

**Armando Dias Duarte**  
(Organizador)

# ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e  
tecnológicas e aspectos ambientais 2



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

**Armando Dias Duarte**  
(Organizador)

# ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e  
tecnológicas e aspectos ambientais 2



**Atena**  
Editora

Ano 2022

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



## Engenharia civil: demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais 2

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Yaidy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Armando Dias Duarte

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

E57 Engenharia civil: demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais 2 / Organizador Armando Dias Duarte. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0384-5

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.845221108>

1. Engenharia civil. I. Duarte, Armando Dias (Organizador). II. Título.

CDD 624

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

A coleção de trabalhos intitulada “*Engenharia civil: Demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais 2*” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio de diversos trabalhos que compõe seus capítulos. O volume abordará de forma categorizada e interdisciplinar, pesquisas cujos resultados possam auxiliar na tomada de decisão, tanto no campo acadêmico, quanto no profissional.

Os trabalhos desenvolvidos foram realizados em instituições de ensino, pesquisa e extensão localizadas no Brasil. Nos capítulos apresentados, são encontrados estudos de grande valia nas áreas de: materiais da construção civil, análise de estruturas por meio de métodos numéricos, recursos hídricos e gestão. A composição dos temas buscou a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos (as), mestres (as) e todos (as) aqueles (as) que de alguma forma se interessam pela área da Engenharia Civil, através de temáticas atuais com resoluções inovadoras, descritas nos capítulos da coleção. Sendo assim, a divulgação científica é apresentada com grande importância para o desenvolvimento de toda uma nação, portanto, fica evidenciada a responsabilidade de transmissão dos saberes através de plataformas consolidadas e confiáveis, como a Atena Editora, capaz de oferecer uma maior segurança para os (as) novos (as) pesquisadores (as) e os (as) que já atuam nas diferentes áreas de pesquisa, exporem e divulguem seus resultados obtidos.

Armando Dias Duarte

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DE CHUVA EM BAIRRO DE ELEVADO FLUXO DE VEÍCULOS – ESTUDO DE CASO**

Eduardo Antonio Maia Lins  
Daniele de Castro Pessoa de Melo  
Diogo Henrique Fernandes da Paz  
Sérgio Carvalho de Paiva  
Adriane Mendes Vieira Mota  
Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha  
Luiz Oliveira da Costa Filho  
Fábio José de Araújo Pedrosa  
Fábio Correia de Oliveira  
Rosana Gondim de Oliveira  
Fabio Machado Cavalcanti  
Maria Clara Pestana Calsa  
Fernando Arthur Nogueira Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211081>

### **CAPÍTULO 2..... 10**

#### **ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM UMA RODOVIA PERNAMBUCANA**

Eduardo Antonio Maia Lins  
Adriana da Silva Baltar Maia Lins  
Daniele de Castro Pessoa de Melo  
Diogo Henrique Fernandes da Paz  
Sérgio Carvalho de Paiva  
Adriane Mendes Vieira Mota  
Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha  
Luiz Oliveira da Costa Filho  
Fábio José de Araújo Pedrosa  
Fábio Correia de Oliveira  
Rosana Gondim de Oliveira  
Fabio Machado Cavalcanti  
Maria Clara Pestana Calsa  
Fernando Arthur Nogueira Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211082>

### **CAPÍTULO 3..... 24**

#### **ANÁLISE AMBIENTAL DOS IMPACTOS NEGATIVOS GERADOS POR CEMITÉRIO – ESTUDO DE CASO**

Eduardo Antonio Maia Lins  
Adriana da Silva Baltar Maia Lins  
Daniele de Castro Pessoa de Melo  
Diogo Henrique Fernandes da Paz  
Sérgio Carvalho de Paiva  
Adriane Mendes Vieira Mota

Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha  
Luiz Oliveira da Costa Filho  
Fábio José de Araújo Pedrosa  
Fábio Correia de Oliveira  
Rosana Gondim de Oliveira  
Andréa Cristina Baltar Barros  
Fabio Machado Cavalcanti  
Fernando Artur Nogueira Silva  
Maria Clara Pestana Calsa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211083>

**CAPÍTULO 4..... 36**

**ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICO DO CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÃO DA CINZA DO COCO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO**

João Paulo Monteiro Carvalho  
Simone de França Cardoso  
Wilson Linhares dos Santos  
Mércia Maria Pinheiro Gambarra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211084>

**CAPÍTULO 5..... 49**

**EFFECT OF BASALT POWDER AND METAKAOLIN FILLERS ON ASPHALT MASTIC BEHAVIOR**

Ana Luiza Rezende Rodrigues  
Rodrigo Pires Leandro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211085>

**CAPÍTULO 6..... 63**

**MASSA CERÂMICA À BASE DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA IMPRESSÃO 3D POR EXTRUSÃO**

Márcia Silva de Araújo  
Gabriel Elias Toledo Ferreira  
José Alberto Cerri

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211086>

**CAPÍTULO 7..... 77**

**VALORIZATION OF SLATE WASTE TO PRODUCE MATERIALS CERAMICS AND COMPOSITES**

Luciana Boaventura Palhares  
Douglas Filipe Galvão  
Tayna E. B. Lucena  
Sthefany B. P. da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211087>

**CAPÍTULO 8..... 90**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVERS**

**PRODUZIDOS COM O USO DE SÍLICA ATIVA**

Martônio José Marques Francelino

Fred Rodrigues Barbosa

João Manoel de F. Mota

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211088>

**CAPÍTULO 9..... 103**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSA PRODUZIDO COM AGLOMERANTE ÁLCALI-ATIVADO À BASE DE RCV E CINZAS**

Otacisio Gomes Teixeira

Mateus Ribeiro Caetano

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8452211089>

**CAPÍTULO 10..... 113**

**ASPECTO HISTÓRICO DO PROJETO DO RESERVATÓRIO DO RIO ARICANDUVA NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO SOB O ASPECTO HIDROLÓGICO**

Ariston da Silva Melo Júnior

Claudia de Oliveira Lozada

João Jorge Pereira da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110810>

**CAPÍTULO 11..... 125**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES DAS ÁREAS RIBEIRINHAS PÓS DESASTRE: UM OLHAR PARA O BANCO DA VITÓRIA, ILHÉUS-BA**

Igor Ângelo Lobão de Souza

Joandre Neres de Jesus

Vanessa Neri de Souza

Kaique Ourives Silva

Ozana Almeida Lessa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110811>

**CAPÍTULO 12..... 138**

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DA PRAIA DO BAIRRO NOVO, OLINDA, PERNAMBUCO**

Eduardo Antonio Maia Lins

Daniele de Castro Pessoa de Melo

Diogo Henrique Fernandes da Paz

Sérgio Carvalho de Paiva

Adriane Mendes Vieira Mota

Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha

Luiz Oliveira da Costa Filho

Fábio José de Araújo Pedrosa

Fábio Correia de Oliveira

Rosana Gondim de Oliveira

Fabio Machado Cavalcanti

Maria Clara Pestana Calsa

Fernando Arthur Nogueira Silva

Hugo Vinicius Arruda de Sales

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110812>

**CAPÍTULO 13..... 155**

**TAIPA DE PILÃO: UMA TÉCNICA CONSTRUTIVA COM TERRA**

Kauan de Jesus Oliveira

Júlio Coura Diniz

Erick Roberto Campos

Sayonara Espinoza Silva

Samuel Velasques Fernandes de Noronha

João Victor Rech Ruiz da Silva

Muriellen Cristina Cavalheiro da Frota Monteiro

Rafael Luis da Silva

Alex Gomes Pereira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110813>

**CAPÍTULO 14..... 165**

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DO SOFTWARE ANSYS**

Henrique Cardoso Koch

Bruna Manica Lazzari

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110814>

**CAPÍTULO 15..... 214**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ATERRO TESTE SOBRE SOLO ARGILOSO MUITO MOLE REFORÇADO COM COLUNAS DE BRITA**

Pedro Gomes dos Santos Pereira

Bruno Teixeira Lima

Marcus Peigas Pacheco

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110815>

**CAPÍTULO 16..... 225**

**ANÁLISE ESTRUTURAL ELÁSTICA LINEAR DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO POR DIFERENTES MODELOS DE CÁLCULO: UM ESTUDO DE CASO**

Ray Calazans dos Santos Silva

Luan Reginato

José Anchieta Damasceno Fernandes Neto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110816>

**CAPÍTULO 17..... 241**

**GERENCIAMENTO, CONTROLE E APLICAÇÃO DO MÉTODO - *LEAN CONSTRUCTION* NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Diego Ramos de Melo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84522110817>

**SOBRE O ORGANIZADOR..... 255**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 256**

# CAPÍTULO 1

## ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DE CHUVA EM BAIRRO DE ELEVADO FLUXO DE VEÍCULOS – ESTUDO DE CASO

*Data de aceite: 01/08/2022*

**Eduardo Antonio Maia Lins**

Universidade Católica de Pernambuco –  
UNICAP / Instituto Federal de Pernambuco –  
IFPE – Campus Recife

**Daniele de Castro Pessoa de Melo**

**Diogo Henrique Fernandes da Paz**

**Sérgio Carvalho de Paiva**

**Adriane Mendes Vieira Mota**

**Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha**

**Luiz Oliveira da Costa Filho**

**Fábio José de Araújo Pedrosa**

**Fábio Correia de Oliveira**

**Rosana Gondim de Oliveira**

**Fabio Machado Cavalcanti**

**Maria Clara Pestana Calsa**

**Fernando Arthur Nogueira Silva**

**RESUMO:** A composição química de um evento de chuva é resultado do conjunto de diversos fatores, pois os processos atmosféricos são dinâmicos e complexos. Assim, a precipitação ácida pode ocorrer como deposição seca ou úmida, não sendo o fenômeno limitado pela presença de chuva. No Brasil, o fenômeno da chuva ácida ocorre sobre as maiores

metrópoles do país, porém, com o aumento do parque industrial brasileiro e da frota de veículos (fontes antropogênicas dos óxidos de nitrogênio e de enxofre), o fenômeno ocorre em todas as regiões que recebem ventos de áreas industriais e de grandes metrópoles nacionais. O presente trabalho visou contribuir com os órgãos ambientais através das análises sobre a chuva ácida, com seus possíveis impactos, tendo como estudo de caso, a incidência no bairro da Boa Vista, localizado na cidade do Recife-PE. Foram usados para coletar a água da chuva, recipientes esterilizados antes de cada coleta. Os recipientes foram colocados em pontos estratégicos da Universidade Católica de Pernambuco ou próximo de telhados com calhas para que a qualidade da água coletada não fosse influenciada com a introdução de particulados como folhas e pedras de pequeno porte. A coleta foi realizada somente no início da precipitação, não ficando exposta à deposição seca. Os resultados apontaram que o pH das amostras coletadas se encontra, em média, acima de 7, contudo essa média dos fatores de neutralidade não está diretamente associado a ocorrência da acidez nas chuvas, uma vez que das amostras analisadas, 30,18% delas resultaram no pH levemente ácido, abaixo de 7. Foram também constatados concentrações de cálcio, sódio e potássio nas águas precipitadas com concentrações média de 11,29 mg/L de  $\text{Ca}^{+2}$ , 3,05 mg/L de  $\text{Na}^+$  e 0,19 mg/L de  $\text{K}^+$ , respectivamente. Notou-se uma alteração significativa entre a água da chuva ideal e a observada na prática, onde essa diferença possivelmente está relacionada a construção civil e alto fluxo de veículos presentes

na cidade de Recife mais especificamente no bairro da Boa Vista.

