1,98	12,7	2,90	Silva [13]
-	16 a 19	2,0 a 4	Segantini [7]
1,95 a 1,97	12 a 17	4 a 6	Siqueira [60]
1,97 a 1,99	7,5 a 8,5	4 a 6	Amaral [29]
1,92 a 1,97	19,5 a 22	4,5 a 6,5	Rodrigues [25]
-	14 a 18	1,3 a 4,2	Leonel [61]
-	13 a 17	3,2 a 4,3	França [68]
1,69 a 1,79	16-19	1,5 a 2,5	Zak [63]
1,78-1,90	7 a 17	3 a 4	Siqueira [62]
-	9,70 a 10,35	0,30 a 1,55	Cristina [64]
-	17 a 19,3	1,2 a 1,8	Jordan [65]
1,59 a 1,75	15,5 a 17	2,42 a 3,38	Vilela [8]
1,84 a 1,94	10 a 12	12 a 18	Kongkajun [66]
-	-	2,5 a 7	Barros [67]

MEA: densidade aparente; AA: absorção de água; MRC: modulo de resistência à compressão

Fonte: dados da pesquisa

#### 2.5.4 Durabilidade

O ensaio de durabilidade é determinado de acordo com a norma ABNT NBR 13553/96 [69]. Segundo as normas, os tijolos devem ser medidos e pesados e imersos em água e em seguida secos em estufa. Após secagem, o mesmo é novamente medido e submetido a escovação e pesagem para avaliar o quanto as partículas podem ser removidas. A operação é repetida por seis vezes. Após o sexto ciclo do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, a expansão deve ser igual ou inferior a 1% e a perda de massa não deve ser superior aos seguintes limites apresentados na Tabela 7. Este ensaio seria importante avaliar não só na presença de água, mas de reagentes químicos, pois sabe-se que tijolos ficam expostos a água durante anos e essa pode conter sais que alteram seu pH e podem influenciar na sua deterioração.

No trabalho de Queradogo [21] a durabilidade foi determinada em câmara climatizada. As amostras cortadas nas dimensões 15 x 15 x 5 cm<sup>3</sup> após cura foram seladas em todas as faces deixando uma livre. Em seguida, os corpos são armazenados e inicialmente em equilíbrio com ar a  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$  e  $(50 \pm 5) \% \text{UR}$ . O critério para equilíbrio foi um período longo o suficiente para o peso da amostra para estabilizar de modo que duas determinações diárias sucessivas (24 h à parte) do peso acordado dentro de 0,1% da massa do teste espécime. Os corpos de prova foram colocados em uma câmara climática, definido para expor as amostras a um ciclo diário de umidade relativa (8 h em 75% UR - 16 h a 33% UR), e seus ganhos e perdas de peso foram medidos com uma precisão de 0,001 g.

**Tabela 7:** Perda de massa permitida no ensaio de durabilidade

Solo	Tipo segundo ASHTO	Perda de massa (máx) (%)
A-1-B	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia	14
A-2-4	Pedregulhos ou areia siltosas e argilosas	14
A-2-5	Pedregulhos ou areia siltosas e argilosas	14
A-2-6	Pedregulhos ou areia siltosas e argilosas	10
A-2-7	Pedregulhos ou areia siltosas e argilosas	10
A-4	Solos siltosos	10
A-5	Solos siltosos	10
A-6	Solos argilosos	7
A-7	Solos argilosos	7

Fonte: dados da pesquisa

### 3. CONCLUSÕES

O solo para produção de tijolos solo-cimento deve conter de 10 a 30% de argila, 30 a 60% de areia + silte e 6 a 10% de cimento. Alguns fabricantes estão migrando para outras matérias-primas, como o filito que apresenta em sua composição argila, feldspato e quartzo.

A composição do solo não deve conter o argilomineral montmorilonita, pois em contato com água expande, além de promover retrações consideráveis, podendo promover fissuras no tijolo. Além disso, não se recomenda que o solo apresente matéria orgânica, a qual pode deteriorar o cimento com o tempo.

O destorroamento ou moagem ainda é primitiva, pois uma moagem mais fina com certeza acelerará as reações e poderão melhorar as propriedades.

As prensas utilizadas normalmente são manuais o que limita a pressão de conformação. Prensas hidráulicas em que a pressão pode ser regulada, garantirão maior densidade de compactação e por sua vez, maior resistência após cura. No entanto, demandam maior produção.

O processo de umidificação para cura também ainda merece estudos, visto que fica provado que a umidificação é necessária por pelo menos nos primeiros 7 dias. Mas uma umidificação via borrifadores é ineficaz, pois umi-

difica uma parte do tijolo, enquanto outras ficam sem receber água.

Poucos estudos foram realizados com relação a durabilidade do tijolo. Não foram observados estudos em que a água possa estar contaminada com produtos químicos ou sais que podem estar presentes na composição da mesma.

O tijolo solo-cimento tem ganhado espaço na construção civil nos últimos anos. No entanto, a falta de metodologias concretas para produção do produto ainda é uma evidência. No entanto, o produto é uma alternativa para atender sobretudo a uma produção sustentável de baixo custo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à PROPEX e ao Edital PIBIC do Instituto Federal de Sergipe.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SANTOS, A. A., RODRIGUES, DE OLIVEIRA, M. D., T. “Estudo da potencialidade da construção com terra visando a sustentabilidade em Sergipe”, *Caderno de Graduação-Ciências Humanas e Sociais-UNIT-Sergipe*, 6, (1) 79, 2020.
- [2] BATTAGIN, A. F. “Uma breve história do cimento Portland. Associação Brasileira de Cimento Portland”, *ABCP*. São Paulo, 2003. Disponível em [www.abcp.com.br](http://www.abcp.com.br) [15/07/2003], 2009. Acessado em 22.02.2021.
- [3] SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI A. A. S.; PEREIRA J. A. “Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, (2) 205–212, 2008.
- [4] SEGANTINI, A. A. S., ALCÂNTARA, M. A. M. Solo-cimento e solo-cal. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 2, p. 834-861, 2007.
- [5] DEBOUCHA S., HASHIM R. “A review on bricks and stabilized compressed earth blocks”. *Scientific Research and Essays*, 6(3), pp. 499-506, 2015.
- [6] MINKE, G. “Manual de construção em terra: desenho e tecnologia uma arquitetura sustentável”. Tradução Jorge Simões. São Paulo: B4, 2001.
- [7] SEGANTINI, A. A. S.; WADA, P. H. “Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição”. Universidade Estadual Paulista, Av. Brasil, 56, 15385-000, Ilha Solteira, São Paulo, 2011.
- [8] VILELA, A. P. et al. “Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste”. *Construction and Building Materials*, v. 262, p. 120883, 2020.

- [9] MIRANDA, C. M. “Estudo de tijolos de solo-cimento com substituição do solo por resíduos da construção civil na sua composição”, 2020. Disponível em <http://hdl.handle.net/11612/1893>, acessado em 20.03.2021.
- [10] SCHRÖDER, H. “Mit Lehm ökologisch planen und bauen (Text Book)”, *Springer (2010)*. ISBN: 978-3-8348-2227-7.
- [11] CARVALHO, B. T., SILVOSO, M. M., ROLA, S. M. “Análise das manifestações Patológicas em construções com bloco de solo-cimento: estudo de caso Laboratório do IVIg-UFRJ”. In: *6ª conferência sobre Patologia e reabilitação de Edifícios*, Rio de Janeiro, 2018.
- [12] PINTO, T. P. “Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento. São Paulo”. ABCP, 1980. 22p.
- [13] SILVA, S. R. “Tijolos solo cimento reforçados com serragem de madeira”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2005. Disponível em <http://hdl.handle.net/1843/BUDB-8C5PAL>. Acessado em 10.02.2021.
- [14] DÉBORA, F.; EDUARDA, L.; M. “Blocos Ecológicos de solo cimento com incorporação de Resíduos”. In: REHABEND. *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, Caceres, Spain, May 15-18, 2018. Disponível em <http://hdl.handle.net/10198/18061>. Acessado em 20.03.2021.
- [15] CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. Manual de construção com solo cimento, 3ª edição, ABCP, São Paulo, 2002.
- [16] ABIDB, R., KAMOUNA N., JAMOUCSI, F. et al. “Fabrication and properties of compressed earth brick from local Tunisian raw materials”. *Ceramica y vidrio (2021)*.
- [17] LOPES, W. G. R. “Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas. Campinas, SP” [Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, (SP), 2002. Disponível em [http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257285/1/Lopes\\_Wilza\\_Gomes\\_Reis\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257285/1/Lopes_Wilza_Gomes_Reis_D.pdf). Acessado em 12.02.2021.
- [18] MACEDO, M. M. “Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos”. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2004. Disponível em <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5694>. Acessado em 02.01.2021.
- [19] MOTTA, Jessica Campos Soares Silva. Tijolo solo cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. *Revista Exacta*, Belo Horizonte, 7, (1) 13-26, 2014.
- [20] NUNTAPORN K., EDWARD A. L., PITCHARAT I., WICHIT P. , BENYA C. , Parinya .” Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production”. *Case Studies in Construction Materials*, (13), 2020.
- [21] QUERADOGO, K. A. J., AUBERT J. E., ESCADEILLAS, C. T., G. “Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant?” *Construção e materiais de construção*, 236, 2020.
- [22] BANJO, A., MICHEAL, O. “Prospects of coir fibre as reinforcement in termite mound clay bricks”. *Acta technologica agriculturae (2016)*.
- [23] LIMA, R. C. O. “Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolo solo-cimento

incorporados com resíduo de granito”. *Programa de pós-graduação em Engenharia civil e ambiental. Universidade de Campina Grande, PB. 2010*. Disponível em <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2835>. Acessado em 12.02.2021

[24] HANY, E., FOUAD, N., WAHAB, M. A. et al. “Sadek Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement”. *Construction and Building Materials*, 281, 2021.

[25] RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. “Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of Soil Cement Bricks”. *Procedia Materials Science*, 8, 197–202, 2015.

[26] ABCP. “Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio”. São Paulo-SP, 1985. ABCP, ET-35, 51p.

[27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10883, Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento, 2018.

[28] BARBOSA, N. P.; SOUZA, S. M.; MATTONE, R. Um Método Construtivo de Casas Populares com Tijolos Prensados de Terra Crua Estabilizados Com Cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 4., São Paulo, 1996. Anais... São Paulo: ABCP, 1996. v. 3, p. 263-276.

[29] AMARAL, M. C. et al. “Soil–cement bricks incorporated with eggshell waste”. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management. ICE Publishing*, p. 137-141, 2013.

[30] CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos, vol1, Editora Blucher, 2012.

[31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do limite de Liquidez de solos, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

[32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade de solos, Rio de Janeiro, 2016.

[33] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D4318, 2010: Standard test method for Liquid Limit, Plastic limit, and plasticity index of soils.

[34] JOSE, A., KASTHURBA A. K. “Laterite soil-cement blocks modified using natural rubber latex: Assessment of its properties and performance”. *Construction and Building Materials*, 273, 2021.

[35] SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI A. A. S.; PEREIRA J. A. “Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12, (2) 205–212, 2008.

[36] NAGARAJ, H. B., SRAVAN, M. V., ARUN, T. G. JAGADISH, K. S. “Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks”. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 3 (1) 54–61, 2014.

[37] SEKH, D.C., NAYAK, S., “Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks”. *Constr. Build. Mater.* 166, 531–536, 2018.

[38] DAO, K., OUEDRAOGO, M., MILLOGO, Y. et al. “Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement”. *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 84–96.

- [39] MORIARTY, J. P., SVARE, T. I., THERKILDSEN, O. K. “Soil-cement for low-cost housing”. *Batiment International/Building Research & Practice, official journal of CIS, Vol. 3, No.3*, 1975.
- [40] SILVA, C. T. et al. “Análise da absorção de água de tijolos de solo-cimento incorporados com pó de brita”. 2020. *Trabalho conclusão de curso*. Disponível em <http://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/4994>. Acessado em 10.01.2021.
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-NBR 7181, Determinação da granulometria, Rio de Janeiro, 2016.
- [42] MARQUES, M. A. G.; MENDES, L. F. “ESTUDO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO QUANTO À SUA ADEQUAÇÃO ÀS NORMAS VIGENTES”. 2020. Disponível em <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1331>, Acesso em 20.03.2021.
- [43] JIMÈNEZ, C. DELGADO, G. IGNACIO. “The selection of soils for unstabilised earth building: a normative review”. *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 237–2.
- [44] BHAIRAPPANAVAR, S., LIU R., SHAKOOR, A. “Eco-friendly dredged material-cement bricks”. *Construction and Building Materials*, (2021), 121524.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12024. Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento, 2012.
- [46] CERATTI, J. A. P., CASANOVA, F. J. “Um método físico-químico para dosagem de solo-cimento. In Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em geotecnica”. In Anais... RJ: COPPE; ABMS; ABGE, 2V.1, p.191-200, 1988.
- [47] CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. Manual de construção com solo cimento – MT-5. Thaba, Camaçari, Bahia. 1999.
- [48] SAVASTANO, O. V. Transitions zone of hardened cement paste and vegetable fibres. Fibre reinforced cement and concrete. R. N. Swamy, editor. London, E & FN Spon, 1992 p.1110-1119, apud JOHN, V. M.
- [49] MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M. “Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes”. *Revista Solos e Rochas*, São Paulo, 24, (3): 191-209, Setembro-Dezembro, 2001.
- [50] BERALDO, A. L. et al. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia. Julho de 2002.
- [51] LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Produção de painéis cimento madeira de eucalipto. Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Anais. 26 a 27 de junho 2002. Lavras, Minas Gerais.
- [52] CAMPOS, A.; NASCIMENTO J., BATISTA J.; BRITO. Comportamento estrutural de tijolos de solo-cimento utilizando diferentes fontes de água e métodos de cura. Interações (Campo Grande), Campo Grande, v. 20, n. 1, p. 283-296, jan. 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?>, acessado em 02.01.2021.
- [53] AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL (ASTM), C. 67-03, Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 2003.

- [54] MOREL, J. C., PKLA, A. WALKER P. “Compressive strength testing of compressed earth blocks”. *Constr. Build. Mater.* 1 (2007) 303–309.
- [55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Solo-cimento - NBR 8492, Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio, 2020.
- [56] GOEL G., KALAMDHAD, A. S. “An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing”. *Constr. Build. Mater.* 148 (2017) 334–343.
- [57] MUNIR M. J., S. M. S. KAZMI, Y. F. WU, A. HANIF, M. U. A. KHAN. “Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: an industrial-scale study”. *Journal Cleaner Production* 174 (2018) 1122–1135.
- [58] JOSHI, A. et al. “Performance of stabilized adobe blocks prepared using construction and demolition waste”. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 4, (1) p. 13, 2019.
- [59] KHOUDJA, D. et al. “Mechanical and thermophysical properties of raw earth bricks incorporating date palm waste”. *Construction and Building Materials*, v. 270, p. 121824, 2021.
- [60] SIQUEIRA, F. B. M., AMARAL, C, BOUISSA, R. A., HOLAND.J. N. F. Influence of industrial solid waste addition on properties of soil-cement bricks. *Cerâmica* 62, 237-24, 2016.
- [61] LEONEL, R. F., FOLGUERAS, M. V., DALLA VALENTINA, L. V. O., PRIM, S. R., PRATES, G. A., & CARASCHI, J. “Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand”. *Cerâmica*, 63(367), 329-335, 2017.
- [62] SIQUEIRA, F. B., J. N. F. HOLANDA. “Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks, Northern Fluminense State University”. *Journal of Environmental Management*,131, 2013.
- [63] ZAK P., ASHOUR. T., KORJENIC A. et al. “The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials”. *Construction and Building Materials*, v106, n1, 179-188, 2016.
- [64] CRISTINA, P. et al. “Tijolo solo cimento com adição de fibra vegetal: uma alternativa na construção civil”. *Research, Society and Development*,2018 v. 7, n. 9, p. e779439-e779439.
- [65] JORDAN, R. A.; MATHEUS, V.; MARTINS, E. A. S. et al. Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane Bagasse. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 39, (1) p.26-31, jan./feb. 2019.
- [66] KONGKAJUN, N. et al. “Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production”. *Case Studies in Construction Materials*, v. 13, p. e00448, 2020.
- [67] BARROS, M. M. “Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin”. *Construction and Building Materials*, 232, p.117252, 2020.
- [68] FRANÇA, B. R. et al. “Durability of soil-cement blocks with the incorporation of limestone residues from the processing of marble”. *Materials Research*, v. 21, 2018.
- [69] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13353: 2012. Soil-cement materials for monolithic walls of soil-cement without structural function – Requirements.