**PALAVRAS-CHAVE:** Precipitação, Contaminação, Poluição, Acidez.

**ABSTRACT:** The chemical composition of a rainfall event is the result of a set of several factors, as atmospheric processes are dynamic and complex. Thus, acid precipitation can occur as dry or wet deposition, and the phenomenon is not limited by the presence of rain. In Brazil, the phenomenon of acid rain occurs over the largest metropolises in the country, however, with the increase in the Brazilian industrial park and in the vehicle fleet (anthropogenic sources of nitrogen and sulfur oxides), the phenomenon occurs in all regions that receive winds from industrial areas and large national metropolises. The present work aimed to contribute to environmental agencies through the analysis of acid rain, with its possible impacts, having as a case study, the incidence in the neighborhood of Boa Vista, located in the city of Recife-PE. Sterilized containers were used to collect rainwater before each collection. The containers were placed at strategic points at the Universidade Católica de Pernambuco or near roofs with gutters so that the quality of the water collected was not influenced by the introduction of particulates such as leaves and small stones. The collection was carried out only at the beginning of the precipitation, not being exposed to dry deposition. The results showed that the pH of the collected samples is, on average, above 7, however this average of the neutrality factors is not directly associated with the occurrence of acidity in the rains, since of the analyzed samples, 30.18% of them resulted at slightly acidic pH, below 7. Calcium, sodium and potassium concentrations were also observed in the precipitated water with average concentrations of 11.29 mg/L of Ca<sup>2+</sup>, 3.05 mg/L of Na<sup>+</sup> and 0.19 mg /L of K<sup>+</sup>, respectively. There was a significant change between the ideal rainwater and that observed in practice, where this difference is possibly related to civil construction and the high flow of vehicles present in the city of Recife, more specifically in the neighborhood of Boa Vista.

**KEYWORDS:** Precipitation, Contamination, Pollution, Acidity.

## INTRODUÇÃO

A chuva ácida, no sentido mais amplo, pode ser traduzida como uma devolução da poluição que o homem cria sobre a superfície terrestre. Em longo prazo, seus efeitos constituem um importante indicador das condições de degradação do meio ambiente, estando, portanto, ligada à qualidade do ar sobre as áreas fortemente urbanizadas. Esta chuva dita ácida, também pode ser neve ou neblina, traz consigo tudo o que é nocivo, os agentes químicos, resíduos industriais, que tanto prejudica o ar atmosférico quanto os seres vivos e infraestruturas (NERY et al., 2013). Dessa forma, o impacto para a fauna ou a flora que a acidez da chuva traz na poluição de lagos e rios, nos climas quentes e nos frios, acarreta em destruição de alguns habitats dos animais (LETRIA et al., 2011).

A composição química de um evento de chuva é resultado do conjunto de diversos fatores, pois os processos atmosféricos são dinâmicos e complexos. Assim, a precipitação ácida pode ocorrer como deposição seca ou úmida, não sendo o fenômeno limitado pela presença de chuva. As fontes de poluentes podem ser tanto naturais quanto devidas à ação

humana que podem ser classificadas como estacionárias e móveis (SOUZA et al., 2016).

Como o pH das chuvas ácidas é menor que 5,6, inferior ao das chuvas convencionais, além da queda do pH dos locais em que se depositam, os locais onde se precipitam sofrem as consequências da ação acidificante da água que provoca corrosões em superfícies metálicas, dissolução de rochas calcárias, problemas respiratórios e alérgicos para os que vivem sob os efeitos de partículas ainda em suspensão na atmosfera (ZAMBONI et al., 2012).

No Brasil, o fenômeno da chuva ácida ocorre sobre as maiores metrópoles do país, porém, com o aumento do parque industrial brasileiro e da frota de veículos (fontes antropogênicas dos óxidos de nitrogênio e de enxofre), o fenômeno ocorre em todas as regiões que recebem ventos de áreas industriais e de grandes metrópoles nacionais. Porém os estudos brasileiros são praticamente pontuais conforme estudos de Souza et al., (2006), e, Santos e Gastmans, (2016). Estes autores detectaram a presença de chuva ácida, respectivamente, nos municípios de Ilha Grande e Rio Claro (SP), relacionando a alteração do pH e da condutividade ao crescente nível industrial e a emissão veicular. Assim, pensando-se nesses centros urbanos com grandes fontes de poluentes atmosféricos, que podem ser transportados para regiões distantes, seguido de remoção por precipitação atmosférica, não existem dados envolvendo os possíveis efeitos na Região Metropolitana do Recife.

O presente trabalho visou contribuir com os órgãos ambientais através das análises sobre a chuva ácida, com seus possíveis impactos, tendo como estudo de caso, a incidência no bairro da Boa Vista, localizado na cidade do Recife-PE.

## **METODOLOGIA**

### **Região de Estudo**

Para fins deste estudo, o bairro da Boa Vista, localizado na cidade do Recife, foi escolhido por sugerir características básicas de locais que podem ser responsáveis por uma chuva ácida, como o alto fluxo de veículos. A Boa Vista, onde moram cerca de 15 mil pessoas e transitam mais de 400 mil veículos, pode ser chamada de trajeto inevitável para quem circula pelo Recife.

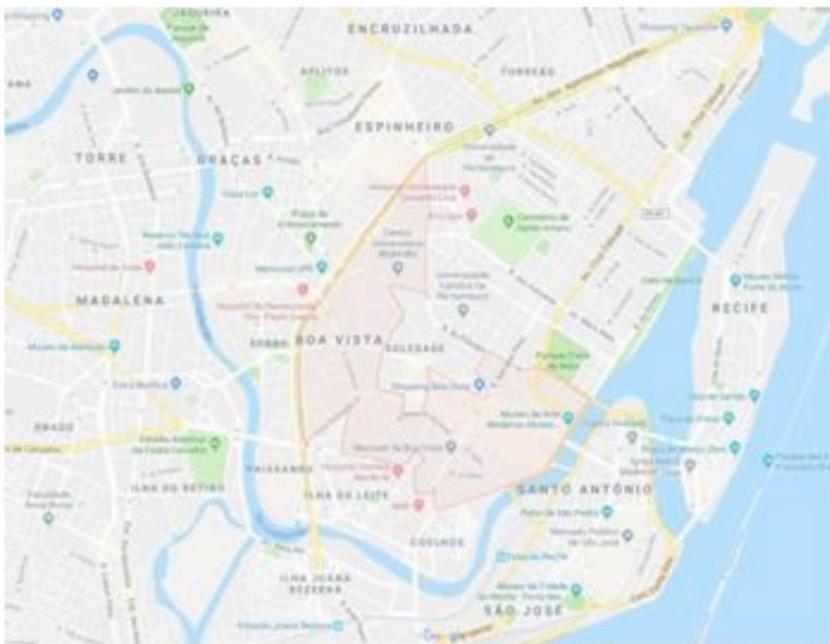


Figura 1- Localização do bairro da Boa vista, Recife-PE

Fonte: Googlemaps (2022).

## Materiais e Métodos

### *a) Escolha dos Pontos de Coleta*

Utilizou-se um método de observação da área do bairro da Boa Vista a fim de escolher o melhor posicionamento para os pontos de coleta da água da chuva. Essa observação consistiu numa análise envolvendo a massa de veículos, pessoas que circulam a área e o tipo de edificação, que possam ser afetadas pelos efeitos dos fenômenos a serem estudados.

### *b) Amostragem da Água da Chuva*

Foram usados para coletar a água da chuva, recipientes esterilizados antes de cada coleta. Os recipientes foram colocados em pontos estratégicos da Universidade Católica de Pernambuco, sendo a superfície do local totalmente aberta, não tendo qualquer tipo de vegetação como árvores, ou próximo de telhados com calhas para que a qualidade da água coletada não fosse influenciada com a introdução de particulados como folhas e pedras de pequeno porte. A coleta foi realizada somente no início da precipitação, não ficando exposta à deposição seca.

### c) Análise Físico-Química da Água

As análises realizadas foram caracterizadas de acordo com a Associação Americana de Saúde Pública - APHA, AWWA, WEF, 2012. Metodologia padrão para exame de água e águas residuais. Foram analisados os seguintes parâmetros para analisar as coletas das águas da chuva: pH, dureza total, sulfato, condutividade elétrica, turbidez, sódio, potássio, cálcio, magnésio e cloreto. Realizaram-se 53 coletas da água da chuva e análises físico-químicas em diferentes dias dos meses de setembro 2017 a maio 2018, análises feitas em triplicata totalizando 1590 determinações, no bairro da Boa Vista, baseado no Standard Methods, metodologia altamente assegurada pela IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como se pode constatar na análise da Figura 2, para o intervalo de Setembro de 2017 a Junho de 2018, os resultados apontaram que o pH das amostras coletadas se encontra, em média, acima de 7, contudo essa média dos fatores de neutralidade não está diretamente associado a ocorrência da acidez nas chuvas, uma vez que das amostras analisadas, 30,18% delas resultaram no pH levemente ácido, abaixo de 7.

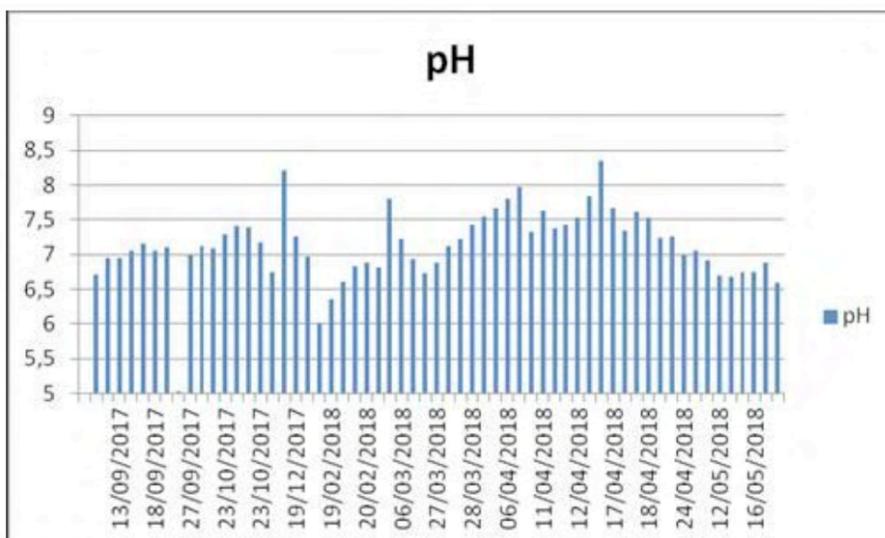


Figura 2 - Histograma dos valores de pH para as amostras de águas de chuva coletadas na região da Boa Vista, Recife-PE, entre setembro/2017 a junho/2018.