# ESTUDO DA CRISTALINIDADE EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO CRISTALITO EM CONCRETOS DE 25 MPA OBTIDOS VIA PASTA DE CIMENTO PORTLAND

*Thiago A. Remacre Munareto Lima  
César D. B. Dos Santos  
Gabriel S. Bento*

## RESUMO

O aprimoramento da vida útil e durabilidade do concreto pode ser alcançado através da investigação do comportamento das propriedades sub-microestruturais e cristalinas do concreto. Esta investigação pode levar a prevenção e entendimento de patologias que possam ser decisivas na durabilidade e estabilidade das estruturas de concreto. Com isso, o presente artigo vem apresentar um estudo sub-microestrutural da cinética de cristalização do concreto através da determinação do grau de cristalinidade e evolução das fases cristalinas em função do tempo de vida do concreto endurecido com 25 MPa para 7, 28, 53 e 128 dias. Os resultados mostraram que independente da região do grão do concreto, superfície ou interior do corpo de prova, a cristalinidade relativa mínima é alcançada próxima aos 28 dias de cura e moldagem do concreto, sendo que o maior tamanho de cristalito é obtido para 128 dias de moldagem do corpo de prova.

**Palavras-chave:** Cimento, Hidratação, Cristalinidade, Concreto.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o surgimento do concreto, no início do século XIX [8], até os dias de hoje, o aparecimento de novas tecnologias e de novos materiais para a construção civil possibilitou um grande desenvolvimento nesta área. Sendo o concreto um material compósito, em termos reológicos, a exigência por parâmetros que melhor definam suas características fez com que novos estudos fossem iniciados. Logo, considerar o concreto como um fluido com comportamento reológico não é recente [4,12]. Entretanto, poucos estudos

são reportados na literatura sobre o estudo reológico do concreto endurecido em idades avançadas de fabricação ou até mesmo após um curto período de cura mediante hidratação dos grãos de cimento. O aprimoramento da vida útil e durabilidade do concreto pode ser alcançado através da investigação do comportamento das propriedades sub-microestruturais e cristalinas. Esta investigação pode levar a prevenção e entendimento de patologias da estabilidade das peças de concreto, e assim, contribuir nos avanços em rotinas de dimensionamento e na tecnologia da utilização do concreto como elemento estrutural. Muitos métodos de ensaios destrutivos foram desenvolvidos para avaliar o desempenho mecânico do concreto no estado fresco e endurecido [1]. Todos esses métodos dependem da consideração implícita de que o número de constantes no universo de variáveis é apenas um, capacidade de hidratação dos grãos de cimento, de maneira que a resistência e durabilidade do concreto possa ser expressa em termos de um valor unitário. Os métodos de ensaios não levam em consideração a variável da formação da microestrutura do concreto, distribuição das fases cristalinas, grau de cristalinidade e tamanho dos cristalitos do concreto formado após a hidratação das fases minerais do clínquer dos grãos de cimento. Todas as fases minerais formadas, quando em contato com a água, mediante reações de hidrólise, dão origem a compostos hidratados que conferem acentuada característica de ligante hidráulico ao cimento e estão diretamente relacionados com a resistência mecânica do material após a hidratação dos grãos de cimento. Os grãos de cimento da superfície de uma estrutura de concreto são rapidamente hidratados enquanto os grãos mais internos possuem uma hidratação por capilaridade mais lenta e dificultosa. O ganho de resistência do concreto e sua durabilidade estão ligados estreitamente com a cinética de hidratação das fases minerais ativas do cimento, bem como, as proporções das fases de silicato de cálcio hidratado também interferem no ganho de resistência do concreto em estado plástico caracterizado como início da cristalização e formação do concreto propriamente dito.

Em parceria com empresas concreteiras e indústrias de cimento do estado de Sergipe, foi estabelecido um estudo investigativo da cristalinidade dos grãos externos e mais internos de peças estruturais de concreto ( $F_{ck} = 25$  Mpa) para diferentes idades de concretagem. Com isso, o presente artigo vem

apresentar um estudo sub-microestrutural da cinética de cristalização dos grãos de concreto em diferentes idades de concretagem e através de estudos por difratometria de raios X (DRX) foi determinado o grau de cristalinidade em função do tamanho dos cristalitos dos grãos de concreto, como também a evolução das fases cristalinas em concretos com diferentes idades de concretagem: 7, 28, 53 e 128 dias.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Preparação das amostras de concreto**

Amostras de peças de concreto endurecido baseou-se em amostragem de corpos de prova cedidos pelo Laboratório de Ensaios de Materiais da Construção Civil (LEMC) do SENAI de Sergipe. Para estes estudos foram cedidos corpos de prova de 7, 28, 53 e 128 dias de concreto estrutural utilizados em duas obras que estão em execução simultânea na Universidade Federal de Sergipe. Vale ressaltar que os corpos de prova foram moldados nos canteiros de obras através de concreto fornecido pela empresa concreteira da região. Para preparação do concreto foi utilizado o cimento CP III-32 F, cimento Portland de alto forno com aditivo de partículas de Filler da moagem fina de calcário, areia da dragagem leitos de rios da região como agregado miúdo e pedra britada 3<sup>o</sup>/4. O traço utilizado foi de 1 (cimento) :2 (areia) :3 (brita). Os corpos de prova foram rompidos por 25 MPa de carga axial para a coleta de frações de concreto do interior (região central) e da parte exterior da interface entre concreto e ar. Ao todo, foram investigados 60 corpos de prova, sendo um total de 15 corpos de prova no padrão 10 x 20 cm para cada idade de concretagem.

### **2.2 Análise por difratometria de raios X**

Para identificação das fases cristalinas existentes nas amostras foi utilizado a técnica de difratometria de raios X do pó. Foi utilizado um difratômetro da marca Rigaku DMAX 100 instalado no Departamento de Física da Universidade Federal de Sergipe. Os parâmetros de operação do equipamento foram: tubo de raios X com uma tensão 40 kV, corrente de 40 mA (com potência 1,6 kW) com radiação  $K_{\alpha 1}$  e  $K_{\alpha 2}$  do Cu ( $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$  e  $1,5444 \text{ \AA}$ ), intervalo

angular  $2\theta$  de medida foi de  $10^\circ$  a  $70^\circ$ , em modo de varredura contínua de  $1^\circ.\text{min}^{-1}$  com fenda de 10 mm. Foi utilizada amostras em forma de pó de concreto macerado em almofariz e posteriormente estas amostras forma peneiradas com uma peneira de 100 mesh e dispostas uniformemente sobre uma lâmina de vidro para medida. Para as análises, foi utilizado vários padrões referência de compostos com os elementos Si, Na, Al, Ca, Fe, Be, O e H. Os padrões de referência destes compostos foram obtidos no banco de dados ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) acessado via portal da pesquisa da CAPES.

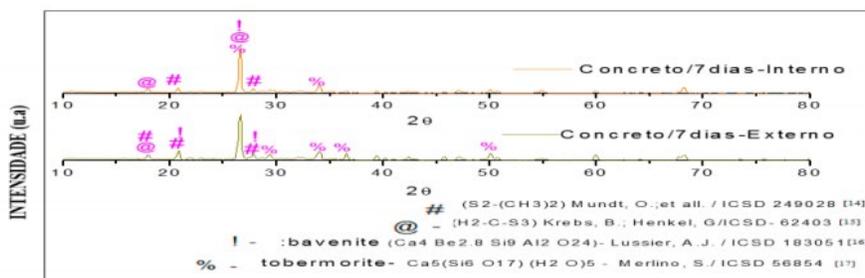
### 3. RESULTADOS

O estudo dos grãos de concreto endurecido das amostras via difração de raios X (DRX) busca qualitativamente: (i) avaliar as fases cristalinas das amostras; (ii) estudar modificações estruturais dos grãos de concreto em relação a idade de moldagem do concreto e, por fim, (iii) estimar via método de Scherrer as tendências de tamanhos dos cristalitos nos grãos das amostras. Vale a pena salientar que as medidas de DRX foram realizadas em sequência (único turno) com as mesmas condições experimentais.

Na Figura 1 estão expostos os difratogramas de raios X da amostra de 7 dias de concretagem, que revelam que esta amostra é policristalina com tamanhos de partículas bem pequenos por apresentar uma distribuição de reflexões provenientes das distâncias interplanares dos planos cristalinos pertencentes a compostos cristalinos com Si, Al, Ca, O e H em sua constituição química. Realizando uma análise qualitativa das posições dos picos de maior intensidade de reflexão dos planos cristalinos contidos nos fragmentos de concreto da amostra de 7 dias, percebemos que estas amostras contém reflexões sobrepostas resultando em diferentes fases cristalinas, tais como polimorfos de silicatos de cálcio hidratado [ $S_2(\text{CH}_3)_2$  e  $\text{CS}_3\text{H}_2$ ] [10,5], composto de bavenite [ $\text{Ca}_4\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_9\text{O}_{26}(\text{OH})_2$ ] [7] e tobermorite [ $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{H}_2\text{O})_5$ ] [9]. Portanto, isto sugere que o concreto endurecido destas amostras contém cristais com uma diversidade de arranjo cristalográfico que vão desde monoclinica para tobermorite a hexagonal para polimorfos de C-S-H.

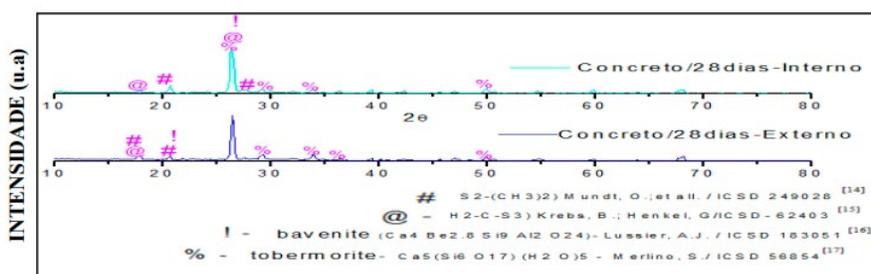
Para esse estudo foi definido que os grãos de concreto, sólido formado pela interação entre agregados e cimento, são compostos por várias partículas

cristalinas formadas por cristalitos que, por sua vez, são as menores frações representativas de um cristal como um todo.



**Figura 1.** Difratomogramas obtidos em sequência com mesmas condições experimentais das amostras para 7 dias de concretagem comparadas com diversos difratogramas padrão de minerais [14,15,16,17] à base de Si, Al, Ca, O e H.

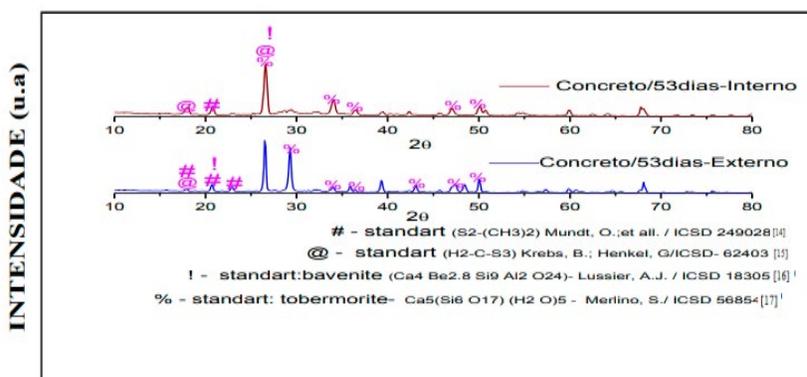
No difratograma da Figura 2, das amostras de 28 dias de concretagem, também foi notado coexistência de fases cristalográficas condizentes com as fases apresentadas pelas amostras do lote 1. Aos 28 dias não foi percebido, qualitativamente por essa técnica, alterações significativas de fases minerais dos cristalitos relacionadas com as regiões internas e superfície de amostragem do corpo de prova de concreto. Também aos 28 dias foram encontradas fases semelhantes do concreto aos 7 dias de moldagem, conforme difratogramas das Figuras 1 e 2.



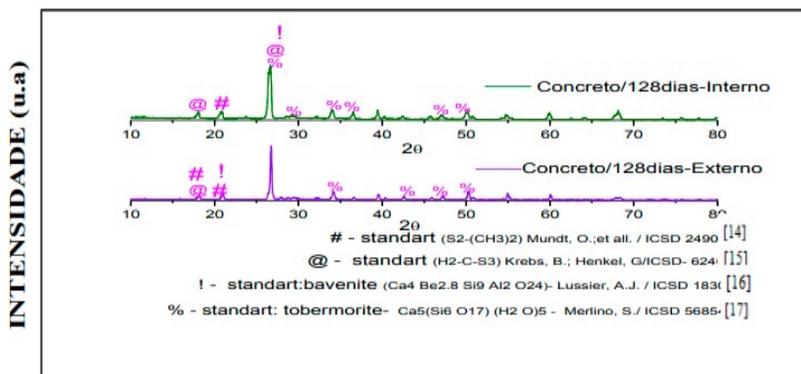
**Figura 2.** Difratomogramas obtidos em sequência com mesmas condições experimentais das amostras de 28 dias de concretagem comparadas com diversos difratograma padrão de minerais [ 14,15,16,17] à base de Si, Al, Ca, O e H.

Os difratogramas das Figuras 3 e 4 são de maneira geral semelhantes na constituição química. Ambas as amostras apresentaram diversidade de

fases mineralógicas de silicatos de cálcio. Algumas reflexões são únicas no difratograma da amostra de concreto/53 dias-externo, por exemplo, a reflexão de planos cristalinos em 28,5° e 28° pode estar atrelado ao processo de cristalização da sílica. Entretanto, para pastas com baixa relação C/S, o C-S-H se assemelha muito com a tobermorite [9]. Picos de reflexões na região de 2~39° foram relatados por alguns autores [14], como evidência de tobermorite no concreto. Todavia, não foi observado picos nesta região em nosso padrão de referência adotado para estrutura monoclinica desse mineral [9]. Em todas as amostras não foram detectadas reflexões providas da fase mineral etringite [11], um dos primeiros produtos cimentantes da hidratação do cimento, que possui reflexões marcantes a  $2\theta = 15,7^\circ$  e  $24^\circ$ . Esse resultado corrobora com os relatos de estudos que indicam a diminuição acintosa de quantidades de etringite próximo aos 7 dias de cura do concreto devido a extinção de íons sulfatos livres [14].

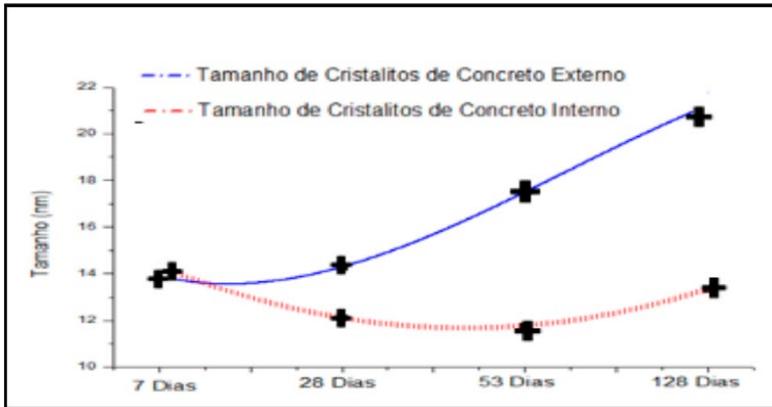


**Figura 3.** Difratogramas obtidos em sequência com mesmas condições experimentais das amostras de 53 dias de concretagem comparadas com diversos difratograma padrão de minerais [14,15,16,17] à base de Si, Al, Ca, O e H.



**Figura 4.** Difratomogramas obtidos em sequência com mesmas condições experimentais das amostras de 128 dias de concretagem comparadas com diversos difratograma padrão de minerais [14,15,16,17] à base de Si, Al, Ca, O e H.

Para análise da tendência do tamanho de cristallitos dos grãos de concreto em função dos dias de concretagem, em primeiro momento há uma uniformidade de tamanhos de cristallitos para 7 e 28 dias após concretagem. Mas conforme a curva de tendência da Figura 5, os cristallitos que compõem os grãos do interior do corpo de prova tendem a diminuir o tamanho conforme o avanço do período de hidratação do concreto. Entretanto, aos 128 dias de hidratação, os cristallitos internos voltam a apresentar tamanhos próximos aos 7 dias iniciais. Existe uma apreciável diferença dos tamanhos de cristallitos em função da região núcleo e superfície do grão de concreto analisado para 53 e 128 dias de concretagem. Nestes concretos os cristallitos da superfície do corpo de prova cresceram quase 48% em média a mais que os cristallitos dos grãos do interior da estrutura de concreto. Essa tendência é evidenciada na curva da Figura 5 para o comparativo do tamanho dos cristallitos extraídos da superfície e do interior das peças de concreto.



**Figura 5.** Curvas de tendência de tamanhos de cristalitas para regiões internas e superficiais de peças de concreto após diferentes idades de concretagem.

Aparentemente, o processo de crescimento do cristalito é sensível à variação intensa de pressão e temperatura do meio. É importante destacar que após o preparo da pasta cimentícia, têm-se a diminuição da plasticidade onde são formadas as primeiras ligações entre grãos de partículas do concreto. Este processo altera a quantidade de ar nos espaços vazios do meio, e conseqüentemente, há uma variação da pressão de equilíbrio do meio interno. Devido ao contato direto com a água e o ar do meio externo o crescimento dos grãos de concreto na superfície é menos afetado por pressões e temperaturas oriundas do interior da peça durante o processo de endurecimento, pois a hidratação é iniciada com uma reação exotérmica, em que é liberado no interior do concreto, grandes quantidades de energia térmica. Para a discussão de possíveis variações de cristalinidade dos grãos de concreto em relação a região do corpo de prova, idade de moldagem e tamanho do cristalito, é necessário estimar o grau de cristalinidade dos grãos de concreto em função da sua localização dentro do corpo de prova.