Para o intervalo do dia 18/09-27/09, o pH atingiu valores próximos a 5 (ácido), denotando interferência de poluentes na sua característica original. Pode-se sugerir que a velocidade com a qual os ventos percorrem a região ora analisada pode estar com alto

percentual de gases emitidos por veículos automotores resultando na acidez da chuva. A água da chuva nesse período está levemente ácida, mesmo contendo cerca 62,71% das amostras alcalinas. Sugere-se que essa acidez encontrada nas amostras coletas de chuvas no bairro da Boa Vista pode vir a trazer um efeito negativo para as edificações e ao ambiente.

De acordo com a Tabela 1, verificou-se que a condutividade elétrica da água de chuva está um pouco elevada, isso pode ser justificado pelos compostos iônicos e catódicos dissolvidos que interferiram na alta concentração elétrica das amostras, de tal forma que, as partículas advindas do litoral apresentam concentrações de cloretos e sódio, também o cálcio e magnésio foram facilmente notados na água da chuva. A alta presença de magnésio (em até 26,05 mg/L e média de 3,09 mg/L) pode ser um indicativo de processos antropogênicos. Notou-se que a água da chuva nesse período não possuiu as características de uma água destilada, apresentando a média das condutividades analisadas de 67,02  $\mu\text{S}$  e alcançando um patamar máximo de até 281,20  $\mu\text{S}$ , concentrações bem acima das obtidas por Santos e Gastmans, (2016) nas águas de chuva de Rio Claro/SP.

	Cond.EI ( $\mu\text{S}$ )	DT (mg/L)	Cálcio (mg/L)	Magnésio (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Turbidez (UT)
<b>Mínimo</b>	7,10	2,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Médio</b>	67,02	22,05	11,29	3,09	13,08	0,18	3,05	0,19	1,27
<b>Máximo</b>	281,20	86,00	146,30	26,05	185,00	4,25	27,06	3,05	35,00

Tabela 1 - Resultados das análises da água da chuva no intervalo de Setembro 2017 à Junho de 2018.

Fonte: Autores 2018.

Observou-se que as concentrações dos poluentes primários da chuva ácida os quais foram analisados, sendo a formação do enxofre (nesse caso em forma de sulfato) com concentrações máxima de 4,25 mg/L de  $\text{SO}_4^{-2}$ , indicando a possível contaminação atmosférica e causando mudanças nas características físico e químicas das chuvas. Portanto, a presença de quantidades relativamente mais altas de íons sulfato em águas de chuva nos centros urbanos é indicativo da influência das emissões veiculares que podem ser justificados pelo aumento da frota veicular que é o principal causador de problemas de poluição atmosférica em grandes centros urbanos, pois tantos veículos a gasolina quanto a álcool são emissores de  $\text{SO}_2$ , importante precursor dos constituintes da chuva ácida.

A Turbidez encontrou-se em sua normalidade na maioria das amostras, porém aquelas que apresentaram uma margem acima de zero pode ser justificada pela aproximação dos materiais particulados característicos de regiões com grande fluxo de veículos.

Foram também constatados na Figura 3, concentrações de cálcio, sódio e potássio nas águas precipitadas com concentrações média de 11,29 mg/L de  $\text{Ca}^{+2}$ , 3,05 mg/L de  $\text{Na}^+$  e 0,19 mg/L de  $\text{K}^+$ , respectivamente. Santos e Gastmans (2016) obtiveram valores menores de  $\text{SO}_4^{-2}$  ( $0,80 \pm 0,38 \text{ mg L}^{-1}$ ),  $\text{Ca}^{+2}$  ( $0,68 \pm 0,43 \text{ mg L}^{-1}$ ),  $\text{Na}^+$  ( $0,13 \pm 0,13 \text{ mg L}^{-1}$ ),  $\text{K}^+$  ( $0,42 \pm 0,67 \text{ mg L}^{-1}$ ) na água da chuva. OLIVEIRA (2015) e DOURADO (2016) também mostraram em seus trabalhos sobre o material particulado na região do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes, a importante participação desses cátions na concentração do  $\text{MP}_{10}$ , sendo associados a emissões naturais e a atividade de cerâmica.

Na Figura 3 é apresentado um histograma que descreve os valores mínimo, médio e máximo dos resultados encontrados nas caracterizações de alguns metais presentes nas águas das chuvas no período de Setembro 2017 a Junho 2018.

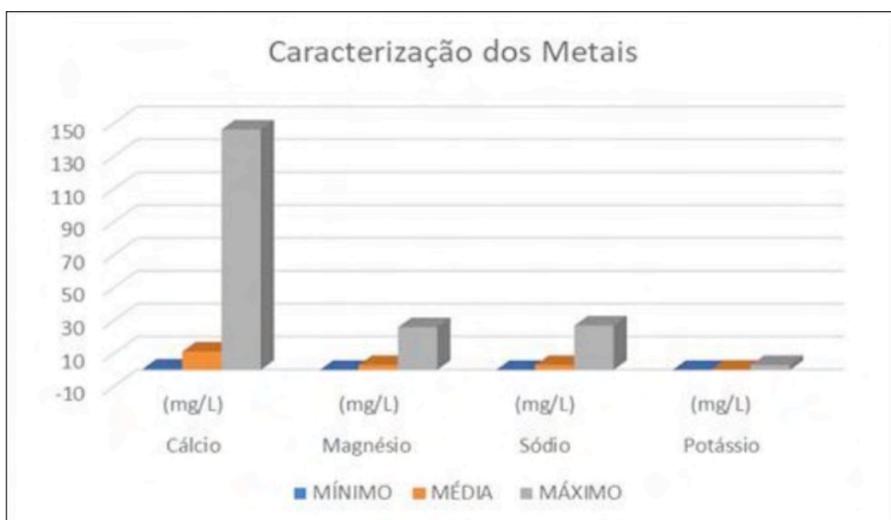


Figura 3 - Histograma dos valores mínimo, máximo e média das amostras de águas de chuva coletadas na região da Boa vista, Recife-PE, entre setembro/2017 à Junho/2018.

Observou-se também que dentre os metais analisados há uma maior predominância do íon cálcio em virtude da presença da construção civil onde se realizou o estudo, indicando que pode haver particulados do calcário que ao entrarem em contato com a água da chuva são solubilizados. Pode-se concluir que quando essas chuvas são consideradas ácidas degradam os materiais que são compostos de carbonato de cálcio dissolvendo-os, embora existam diferentes tipos de pedras utilizadas na construção dos edifícios e esculturas, as que são consideradas mais vulneráveis aos ataques a acidez das chuvas são compostas de calcário.

## CONCLUSÕES

- Os resultados iniciais apontam que o pH resultante das coletas encontradas nas amostras ficou, em média, acima de 7, porém essa média dos fatores de neutralidade não está diretamente associado com ocorrência da acidez nas chuvas, uma vez que das amostras analisadas, 30,18% delas, resultaram no pH levemente ácido;
- O cálcio e magnésio facilmente notados na água de chuva podem estar relacionados provenientes de processos naturais e antropogênicos. Quanto aos processos naturais, a cidade do Recife, por exemplo, por estar próximo ao mar pode ser a fonte de magnésio e cloretos, alterando a condutividade. Já as edificações podem ser responsáveis pela fonte de cálcio na água da chuva;
- Notou-se uma alteração significativa na água da chuva ideal e a observada na prática, essa diferença possivelmente está relacionada a construção civil e alto fluxo de veículos presentes na cidade de Recife mais especificamente no bairro da Boa Vista;
- Observaram-se concentrações dos poluentes primários da chuva ácida na forma de sulfato, indicando futura possibilidade real de chuvas ácidas. Outras análises, como Amônia e Chumbo deverão ser realizadas para análises mais aprofundadas.

## REFERÊNCIAS

1. APHA AWWA WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22ª ed. Washington: Associação Americana de Saúde Pública, APHA. 2012. 1360 pp.
2. DOURADO, T. A. 2016. **Avaliação do Teor de Metais em Material Particulado MP2,5 e MP10 nas cidades de Goiânia – GO e Rio Claro – SP empregando a Técnica de Fluorescência de Raios X Dispersiva em Energia (EDXRF)**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 108 p.
3. LETRIA, J. J.; ALBUQUERQUE, T.; **O alfabeto da Natureza**, Oficina dos Livros e Sociedade Editorial, Ltda. 1ª edição, julho de 2011.
4. NERY, J.T; CARFAN, A. C., **Glossário de Termos Técnicos em Meteorologia e Climatologia**. Jundiaí, Paco Editorial. 416p, 2013.
5. OLIVEIRA, M. 2015. **Caracterização Mineralógica e Química das Fontes de Poeira e sua Influência na Atmosfera da Região do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes (SP)**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 144 p.
6. SANTOS, V & GASTMANS, D. Composição Química da Água de Chuva em Rio Claro (SP). **Revista do Instituto Geológico**, v. 37, p. 45-60, 2016.

7. SOUZA, G.; SILVA, R. A.; OLIVEIRA JUNIOR, J. M.; MENDONÇA, N. M. **Chuva Ácida: Estudo de Caso Na Região Metropolitana de Belém/PA**. V Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia, Vol 4. 2016.

8. SOUZA, P. A.; MELLO, W. Z.; MALDONADO, J.; EVANGELISTA, H. Composição química da chuva e aporte atmosférico na Ilha Grande, RJ. **Química Nova**, v. 29, n. 3, p. 471-476, 2006.

9. ZAMBONI, G.; CAMARGO COSTA, F.; ZAMPIN, I. C. Consciência ambiental: Conceitos e aplicação inter-áreas de química e geografia com textos sobre chuva ácida. **Revistas UNISEPE**, v. 5, p. 1-12, 2012.

# CAPÍTULO 2

## ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM UMA RODOVIA PERNAMBUCANA

Data de aceite: 01/08/2022

**Eduardo Antonio Maia Lins**

\*Universidade Católica de Pernambuco –  
UNICAP / Instituto Federal de Pernambuco –  
IFPE – Campus Recife

**Adriana da Silva Baltar Maia Lins**

**Daniele de Castro Pessoa de Melo**

**Diogo Henrique Fernandes da Paz**

**Sérgio Carvalho de Paiva**

**Adriane Mendes Vieira Mota**

**Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha**

**Luiz Oliveira da Costa Filho**

**Fábio José de Araújo Pedrosa**

**Fábio Correia de Oliveira**

**Rosana Gondim de Oliveira**

**Fabio Machado Cavalcanti**

**Maria Clara Pestana Calsa**

**Fernando Arthur Nogueira Silva**

**RESUMO:** As construções de rodovias influenciam diretamente no desenvolvimento social quanto econômico de uma população em seu entorno, entretanto acabam causando inúmeros impactos à natureza. A presente pesquisa relata uma análise feita sobre os impactos ambientais

causados nas fases de construção e operação da Rodovia PE-063, no estado de Pernambuco, onde foram identificados impactos de todas as características e magnitudes. O método utilizado foi a Matriz de Leopold, que por sua vez é composta por uma lista de ações de projeto passíveis de acarretar modificações no ambiente e outra lista que contém os elementos naturais e humanos que podem ser afetados por ações do projeto. Os resultados analisados através da Matriz de Leopold e dos gráficos demonstraram que a rodovia tanto na fase de construção como na etapa de operação sofreu alterações em quase todos os compartimentos ambientais: físico (erosão, assoreamento, contaminação do solo, alteração na qualidade das águas subterrâneas e superficiais, modificação da superfície geomorfológica), biótico (afugentamento da fauna, supressão da vegetação) e socioeconômico (aumento da circulação de veículos, atração de comércios). Portanto torna-se necessária a adoção de medidas mitigadoras e/ou compensatórias para a área estudada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Danos, Benefícios, Estrada, Matriz, Variáveis.