Para a discussão de possíveis variações de cristalinidade dos grãos de concreto em relação a região do corpo de prova, idade de moldagem e tamanho do cristalito é necessário adotar a metodologia descrita pela referência [13,6], em que o grau de cristalinidade pode ser estimado através da seguinte relação pela Eq. 1:

$$X_c = 1 - \left( \frac{V_{50,7/50,1}}{I_{50,1}} \right) \quad (1)$$

Em que:  $I_{50,1}$  é a intensidade correspondente ao pico mais intenso em  $2 = 50,1^\circ$  dentre dois picos separados por um vale nos difratogramas das Figuras 1 a 4, e  $V_{50,7/50,1}$  corresponde justamente a intensidade do vale existente entre os picos escolhidos em  $2 = 50,1^\circ$  e  $2 = 50,7^\circ$  nos difratogramas. A tendência é que este vale da região escolhida desapareça completamente em amostras amorfas, amostras sem ordenamento a longa ordem de rede cristalina, já que a tendência é que estes picos se alarguem e diminuam de intensidade à medida que o grau de amorfismo cresça, fazendo com que  $V_{50,7/50,1} \rightarrow I_{50,1}$  e  $X_c \rightarrow 0$ .

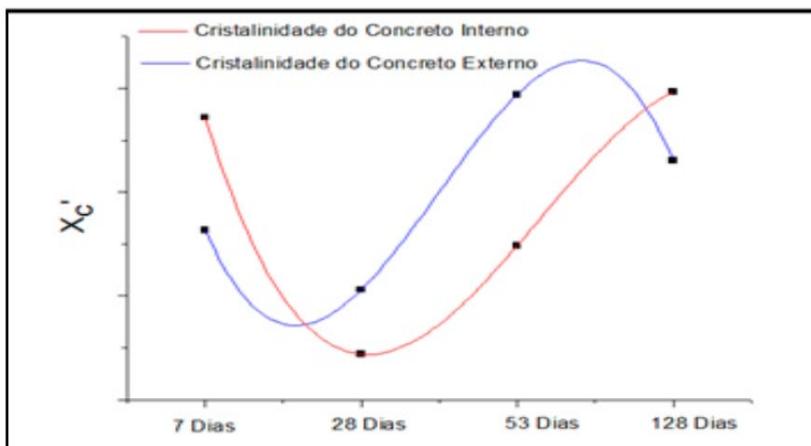
A Eq. 1 é muito dependente do tamanho do cristalito encontrado nas amostras [6]. Isto é particularmente importante porque os difratogramas apresentados das amostras possuem alargamento a meia altura (FWHM) característicos de cristalitos manométricos e as estimativas de tamanho pela equação de Scherrer [3,15] confirma essa interpretação. Quanto menor as dimensões do cristalito, mais largo o pico de difração será, e portanto, mais difícil será identificar o valor correto do vale existente entre os picos a  $2 = 50,1^\circ$  e  $50,7^\circ$ . Os autores [6] propuseram um segundo método baseada na largura a meia altura de um pico de intensidade de reflexão isolado e presente em todos os difratogramas da estrutura analisada. Foi escolhido o pico em  $2 = 36,5^\circ$  com largura a meia altura com pouca variação para os difratogramas obtidos. Este último método, descrito pela Eq. 2 abaixo, é um aprimoramento da Eq. 1, em que  $B_{(36,5^\circ)} = 0,245^\circ$  é a largura em graus à meia altura relativo à reflexão a  $2 = 36,5^\circ$ .

$$X'_c = B_{(36,5^\circ)} \sqrt[3]{X_c} \quad (2)$$

Os dados quantitativos referentes a cristalinidade dos difratogramas das amostras estão melhor representados na curva de tendência de cristalinidade da Figura 6. Com essa análise é possível determinar a cristalinidade dos grãos de concreto em função dos dias de concretagem e regiões do corpo de prova de concreto. Enquanto os resultados da cristalinidade revelaram que, inde-

pendente da região de amostragem, os grãos de concreto são relativamente menos cristalinos aos 28 dias que as demais idades de concreto.

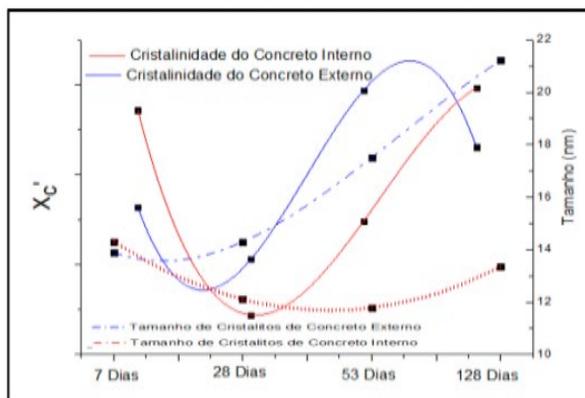
Em termos de região de amostragem, as frações de grãos de concreto do interior do corpo de prova são mais cristalinos aos 7 dias que os grãos de concreto da superfície. Esses se tornam bem cristalinos a partir dos 28 dias de moldagem, sendo que aos 128 dias de idade o concreto apresenta uma melhor homogeneidade cristalina entre as regiões internas e externas do corpo de prova, conforme evidenciado nas curvas de tendência, evidenciada na Figura 6.



**Figura 6.** Perfil de tendência de cristalinidade dos grãos de concreto para regiões internas e superficiais em função da idade de moldagem do corpo de prova.

Para melhor discussão dos resultados, é proposto na Figura 7 um modelo unificado que correlaciona as informações do tamanho do cristalito e cristalinidade relativa com as idades e regiões de amostragem do corpo de prova. Analisando a tendência de cada informação de forma conjunta, têm-se: i) a cristalinidade relativa dos grãos de concreto acompanha o perfil de crescimento do tamanho dos cristalitos destes grãos, ou seja, grãos de concreto com cristalitos menores apresentam cristalinidade inferior aos grãos maiores; ii) de maneira geral, na análise realizada neste estudo, há uma tendência no aumento do tamanho dos cristalitos e cristalinidade do grão com o avanço da idade dos concretos. Sendo que a cristalinidade decresce nos primeiros 14

dias e após os corpos de provas alcançarem a marca de 28 dias, a cristalinidade aumenta de maneira linear até os 128 dias.



**Figura 7.** Perfil de tendência de cristalinidade dos grãos de concreto para regiões internas e superficiais em função da idade de moldagem do corpo de prova.

## 4. CONCLUSÕES

Corroborando os dados da tendência de tamanhos de cristalitos versus cristalinidade relativa dos grãos de concreto, é possível atribuir o aumento de cristalinidade devido ao maior grau de organização da estrutura cristalográfica alcançada. Partículas menores são mais reativas e desorganizadas estruturalmente que partículas maiores. Essas últimas crescem por coalescência das partículas menores formando grãos maiores e mais cristalinos devido a uma maior organização da estrutura cristalográfica. Portanto, no presente estudo, ficou claro que a cristalinidade relativa nas regiões do corpo de prova é alcançada próxima aos 28 dias de cura e moldagem do concreto. Essa idade segundo normas nacionais [2], é a idade indicada para ensaios de resistência mecânica que visam determinar o  $f_{ck}$  máximo do corpo de prova de concreto para desempenho estrutural.

## REFERÊNCIAS

- [1] AÏTCIN, P. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 9, p. 1349-59, 2000.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [3] CULLITY, B. D., STOCK, S. R. *Elements of X-Ray Diffraction*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 820 p.
- [4] FERRARIS, C. F. Measurement of rheological properties of high-performance concrete: state of the art report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, [S.l.], v. 104, n. 5, p. 461-478, 1999.
- [5] KERBS, B.; HENKEL, G. S. Hydrogen bridges: The crystal structure of a new modification of trithiocarbonic acid. *Zeitschrift fuer Kristallographie*, v.149, p. 373-382, 1979.
- [6] LANDI, E., TAMPIERI A., CELOTTI G., SPRIO S. Densification behavior and mechanisms of synthetic hydroxyapatites. *Journal of the European Society*, v.20, p. 2377-2387, 2000.
- [7] LUSSIER, A. J.; HAWTHORNE, F. C. Short-range constraints on chemical and structural variations in bavenite. *Mineralogical Magazine* v.75, n.1 p.213-239, 2001.
- [8] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p. 1997.
- [9] MERLINO, S.; BONACCORSI, E.; ARMBRUSTER, T. The real structures of clinotobermorite and tobermorite 9A: OD character, polytypes, and structural relationships. *European Journal of Mineralogy*, v. 12, p. 411-429, 2000.
- [10] MUNDT, O.; BECKER, G.; BAUMGARTEN, J. et al. Element-Element-Bindungen. XI [1,2] Kettenbildung bei kristallinen Dimethyldichalkogenanen. *Zeitschrift fuer Anorganische und Allgemeine Chemie*, v. 632, p.1687-709, 2006.
- [11] MOORE, A. E.; TAYLOR, H. F. W. Crystal structure of ettringite. *Acta Crystallographica B*, v. 26, p. 386-393, 1970.
- [12] NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
- [13] SANOSH K. P., CHU M. C., BALAKRISHNAN A. Synthesis of nano hydroxyapatite powder that simulate teeth particle morphology and composition. *Current Applied Physics* v. 9, p. 1459-1462, 2009.
- [14] VAUPEL, H.; ODLER, I. A discussion of paper “Microstructural investigations on aerated concrete”, *Technical University Clausthal Press*, v.3, p.218-229, 2000.
- [15] YOUNG, R. A. *The Rietveld Method*, Oxford Science Publications, 1993.

# ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO EM DIFERENTES REGIÕES EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CONCRETAGEM

*Thiago A. Remacre Munareto Lima*

*Luís Flávio A. Mendonça*

*César D. B. Dos Santos*

*Iuri dos Santos Bispo*

*Gabriel S. Bento*

*Rafaela R. Dantas*

*Wandeley S.S Júnior*

## RESUMO

O concreto é um material heterogêneo muito empregado em edificações. Com intuito de investigar a viabilidade das estruturas de concreto, moldes de corpos de prova foram preenchidos para avaliar o comportamento mecânico de diferentes esforços para obter a análise da cinética de endurecimento do concreto versus resistência mecânica em diferentes regiões da peça de concreto: região axial e superficial. Esse estudo é feito de maneira a verificar os 3, 7 e 28 dias de cura, e ter um acompanhamento da influência da hidratação ao longo dos dias na resistência mecânica das diferentes partes do corpo de prova, visando atingir um  $f_{ck}$  de 30 MPa no final da cura. Nos primeiros 7 dias de cura os grãos de concreto da região axial obtiveram um aumento de resistência abrupto comparado com a região superficial, a partir do sétimo dia o processo torna-se o inverso. Estes resultados instigam novos postulados na área estrutural.

**Palavras-chave:** Estrutura de concreto, hidratação, resistência mecânica.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a idade da pedra que o homem sente a necessidade de proteção contra os agentes externos (precipitação, vento). Dentro desse contexto, juntamente com a evolução ao longo do tempo, surge o concreto. Isso não se dá atoa, ele é um dos materiais mais utilizados no mundo pela construção civil por ser versátil, resistente, além de ter boa durabilidade. O concreto moderno utilizado atualmente para a construção dos mais diversos tipos de estrutura

é fruto de inúmeros trabalhos, que são resultados de milhares de anos observando a natureza e busca por aperfeiçoar materiais, técnicas, teorias e formas estruturais.

Desta forma, constatou-se que a história do concreto não começou no século passado, mas com a própria civilização humana, pois a partir do momento que o homem existe sobre a terra, ele tem a necessidade básica de morar e morar melhor a cada dia, desenvolvendo novas tecnologias para isto. As relações estrutura-propriedade constituem a essência da moderna ciência dos materiais.

O concreto tem uma estrutura muito heterogênea e complexa. Consequentemente, é muito difícil estabelecer modelos exatos, a partir dos quais o comportamento do material pode ser previsto com segurança [1]. Portanto, no decorrer do tempo, pesquisas foram iniciadas para entender o comportamento desse tipo de insumo e mais recentemente evidencia-se a necessidade de entender como o comportamento microestrutural irá refletir macroscopicamente em uma estrutura em concreto, tendo em vista que as propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna, em outras palavras, as propriedades podem ser modificadas por mudanças adequadas na estrutura do material.

Embora o concreto seja o material estrutural mais utilizado, a sua estrutura heterogênea é também altamente complexa. Embora as relações estrutura-propriedade ainda não estejam bem desenvolvidas, busca-se o entendimento de algumas de suas propriedades, tais como, resistência e fissuração. Para atingir êxito, de acordo com a especificação do traço do concreto, é preciso uma ótima dosagem e controle, portanto, entender como o processo de hidratação funciona microscopicamente e como este interage com a parte externa e interna de uma estrutura de um pilar, por exemplo, é um diferencial. Logo, o objetivo desse estudo é analisar como a cristalização dos grãos de cimento devido a hidratação reflete na resistência à compressão do concreto, buscando futuras melhorias em sua aplicação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Preparação dos corpos de prova

O desenvolver dessa pesquisa é iniciado com a produção da mistura do concreto Portland 30 MPa na usina de concretagem FM MIX, Aracaju-SE, de acordo com o traço desejado para 30 MPa, utilizando 1: 2,28: 0,8: 2,32: 0,62 (Cimento CP III, areia fina, brita zero, brita  $\frac{3}{4}$ , fator água/cimento). Em seguida é realizado a moldagem segundo a NBR 5738, em seu laboratório, onde antes de proceder à moldagem dos corpos de provas, estes são convenientemente revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral para facilitar a retirada dos mesmos. É feita uma nova mistura do concreto que será utilizado para garantir uma uniformidade do material, logo após isso a mistura vai para o molde de corpos de prova onde é dividido em 2 etapas e feito o adensamento manual com a haste em cada uma delas, dando 12 batidas no corpo de prova de 20 cm de altura, visto que a mistura permanecerá no molde por um dia. Concluído esse tempo, o corpo de prova vai para o tanque de cura, todos identificados, onde fica por dias pré-determinados e são retirados com 3, 7 e 28 dias para a realização do ensaio de compressão.

### 2.2 Sistema de rompimento dos corpos de prova por compressão axial:

Previamente ao ensaio, o corpo de prova passa por uma máquina onde suas superfícies são retificadas para que não haja nenhuma imperfeição nas suas extremidades, e então é levado à máquina de compressão em que uma força é aplicada até que o corpo de prova se rompa, a força utilizada é anotada para que, posteriormente, sejam feitos os cálculos de determinação da tensão de ruptura. Para romper os corpos de prova, foram utilizadas diferentes anilhas de aço ASTM-A36 (Figura 1), possuindo um diâmetro total de 0,1 m, sendo que a anilha menor e a anilha maior apresentam um mesmo diâmetro de 0,05 m. O intuito é obter resultados das tensões em áreas distintas do corpo de prova, sendo esses locais a região superficial e a região axial do mesmo. Para um melhor entendimento de todo esse contexto, denote que a região superficial é a área externa do corpo de prova, e a região axial a parte interna.



**Figura 1.** Anilhas de aço utilizadas para rompimento dos corpos de prova.

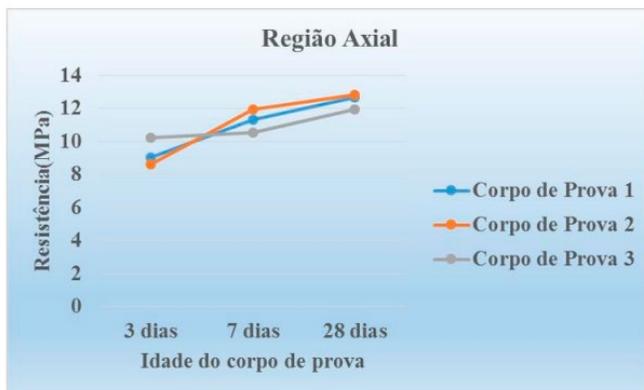
## 2.3 Fator de conversão da análise dos dados

Com o objetivo de quantificar os resultados obtidos, foi-se utilizado um fator de conversão nos valores obtidos das tensões, visando buscar uma equivalência de relação entre as áreas das anilhas e as tensões de ruptura obtidas através do ensaio, padronizando essas áreas. Os fatores de conversão são: 0,25 para área total, 4,0 para área interna e 0,75 para área externa. Esse fator é um valor atribuído como conversor de amostra, quando divergentes. Neste caso, foi utilizado para compatibilizar as áreas estudadas, tornando-as uniformes para que possa realizar um cálculo preciso. Isso significa que o valor informado como fator de conversão, quando multiplicado ou dividido pela magnitude da área da amostra, define-se a unidade de medida cadastrada para o produto.