**ABSTRACT:** The construction of highways directly influence the social and economic development of a population in its surroundings, however they end up causing innumerable impacts to nature. The present study reports an analysis of the environmental impacts caused in the construction and operation phases of Highway PE-063, in the state of Pernambuco, where impacts of all characteristics and magnitudes

were identified. The method used was the Leopold Matrix, which in turn consists of a list of project actions likely to lead to modifications in the environment and another list that contains the natural and human elements that can be affected by project actions. The results analyzed through the Leopold Matrix and the graphs showed that the road, both in the construction phase and in the operation stage, changed in almost all environmental compartments: physical (erosion, silting, soil contamination, alteration in groundwater quality and superficial changes of geomorphological surface), biotic (removal of fauna, suppression of vegetation) and socioeconomic (increased circulation of vehicles, attraction of trade). Therefore, it is necessary to adopt mitigating and / or compensatory measures for the area studied..

**KEYWORDS:** Damage, Benefits, Road, Matrix, Variables.

## INTRODUÇÃO

A construção de rodovias, embora produzam benefícios socioeconômicos, também podem apresentar inúmeros impactos sobre o meio ambiente, como desmatamentos, perda da diversidade biológica, alteração do sistema natural de drenagem e a degradação do solo. Sob esta ótica, o processo de construção rodoviária deve, portanto, compatibilizar-se com a conservação ambiental a partir do uso de técnicas e métodos de atividades construtivas, que evitem ou minimizem a degradação ambiental (SILVA, FELIZMINO & OLIVEIRA, 2015).

Os progressos no tratamento ambiental de rodovias também estão relacionados à incorporação da variável ambiental na rotina de trabalho dos órgãos rodoviários, à maior fiscalização dos órgãos ambientais competentes, à difusão de manuais técnicos contendo instruções ambientais para projetos e obras rodoviárias (NEVES & HENKES, 2013). Nesse contexto, as resoluções nº 001/86 e nº237/97 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, englobam também as rodovias no seu processo de licenciamento ambiental, quanto ao Estudo de Impacto Ambiental –EIA em conjunto com o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA e o necessário acompanhamento e monitoramento dos procedimentos adotados quando da identificação de impactos ambientais. Segundo o artigo 225 da Constituição Federal, promulgada em 1988, “Todos tem direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.

A rodovia em estudo é a PE 063 Trecho: Entr.BR 101 (Escada) / Entr.PE 058 (Acesso à Primavera) / Entr. PE 071 Amaraji do acesso à Primavera, com extensão de 23,74 km. Com a aplicação da Matriz de Leopold, buscou-se analisar acerca dos impactos ambientais causados na fase de construção e operação da rodovia. Os impactos ambientais cadastrados ao longo do segmento da rodovia compreendem o seu passivo ambiental, que foi gerado a partir da implantação da rodovia e de atividades antrópicas danosas ao corpo estradal, a faixa de domínio e a região lindeira.

## OBJETIVOS

Este trabalho buscou apresentar uma análise de impactos ambientais durante a fase de construção e operação da Rodovia PE 063 utilizando a Matriz de Leopold e suas variáveis, além de propor ações mitigadoras ou compensatórias que podem ser executadas para reduzir os impactos ambientais nas rodovias.

## METODOLOGIA

### • Localização

A área de estudo é a Rodovia PE 063 que liga o Município de Escada ao Município de Amaraji passando por Primavera, sob jurisdição do 4º Distrito Rodoviário, este localizado na zona da mata sul do estado de Pernambuco, vinculado ao Departamento de Estradas de Rodagem (DER), conforme observado na Figura 1.

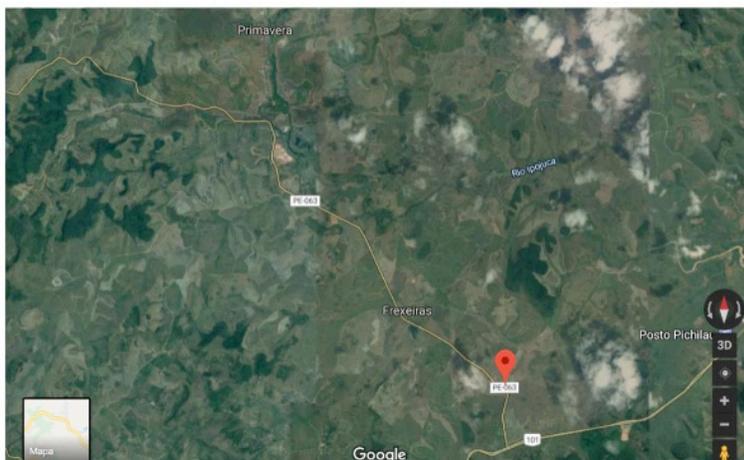


Figura 1. Mapa da Rodovia PE 063.

Fonte: Fonte: Googlemaps, 2019.

### • Caracterização do Órgão

O DER – PE foi fundado em 1º de novembro de 1946 através do Decreto – Lei nº 1463/46 a partir de um desmembramento da Secretaria de Viação e Obras Públicas do Estado de Pernambuco, tendo a seu encargo a responsabilidade de restaurar a administração rodoviária do Estado habilitando-o a receber cotas do Fundo Rodoviário Nacional (DER-PE, 2015). Ainda segundo dados do próprio órgão, “a missão do DER-PE é desenvolver meios para a construção e Gerenciamento do Sistema de Transporte Rodoviário, proporcionando conforto, segurança e fortalecimento da economia em benefício

da população do Estado de Pernambuco”.

- **Coleta e análise dos dados**

A pesquisa fora baseada na revisão de bibliografia e aplicação da Matriz de Leopold tratando de impactos ambientais, na fase de operação e construção da rodovia.

A Matriz é composta por uma lista de ações de projeto passíveis de acarretar modificações no ambiente, como: modificações de regime, transformação do espaço e construção e alterações no tráfego e outra lista que contém os elementos naturais e humanos que podem ser afetados por ações do projeto, como: características físicas e químicas, condições humanas, fatores culturais e relações ecológicas. As quadriculas são preenchidas com algarismos que variam de 0 a 10, correspondendo, respectivamente, a magnitude e a importância do impacto. Ao número 0 corresponde a condição de nenhuma magnitude. Ao número 10 corresponde os valores máximos desses atributos. O sinal (+) ou (-) na frente dos números indica se o impacto é, respectivamente, benéfico ou adverso. Ao final, as quadriculas referentes a cada situação são somadas e, a situação que apresentar um maior valor modular, positivo (ou menor valor modular, negativo) é a ambientalmente mais favorável (ou menos desfavorável).

De acordo com Oliveira, Araújo e Wenson (2007), a matriz de Leopold apresenta vantagens no que diz respeito: necessidade de poucos dados para elaboração; abrangência dos fatores ambientais físicos, biológicos e socioeconômicos; comunicação dos resultados de forma compreensível; constitui guia inicial para prosseguimento de projetos e estudos futuros e trata dados qualitativos e quantitativos. Porém, tem como desvantagens a variável tempo, uma vez que esta não é considerada, uma vez que não prevê impactos imediatos, temporários nem definitivos. O autor ainda afirma que a matriz compartimentariza o ambiente em meios separados, não atribuindo assim valores.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

- **Análise dos Fatores Físicos e Químicos**

A partir da análise dos dados obtidos a partir da matriz de Leopold, é possível observar na Figura 2 que os impactos ambientais negativos são mais significativos que os impactos positivos em ambas as fases: construção e operação, no que tange as características físicas e químicas analisadas. De forma mais específica, na fase de construção ganha-se destaque os danos causados na etapa de terraplanagem, instalação do canteiro de obras, alteração da drenagem, alteração da cobertura do solo, pavimentação, escavações da superfície movimentação de máquinas pesadas. Os cortes, aterros, bota-foras e áreas de empréstimo causam diversos efeitos adversos como a emissão de material particulado, ruído e vibrações, que trazem prejuízos temporários para a população local. Além destes, temos o risco de erosão do solo, degradação do solo e alteração do perfil das encostas,

causados pelos cortes e aterros. Tais efeitos são permanentes e de longo prazo, afetando diretamente a área.

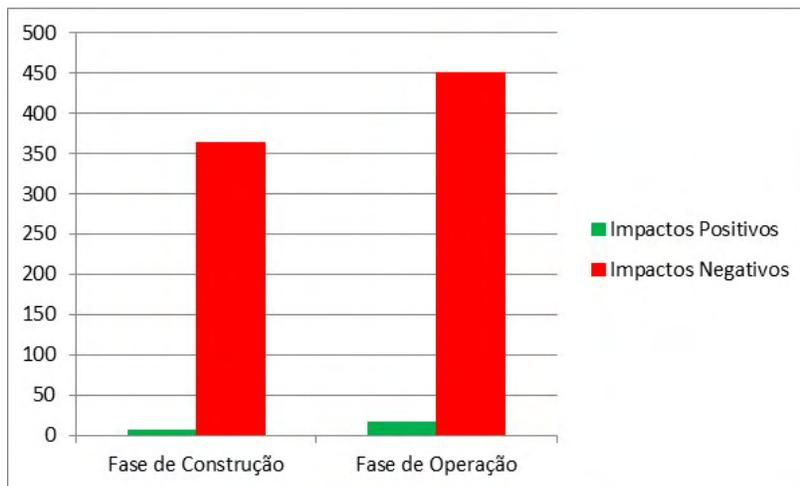


Figura 2. Análise das Características Físicas e Químicas.

Fonte: Os Autores (2019).

Pode ocorrer, na terraplanagem, uma redução da disponibilidade hídrica da região causando problemas para a população local permanentemente. Porém, podem-se atenuar tais efeitos protegendo nascentes e cursos d'água. A modificação da forma de ocupação do solo e a degradação do patrimônio natural e cultural são impactos certos nas obras de terraplanagem e podem ser atenuadas por simples ações como limitar a terraplanagem às áreas de intervenção, reabilitar áreas degradadas, entre outras (SENÇO, 2008).

É importante que as máquinas e equipamentos utilizados nos serviços de terraplanagem sejam revisados periodicamente, no intuito de evitar vazamentos de combustíveis, óleos e graxas, decorrentes de sua operação.

A instalação dos canteiros de obras e alojamentos é prejudicial ao meio ambiente, já que ocorre a disposição de efluentes no solo, podendo infiltrar e contaminar as águas subterrâneas e superficiais. Para sua construção têm-se uma remoção da cobertura vegetal sem contar com possíveis conflitos de uso e ocupação do solo com a população local. Para minimizar os efeitos adversos causados pelas obras de apoio: canteiros de obra e alojamentos, os mesmos devem ser implantados em locais adequados, com terrenos favoráveis, com um controle da emissão de efluentes líquidos através de fossas sépticas e sumidouros, além da drenagem das águas superficiais e no final das obras deve ocorrer à reabilitação das áreas degradadas.

Como visto, seus efeitos são adversos e podem ser tanto diretos quanto indiretos, já que a poluição causada pelos dejetos, por exemplo, pode afetar a população com doenças

diretas, causadas pelo acúmulo de lixo, como por doenças de transmissão hídrica. Para evitar tais malefícios, deve-se manter a limpeza e manutenção dos canteiros frequente. Seus efeitos são de ordem local, temporária, imediata e reversível (SENÇO, 2008).

No caso das obras de drenagem estas devem ser bem dimensionadas para evitar a degradação excessiva do solo e os riscos de erosão, além das alterações no “run-off”. Um mau dimensionamento pode trazer prejuízos inestimáveis para a população local, já que são obras normalmente permanentes e irreversíveis (SENÇO, 2008).

Os danos causados à água tanto superficial quanto de recarga, tendem a ocorrer em função principalmente da pavimentação da superfície, aterros executados, circulação de veículos e a operação de equipamentos movidos à combustão. A retirada da cobertura vegetal e as mudanças no aporte de água subterrânea implicarão em diminuição do fluxo das drenagens naturais. Com o solo exposto, tem-se uma maior área de exposição, reduzindo a infiltração da água e o fluxo preferencial das águas das chuvas. A nova conformação do relevo e configuração geotécnica do solo implicará primeiramente em redução da área de infiltração no solo e secundariamente em um novo padrão de escoamento das drenagens locais.

A remoção da cobertura vegetal da região afeta a população local permanentemente, alterando o microclima da região, degradando o solo e alterando os habitats, tanto dos animais como da população, além de modificar a paisagem. Tal degradação pode causar efeitos imediatos como também pode causar efeitos de longos prazos, afetando as gerações futuras (SENÇO, 2008).

Assim o maior problema que pode ser ocasionado é a chamada impermeabilização do solo que interfere no ciclo de água das chuvas, uma vez que uma das etapas do mesmo consiste no escoamento superficial da água para os oceanos, de onde se reinicia o ciclo. Isto também afeta diretamente a recarga natural dos aquíferos. A impermeabilização é uma das principais causas das inundações e deslizamentos em áreas urbanas (TUCCI, 2012), pois diminui as áreas verdes, reduz a capacidade de infiltração de água no solo e aumenta a capacidade de escoamento, devido a adoção de condutos e superfícies que facilitam a rápida movimentação da água. A remoção de camadas de solo diminui a capacidade efetiva do mesmo absorver água, de forma que rapidamente pode ocorrer a saturação pela água da chuva. Quando isto ocorre à camada de solo passa a se comportar como meio líquido, escoando encosta abaixo (BRAGA e CARVALHO, 2003).

Na pavimentação, a preparação da base e a pavimentação impactam o meio negativamente, alterando o microclima da região, criando alterações no escoamento superficial das águas (run-off) e gerando desconforto à população circunvizinha por conta dos ruídos e vibrações criados. Ressalta-se que alguns de seus efeitos são temporários, já que ao término da obra tende a cessar o desconforto gerado pelos ruídos e vibrações, porém o desconforto gerado pelas alterações climáticas pode ser permanente a não ser que ocorra uma revegetação adequada na faixa de domínio e um dimensionamento adequado

do sistema de drenagem (SENÇO, 2008).

Já na fase de operação as perdas mais consideráveis são vistas no solo em razão de várias ações do projeto como, por exemplo, a alteração da cobertura do solo e a utilização de áreas de empréstimo/ jazidas que pode causar a o declínio da capacidade produtiva do solo, erosões e em casos mais extremos a desertificação.

Em se tratando dos impactos positivos encontrados pode-se citar na fase de construção a execução de aterros que podem minimizar processos erosivos existentes no traçado da via. E na fase operacional os dados positivos são provenientes do processo de movimentação de ar em função dos automóveis e veículos de carga.

#### • **Análise dos Fatores Biológicos**

Nas fases de construção e operacional da PE-063, em relação às condições biológicas estudadas não foram detectados impactos ambientais positivos, conforme observado na Figura 3. Em relação aos prejuízos ambientais na fase de construção e operação destacam-se aqueles referentes aos animais silvestres, incluindo os répteis, sendo fator determinante para tal a instalação do canteiro e a modificação do habitat. Uma mitigação pode ser sugerida durante o funcionamento da via: a inclusão de barreiras como cercas, evitando o atropelamento de animais.

A cobertura vegetal na área de implantação será afetada diretamente pela ação de limpeza do terreno. A supressão vegetal resultará em prejuízo para a biodiversidade local, desencadeando outros impactos, principalmente sobre a fauna. A cobertura vegetal desta área em estudo, cuja exuberância e diversidade biológica são notáveis, tem sido, desde os tempos coloniais, destruída principalmente pelo cultivo da cana de açúcar.

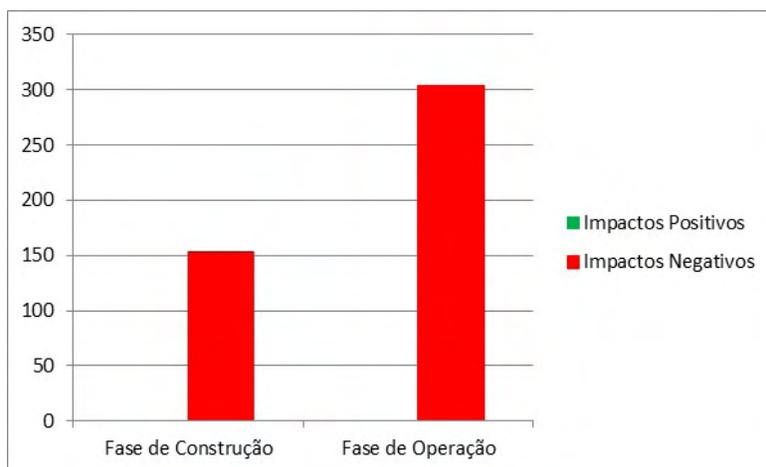


Figura 3. Análise dos Fatores Biológicos.

Fonte: Os Autores (2019).

Toda a faixa desmatada se constituirá em uma barreira efetiva entre ambientes, dificultando o fluxo de espécies terrestres arborícolas. A retirada da vegetação resultará em alteração da paisagem da área de influência direta e junto com a diminuição do potencial ecológico, ocorrerá a fuga da fauna, para áreas mais seguras. Esses efeitos desencadearão alteração do ecossistema e instabilidade ecológica. A ação de desmatamento resultará em alteração da paisagem pela perda do potencial biótico, já que as áreas desnudadas perderão a beleza natural, prejudicando os valores paisagísticos. Os efeitos da supressão da vegetação nos trechos de implantação se somarão as outras áreas que já sofreram ou que sofrerão desmatamento na região, causando um impacto cumulativo e sinérgico, que afetarão a paisagem, a biodiversidade e a fauna local. A atividade de supressão vegetal levará a perda pontual de habitats, assim como ninhos e tocas poderão ser afetadas. As comunidades de pequenos mamíferos não voadores agrupam as espécies mais sensíveis às perturbações ambientais. Espécies da avifauna serão menos impactadas, considerando-se a capacidade de deslocamento. De acordo com Rezende e Coelho (2015), a supressão de vegetação nativa encontra-se diretamente associada às etapas de topografia e cadastro, abertura das vias e da faixa de domínio, implantação de canteiros e alojamentos.

A abertura da vegetação expõe bastante à fauna que poderá sofrer com a perseguição e caça por parte da população ou dos próprios trabalhadores no processo de desmatamento, sendo importante a instrução dos operários para que isto não ocorra. Junto a esta adversidade, com o escape da fauna, poderá ocorrer o aumento do risco de acidentes com animais peçonhentos junto à população periférica e aos trabalhadores. Os principais impactos prognosticados sobre a fauna (afugentamento, migração para áreas contíguas, aumento dos riscos de atropelamentos, desequilíbrio temporário das populações, aumento da competição intra e interespecífica) serão cumulativos. Caso as obras ocorram no período de chuvas, os impactos sobre a fauna, principalmente sobre anfíbios e aves, serão também de maior magnitude. No caso dos anfíbios, observa-se maior atividade reprodutiva na estação chuvosa, época em que há um maior número de animais e locais propícios à sua reprodução dos anuros (sapos, rãs, etc.).

#### • **Análise dos Fatores Culturais**

No que se refere aos fatores culturais nota-se a presença de impactos positivos mais acentuados que os impactos ambientais negativos nas duas fases avaliadas, conforme Figura 4. Na construção têm relevância à geração de empregos ligada de forma mais direta à instalação de canteiro e a própria execução de serviços de execução da rodovia PE-063. Embora seja importante mencionar que este empreendimento também causa nesta fase ruídos e vibrações que afetam a saúde e a segurança da população.

Já tratando da fase de operação, a densidade populacional é afetada de forma mais efetiva, pois há uma melhora nas vias de acesso facilitando os deslocamentos, favorecendo o processo de urbanização da região, além de ter impactos positivos na esfera

econômica da região.

A Rodovia em estudo apresenta singularidade com relação a este parâmetro. Isso se deve ao fato da existência da Usina União Indústria, produtora de açúcar e álcool, a qual realiza o escoamento de sua produção através da PE 063, como via de acesso a BR 101 e daí para o Porto do Recife. De maneira oposta na etapa operacional da via a modificação da paisagem para a inserção da rodovia pode ser considerado o passivo ambiental mais significativo, uma vez que é resultado de alterações da cobertura do solo, da própria instalação do canteiro de obras, do aumento na incidência de incêndios e atropelamento de animais silvestres.

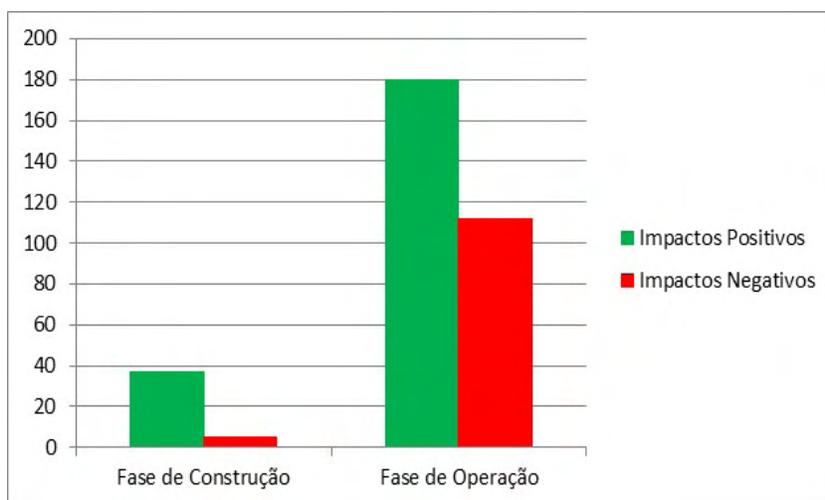


Figura 4. Análise dos Fatores Culturais.