## 3. RESULTADOS

A partir dos ensaios realizados, foram obtidas as resistências à compressão conforme exposto nos gráficos das Figuras 2, 3 e 4. Vale ressaltar que as regiões de ensaio nos corpos de prova foram subdivididas em: área superficial, sendo caracterizada por um rompimento periférico do corpo de

prova, área axial, definida com uma concentração de cargas na região central da amostra e área total, utilizando a superfície de contato completa do corpo de prova para o rompimento.



**Figura 2.** Gráfico de resistência x tempo para região axial.



**Figura 3.** Gráfico de resistência x tempo para região superficial.



**Figura 4.** Gráfico de resistência x tempo para toda a região.

Na intenção de obter a taxa de diferenciação referente a cada idade dos corpos de prova, calculou-se os coeficientes angulares das retas características dos resultados de resistência à compressão do concreto para 3 a 7 dias e 7 a 28 dias. Estes coeficientes angulares foram denominados como taxa de diferenciação e estão demonstrados nas Tabelas 1, 2 e 3.

**Tabela 1.** Taxa de diferenciação para região superficial de cada corpo de prova.

Intervalo de dias	Região Superficial		
	Taxa de Diferenciação		
	CP1	CP2	CP3
3° ao 7°	-0,5588	0,1688	-0,1250
7° ao 28°	0,3253	0,4122	0,4949

**Tabela 2.** Taxa de diferenciação para região axial de cada corpo de prova.

Intervalo de dias	Região Axial		
	Taxa de Diferenciação		
	CP1	CP2	CP3
3° ao 7°	0,5715	0,8400	0,0750
7° ao 28°	0,0636	0,0404	0,0672

**Tabela 3.** Taxa de diferenciação para região total de cada corpo de prova.

Intervalo de dias	Região Total		
	Taxa de Diferenciação		
	CP1	CP2	CP3
3° ao 7°	0,8775	0,9400	1,5083
7° ao 28°	0,3872	0,0916	0,0898

Para tanto, na região superficial no intervalo de 3 a 7 dias, notou-se um dos aspectos singulares do concreto, que diz que diferentemente de outros materiais da engenharia, a estrutura do concreto não permanece estável pelo fato dos constituintes da estrutura estarem sujeitos a modificações com o tempo, umidade ambiente e temperatura. Este comportamento reológico do concreto corrobora com o fato de dois dos coeficientes dos corpos de prova analisados, apresentaram valores negativos: -0,5588 para CP1 3 a 7 dias e -0,1250 para CP3 de 3 a 7 dias.

Neste sentido, é possível observar com o auxílio dos gráficos e das taxas de diferenciação que o ganho de resistência dos corpos de prova na região superficial do 3º dia para o 7º dia de moldagem, apresentam valores baixos quando comparado com a resistência obtida para o rompimento na mesma região do corpo de prova do 7º ao 28º dia, em que após o 28º dia essa região passa a ter um aumento médio de 8 MPa e com este acréscimo obtém-se o valor calculado no  $f_{ck}$  de 30 MPa.

A região axial tem um valor geral de resistência inferior a região superficial. Existe um ganho abrupto de resistência logo nos primeiros dias de idade do concreto gerando uma taxa de diferenciação, ao passo em que do 7º para o 28º dia, o aumento de resistência se mostra menos acentuado. A hipótese deste fenômeno é devido ao acesso facilitado da água aos grãos de cimento localizados na parte interna do corpo de prova logo no início do processo de cura e primeiros dias de moldagem do corpo de prova. Sendo que a cura nos primeiros dias de moldagem beneficia a cristalização dos grãos de cimento na parte externa do corpo de prova com formação das primeiras fases anídricas. Essas fases dificultam a passagem de água por capilaridade da parte superficial do corpo de prova para a região mais interna, tornando o ganho de

resistência na região axial mais brando após o 7º de moldagem.

Analisando os gráficos da região total e das resistências médias das Figuras 4 e 5, percebe-se que a resistência provém predominantemente da região superficial. Este fato gera um problema na concepção de análise estrutural visto que a região axial atinge o  $f_{ck}$  especificado de forma lenta e paulatina após o 28º dia de moldagem para peças de concreto com traço em cimento CP-III. Isto implica diretamente no tempo mínimo para início de carga axial dos pilares de uma edificação, em que não se deve empregar carregamentos axiais em pilares até o 28º dia de cura úmida.

Com isso, percebe-se a importância desse estudo, entendendo as diferentes regiões de uma estrutura de concreto: superficial e axial podem se comportar de maneiras distintas até os 28 dias de moldagem, como sugere as curvas da Figura 5. Em síntese, esses dados corroboram com a tese de que o ganho de resistência em função do tempo acontece de fora para dentro e isto resulta na soma das partes periféricas e centrais para obter a resistência total da peça de concreto.

## 4. CONCLUSÕES

Diante de todo desenvolvimento explanado, é notável a suma importância e influência do processo de hidratação do concreto ao que remete sua cura. Segundo os resultados obtidos com o rompimento dos corpos de prova em 3, 7 e 28 dias, percebe-se um maior ganho de resistência na região externa quando comparada com a região interna, logo, esta será a região mais apta a receber os carregamentos de maior grandeza na estrutura. Dando a entender que em uma situação prática, considerando um pilar por exemplo, a região externa está mais apta a suportar o carregamento nos primeiros dias de concretagem a peça, pois nesses primeiros dias, nota-se que a resistência total da peça de concreto recebe a maior influência da mesma.

## REFERÊNCIAS

- [1] FENG, X., GARBOCZI, E. J., BENTZ D. P. et al. Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscope point-counting procedure. Cement and concrete research 34, 2004.
- [2] GARBOCZI, E. J., BULLARD, J. W. Shape analysis of reference cement. Cement and Concrete Research 34, 2004.

[3] NBR 5738 e NBR 5739 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova e ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico.

[4] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais, Editora PINI, S. Paulo, Brasil (1994).

[5] MOORE, A. E., TAYLOR, H. F. W. Crystal structure of ettringite. Acta Crystallographica B , v. 26, p. 386-393, 1970.

# DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL LEVE COM ARGILA EXPANDIDA E DOLOMITA

*Thayslene dos Santos  
Vanessa Gentil de Oliveira Almeida;*

## RESUMO

Diante do rápido desenvolvimento das cidades e com o elevado crescimento populacional, a escassez de planejamento dos sistemas de drenagem e a utilização da pavimentação impermeável, são motivos que impedem a passagem da água pelo solo rumo ao lençol freático. Uma das tecnologias que vem sendo mais empregada é a utilização do concreto permeável, material este, que apresenta um maior índice de poros, o que permite a redução dos picos de cheias e o acúmulo de águas em vias públicas. Com o intuito de facilitar o manuseio e o transporte de peças fabricadas de concreto permeável, o uso da argila expandida como agregado leve, pode ser uma alternativa viável para essa problemática. Dessa forma, o objetivo principal desta pesquisa é estudar como a incorporação da argila expandida em substituição ao agregado graúdo influencia as propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável. De acordo com o programa experimental, todas as matérias-primas foram caracterizadas por meio das normas técnicas vigentes. Os concretos foram ensaiados no estado fresco, para determinação da massa específica aparente, e no estado endurecido, para determinação da absorção de água, massa específica, permeabilidade e resistência à tração na flexão. Diante dos resultados dos ensaios, pode-se concluir que os concretos, concreto permeável com dolomita (CPD) e concreto permeável com dolomita e argila expandida (CPD/AE) obtiveram valores de massa específica no estado fresco maiores que  $1600 \text{ kg/m}^3$ , estabelecidos para concretos permeáveis. Em relação aos ensaios do concreto no estado endurecido, ocorreu o aumento da absorção de água e uma redução na massa específica, à medida que foi adicionado a argila expandida. Foram obtidos valores consideráveis de permeabilidade para todos os tipos de concreto. Somente o concreto permeável com dolomita (CPD) obteve resistência suficiente de 2 MPa para ser utilizado em pavimentação de veículos leves, os demais concretos CPD/AE e o concreto permeável com argila expandida (CPAE) podem ser destinados para o emprego em tampas de valas, áreas de jardins e calçadas de pouco fluxo.

**Palavras-chave:** concreto permeável, argila expandida, dolomita.

# 1. INTRODUÇÃO

Devido à intensificação do processo de urbanização das grandes cidades, o gerenciamento das águas das chuvas tornou-se uma problemática. Dessa maneira, com a falta de planejamento racional do uso do solo e de sua ocupação, as enchentes vêm frequentemente acontecendo nos centros urbanos, o que propicia o aumento de alagamentos, trazendo grandes prejuízos e prejudicando os seus habitantes. As soluções para a gestão das águas são baseadas em projetos relacionados conforme a abordagem clássica da drenagem urbana. Como estratégia para a redução dessa problemática, pode-se utilizar o pavimento de concreto permeável.

Quando corretamente projetado e implantado, os pavimentos de concreto permeável apresentam vantagens, como o custo de produção inferior aos demais sistemas de drenagem convencionais, redução do escoamento superficial, minimiza o número de ocorrências de alagamentos e inundações, diminui as vazões de pico de corpos d'água e promove o reabastecimento das águas subterrâneas ou reaproveitamento da água da chuva [1].

O termo concreto permeável é empregado para determinar concretos com altos índices de vazios interligados entre eles, possibilitando a passagem de fluidos, devido a sua elevada permeabilidade. Um dos procedimentos para obtenção de tal configuração é a utilização do cimento, água, agregado graúdo e o pouco uso ou não, do agregado miúdo, indicando assim praticamente nenhuma quantidade de finos na mistura [2]. O concreto permeável pode ser utilizado em inúmeros locais, como menciona [3, 4, 5], tais como em ruas residenciais, becos e calçadas, estacionamentos, placa de conexão para pavimentos, estabilização de taludes, fundações, piscicultura, centros de diversões aquáticas, estruturas hidráulicas e decks de piscinas para natação. Dispondo como sua principal finalidade à absorção da água superficial e a não concentração da mesma [6].

Estudos baseados em análises relacionadas ao concreto permeável e ao concreto com a incorporação da argila expandida como agregado leve, apresentam algumas contribuições importantes.

Junior [7], estudou o potencial da incorporação do resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis, com o traço 1:3,78 (cimento: resíduo de concreto), sendo obtidos resultados de massa es-

pecífica tanto no estado fresco como no estado endurecido superiores a 1600 kg/m<sup>3</sup>, coeficiente de permeabilidade igual a 0,9 cm/s e resistência à tração na flexão de 2,08 MPa. Todos os valores ficaram dentro das faixas estabelecidas para cada tipo de ensaio, de acordo com a ABNT NBR 16416:2015.

Moura [8], pesquisou a viabilidade de substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo na fabricação de concreto leve com argila expandida. Foi utilizado traço 1:2,38:0,67 (cimento: areia: argila expandida), notou-se um aumento na propriedade de absorção de água e uma redução na massa específica, fato este, atribuído à estrutura interna muito porosa deste agregado leve. Em relação a resistência à tração na flexão, o valor obtido foi referente a 3 MPa, sendo superior ao especificado em norma, apesar da ruptura desses concretos ocorrer na zona de ligação pasta/agregado ou até mesmo no próprio agregado, caracterizando uma resistência menor, quando comparada a um concreto convencional.

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar como a incorporação da argila expandida em substituição ao agregado graúdo influencia as propriedades físicas e mecânica do concreto permeável. Para isto, foram produzidos concretos com variações de argila expandida e dolomita (agregado graúdo), mantendo a quantidade de cimento e o fator água/cimento constante. As matérias-primas foram caracterizadas por meio de ensaios físicos e mecânicos de acordo com as recomendações normativas. Os concretos foram avaliados no estado fresco, por meio do ensaio de massa específica aparente, e no estado endurecido, a partir dos ensaios de massa específica, absorção de água, permeabilidade e resistência à tração na flexão.

## **2. METODOLOGIA**

Para a produção dos concretos permeáveis foi utilizado o cimento, dolomita, argila expandida 0500, dolomita e água.

Os materiais foram caracterizados de acordo com os critérios prescritos nas normas técnicas, conforme listados nos tópicos a seguir. Todos os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe, Campus Estância.

## 2.1 Caracterização tecnológica das matérias-primas

**Cimento:** o aglomerante hidráulico utilizado foi o CPV-ARI-RS (cimento Portland de alta resistência inicial com resistência à sulfatos). Segundo a ABNT NBR 16697:2018 [9], este cimento apresenta uma resistência igual ou superior a 14 MPa no primeiro dia de idade. Os ensaios de caracterização estão apresentados a seguir.

**Determinação do índice de finura:** o ensaio para a determinação do índice de finura do cimento foi realizado de acordo com a ABNT NBR 11579:2013 [10].

**Determinação da consistência normal:** o ensaio para determinação da pasta de consistência normal do cimento Portland, é prescrito pela ABNT NBR 16606:2018 [11].

**Determinação do tempo de pega:** os procedimentos para a determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland, foi executado conforme a ABNT NBR 16607:2018 [12].

**Determinação da massa específica:** a obtenção da massa específica do cimento Portland foi feita por meio das prescrições da ABNT NBR 16605:2017 [13], utilizando o método do frasco volumétrico de Le Chatelier.

**Expansibilidade:** a ABNT NBR 11582:2016 [14], estabelece o ensaio para a determinação da expansibilidade do cimento por meio do aferidor e agulha de Le Chatelier.

**Resistência à compressão:** o ensaio para a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi realizado conforme a ABNT NBR 7215:2019 [15].

**Dolomita e argila expandida:** os dois materiais foram submetidos a análise granulométrica para uniformização dos grãos, sendo utilizados os passantes na peneira de nº 4,75 mm.

Os ensaios de caracterização dos dois materiais são descritos a seguir.

**Análise granulométrica:** o ensaio de análise granulométrica foi determinado conforme a ABNT NBR NM 248:2003 [16].

**Massa unitária e volume de vazios:** as amostras de dolomita e argila expandida foram analisadas conforme o ensaio de massa unitária e do volume de vazios, pelo método A (massa unitária compactada) e método C (massa unitária no estado solto), conforme a ABNT NBR NM 45:2006 [17].

Massa específica: as massas específicas foram determinadas por meio das recomendações da ABNT NBR NM 53:2009 [18].

**Água:** a água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Estância/SE, o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), que de acordo com a ABNT NBR 15900-1:2009 [19], é adequada para ser utilizada em concretos, e não precisa ser ensaiada.

## 2.2 Procedimentos de dosagem e moldagem dos corpos de prova

A dosagem dos materiais para produção do concreto permeável foi predefinida a partir dos estudos realizados por Lian [19], que utilizaram os traços 1:3, 1:4,44, 1:4, respectivamente. Dessa maneira, o traço adotado foi o 1:3 (cimento: agregado graúdo). O fator água/cimento utilizado foi de 0,32, que de acordo com Lian e Zhuge [19], obteve os melhores resultados em sua pesquisa sobre um projeto de mistura ideal para concreto permeável.

Na Tabela 1, são apresentadas as formulações com as devidas nomenclaturas: concreto permeável com dolomita (CPD), concreto permeável com argila expandida (CPAE) e concreto permeável com dolomita e argila expandida (CPD/AE).

**Tabela 1:** Formulações estudadas

Nomenclatura	Cimento (kg)	Dolomita (kg)	Arg. Expandida (kg)	Água (l)
CPD	38,13	114,41	-	12,20
CPAE	24,48	-	73,44	7,83
CPD/AE	27,84	27,84	55,69	8,90

Fonte: Autor (2021).

Antes de iniciar o processo de mistura dos materiais, foram realizadas a pré-saturação das argilas expandidas por 24 h, visto que, conforme Rossignolo, para os agregados leves com índice de absorção superior a 10%, é preciso que esses permaneçam submersos em água por esse período, sendo fundamental para que a trabalhabilidade, segregação e consumo de água do amassamento do concreto não seja comprometida.

## **2.3 Ensaio do concreto no estado fresco**

Foi analisada a propriedade de massa específica aparente do concreto permeável em seu estado fresco conforme o estabelecido por norma especificada no item a seguir.

Massa específica aparente: o ensaio de massa específica no estado fresco foi determinado de acordo com a ABNT NBR 9833:2009, o procedimento consistiu no adensamento de três camadas com 25 golpes cada, com o auxílio de uma haste metálica, logo após, foi feito o rasamento com régua, também metálica e pesagem do recipiente com o material. O ensaio é concluído dividindo-se a massa do material obtido pelo volume do recipiente.

## **2.4 Ensaio do concreto permeável no estado endurecido**

No estado endurecido foram realizados os ensaios de absorção de água, massa específica, permeabilidade e resistência à tração na flexão.

Absorção de água e massa específica: para determinação dos ensaios de absorção de água e massa específica foram utilizados os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 9778:2009, por meio da obtenção da massa seca, massa saturada e da massa submersa de cada corpo de prova, com o auxílio da balança hidrostática.

Permeabilidade: o ensaio de permeabilidade do concreto foi realizado seguindo os procedimentos descritos no Anexo A da ABNT NBR 16416 [17]. Para sua determinação foi utilizado um cilindro vazado (anel), utilizando material impermeável (PVC), de 300 mm de diâmetro, com uma marcação interna com distâncias de 10 e 15 mm em relação à face inferior. O ensaio consiste na colocação do anel de infiltração no centro da placa de concreto a ser ensaiada, vedando com massa de calafetar, para evitar vazamentos superficiais e garantir a estanqueidade do procedimento.

O ensaio é iniciado com a etapa da pré-molhagem da amostra, onde foram despejados 18 litros de água no interior do cilindro, procurando-se permanecer a lâmina de água constante no interior das marcações limites (10 e 15 mm) à medida que o tempo decorrido de infiltração total da água é cronometrado, todos os tempos foram menores de 30 s. A etapa da molhagem foi iniciada em até 2 min depois da pré-molhagem, onde a quantidade de água

despejada teria que se manter constante entre as marcações pré-estabelecidas. O tempo transcorrido e a quantidade de água foram anotados, finalizando o ensaio. Para finalizar o ensaio, depois de obtidos todos os tempos de infiltração, é calculado o coeficiente de permeabilidade, através da Eq. 1:

$$k = V / (A_c \cdot t) \quad (1)$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

A<sub>c</sub> = área da seção do cilindro (m<sup>2</sup>);

V = volume d'água utilizada (m<sup>3</sup>);

t = tempo necessário para a percolação total da água (s);

Resistência à tração na flexão: o ensaio de resistência à tração na flexão foi determinado seguindo as prescrições da ABNT NBR 12142 [18]. O equipamento utilizado na realização do ensaio foi uma máquina universal da marca EMIC, modelo GR048 com capacidade máxima de 200 kN. O corpo de prova foi colocado no centro dos apoios, em seguida submetido a aplicação de uma força contínua.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa, bem como, os resultados dos ensaios do concreto permeável, no estado fresco, por meio da massa específica aparente e no estado endurecido, com os ensaios de massa específica, absorção de água, permeabilidade e resistência à tração na flexão.

#### 3.1 Caracterização dos materiais

Cimento Portland: na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios físicos e mecânico de caracterização do cimento Portland.

**Tabela 2:** Caracterização física e mecânica do cimento Portland

Propriedades	Resultados
<b>Índice de finura (%)</b>	1,92
Início de pega (min)	160,00
Fim de pega (min)	232,00
Consistência normal (%)	30,00
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,14
Expansibilidade a quente (mm)	0,29
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	35,7

Fonte: Autor (2021).

Conforme os dados expostos na Tabela 2, o cimento utilizado no presente trabalho, está de acordo com a ABNT NBR 16697:2018.

Dolomita e argila expandida: a massa específica e a massa unitária da dolomita e da argila expandida estão apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3:** Caracterização física dos agregados

Matéria-prima	Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Dolomita	1,53	1,38	2,13
Argila Exp (0500)	0,72	0,68	1,56

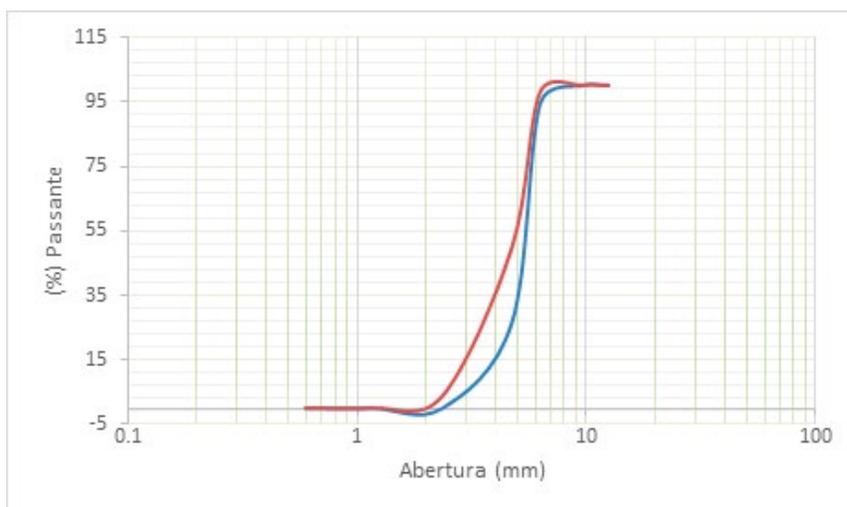
Fonte: O autor (2021).

Com base nos dados, pode-se verificar que a dolomita apresentou maiores valores de massa unitária, constatando com isso menores quantidades de vazios, em relação a mesma proporção da argila expandida (0500). Como era esperado, o valor referente a massa específica da argila expandida apresentou-se menor do que a da dolomita, podendo ser utilizada como um agregado leve, para fabricação de concretos com baixo peso específico.

Alguns pesquisadores também caracterizaram esse agregado leve e encontraram valores semelhantes aos apresentados nesta pesquisa. Borja estudou o efeito da adição de argila expandida e de adições minerais (metacaulim e cinza de biomassa de cana-de-açúcar) na formulação de concretos estrutu-

rais leves autoadensáveis, e obteve resultados de massa unitária para a argila 0500 de  $0,82 \text{ g/cm}^3$  e massa específica de  $1,32 \text{ g/cm}^3$ . Angelin, na análise dos desempenhos físicos, mecânicos, térmicos e acústicos da microestrutura do concreto leve autoadensável emborrachado (CLAE), obteve valor de massa unitária de  $0,85 \text{ g/cm}^3$ . Moravia et al., na caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve, obteve massa específica real de  $1,57 \text{ g/cm}^3$ .

Análise Granulométrica: a Figura 1 apresenta a curva granulométrica dos agregados (Dolomita e Argila Expandida).

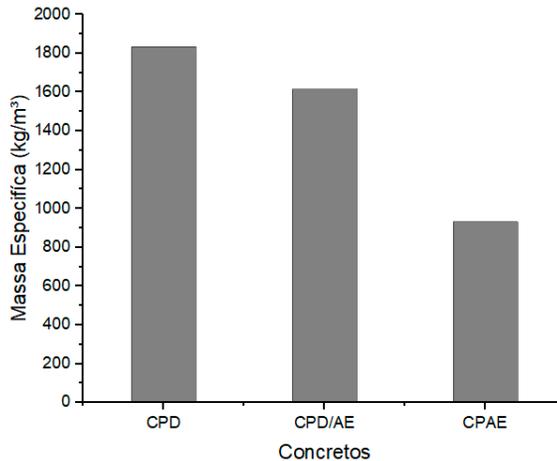


**Figura 1** – Curva granulométrica da dolomita e da argila expandida (Fonte: Autor, 2021).

De acordo com a análise granulométrica, pode-se constatar que os diâmetros máximos foram de 9,5 e 6,3 mm da dolomita e da argila expandida, respectivamente. A curva granulométrica dos materiais apresentou-se com uma granulometria uniforme, em que a curva é quase vertical, indicando a predominância de um só tipo de fração. Com base nos parâmetros representativos dessa curva, o Cu (coeficiente de não uniformidade) foi classificado como um material uniforme.

### 3.2 Propriedades do concreto no estado fresco

Na Figura 2 são apresentados os resultados do ensaio de massa específica dos concretos permeáveis em seu estado fresco.



**Figura 2.** Resultados de massa específica no estado fresco (Fonte: Autor, 2021).

A redução de massa específica é a característica principal para um concreto com agregado de argila expandida. Pode-se notar que, com a incorporação da argila expandida nas misturas, ocorreu uma redução nos valores da massa específica em 11,8% no concreto CPD/AE e de 49% no concreto CPAE, em relação ao concreto tendo como agregado gráúdo a dolomita (referência).

De acordo com a especificação da ABNT NBR 16416 [17], os concretos permeáveis precisam alcançar valor mínimo para massa específica de 1600 kg/m³. O concreto com dolomita (CPD) e o concreto com substituição de parte da dolomita pela argila expandida (CPD/AE) com traço 1:1:2 (cimento: dolomita: argila) se enquadram nessas duas classificações.

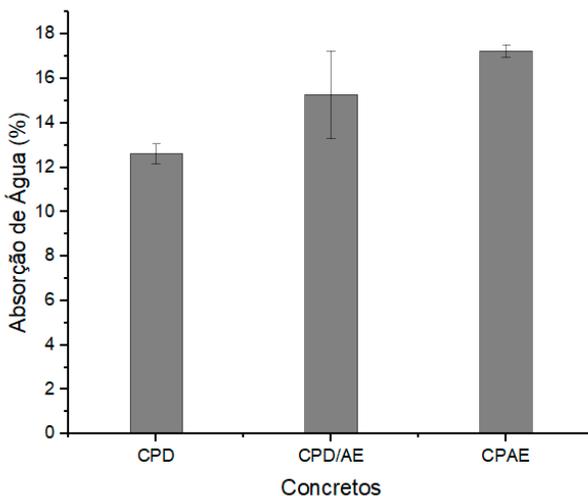
Fazendo uma correlação com alguns autores mencionados na fundamentação teórica desta pesquisa, valor encontrado na pesquisa de Júnior, que utilizou resíduo de concreto como agregado gráúdo em concretos permeáveis com traço de 1:3,78 e obteve valores de massa específica no estado fresco

de 1677,4 kg/m<sup>3</sup>. Botteon, em seu estudo sobre o uso de concreto permeável para estacionamento, conseguiu massas específicas de 1136,09 kg/m<sup>3</sup>, para traços de 1:4 e 1:4,5 (cimento; brita 0). Silva e Tommaselli em um estudo sobre concreto permeável para pavimentação, constataram valores de 1523 kg/m<sup>3</sup> e 1488 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

As propriedades do concreto permeável no estado endurecido foram analisadas com o auxílio de técnicas estatísticas. Foi realizada uma análise de variância por meio do método estatístico (ANOVA), tendo em vista uma melhor compreensão da influência dos parâmetros avaliados, seguida do teste de Tukey.

Absorção de água e massa específica: na Figura 4 são apresentados as médias e os desvios padrão das amostras referentes ao ensaio de absorção de água.



**Figura 4** - Resultados de absorção de água (Fonte: Autor, 2021).

De acordo com a análise estatística (ANOVA), os resultados mostraram que não existe uma diferença significativa entre as médias (valor  $p = 0,064$ ). Com o teste de Tukey, constatou-se um aumento não significativo nos concre-

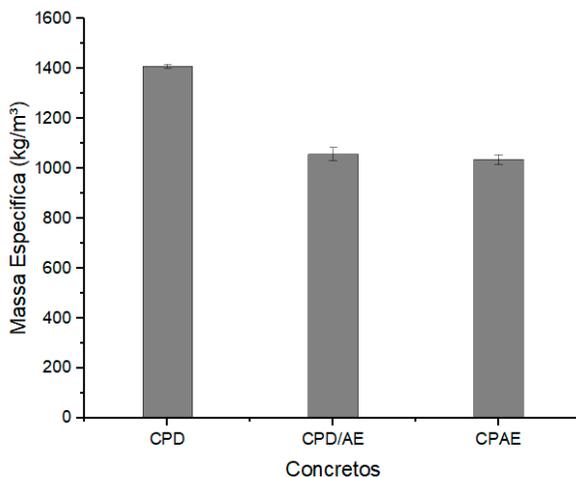
tos permeáveis.

Diante dos dados apresentados, pode ser verificado que à medida que ocorre o aumento da proporção da argila expandida nas formulações, o valor da absorção de água aumenta também, isso se deve ao fato da argila ser um material extremamente poroso e com alto poder de absorção. Conforme Angelin, a porosidade total do agregado, a união entre os poros, o perfil da superfície e a umidade antes da mistura, são os fatores que influenciam a absorção de água.

Valores referentes a propriedade de absorção de água foram encontrados em concretos permeáveis e também em concretos leves somente com o uso da argila expandida. Podendo citar Monteiro, que obteve um aumento de 5,77% na absorção de água em relação ao concreto permeável referência utilizando brita. As partículas que têm alta absorção de água não produzem altas resistências, porque a pasta em volta do agregado perde água, e produz uma zona de transição ainda mais fraca.

Pesquisas realizadas por Santos, Angelin, Natali e Scobar concluíram que o uso de argila expandida aumenta o índice de absorção de água no concreto em relação a um concreto convencional, em 7,6, 6,0, 10 e 9,6%, respectivamente.

Na Figura 5 são apresentados as médias e os desvios padrão das amostras referentes ao ensaio de massa específica.



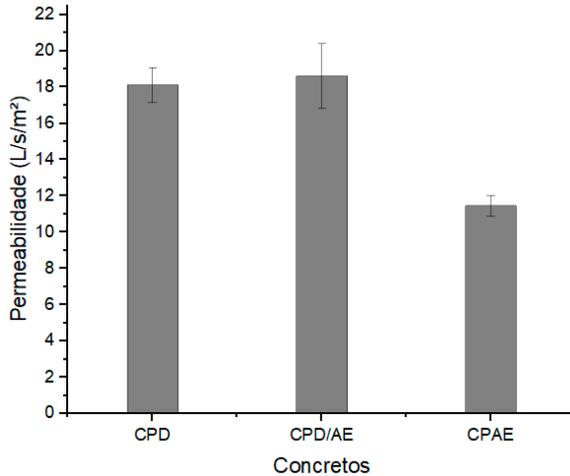
**Figura 5** - Resultados de massa específica (Fonte: Autor, 2021)

De acordo com a análise estatística (ANOVA), os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias (valor  $p = 0,00049$ ) O teste de Tukey constatou-se uma redução significativa para os concretos CPD/AE e CPAE, de 24,96 e 26,52%, respectivamente, em relação ao CPD.

Os valores referentes às massas específicas desta pesquisa apresentaram-se abaixo do valor estabelecido pela ABNT NBR 16416 [17] para concretos permeáveis ( $1600 \text{ kg/m}^3$ ), mas as mesmas se enquadram na classificação de concretos leves, por terem obtido valores menores que  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Isso se deve ao fato, das misturas de concreto permeável possuírem em sua composição pouco ou nenhum agregado miúdo e ter ocorrido a substituição do agregado graúdo convencional por um agregado de massa específica bem mais leve, ocasionando dessa forma uma altíssima redução dessa propriedade.

Rossignolo comenta que pela argila expandida possuir uma estrutura interna porosa, a tendência é que ocorra mesmo a redução na massa específica. Nota-se com os estudos realizados por Rossignolo, Pereira, Moura e Silva, que obtiveram massas específicas para concretos com o uso da argila expandida de 1605, 1642, 1607 e  $1746 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente. E para o concreto permeável como revestimento para pavimento pode ser citado o estudo de Batezini [20], que obteve massa específica de  $1847 \text{ kg/m}^3$ , apresentando-se cerca de 25% inferior aos valores característicos do concreto convencional, com traço 1:4,44 (cimento: brita 0).

Permeabilidade: a Figura 6 apresenta os resultados das médias dos três corpos de prova do tipo placa para cada formulação, assim como os desvios padrão obtidos a partir do ensaio realizado que determina a permeabilidade.



**Figura 6** - Resultados de permeabilidade (Fonte: Autor, 2021)

Os resultados mostraram que existe uma diferença entre as médias (valor  $p = 0,04$ ) e com o teste de Tukey, constatou-se um pequeno aumento no valor da permeabilidade do concreto CPD/AE. Já para o concreto CPAE ocorreu uma redução dessa permeabilidade em 36,75% em relação ao concreto CPD.

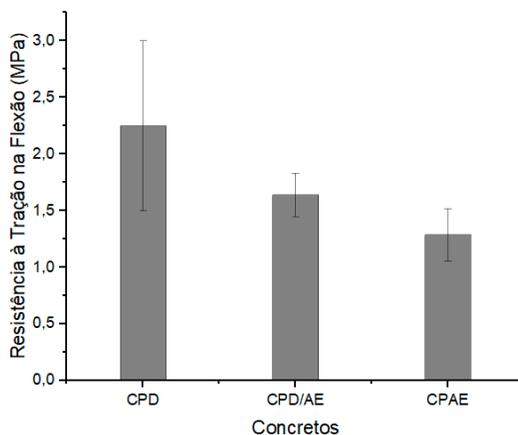
Conforme os resultados apresentados, constatou-se que todos os concretos demonstraram valores acima do limite da pesquisa realizada por Scheffer et al. de 2 a 18 l/s/m<sup>3</sup>.

A variação dos valores referentes a permeabilidade entre os concretos permeáveis, pode ser atribuído a etapa de adensamento, pelo fato, da argila expandida absorver água da mistura e conseqüentemente, reduzir a trabalhabilidade, prejudicando dessa forma a sua compactação.

De acordo com a fundamentação teórica desta pesquisa, ao avaliar os concretos permeáveis foram encontrados vários métodos, bem como uma grande variação de resultados entre os pesquisadores relacionados à permeabilidade, devido principalmente a composição da mistura, granulometria dos agregados e processo de adensamento utilizado.