Fonte: Os Autores (2019).

#### • Condições das Relações Ecológicas

De maneira análoga ao obtido na avaliação das condições biológicas, não foram encontrados impactos ambientais positivos que contemplem as relações ecológicas nas fases de construção e operação da PE-063, conforme Figura 5. Tratando da fase de construção, ao interpretar as informações disponíveis foi constatado que os impactos negativos foram vistos tanto no que se refere à cadeia alimentar - em consequência da modificação do habitat do entorno da rodovia - quanto danos relativos à usurpação de matas. Já na fase de operação também foram afetadas negativamente a cadeia alimentar e na usurpação das matas, em virtude no primeiro caso da modificação do habitat, assoreamento de rios e do atropelamento de animais silvestres. Segundo Fellenberg (1980), a preservação ambiental das margens dos rios deverá nos preocupar bastante no futuro, pois em todas as regiões em que as reservas de água subterrâneas se esgotarem

a solução para garantir o abastecimento de água potável será o aproveitamento da água de represa, lagos e rios.

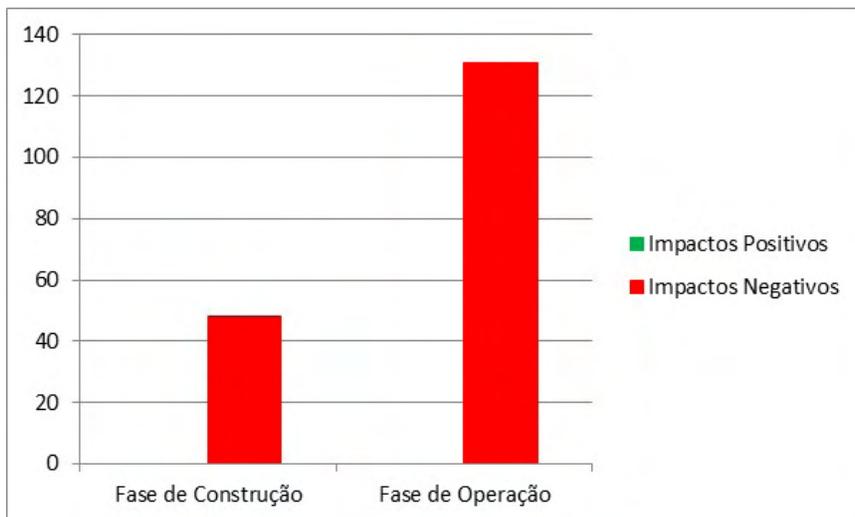


Figura 5. Análise das Relações Ecológicas.

Fonte: Os Autores (2019).

Já no segundo caso as ações do projeto mais danosas foram a utilização de áreas de empréstimos/jazidas e a ocorrência de incêndios. As queimadas provocam forte alteração no meio físico com o aumento da concentração de gases, interferindo na qualidade do ar. No meio biótico acarreta a redução da fauna e da flora e conseqüentemente da base genética. No trecho analisado é notável a presença de queimadas por se tratar de uma região em que o cultivo da cana de açúcar é predominante. A cana de açúcar participa de forma relevante na economia da região, onde 45% da mata estão comprometidas com o seu cultivo.

#### • **Medidas Mitigadoras**

As medidas mitigadoras oferecem o contraponto às ações impactantes realizadas ou desencadeadas ao meio ambiente pelas atividades ligadas a construção e operação da rodovia. No caso do empreendimento em estudo, os impactos mais significantes identificados e analisados atingem ao solo, água, ar, fauna e flora. Portanto, no sentido de proteção ambiental, devem ser adotadas medidas que diminuam estes impactos ao mínimo possível, ou que isolem como forma de controle, restringindo-os à área do empreendimento e preservando o entorno. Seguem algumas orientações quanto as medidas mitigadoras a serem realizadas:

- Ar:

- Molhar as áreas expostas do solo ou em terraplenagem para diminuir a emissão de poeiras fugitivas;
  - Os veículos e equipamentos utilizados nas atividades devem receber manutenção preventiva para evitar emissões abusivas de gases e ruídos na área trabalhada;
  - Minimizar os níveis de ruídos a serem gerados durante a operação.
- Ruído:
    - As ações de controle serão compostas pela implementação de medidas para redução dos níveis de ruídos, como controle das emissões tal qual propostas do Programa de Monitoramento dos Ruídos;
    - Construção de barreiras físicas entre a fonte dos ruídos e as áreas a serem protegidas.
- Solo:
    - Realizar a supressão vegetal somente quando estiver próximo do início das obras de terraplenagem, evitando que o terreno fique exposto aos agentes intempéricos por longo período;
    - No caso da identificação de processos erosivos não passíveis de controle, realizar a contenção e estabilização da erosão e investir em rede de drenagem;
    - Fazer o controle técnico e proteção do solo estocado.
- Flora:
    - A limpeza da área deverá ser restrita às áreas previstas e estritamente necessárias, de forma a impedir o aumento das áreas desmatadas;
    - Deverá ser executada delimitação física das áreas constantes nas autorizações para desmatamento, evitando assim supressão desnecessária de vegetação e/ou soterramento de outras áreas e comprometimento de corpos de água. Esta delimitação poderá ser feita por meio de estaqueamento, fitas de sinalização ou similares;
    - As atividades de supressão vegetal e limpeza de terreno deverão se concentrar nos períodos mais secos. Tal procedimento tem como orientação a proteção de linhas de drenagens naturais e de áreas suscetíveis a processos erosivos e ainda a proteção da fauna;
    - Deverão ser implantados dispositivos provisórios de controle de erosão;
    - Em hipótese alguma se deve proceder a queima do material vegetal gerado, por constituir extremo perigo a vegetação circundante;
    - Durante os trabalhos, devem ser adotadas práticas para evitar acidentes que possam comprometer a cobertura vegetal ou a qualidade dos solos das áreas de entorno, como incêndios, derramamento de óleos e disposição de materiais incompatíveis (entulhos de construção);

- É recomendável, sempre que possível, a execução de limpeza da área de forma manual, entretanto, se for realizada de forma mecanizada, deverá ser feita previamente à manutenção e regulagem dos equipamentos, visando evitar emissão abusiva de ruídos e gases, bem como o derramamento de óleos e graxas;
  - A supressão vegetal deverá ser planejada e executada de forma a conduzir a fauna para áreas vizinhas não habitadas;
  - Promover a umectação de vias de acessos às frentes de obras com o intuito de minimizar a emissão de material particulado (poeiras) durante as obras e sua deposição sobre áreas de vegetação;
  - Deve-se proibir os trabalhadores de qualquer atividade relacionada à coleta de espécies botânicas nas áreas próximas aos locais autorizados de supressão vegetal.
- Fauna:
    - Fazer o manejo da fauna durante a realização da supressão vegetal;
    - Proibir os trabalhadores de quaisquer atividades relacionadas à caça furtiva;
    - Para minimizar os impactos de ruídos e trânsito;
    - Devem-se definir as Diretrizes Básicas do Código de Conduta que regulam as atividades dos trabalhadores nas frentes de trabalho;
    - Desenvolver as ações propostas no Programa de Educação Ambiental e divulgar os métodos de identificação de animais peçonhentos e de prevenção de acidentes com ofídios (cobras e serpentes).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos, pôde-se considerar que:

- As estradas servem para interligar regiões dando fácil acesso ao crescimento social e econômico das mesmas, por isso simbolizam o progresso social e econômico da população, criando impactos ambientais positivos. Entretanto, a mesma traz diversos impactos negativos ao meio ambiente, tanto na fase de construção quanto de operação da rodovia;
- Atualmente a área ambiental está em avanço, principalmente porque a cada dia surgem novos profissionais técnicos e uma literatura especializada no assunto, além da legislação ambiental que se encontra em constante desenvolvimento. As leis ambientais brasileiras são de suma importância para o meio ambiente, onde a partir delas que se define o que pode e deve ser feito a fim de impactar o mínimo possível, seja sob o aspecto físico, biótico ou sociocultural;
- A viabilidade ambiental da construção de uma estrada é definida a partir do Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), onde se definem todas as características da rodovia, determinando o

melhor traçado, onde seus impactos mais relevantes sejam de menor intensidade em comparação com os demais traçados. Além disso, tais documentos elucidam quais medidas mitigadoras devem ser utilizadas no empreendimento. Mesmo o melhor traçado pode trazer impactos significativos para o meio ambiente, sendo assim as medidas mitigadoras se tornam essenciais para a manutenção do meio onde o empreendimento está inserido;

- A fase de construção traz diversos impactos significativos sendo de extrema importância e devem ser mitigados a medida do possível a fim de diminuir a influência do homem no meio ambiente natural. Os principais impactos vistos são decorrentes da própria natureza da obra;
- Sugere-se um estudo ambiental detalhado do meio onde se deseja inserir tal empreendimento para ponderar a viabilidade do mesmo quanto aos possíveis impactos gerados pela obra. No caso da PE-063, tem-se diversos impactos relevantes, que devem ser atenuados da melhor maneira possível. Como visto na matriz de Leopold analisada, tais impactos foram estudados, porém, foram previstas medidas mitigadoras para cada impacto negativo possível, seja em sua área de influência direta ou indireta;
- Tanto a promoção do desenvolvimento econômico e social quanto a tutela do meio ambiente visam, ao final, a sadia qualidade de vida do ser humano. O desenvolvimento sócio-econômico-ambiental ecologicamente equilibrado deve ser conciliado e compatibilizado.

## REFERÊNCIAS

1. BANDEIRA, C.; FLORIANO, E. P. **Avaliação de impacto ambiental de rodovias**. Caderno Didático nº. 8, 1ª ed. ANORGS: Associação de Pesquisa, Educação e Proteção Ambiental do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul Santa Rosa: 2004.
2. BRAGA, R.& CARVALHO, P.F. **Recursos Hídricos e Planejamento Urbano e Regional**. São Paulo: Laboratório de Planejamento Ambiental/UNESP, 2003. 131p.
3. BRASIL. **Resolução CONAMA nº. 001 de 1986**. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF.
4. BRASIL. **Resolução CONAMA nº. 237 de 1997**. Dispõe sobre licenciamento ambiental; competência da União, Estados e Municípios; listagem de atividades sujeitas ao licenciamento; Estudos Ambientais, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental. Brasília, DF.
5. DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. **Manual rodoviário de conservação, monitoramento e controle ambientais**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2005.
6. FELLEBERG, G. **Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental**. Editora EPU, Ed. da Universidade de São Paulo, 1980.