Faria et al. obtiveram valores de desempenho na permeabilidade para o concreto permeável de 48,75 l/s/m<sup>2</sup> para o traço 1:5, 24,17 l/s/m<sup>2</sup> e 5,95 l/s/m<sup>2</sup>, para os traços 1:3 e 1:4, respectivamente. Resistência à tração na flexão: os va-

lores das médias dos seis corpos de prova obtidos no ensaio para determinar a resistência à tração na flexão e seus respectivos desvios padrão encontram-se apresentados na Figura 7.



**Figura 7** - Resultados de resistência à tração na flexão (Fonte: Autor, 2021)

Os resultados mostraram que não existe uma diferença entre as médias (valor  $p = 0,18$ ) e com o teste de Tukey, constatou-se uma redução não significativa dos concretos CPD/AE e CPAE, em relação ao concreto CPD.

O concreto permeável de referência (CPD) foi a formulação que apresentou maior valor de resistência à tração na flexão. A partir da substituição parcial e total do agregado graúdo pela argila expandida, houve um decréscimo nos valores de resistência, já esperado, de acordo com as pesquisas apresentadas na fundamentação teórica.

Nos concretos com agregados leves, o processo de ruptura não ocorre devido a diferença entre deformações dos agregados e da pasta de cimento, mas, pelo colapso da argamassa e a linha de fratura que atravessa o agregado, isso explica a baixa resistência, de acordo com Angelin.

A mistura do concreto CPD foi a única que apresentou resistência limite estabelecida pela ABNT NBR 16416 [17] para o uso em tráfegos leves, referente a 2,0 MPa.

Nota-se por meio dos estudos experimentais, que Vidal, Guerra e Filho, ao utilizar a argila expandida em concretos leves, obtiveram um valor médio

de 3,61 MPa para a propriedade de resistência à tração na flexão. Para os concretos permeáveis, Araújo encontrou resultados entre 1,5 e 2,6 MPa, apesar de estarem dentro da faixa de normalidade, mostraram alguns valores inferiores às características de concretos usualmente utilizados para pavimentação. Barreto também estudou concreto permeável e obteve resultados variando entre 1,3 a 2,1 MPa, com traço 1:0,64:3,36 (cimento: brita 0).

## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram produzidos concretos permeáveis leves com a incorporação do agregado de argila expandida em substituição parcial e total ao agregado graúdo, a fim de avaliar seu desempenho. Os resultados experimentais foram comparados com pesquisas disponíveis na literatura.

De maneira geral, notou-se que, com o uso da argila expandida foi obtido uma redução da massa específica aparente no estado fresco, o concreto com a substituição total da dolomita pela argila expandida (CPAE), conseguiu reduzir em quase 50% o valor dessa massa. As formulações CPD e CPD/AE atenderam as especificações da ABNT NBR 16416 [17], em que os concretos permeáveis precisam alcançar valor mínimo para massa específica de 1600 kg/m<sup>3</sup>.

No estado endurecido, a propriedade de absorção de água, como já era de se esperar, sofreu um ganho à medida do aumento da argila expandida na mistura, devido justamente à estrutura porosa que compõe esse material. A massa específica foi reduzida para as duas formulações com a argila expandida em torno de 26%, atingindo um dos objetivos dessa pesquisa, que era a redução do peso final do concreto permeável. Os valores encontrados referentes a massa específica não atenderam as especificações da ABNT NBR 16416 [17], porém, poderiam ser consideradas materiais leves, já que atingiram massas específicas menores que 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Em relação ao ensaio de permeabilidade, pode-se concluir que a mistura CPAE obteve uma redução significativa, isso pode ter ocorrido pelo fato de um mal adensamento do concreto no momento da moldagem das placas, devido a argila expandida reduzir a trabalhabilidade desse concreto, ou até mesmo, como existe um maior quantitativo de argila não ter ocorrido uma

aderência efetiva entre a pasta e os grãos dessa argila, proporcionando menos vazios, mas isso só poderia ser verificado com meio do ensaio do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

No ensaio de resistência à tração na flexão, somente a mistura CPD conseguiu alcançar o valor de 2 MPa, especificado pela ABNT NBR 16416 [17] para o uso de concretos permeáveis em pavimentação de tráfegos leves.

Diante da classificação apresentada na parte teórica deste trabalho, o concreto permeável leve produzido pode ser enquadrado na classificação de um concreto permeável hidráulico, em que o material apresenta baixa resistência mecânica e elevada permeabilidade, utilizado para aplicações não estruturais, como por exemplo, em áreas de jardins, calçadas com pouco fluxo, tampas de valas e bueiros, possibilitando a eliminação de poças e lâminas d'água em dias chuvosos.

## REFERÊNCIAS

- [1] ARAÚJO, P. R; TUCCI, C. E. M; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. p 21-29. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, 2000.
- [2] PEREIRA, K. K; BARBOSA, M. P. Desenvolvimento de Composição de Concreto Permeável com Agregados Oriundos de Resíduos de Construção Civil da Região de Campinas. p. 6. Campinas, São Paulo, 2015.
- [3] NIGRI, I. R. Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos Gerais de Projeto Estabelecidos pela Norma ABNT NBR 16416: 2015. 2017. 45 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica, 2017.
- [4] JUNIOR, A. C. de P. Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis. 2019. 168 f. Dissertação de pós graduação – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2019.
- [5] MOURA, W. A; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. Rem: Revista Escola de Minas, v. 64, p. 147-154, 2011.
- [6] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200), Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal, Rio de Janeiro, 2018.
- [7] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega, Rio de Janeiro, 2018.

- [8] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017.
- [9] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier, Rio de Janeiro, 2016.
- [10] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2019.
- [11] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.
- [12] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.
- [13] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Determinação de massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.
- [14] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017.
- [15] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2009.
- [16] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro, 2009.
- [17] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- [18] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto –  
Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.
- [19] LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. Elsevier Journal Construction and Building Materials, 2010.
- [20] BATEZINI, Rafael. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Transportes – Infraestrutura de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

# DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU

*Larissa Isabelle Conceição da Silva  
Emily de Oliveira Santos;  
Luan da Conceição Ribeiro;  
Vanessa Gentil de Oliveira Almeida;*

## RESUMO

Devido ao acelerado processo de urbanização das grandes cidades de maneira desordenada, o crescimento de áreas impermeáveis é perceptível, o que prejudica a drenagem da água através do solo tornando o escoamento e o retorno ao lençol freático ineficientes, provocando alterações nos leitos e no volume de enchentes. Para contornar esta problemática, o concreto permeável vem sendo estudado há alguns anos, como uma opção para ser aplicado em sistemas de pavimentações. A construção civil é uma atividade que exerce um papel fundamental no processo de formação das cidades, no entanto gera impactos desfavoráveis ao meio ambiente, pois consome um percentual muito alto de recursos naturais, dos quais a maioria não é renovável. Diante desse fato, a utilização de resíduos como fonte de matéria prima para a construção tem se tornado uma possibilidade viável e sustentável. Dentre eles, encontra-se a borracha proveniente de pneus de automóveis, que muitas vezes são descartados de maneira irregular provocando danos ao meio ambiente. Visando o correto destino, pesquisas estão sendo intensificadas considerando-se a viabilidade técnica desse resíduo em matrizes cimentícias. Mediante o exposto, este trabalho tem como objetivo principal produzir um concreto permeável com o reaproveitamento do resíduo de borracha de pneu nas proporções de 5% e 7% em substituição parcial ao agregado graúdo. Todas as matérias primas foram caracterizadas de acordo com as prescrições normativas. Os concretos foram ensaiados no estado fresco, para determinação da massa específica aparente, e no estado endurecido, para determinação da massa específica, absorção de água, permeabilidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Diante dos resultados dos ensaios, pode-se concluir que, o concreto de referência apresentou valor superior referente ao ensaio de massa específica, tanto no estado fresco como no estado endurecido, ao estabelecido pela norma para concretos permeáveis que é de 1600 kg/m<sup>3</sup>. Todos os tipos de concreto apresentaram alta permeabilidade. Porém, a resistências à compressão e a resistência à tração na flexão,

não apresentaram valores dentro do limite estabelecido pela ABNT NBR 16416:2015, de 20 MPa e 2 MPa, respectivamente, para serem utilizados como concretos permeáveis em pavimentação de veículos leves. Todavia, esse tipo de concreto pode ser destinado para aplicação em áreas de jardins, calçadas com pouco fluxo, tampas de valas e bueiros, dessa forma, possibilitando a eliminação de poças e lâminas d'água em dias chuvosos e favorecendo também, a questão da sustentabilidade com o reaproveitamento do resíduo de borracha de pneu em matrizes cimentícias.

**Palavras chaves:** concreto permeável, resíduo, borracha de pneu.

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento inevitável das áreas urbanas juntamente com a falta de planejamento do uso e ocupação do solo vem gerando problemas de saneamento básico, o que provoca o surgimento de mais áreas impermeabilizadas. Em pavimentos de concretos convencionas é possível notar que durante as chuvas há formação de escoamento superficial da água e este volume de água passa para o sistema de drenagem urbana da cidade. Essa demanda, por sua vez, que chega ao sistema pode causar uma saturação e ocasionar as enchentes.

Uma alternativa para tentar favorecer o escoamento e reduzir às áreas de impermeabilização e em contrapartida as enchentes, é aumentar a permeabilização do solo através do uso do concreto permeável para revestimento de pavimentos. Bressan[1] afirmam que dentro desse contexto, é possível aplicar pavimentos permeáveis em substituição ao sistema convencional, fazendo com que ocorra a infiltração da água e o escoamento superficial seja reduzido.

A estrutura do concreto permeável se dá através de vazios interligados que permitem a percolação da água por ação da gravidade (ABNT NBR 16416:2015) [2]. Por esse motivo, na maioria das misturas, não se utiliza o agregado miúdo, logo o concreto é produzido apenas com o aglomerante, água e o agregado graúdo. Diferente dos outros concretos, a sua qualidade é definida pela porosidade, pela taxa de infiltração de água e seu peso, não sendo a resistência fator de grande importância [3].

Esse tipo de concreto possui diversas aplicações, destacando-se seu uso em estradas, áreas de jardins, calçadas residenciais, quadras de tênis, estabilização de taludes e centros de diversões aquáticos, dentre outros [4]. Saldanha

[5] afirma que, esse concreto permeável funciona também como um filtro artificial de modo a facilitar a sua absorção pelo solo e assim garante o provimento e manutenção do lençol freático.

A indústria da construção civil exerce importante papel na transformação ambiental da sociedade, mas gera impactos negativos sobre o meio ambiente devido às diversas formas de poluição ambiental, por meio do elevado consumo de recursos naturais e também com a geração de resíduos. Com isso, a utilização de resíduos como matéria prima para construção pode ser uma alternativa para reduzir a quantidade desses recursos naturais retirados do meio ambiente [5].

Os resíduos sólidos são muitas vezes jogados e descartados de maneira inadequada. Dentre os vários tipos de materiais que são encontrados em meio aos descartes, e que vem trazendo uma preocupação em relação aos danos que podem causar ao ambiente, encontram-se os chamados pneus inservíveis. A Resolução nº 416 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – (CONAMA 2009) [6] afirma que “o pneu inservível é aquele que apresenta danos que não podem ser reparados, assim não servindo para rodagem ou reforma”.

No Brasil são descartadas pelo menos 450 mil toneladas de pneus, estes levam cerca de 600 anos para decompôr-se, o que gera sérios riscos tanto para o ambiente como para os seres humanos [7]. Esse descarte pode provocar a proliferação de doenças transmitidas por mosquitos, como a dengue, além do risco de serem queimados, causando a poluição do ar. Por isso, é necessário conhecer formas viáveis de aproveitamento ou destinação final desses pneus. Segundo a Resolução nº 258 (CONAMA 1999) [8], “cada pneu novo comercializado, as empresas fabricantes ou importadoras devem dar destinação adequada a um pneu inservível”.

Gesoglu [9] investigaram as propriedades do concreto permeável contendo borracha de pneu, os autores utilizaram lascas de pneu, borracha fragmentada e borracha fragmentada fina nas proporções de 10% e 20% em substituição ao agregado graúdo e verificaram que o uso da borracha prejudicou significativamente as propriedades mecânicas do concreto permeável e sua permeabilidade, mas em graus diferentes de acordo com a taxa e o tipo de borracha utilizada. Apesar disso, a substituição do agregado natural por partículas de borracha resultou em um aumento expressivo da tenacidade e duc-

tilidade do concreto, bem como melhor capacidade de amortecimento.

Neste contexto, diante da quantidade de resíduo de borracha de pneu sem destino final apropriado, o presente trabalho discorre acerca da produção de um concreto permeável com o reaproveitamento do resíduo de borracha de pneu nas proporções de 5% e 7% (na forma de filamento), em substituição parcial ao agregado graúdo. As matérias primas foram caracterizadas seguindo as recomendações normativas. Os concretos permeáveis foram ensaiados no estado fresco, através do ensaio de massa específica aparente, e no estado endurecido, a partir dos ensaios de absorção de água e massa específica, permeabilidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

## **2. METODOLOGIA**

Para a produção dos concretos permeáveis com resíduo de borracha de pneu foi utilizado o cimento, pedrisco, resíduo de borracha de pneu, superplastificante e água.

Os materiais foram caracterizados obedecendo aos critérios das normas técnicas, conforme listados nos tópicos a seguir. Todos os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe, campus Estância.

### **2.1 Ensaios de caracterização**

#### **2.1.1 Cimento**

O aglomerante hidráulico utilizado foi o CPV-ARI-RS (cimento Portland de alta resistência inicial com resistência à sulfatos). Segundo a ABNT NBR 16697:2018 [10], este cimento apresenta uma resistência igual ou superior a 14 MPa no primeiro dia de idade. Os ensaios de caracterização estão apresentados a seguir.

Determinação do Índice de Finura: o ensaio para a determinação do índice de finura do cimento foi realizado de acordo com a ABNT NBR 11579:2013 [11].

Determinação da Consistência normal: o ensaio para determinação da pasta de consistência normal do cimento Portland, é prescrito pela ABNT NBR 16606:2018 [12].

Determinação do Tempo de pega: os procedimentos para a determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland, foi executado conforme a ABNT NBR 16607:2018 [13].

Determinação da Massa Específica: a obtenção da massa específica do cimento Portland é feita por meio das prescrições da ABNT NBR 16605:2017 [14], utilizando o método do frasco volumétrico de Le Chatelier.

Expansibilidade: a ABNT NBR 11582:2016 [15], estabelece o ensaio para a determinação da expansibilidade do cimento por meio do aferidor e agulha de Le Chatelier.

Resistência à compressão: o ensaio para a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi realizado conforme a ABNT NBR 7215:2019 [16].

### **2.1.2 Pedrisco**

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi o pedrisco passante na peneira de nº 9,5 mm. Os ensaios de caracterização estão apresentados a seguir.

Análise granulométrica: o pedrisco foi submetido a análise granulométrica tradicional pela ABNT NBR NM 248: 2003 [17].

Massa unitária: a determinação da massa unitária foi realizada seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 45:2006 [18] pelo método A (massa unitária no estado compactado) e pelo método C (massa unitária no estado solto).

Massa específica: para determinar a massa específica foram utilizadas as recomendações da ABNT NBR NM 53:2009 [19].

### **2.1.3 Resíduo de Borracha de Pneu**

O resíduo utilizado nessa pesquisa foi o proveniente da recauchutagem de pneus, em forma de filamento passante na peneira de nº 6,3 mm. Foi realizada a coleta do resíduo, secagem em estufa com temperatura de 105°C e armazenamento em recipientes fechados. Os ensaios de caracterização estão descritos abaixo.

Análise granulométrica: para determinação da análise granulométrica foi realizado os procedimentos descritos conforme norma ABNT NBR NM 248:2003 [17].

Massa unitária: a determinação da massa unitária do resíduo de pneu foi realizada seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 45:2006 [18] pelo método A (massa unitária no estado compactado) e pelo método C (massa unitária no estado solto).

Massa específica: para a determinação da massa específica do resíduo de borracha de pneu, foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 9776:1988 [20].

### **2.1.4 Superplastificante**

O superplastificante utilizado foi o da marca Bautech, que reduz de 10% a 25% a necessidade de água do concreto, promovendo uma melhor resistência mecânica e aumento da plasticidade.

### **2.1.5 Água**

A água utilizada nesta pesquisa é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Estância/SE, livre de impurezas e não necessário nenhum tipo de ensaio para realização do concreto.

## **2.2 Procedimentos de dosagem e moldagem dos corpos de prova**

A dosagem para as misturas foi predefinida a partir da revisão bibliográfica, uma vez que não se tem dados de um procedimento específico para dosagem de concreto permeável. Dessa maneira, o traço adotado nessa pesquisa foi o 1:3 (cimento: pedrisco), incorporando a essa mistura de referência porcentagens do resíduo de borracha de pneu (5 e 7%) em substituição parcial ao agregado graúdo. Em relação ao fator água/cimento, foi utilizado o valor de 0,32. Foi utilizado também, a fim de melhorar a trabalhabilidade dos concretos, o superplastificante referente à quantidade de 2% em relação ao peso do cimento.

Na Tabela 1 são apresentadas as proporções dos materiais onde CPR é o concreto permeável de referência, CP5% concreto permeável com 5% do resíduo de borracha de pneu e o CP7% concreto permeável com 7% desse resíduo.

**Tabela 1.** Dosagem dos materiais.

Formulações	Cimento (kg)	Pedrisco (kg)	Resíduo (kg)
CPR	51,81	155,43	-
CP5%	30,09	85,75	4,51
CP7%	44,10	123,03	9,26

Fonte: O autor (2021).

## 2.3 Ensaio do concreto no estado fresco

Foi avaliada a propriedade de massa específica aparente do concreto permeável em seu estado fresco de acordo com a norma especificada no item a seguir.

### 2.3.1 Massa específica aparente

Toda concretagem realizada foi acompanhada do ensaio de determinação da massa específica aparente do concreto no seu estado fresco. A norma de referência, ABNT NBR 16416:2015 [2], apresenta a metodologia para execução do ensaio, a qual se baseia nas recomendações da ABNT NBR 9833:2009 [21].

O ensaio foi executado a partir da moldagem de um recipiente, distribuída em três camadas, aplicando-se 25 golpes por camada, com auxílio de soquete e altura também estabelecidos pela norma. Finalmente, o teste é concluído dividindo-se a massa de material obtida pelo volume do recipiente.

## 2.4 Ensaios do concreto no estado endurecido

No estado endurecido foram realizados os ensaios de absorção de água e massa específica, permeabilidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

### 2.4.1 Absorção de água e massa específica

Para realização dos ensaios de absorção de água e massa específica foram utilizados os procedimentos descritos na ABNT NBR 9778:2009 [22], através da obtenção da massa seca, massa saturada e da massa submersa de cada corpo de prova, com o auxílio da balança hidrostática.

## 2.4.2 Permeabilidade

Para o ensaio de permeabilidade do concreto foi adotado os procedimentos descritos no Anexo A da ANBT NBR 16416:2015 [2], com algumas adaptações. Para sua determinação foi utilizado um cilindro vazado (anel), utilizando material impermeável (PVC), de 300 mm de diâmetro, com uma marcação interna com distâncias de 10 mm e 15 mm em relação à face inferior. O ensaio prossegue com o posicionamento do anel de infiltração no centro da placa a ser ensaiada, vedando com massa de calafetar, para evitar vazamentos superficiais e garantir a estanqueidade do procedimento.

O ensaio inicia com a etapa da pré-molhagem da amostra, onde foram despejados 18 litros de água no interior do cilindro, tentando manter a lâmina de água constante entre as marcações feitas no interior do cilindro, sendo cronometrado o tempo total em que a água foi infiltrada. Todos os tempos cronometrados atingiram menos de 30 segundos, com isso, para a molhagem foi utilizada a quantidade de água que se mantivesse entre as marcações pré-estabelecidas, em cada uma das placas (Figura 1), sendo iniciada em até 2 minutos depois da pré-molhagem. O tempo transcorrido e a quantidade de água foram anotados, terminando o procedimento. Para finalizar o ensaio, depois de obtidos todos os tempos de infiltração, é calculado o coeficiente de permeabilidade, através da Equação 1:

$$k = V/(A_c \cdot t) \quad (1)$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

ac = área da seção do cilindro (m<sup>2</sup>);

V = volume d'água utilizada (m<sup>3</sup>);

t = tempo necessário para a percolação total da água (s).



**Figura 1.** Processo do ensaio de permeabilidade (a) Preparação da placa para o ensaio de permeabilidade. b) Processo de molhagem do corpo de prova (Fonte: Autor).

### 2.4.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi determinado seguindo as prescrições da ABNT NBR 5739:2018 [23].

### 2.4.4 Resistência à tração na flexão

Os procedimentos adotados para determinar a resistência à tração na flexão foram os descritos na ABNT NBR 12142:2012 [24].

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização dos materiais

Os resultados obtidos dos ensaios de caracterização do cimento, do pedrisco e do resíduo de borracha de pneu, serão abordados nesse item.

#### 3.1.1 Cimento Portland

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do cimento CPV-ARI- RS.

**Tabela 2:** Ensaios físicos e mecânico do cimento.

Propriedades	Resultados
Índice de Finura (%)	1,92
Consistência normal (%)	30,00
Início de pega (min)	160,00
Fim de Pega (min)	232,00
Expansibilidade à quente (mm)	0,29
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,14
Resistência à compressão (MPa)	35,7

Fonte: O autor (2021).

Os dados apresentados estão de acordo com as prescrições da ABNT NBR 16697:2018 [10].

### 3.1.2 Pedrisco e resíduo de borracha de pneu

Massa específica e massa unitária.

Na Tabela 3 são apresentas as massas específicas e as massas unitárias (estado solto e compactado) do pedrisco e do resíduo da borracha de pneu.

**Tabela 3:** Resultados dos ensaios de massa específica e massa unitária.

Matéria-prima	Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Pedrisco	1,29	1,35	2,20
Resíduo de borracha de pneu	0,27	0,40	1,18

Fonte: O autor (2021).

Diante do resultado, pode-se verificar que o pedrisco apresentou maiores valores de massa unitária, constatando com isso menores quantidades de vazios, em relação à mesma proporção do resíduo de borracha, já que este se apresenta em formato de fibras irregulares. Como era esperado, o valor referente a massa específica do resíduo apresentou-se menor do que o do pedrisco, podendo ser utilizado como um agregado leve. Alguns pesquisadores também caracterizaram esse resíduo e encontraram valores semelhantes aos

apresentados nesta pesquisa, como pode ser visto a seguir.

Angelin,[25] que analisou o desempenho físico, mecânico, térmico acústico da microestrutura do concreto leve auto adensável emborrachado, utilizou o resíduo de borracha de pneu retido na peneira de 0,600 mm, apresentou massa específica igual a 1,16 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária de 0,40 g/cm<sup>3</sup>.

Santos,[26] que estudou o concreto leve modificado com resíduo de borracha de pneu, utilizou o resíduo passante na peneira de abertura 1,18 mm e apresentou uma massa unitária e uma massa específica do resíduo de borracha, respectivamente, iguais a 0,38 g/cm<sup>3</sup> e a 1,18 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.3 Análise granulométrica

A Tabela 4 apresenta a análise granulométrica do resíduo de borracha e do pedrisco, conforme a norma NBR NM 248:2003, e a Figura 2 mostra as curvas granulométricas de cada um dos materiais.

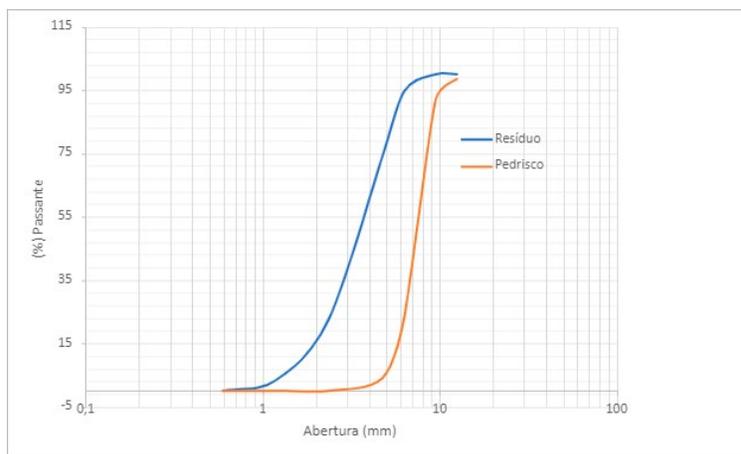
**Tabela 4** - Análise granulométrica do resíduo de borracha e do pedrisco.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida acumulada (%)	
	Resíduo	Pedrisco
12,5	-	1,5
9,5	0	8
6,3	5,38	77
4,75	26,89	96
2,36	77,43	100
1,18	96,78	-
600	100	-
Fundo	0	0
Diâmetro máximo (mm)	9,5	12,5
Módulo de finura	3,01	2,04

Fonte: dados da pesquisa.

O módulo de finura do resíduo de borracha de pneu vai variar de acordo com a sua dimensão e formato adotado. O valor encontrado nesta pesquisa foi de 3,01 apresentando-se próximo ao adotado nas pesquisas de [27] que foi de

3,87, [25] de 3,49, [28] de 3,81 e [29] de 3,32, onde também utilizaram esse resíduo em sua forma de filamento.

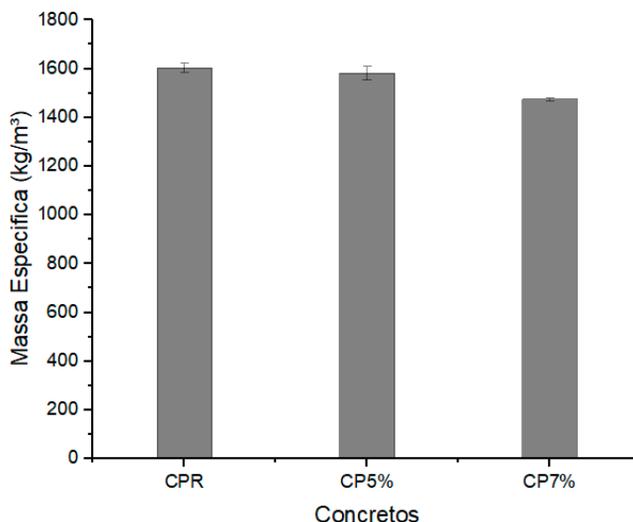


**Figura 2.** Curva granulométrica do resíduo e do pedrisco (O autor, 2021).

De acordo com a Figura 2, a curva granulométrica dos materiais, apresentaram-se com uma granulometria uniforme, onde a curva é quase vertical, indicando a predominância de um só tipo de fração. Com base nos parâmetros representativos dessa curva o  $C_u$  (coeficiente de não uniformidade) foi classificado como um material uniforme.

### 3.1 Propriedade do concreto no estado fresco

A Figura 3 apresenta o resultado do ensaio de massa específica aparente no estado fresco do concreto permeável referência e dos concretos com resíduo de borracha de pneu.



**Figura 3** – Resultados do ensaio de massa específica no estado fresco (Fonte: dados da pesquisa).

O concreto permeável de referência apresentou maior valor de massa específica em relação aos concretos com incorporação do resíduo de borracha de pneu. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias (valor  $p=0,032$ ); com o teste de Tukey, constatou-se uma redução significativa somente do concreto CP7% em relação ao concreto de referência, em 8%.

Diante dos resultados encontrados apenas o concreto referência está de acordo com que a ABNT NBR 16416:2015 [2] prescreve que os concretos permeáveis, devem possuir massa específica tanto no estado fresco como no estado endurecido superiores a  $1600 \text{ kg/m}^3$ . Já os concretos com 5% e 7% de resíduo encontram-se numa faixa abaixo no estabelecido em norma, no entanto coerente com resultados encontrados na literatura, atingindo valores de  $1582 \text{ kg/m}^3$  e  $1475 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente.

Segundo [4] são encontrados valores de massa específica aparente do concreto permeável na ordem de  $1.300 \text{ kg/m}^3$  a  $2.000 \text{ kg/m}^3$  no estado fresco. [30] encontrou valores de massa específica no estado fresco variando de  $1459 \text{ kg/m}^3$  a  $1561 \text{ kg/m}^3$ .

Para [29] a redução na massa específica do concreto acontece à medida que aumenta a quantidade de resíduo de borracha em substituição ao agregado. Essa redução está associada ao adensamento, pois, concretos com resíduos de borracha mal adensados podem apresentar vazios internos fazendo com que haja diminuição na massa específica [31]

## 3.2 Propriedade do concreto no estado endurecido

### 3.2.1 Massa específica e absorção de água

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes à massa específica e absorção de água dos concretos permeáveis.

**Tabela 5.** Resultados de massa específica e absorção de água.

Formulações	Massa específica (kg/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
CPR	1680 ± 55	9,06 ± 0,61
CP5%	1541 ± 21	8,91 ± 0,13
CP7%	1466 ± 38	9,25 ± 0,00

Fonte: dados da pesquisa.

O concreto permeável de referência apresentou maior valor de massa específica em relação aos concretos com incorporação do resíduo de borracha de pneu. Os resultados mostraram que existe uma diferença significativa entre as médias (valor  $p = 0,032$ ). Com o teste de Tukey, constatou-se redução significativa dos concretos com resíduo em relação ao concreto de referência, para o CP5% e CP7%, de 8,3 e 12,7%, respectivamente. Os corpos de prova dos concretos permeáveis, principalmente os que possuem em sua composição resíduos, possuem uma maior fragmentação das partículas superficiais em suas bordas. Por conta disso, é preciso levar em consideração a possível dispersão dos resultados de massa específica no estado endurecido [32].

Como já foi mencionado no item anterior, o valor da massa específica deve atingir no mínimo 1600 kg/m<sup>3</sup> de acordo com a ABNT NBR 16416:2015 [2] para concretos permeáveis. Somente o concreto de referência está nessa faixa estabelecida por norma. [29] comenta que a massa específica diminui

com a adição de resíduo de borracha de pneu, devido ao mau adensamento que traz como consequência o aparecimento de muitos vazios internos na mistura.

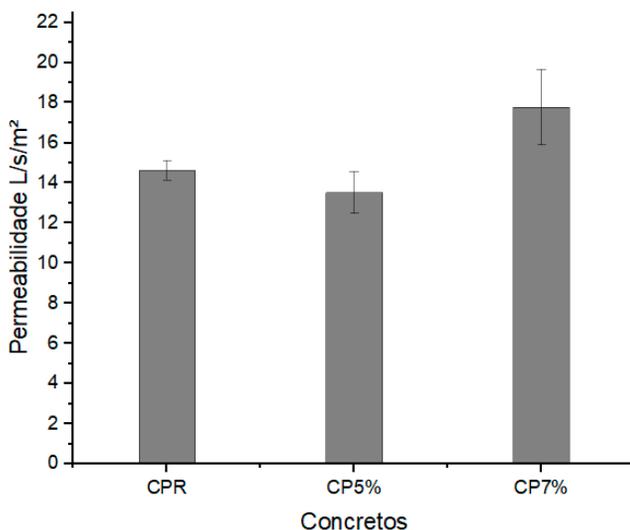
Gesoglu [9] explicam que adicionar borracha em quantidades diferentes mostram pesos mais leves de concretos, com isso as massas específicas de concreto permeável com borracha são menores quando comparadas a mistura de um concreto permeável sem resíduo, em cerca de 2% a 11%.

Na propriedade de absorção de água foi observado uma redução não significativa para o concreto com 5% de resíduo em 1,65% em relação ao concreto de referência, esse fato, pode ter ocorrido devido a um mau adensamento, ocasionando pontos com maiores concentrações do resíduo do que em outros. Já para o concreto com 7% do resíduo, o resultado mostrou que não existe uma diferença significativa entre as médias (valor  $p=0,500$ ); com o teste de Tukey, constatou-se aumento não significativo em 2,09%, em relação ao de referência.

Fioriti[33] perceberam que o emprego de resíduos de borracha de pneus não modifica de forma significativa a característica de absorção de água no concreto. Os autores ainda constataram que em alguns casos, os resultados da absorção das misturas com resíduo de borracha foram menores que o traço de referência.

### **3.2.2 Permeabilidade**

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de permeabilidade, assim como também, os desvios padrões das três placas dos concretos permeáveis.



**Figura 4.** Resultados do ensaio de permeabilidade (dados do autor).

Os resultados mostraram que não existe uma diferença entre as médias (valor  $p = 0,19$ ). Através do teste de Tukey, constatou-se uma redução não significativa do concreto com resíduo de 5% e um aumento também não significativo do concreto com resíduo de 7%, todos em relação ao concreto de referência.

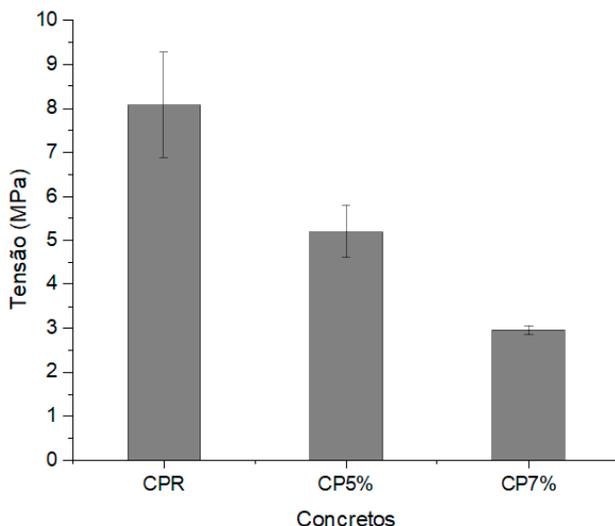
De acordo com a fundamentação teórica desta pesquisa, ao avaliar os concretos permeáveis contendo borracha de pneu, foi verificado que a adição desse resíduo tende a diminuir o coeficiente de permeabilidade. Fato este, que pode ser observado no concreto com a incorporação de 5% do resíduo, já o concreto com a porcentagem de 7%, provavelmente ocorreu um mau adensamento no momento da moldagem dos corpos de prova, o que influenciou no resultado desta propriedade. Os autores ainda concluem que as partículas menores afetam mais a permeabilidade do que as maiores, pois elas preenchem facilmente os poros entre os agregados naturais.