7. NEVES, F. E. S.; HENKES, J. A. Gestão Ambiental Aplicada na Implantação de Rodovias no Estado de Santa Catarina, **Revista Gestão Sustentável Ambiental**, Florianópolis, v. 2, n.1, p. 265-349 , abr./set. 2013.
8. OLIVEIRA, F. F. G., ARAÚJO, M., WENDSON D., Bases Teórico-Conceituais de Métodos para Avaliação de Impactos Ambientais em EIA/RIMA. **Revista de Geografia da UFC**, 2007.
9. REZENDE, E. N.; COELHO, H. A. Impactos Ambientais Decorrentes da Construção de Estradas e suas Consequências na Responsabilidade Civil. **RVMD**, Brasília, V. 9, nº 2, p. 155-180, Jul-Dez, 2015.
10. SAMPAIO, R. S.; BRITO, P. C. R. **Impactos ambientais causados pela construção de rodovias**. UCSAL- Universidade Católica do Salvador.
11. SÁNCHEZ, L.E. **Avaliação de Impacto Ambiental: Conceitos e Métodos**. São Paulo: Oficinas de Textos, 2008.
12. SENÇO, W. **Técnicas de projetos rodoviários**. 1ª Edição. São Paulo. Editora PINI Ltda. 2008.
13. SILVA, D. D. E.; FELIZMINO, F. T. A.; OLIVEIRA, M. G. Avaliação da Degradação Ambiental a partir da prática da cultura do feijão no município de Tavares - PB. **Revista Holos**, Ano 31, Vol. 8, 2015.
14. SPADOTTO, C. A. **Classificação de impacto ambiental**. Comitê de Meio Ambiente, Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas: 2002.
15. TUCCI, C. E. M. Hidrologia. Ciência e aplicação. UFRGS Editora. BR. 2012. 943p.

## ANÁLISE AMBIENTAL DOS IMPACTOS NEGATIVOS GERADOS POR CEMITÉRIO – ESTUDO DE CASO

*Data de aceite: 01/08/2022*

**Eduardo Antonio Maia Lins**

Instituto Federal de Pernambuco – IFPE  
/ Universidade Católica de Pernambuco -  
UNICAP

**Adriana da Silva Baltar Maia Lins**

**Daniele de Castro Pessoa de Melo**

**Diogo Henrique Fernandes da Paz**

**Sérgio Carvalho de Paiva**

**Adriane Mendes Vieira Mota**

**Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha**

**Luiz Oliveira da Costa Filho**

**Fábio José de Araújo Pedrosa**

**Fábio Correia de Oliveira**

**Rosana Gondim de Oliveira**

**Andréa Cristina Baltar Barros**

**Fabio Machado Cavalcanti**

**Fernando Artur Nogueira Silva**

**Maria Clara Pestana Calsa**

**RESUMO:** Os cemitérios quando não seguem as normas de implantação e operação, estabelecidas pelo CONAMA, podem ser fontes de potencial impactos ambientais, causando danos à saúde

pública e ao ambiente. No processo de putrefação os cadáveres são gerados efluentes cadavéricos, gasosos e líquidos, que podem causar potenciais impactos no solo, nos corpos hídricos superficiais e subterrâneos e na qualidade do ar. O efluente produzido da decomposição dos corpos é o necrochorume, que possui uma alta carga de patógenos, rico em sais minerais e substâncias orgânicas degradáveis, incluindo a Cadaverina e a Putrescina, duas aminas altamente tóxicas. Os gases gerados são Ácido Sulfídrico ( $H_2S$ ), Mercaptanas, Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), Metano ( $CH_4$ ), Amônia ( $NH_3$ ) e Fosfina, ( $PH_3$ ). Os possíveis impactos ambientais negativos gerados pelo cemitério foram analisados neste trabalho. A investigação foi realizada no cemitério de São Luís, no município de Escada que fica localizado na Zona da Mata Sul do estado de Pernambuco. A metodologia utilizada para levantamento e análise dos dados foram visitas técnicas in loco, aplicação de questionário, registro fotográficos, e a matriz de Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR) que orientou na análise dos impactos e o que pode ser feito para mitigar ou evitar os problemas atuais e futuros. Durante as análises, observou-se que o gerenciamento das necrópoles está em desconformidade com as normas vigentes. Além do impacto que pode ser gerado pelo processo putrefação dos corpos, os resíduos sólidos gerados da exumação não têm destinação adequada e a falta de ossário é um dos grandes problemas. Na atividade cemiterial os riscos de contaminação e poluição irão sempre existir, porém estes riscos podem ser reduzidos, seguindo as normas de implantação e gerenciamento para cemitérios. Considerando

estas áreas de potenciais impactos ambientais, é indispensável à fiscalização e monitoramento constante pelos órgãos responsáveis para prevenção e controle dos impactos provenientes desta atividade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Jazigos, Riscos, Saúde, Meio Ambiente.

**ABSTRACT:** Cemeteries where they do not follow the implementation and operation regulations established by CONAMA can be sources of potential environmental impacts, causing damage to public health and the environment. In the process of putrefaction, the corpses are generated cadaveric, gaseous and liquid effluents, that can cause potential impacts in the ground, in the superficial and subterranean water bodies and in the quality of the air. The effluent produced from the decomposition of the bodies is necrochorume, which has a high pathogen load, rich in minerals and degradable organic substances, including Cadaverine and Putrescina, two highly toxic amines. The gases generated are Sulfuric Acid (H<sub>2</sub>S), Mercaptanas, Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>), Methane (CH<sub>4</sub>), Ammonia (NH<sub>3</sub>) and Phosphine, (PH<sub>3</sub>). The possible negative environmental impacts generated by the cemetery were analyzed in this work. The investigation was carried out in the São Luís cemetery, in the municipality of Escada, located in the Zona Sul Mata in the state of Pernambuco. The methodology used for data collection and analysis was on-site technical visits, questionnaire application, photographic record, and the Pressure-State-Impact-Response (PEIR) matrix that guided the impact analysis and what can be done to mitigate or avoid current and future problems. During the analyzes, it was observed that the management of the necropolis disagrees with the current norms. Besides the impact that can be generated by the putrefaction process of the bodies, the solid residues generated from the exhumation are not destined properly and the lack of ossuary is one of the great problems. In cemetery activity, the risks of contamination and pollution will always exist, but these risks can be reduced, following the rules of implantation and management for cemeteries. Considering these areas of potential environmental impacts, it is indispensable to the monitoring and constant monitoring by the responsible organisms for prevention and control of the impacts coming from this activity.

**KEYWORDS:** Reservoirs, Risks, Health, Environment.

## INTRODUÇÃO

Na construção da maioria dos cemitérios não foi realizado nenhum estudo dos riscos que esta atividade poderia causar a população e o meio ambiente. Considerando que a qualidade de vida e os problemas ambientais estão interligados, qualquer alteração no meio ambiente tem consequências no meio urbano, causando impactos que afetam a qualidade de vida da população. Kemerich et al. (2014) provam que os cemitérios podem ser uma fonte geradora de impactos ambientais, pois apresenta alto potencial de poluição e contaminação, estes riscos podem ser aumentados, se a localização e gerenciamento são inadequados.

No Brasil, os cemitérios são carentes de planejamento e monitoramento ambiental, não há controle na construção de cemitérios e muito menos na fiscalização dos existentes. Estas responsabilidades foram repassadas aos municípios, que não tem interesse político

em investir. Os cemitérios públicos estão mais suscetíveis a estes impactos, pois são implantados e operados de forma negligente (HINO, 2015).

Em relação à implantação e gerenciamento de cemitérios, principalmente os localizados em áreas urbanas, é fundamental o conhecimento dos impactos ambientais causados pelos mesmos. As substâncias tóxicas produzidas pela putrefação dos corpos, necrochorume, gases, metais pesados, podem poluir o ar, o solo e a água, acarretando um grande problema ambiental sanitário e de saúde pública.

Após a morte os cadáveres produzem e liberam grandes quantidades de substâncias oriundas do processo de putrefação como: gás sulfídrico ( $H_2S$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), amônia ( $NH_3$ ), Cadaverina e a Putrescina, responsáveis pelo cheiro de carne podre, além da Fosfina ( $PH_3$ ). A maioria destas substâncias apresenta alto grau de contaminação e poluição ambiental. Quando o corpo humano para suas atividades vitais, ele se transforma em um ecossistema habitado por microrganismo, insetos e outros seres que se alimentam de matéria morta (SANTOS, 2013). Além destas substâncias, o necrochorume produto da putrefação contém quantidades elevadas de diferentes bactérias, como as causadoras de tétano (*Clostridium tetani*), gangrena gasosa (*Clostridium perfringes*), febre tifóide (*Salmonella typhi*), febre parasitóide (*Salmonella paratyphi*), disenteria (*Shigella dysenteriae*) e vírus como os da hepatite. Estão presentes ainda metais pesados, formaldeído e metanol utilizado no embalsamento e poder conter resíduos de tratamentos químicos hospitalares (SANTOS, 2013).

## OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise dos possíveis Impactos Ambientais negativos gerados pelo cemitério público de São Luís, no município de Escada, localizado na Zona da Mata Sul de Pernambuco, através de inspeções in loco e utilizando a matriz de PEIR.

## METODOLOGIA

### • Área de estudo

O município de Escada com uma população estimada de 68.281 habitantes (CENSO IBGE, 2017), está localizado na Mesorregião da Mata e na Microrregião Meridional do Estado de Pernambuco, limitando-se a norte com o Cabo de Santo Agostinho Vitória de Santo Antão, a sul com Sirinhaém e Ribeirão, a leste com Ipojuca e a oeste com Primavera. Ocupa uma área 348,8 km<sup>2</sup>, representado 0,35% do Estado de Pernambuco. A sede do município tem uma altitude aproximada de 109,0 metros, Latitude 8° 21' 33", Longitude 35° 13' 25".



Figura 1: Localização dos Cemitérios no município de Escada – PE.

Fonte: Googlemaps (2018).

#### • **Materiais e métodos**

O estudo iniciou-se com revisão bibliográfica e legislação pertinente sobre o tema, que deu suporte ao desenvolvimento do estudo. Os subsídios utilizados para análise da situação da área foram coletados através de cinco visitas técnicas a campo com registros fotográficos, entrevistas informais com os administradores e funcionários do cemitério de São Luís. Também foi realizada a visita a Secretaria Municipal de Infraestrutura, órgão responsável pela administração do cemitério no município. Como a área de estudo está inserida totalmente em ambiente urbano, sentiu-se a necessidade de analisar os problemas enfrentados pelos moradores nas áreas circunvizinhas ao cemitério.

Para uma análise mais detalhada e representação visual dos dados obtidos, utilizou-se o programa Microsoft Office Excel na criação dos gráficos e tabulação dos questionários. Pela complexidade que envolve o diagnóstico dos impactos ambientais, é preciso ter uma visão holística na análise dos dados, então foi aplicada a Matriz-PEIR. Para identificação e análise dos impactos negativos gerados e suas consequências para o meio ambiente. A Matriz-PEIR é utilizada para orientar na avaliação do estado do Meio Ambiente e o que pode ser feito para mitigar ou evitar os problemas atuais e futuros. A matriz é classificada em quatro indicadores principais: pressão, estado, impacto e resposta (DANTAS, 2013).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O Cemitério São Luís está instalado no centro do município, onde existem diversos estabelecimentos residenciais e comerciais e a arquitetura dos túmulos são desde as mais simples as mais sofisticadas. Hoje, o cemitério está com superlotação, não tendo vagas para construção de novos jazigos. O tipo de sepultamento oferecido pelo Cemitério São

Luís é por entumulação, que são construções de caixas em concreto ou alvenaria na forma horizontal e vertical. De acordo com Santos (2013), o tipo de sepultamento também pode contribuir para aumentar, controlar ou diminuir a poluição. Comparando a entumulação com a inumação, a entumulação é a técnica mais recomendada, porém a construção dos jazigos precisa ser bem executada, para evitar o escape do necrochorume e dos gases. A Figura 1 apresenta os tipos de jazigos encontrados no cemitério de São Luís, por entumulação na forma horizontal e vertical.