Diante dos resultados expostos, notou-se que todos os concretos apresentaram valores dentro do limite do estudo realizado por [34] de 2 l/s/m<sup>2</sup> a 18 l/s/m<sup>2</sup>.

Na literatura podem-se encontrar vários métodos para a realização da medição da permeabilidade, assim como também uma grande variação de resultados entre os autores, devido principalmente a composição, qualidade dos materiais e o processo de adensamento empregados nos concretos permeáveis.

### 3.3.3 Resistência à compressão e tração na flexão

A Figura 5 apresenta a média dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos permeáveis.



**Figura 5** . Resultados do ensaio de resistência à compressão (Fonte: dados da pesquisa).

Os resultados mostraram que existe uma diferença entre as médias (valor  $p=0,0053$ ); com o teste de Tukey, constatou-se redução significativa do concreto com resíduo em relação ao concreto de referência, para o CP5% e CP7%, de 35,64 e 63,36%, respectivamente.

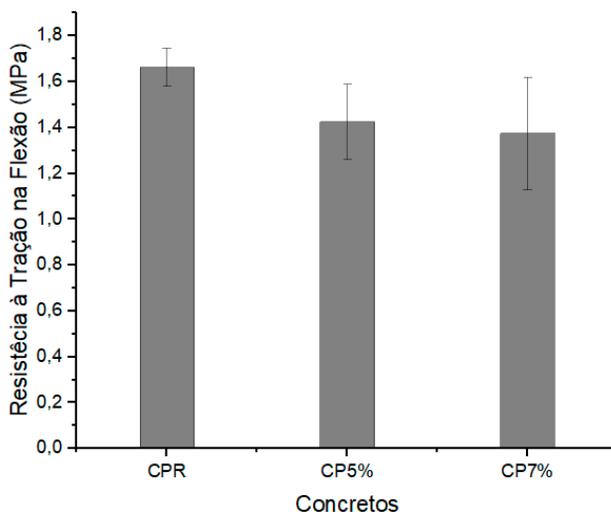
O concreto permeável de referência foi a formulação que apresentou maior valor de resistência à compressão. A partir da substituição parcial do agregado graúdo pelo resíduo de borracha, houve um decréscimo nos valores de resistência, já esperado, de acordo com as pesquisas apresentadas na fundamentação teórica.

Segundo os estudos de [35], [36], [37] e [38], os concretos que possuem resíduos de borracha de pneu em sua composição tendem a sofrer redução na resistência à compressão devido a fraca ligação existente entre a matriz cimentícia e a partícula da borracha de pneu. Um outro fator que afeta essa propriedade é a granulometria irregular desses resíduos que geram vazios e aumentam a porosidade, produzindo um concreto menos resistente.

Lanson [39], mencionam também que as partículas de borracha aumentam a zona de transição entre o este resíduo e a pasta de cimento. Isso se dá pelo fato da borracha ser um material antiaderente, o que faz com que não consiga aderir à pasta de cimento tornando o concreto mais frágil, provocando o aparecimento de microfissuras.

Contudo, mesmo com essa discrepância entre os valores, associada à variabilidade dos resíduos e à própria natureza anisotrópica dos concretos permeáveis, os resultados de resistência à compressão alcançados se adequam à faixa de valores correspondente a concretos permeáveis: 2,8 a 28 [4].

A Figura 6 apresenta a média dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos concretos permeáveis com seus desvios.



**Figura 6** – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão (Fonte: dados da pesquisa).

Em relação aos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, pode-se notar que por meio da análise estatística os resultados mostraram-se iguais ( $p = 0,38$ ), não apresentando diferença significativa entre as amostras,

Os valores obtidos não atenderam à especificação mínima quanto à resistência mecânica característica, definida pela ABNT NBR16416:2015 [2], para revestimento de pavimento de concreto permeável moldado no laboratório. A norma limita a determinação da resistência à tração na flexão a valores superiores a 2 MPa para tráfego leve de veículos.

Este fato pode ser atribuído a dificuldade de realização deste ensaio, pelo corpo de prova prismático apresentar superfícies irregulares e também em decorrência do aumento do número de vazios do concreto, além da provável redução da interface entre a pasta de cimento e o resíduo.

## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram produzidos concretos permeáveis com a incorporação do resíduo de borracha de pneu nas proporções de 5% e 7% em substituição parcial ao agregado graúdo, a fim de avaliar o desempenho do resíduo na composição desse concreto. Os resultados experimentais foram comparados com valores disponíveis na literatura para ensaios similares.

Os resultados mostraram que em relação a massa específica, tanto no estado fresco como no estado endurecido, a norma estabelece que possua um valor mínimo de  $(1600 \pm 80)$  kg/m<sup>3</sup>. Sendo assim, somente o concreto de referência apresentaram-se dentro desse limite, os concretos com as incorporações dos resíduos ficaram abaixo do limite da norma, no entanto, encontra-se dentro dos valores vistos na literatura.

Sobre a propriedade da permeabilidade, apesar da discrepância entre os valores encontrados na literatura, os resultados desta pesquisa mostraram-se de acordo com a faixa estabelecida nos estudos de Scheffer (2006) de 2 l/s/m<sup>2</sup> a 18,33 l/s/m<sup>2</sup>.

Os resultados referentes a resistência à compressão não atenderam a ABNT NBR 16416:2015 que determina um valor  $\geq 20$  MPa, no entanto encontra-se dentro dos valores estabelecidos pelo ACI 522 2010 de 2,8 MPa a 28 MPa. E sobre a resistência a tração na flexão os valores também não atende-

ram aos 2 MPa, exigidos por norma.

Diante dos dados expostos, o concreto permeável com incorporação de resíduo de borracha de pneu produzido nesta pesquisa não atendeu as especificações da ABNT NBR 16416:2015, para o uso em pavimentação de veículos leves. Mas, contudo, esse material pode ser aplicado em áreas de jardins, calçadas com pouco fluxo, tampas de valas e bueiros, possibilitando a eliminação de poças e lâminas d'água em dias chuvosos.

De fato, a aplicação do concreto permeável em pavimentos representa um cenário promissor na busca pela redução da impermeabilização das superfícies de áreas urbanas através de métodos sustentáveis e economicamente viáveis.

Além de que, a adição de resíduos na composição do concreto ajuda na diminuição da extração de recursos minerais e a redução dos impactos ambientais e dos danos causados à saúde devido à disposição irregular dos pneus, com isso contribuindo de maneira sustentável com o seu reaproveitamento que mesmo possuindo normas de disposição final ainda são jogados em locais inadequados.

## REFERÊNCIAS

- [1] BRESSAM, Gabriela. S. C.; Oliveira, Daniela. D.; Dessuy, Thainá. Y. (2017) “Prevenção de enchentes urbanas: uma alternativa sustentável através do uso do concreto permeável”, Salão do Conhecimento, UNIJUI. 2017.
- [2] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- [3] BOTTEON, Leticia M. “Desenvolvimento e Caracterização de Concreto Permeável para Utilização em Blocos Intertravados para Estacionamentos”, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Fluminense. Niterói/RJ, 2017.
- [4] TENNIS, Paul D.; LEMING, Michael L.; AKERS, David J.; Pervious concrete pavements, EB.302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, e National Ready Concrete Association, Silve Spring, Maryland, USA, 2004, 36 p.
- [5] SALDANHA, Gustavo. S.; NUNES Valone. S.; BORJA, Edilberto. V. Estudo da viabilidade técnica da utilização de resíduo de pneu na composição de concreto permeável para pavimentação urbana. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindóia, SP, 2016.
- [6] CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Diário Oficial da República

Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 188, de 01/10/2009, p.64-65.

[7] SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE/ SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DO TRANSPORTE. Cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartadas por ano no Brasil. 2017. Disponível em <<http://www.sestsenat.org.br/imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneussao-descartados-por-ano-no-brasil>> Acesso em: 11 mar. 2019.

[8] CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente.. Resolução nº 258, 1999. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>. Acesso em 16 fev.2020.

[9] GESOGLU, Mehmet. et al. Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. 2014. Construction and Building Materials, 2014, p. 206–213.

[10] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

[11] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

[12] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal, Rio de Janeiro, 2018.

[13] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega, Rio de Janeiro, 2018.

[14] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017.

[15] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier, Rio de Janeiro, 2016.

[16] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2019.

[17] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

[18] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

[19] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

[20] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT NBR 9776 Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1988.

[21] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro, 2009.

[22] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778:

Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2009.

[23] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico, Rio de Janeiro, 2007.

[24] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

[25] ANGELIN, Andressa F. Análise dos desempenhos físicos, mecânicos, térmico acústico da microestrutura do concreto leve autoadensável emborrachado (clae). Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. São Paulo, 2018.

[26] SANTOS, José N. Desenvolvimento de Concreto leve de argila expandida modificado com resíduo de borracha de pneu. 95 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Estância. 2019.

[27] SILVA, Maria de F. R. Estudo das propriedades do concreto leve com argila expandida e adição do resíduo de borracha de pneu. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Estância, 2019.

[28] AKASAKI, J. L.; LEMOS, P. E.; FIORITI, C. F. Pó de pedra e borracha de pneus utilizados como substituto da areia natural em concretos. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis 2016, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2016.

[29] BOAVENTURA, Márcio C. Avaliação da resistência à compressão de concretos produzidos com resíduos de pneus. Trabalho de conclusão de curso (monografia). Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana/BA, 2011.

[30] BATEZINI, Rafael. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Transportes – Infraestrutura de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013

[31] NEVILLE, A. Propriedades do concreto. 2ª Ed. São Paulo. Editora Pini, 1997.

[32] PAULA JUNIOR, Adilson C. de P. Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis. 168f. Dissertação de pós graduação – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2019.

[33] FIORITI, Cesar. F.; INO, Akemi; AKASAKI, Jorge. L. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos de processo de recauchutagem de pneus. *Acta Scientiarum Technology*, v. 32, n. 3, p. 237-244, 2010

[34] SCHAEFER, Vernon R.; WANG, Kejin.; SULEIMAN, Muhannad T.; KEVERN, John T. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Final Report, Civil Engineering, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA, USA, 2006.

[35] SHEN, Weiguo et al. Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 667–674, 2013.

- [36] HERRERA-SOSA, Eduardo. S. et al. Recovery and Modification of Waste Tire Particles and Their Use as Reinforcements of Concrete. *International Journal of Polymer Science*, v. 2015, n. 1, 2015.
- [37] SILVA, Fabiana. M. et al. Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, v. 91, 2015.
- [38] ANGELIN, Andressa. F. et al. Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars. *Construction & Building Materials*, v. 95, p. 525-536, 2015.
- [39] LANZON, M. et al. Microstructural examination and potential application of rendering mortars made of tire rubber and expanded polystyrene wastes. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 817–825, 2015.
- [40] ACI - AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. Stormwater management with pervious concrete pavement. *Concrete Information*, Skokis, 2010.

# **SOBRE OS AUTORES**

## **ORGANIZADORES**

### **FERNANDA MARTINS CAVALCANTE DE MELO**



Possui mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Sergipe (2016), Pós-graduação em Educação Profissional e Tecnológica pela FAEL (2020), graduação em Engenharia Civil pela Faculdade Pio Décimo (2011) e Curso técnico/profissionalizante em Construção Civil pelo IFS (2004). Atuou na mineradora Vale S.A. como Gestora de contratos na área de Saneamento, Manutenção Predial e Obras Cíveis (2009-2012). Atualmente é Revisora de periódico da Construction and Building Materials, professora efetiva do Instituto Federal de Sergipe (IFS), campus Estância e Líder do Núcleo de Pesquisa em

Desenvolvimento, Edificações e Meio Ambiente (NPDEMA), onde é pesquisadora com trabalhos publicados na área de materiais sustentáveis, principalmente, concreto, argamassa e tijolo de solo-cimento.

E-mail: [fernanda.melo@ifs.edu.br](mailto:fernanda.melo@ifs.edu.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0886015140159176>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0122-8336>

### **HERBET ALVES DE OLIVEIRA**



Graduado em Engenharia Civil e Licenciatura em Complementação Pedagógica para o ensino técnico. É Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais pelo IPEN/USP e Doutorado na mesma área na UFS. Possui pós graduação em Geotecnia e Docência do ensino superior. Atuou no segmento de Cerâmica na Klabin/Cecrisa (MG) (1978-1986), em indústria química na produção de óxido de ferro sintético na Globo Tintas (SP) (1986-1987) e na fábrica Porcelanato Balgres na Venezuela (1990-1991). Atuou como Gerente de produção de tijolo solo-cimento na Valemix (MG) (1993-1994) e Gerente de qualidade no segmento de

Revestimento Cerâmico Samarsa (SE) (2003-2010). Foi professor do curso técnico em Cerâmica no SENAI (SP) (1994-2002). Atuou como docente na FANESE (2003-2014). Atualmente é professor do Instituto Federal de Sergipe (2011-atual). É pesquisador nas áreas de cerâmica, argamassa e solos, sobretudo que envolvam reaproveitamento de resíduos.

E-mail: [herbet.oliveira@ifs.edu.br](mailto:herbet.oliveira@ifs.edu.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7050244937607862>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4159-6325>

## **VANESSA GENTIL DE OLIVEIRA ALMEIDA**



Graduação em engenharia civil pela Faculdade Pio Décimo, mestrado em engenharia civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e curso técnico em Edificações pelo Instituto Federal de Sergipe. Atualmente é professora efetiva do Instituto Federal de Sergipe. Área de pesquisa: materiais para engenharia.

E-mail: [vanessa.gentil@hotmail.com](mailto:vanessa.gentil@hotmail.com)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1276940715351784>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9740-1940>

## **THIAGO AUGUSTO REMACRE MUNARETO LIMA**



Possui graduação em Física Médica e Engenharia Civil com Mestrado em Física da Matéria Condensada (UFS). Doutorado em Física da Matéria Condensada (UFS/Inct-INAMI). Especialista em Educação à Distância (SENAC) com experiência em Tecnologia na Educação, Educação de Jovens e Adultos, Tutoria da EJA e Desenvolvimento de Novas Tecnologias para Sociologia e Educação. Atualmente é professor Efetivo EBTT do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Sergipe (IFS). Possui formação básica concentrada em Física da Matéria Condensada Experimental, atuando principalmente nas especialidades experimentais:

XAS (espectroscopia de absorção de raios X), MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), SAXS (espectroscopia de espalhamento de raios X a baixos ângulos) e espectroscopia óptica (UV-VIS) de nanopartículas e sistemas nanoestruturados/porosos no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). No campo da Engenharia Civil, possui experiência profissional em Engenharia Estrutural na elaboração e execução de projetos Estruturais, Edifícios, Hotéis, Infraestrutura (Fundações) e Construção Civil. Desenvolve pesquisa acadêmica nas seguintes temáticas: nanociência das biocerâmicas com porosidade controlada, nanoestrutura e tecnologia do concreto armado, microestrutura do concreto fissurado, materiais híbridos metálicos/não-metálicos para reforço estrutural, criação e desenvolvimento de softwares para a indústria 4.0 da construção civil. Líder de grupo dos seguintes grupos de pesquisa: i) Núcleo de materiais avançados, compósitos e componentes para construção civil e ii) Grupo de inovação em softwares mobile para a indústria 4.0 da construção civil.

E-mail: [thiago.remacre@ifs.edu.br](mailto:thiago.remacre@ifs.edu.br)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8317416907165101>

Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-6379-6593>

Sustentabilidade é o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. É a preocupação em reaproveitar todos os recursos explorados, maximizando seu aproveitamento. Vivemos em uma geração de automação, agilidade e alta produtividade. Para quem estava na ativa em meados de 1982, pôde viver a reengenharia, em que a indústria questionava seus processos e buscava automação e, conseqüentemente, redução de custos de processo. Naquele momento, iniciava-se a busca pelo desenvolvimento sustentável. Na atividade industrial dos dias de hoje muito resíduo é produzido e na maioria das vezes é descartado em aterros e pouca solução foi encontrada para esse descarte.

Nesse livro trazemos uma coletânea dos principais trabalhos realizados no período de 2014 a 2021 na área de construção civil, em que o reaproveitamento de resíduo foi explorado, bem como pesquisas em que a otimização das propriedades dos materiais foi realizada. Foram realizados trabalhos com argamassa, concreto leve utilizando argila expandida, concreto, blocos de concreto e tijolo solo-cimento, entre outros. Foram testados resíduos de marmorarias, cinza gerada na queima de madeira para indústria têxtil, plásticos, vidro de garrafas, serragem de madeira gerada no processamento de móveis de modo geral, entre outros, além de trabalhos voltados para revisão bibliográfica.