Figura 1: Tipos de sepultamentos – Cemitério de São Luís – Escada - PE.

Fonte: Os autores.

O cemitério de São Luís possui aproximadamente 1200 jazigos, muitos são considerados centenários, sendo que alguns encontram-se em total abandono. As famílias podem reutilizá-los após um período mínimo de três anos para adultos e dois anos para crianças. De acordo com as informações coletadas no local, a construção dos túmulos não envolve nenhum tipo de material especial, são feitos de areia, cimento e tijolos, sem qualquer impermeabilização. Porém, o Art. 6º da resolução CONAMA 335/03, estabelece que a construção dos túmulos deve obedecer a tecnologias que impeçam a passagem dos gases e o vazamento dos líquidos oriundos da coliquação.

Observou-se que nesse cemitério não só os jazigos mais antigos apresentam problemas estruturais. Jazigos mais recentes, incluindo os reformados, também apresentam problemas. Ressalta-se que estes problemas de construção dos túmulos podem fazer com que ocorram fugas do necrochorume e emissão dos gases para o meio ambiente. Pacheco (2012, apud SANTOS, 2013), classifica este tipo de impacto como físico secundário, que

estão diretamente ligados à má confecção e manutenção dos jazigos. A Figura 2 apresenta as condições estruturais dos jazigos.



Figura 2: Condições estruturais dos jazigos no cemitério São Luís.

Fonte: Os autores.

Silva, (1999, apud CAMPOS, 2007) salientou que nos sepultamentos por entumescimento, dependendo das condições de impermeabilização dos jazigos, o necrochorume polimeriza-se naturalmente, reduz-se a pó e não passa para o solo circunvizinho. Porém, se os jazigos estiverem mal estruturados, pode tornar o ambiente bastante insalubre, através da infiltração nas paredes, emitindo odor e atraindo insetos.

Outra problemática diagnosticada foi ausência de gerenciamento dos resíduos sólidos gerados da exumação, das visitas e reforma dos jazigos. Segundo Nascimento (2009) estes tipos de resíduos se não tiverem gerenciamento adequado podem causar impactos significativos sobre a saúde e o meio ambiente. No artigo 9º da resolução do (CONAMA) 335/03, existe uma determinação de que os resíduos sólidos, não humanos, resultantes da exumação dos corpos deverão ter destinação ambiental e sanitariamente adequada, seguindo o mesmo tratamento dado aos resíduos sólidos dos serviços de saúde, como a incineração (CONAMA nº 5/93). Foram observados diversos tipos de resíduos dispostos inadequadamente no Cemitério São Luís, tais como resíduos de construção, da exumação dos corpos, restos de coroas, flores, velas entre outros. Hino (2015) salienta que é preciso considerar que estes resíduos podem servir de focos para fungos e bactérias, principalmente se forem resíduos oriundos de corpos humanos derivados de doenças

contagiosas, bem como os restos de exumação de cadáveres submetidos a tratamentos para câncer.

Na visita técnica in loco, verificou-se que prefeitura não segue as normas para o acondicionamento, tratamento e destinação final deste tipo de resíduo. O manejo dos resíduos gerados no cemitério é inadequado, pois são expostos ao meio ambiente e a comunidade local sem nenhum cuidado sanitário e ambiental. Os resíduos são colocados na frente do cemitério, esperando ser recolhido pela prefeitura, que dá a disposição final no aterro controlado do município, ou jogados em um terreno baldio próximo ao cemitério (Figura 3). Os manejos dos resíduos sólidos dos cemitérios devem obedecer às normas técnicas para minimização dos riscos à saúde pública e à qualidade do meio ambiente. O CONAMA n° 358/05, classifica os resíduos deste tipo em dois grupos: o grupo A, resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido à presença de agentes biológicos patogênicos como, por exemplo, urnas, roupas, luvas, plásticos, etc, gerados pela exumação de corpos, e, o grupo D, são os resíduos comuns, com características de resíduos urbanos, como por exemplo, restos de coroas, flores e velas, resíduos de escritório, papéis de sanitários, resíduos de cozinha e refeitório, restos de podas de árvores e de cortes de gramas, etc.

Depois de transcorrido o prazo para exumação dos corpos, e caso a família não compareça, a exumação e os restos mortais humanos são queimados no próprio cemitério, tratando-se um ato ilícito penal que infringe os Arts. 208 a 212 do código penal brasileiro que trata dos crimes contra o sentimento religioso e contra o respeito aos mortos, além do lançamento de gases poluentes para atmosfera. A justificativa dada pela administração local se deve à falta de ossário no referido cemitério.



Figura 3: Disposição inadequada dos resíduos sólidos gerados no cemitério.

Fonte: Os autores.



Figura 4: Ossos queimados no cemitério e em áreas adjacentes.

Fonte: Os autores.

De posse de todas as informações foi possível montar a Matriz PEIR para análise dos possíveis impactos ambientais negativos gerados pelo cemitério (Quadro 1). Procurar compreender a causa e efeito das ações antrópicas sobre o meio ambiente é fundamental para tomada de decisões que contribuirá na orientação do diagnóstico ambiental e o que

pode ser feito para prevenir e mitigar os impactos negativos atuais e futuros.

A infringência das normas técnicas na operação e adequação dos cemitérios, ausência de fiscalização, falta de planejamento e gerenciamento ambiental, servem como características das pressões exercidas pela atividade antrópica, fatores que podem levar a contaminação e poluição das áreas onde está implantado o cemitério. O estado do meio ambiente, que resultam das pressões são: liberação de efluentes cadavéricos líquidos e gasosos, produção de resíduos sólidos sem gerenciamento adequado, queima de ossos por falta de ossário, inexistência de drenagem das águas pluviais.

Os impactos são produzidos pelo estado do meio ambiente, sobre diferentes aspectos como, meio ambiente, qualidade de vida e economia, que gera impactos negativos tais como: contaminação dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos e o solo, poluição atmosférica, disseminação de doenças, custos hospitalares, poluição visual, proliferação de vetores de doenças, poluição atmosférica, erosão do solo e saponificação.

<b>PRESSÃO</b>	<b>ESTADO</b>	<b>IMPACTO</b>	<b>RESPOSTA</b>
<b>INFRINGÊNCIA DAS NORMAS TÉCNICAS: NA OPERAÇÃO E ADEQUAÇÃO DOS CEMITÉRIOS;</b>  <b>AUSÊNCIA DE FISCALIZAÇÃO;</b>  <b>FALTA DE PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO AMBIENTAL</b>	<b>VAZAMENTO EFLUENTES LÍQUIDOS</b>	Contaminação dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos; Contaminação do solo; Disseminação de doenças;  Custos hospitalares.	Programa de prevenção de Riscos Ambientais (PPRA); Recuperação imediata dos túmulos; Mantas absorventes e pastilhas com bactérias selecionadoras; Aplicação de óxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> e Ácido Peracético (CH <sub>3</sub> CO <sub>3</sub> H).
	<b>EMISSÃO EFLUENTES GASOSOS</b>	Poluição atmosférica; Disseminação de doenças; Custos hospitalares.	Programa de prevenção de Riscos Ambientais (PPRA); Tratamento dos efluentes gasosos com utilização de carvão ativado; Recuperação imediata dos túmulos.
	<b>PRODUÇÃO RESÍDUOS SÓLIDOS.</b>	Contaminação do solo; Poluição visual; Proliferação de vetores de doenças; Disseminação de doenças; Custos hospitalares.	Plano de gerenciamento de resíduos sólidos para destinação sanitária adequada dos resíduos gerados; Controle de vetores.
	<b>QUEIMA DE OSSOS POR FALTA DE OSSÁRIO</b>	Poluição visual; Poluição atmosférica; Custos por indenização as famílias.	Construção de ossário; Cremação dos restos mortais exumados não reclamados
	<b>INEXISTÊNCIA DE DRENAGEM DAS ÁGUAS PLUVIAIS.</b>	Erosão do solo; Infiltração das águas pluviais; Contaminação dos corpos hídricos; Saponificação; Disseminação de doenças; Custos hospitalares;	Sistema de drenagem adequado para captar e encaminhar de maneira segura o escoamento das águas pluviais.

Quadro 1: Matriz PEIR para o cemitério de São Luís – Escada – PE.

As respostas são o componente da matriz que corresponde às ações que irão mitigar ou prevenir os impactos ambientais negativos, e que conservam os recursos naturais contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população local. São eles: Programa de prevenção de Riscos Ambientais (PPRA), Recuperação imediata dos túmulos para impedir as fugas dos líquidos oriundos da coligação e também tratamento de eventuais efluentes gasosos, com utilização, por exemplo, de carvão ativado.

De acordo com Francisco et al. (2017), há alguns produtos que podem neutralizar ou reter o necrochorume, servindo como métodos para mitigar os impactos ambientais causados por cemitérios. A manta absorvente, utilizada para evitar a fuga do necrochorume, também é um recurso eficiente, onde é constituída por um plástico resistente, que possui uma camada de celulose e um pó que em contato com o efluente se transforma num gel. Neckel et al. (2014) sugerem a utilização de pastilhas contendo uma imensa quantidade de bactérias seletivas que possuem alta capacidade de digerir matéria orgânica também servem de recursos para minimizar os impactos ambientais. Esses produtos de origem natural, também chamados de bioenzimas, contém cepas de bactérias selecionadas com alta capacidade de digerir matéria orgânica, ativadas gradativamente na medida em que entram em contato com o necrochorume, transformando os complexos compostos orgânicos em dióxido de carbono e água. Essas bactérias vêm em forma de esporos e são ativadas gradativamente. As pastilhas são colocadas dentro da urna funerária, e, na medida em que o corpo vai liberando o necrochorume elas são ativadas e vão digerindo essas substâncias. Ferraz (2014) sugere a utilização de substâncias oxidantes nos sepultamentos, como o óxido de cálcio anidro (cal virgem) ou peróxido de cálcio, substância oxidante que maximiza a decomposição devido a sua acidez e minimiza as fugas de necrochorume para o solo.

Existem inúmeras soluções para os problemas ambientais gerados por cemitérios, onde os estudos de Ferraz (2014), Neckel et al. (2014) e Francisco et al. (2017), por exemplo, comprovam a eficiência. Porém, a existência de um plano de gerenciamento de resíduos sólidos para destinação sanitária adequada dos resíduos gerados e controle de vetores torna-se fundamental para a redução dos riscos ambientais. A Construção de ossário e a implantação de um sistema de drenagem de águas pluviais adequado para captar e encaminhar de maneira segura o escoamento das águas pluviais tornam-se fundamentais para o adequado gerenciamento.

## CONCLUSÕES

- Com este estudo observou-se que os principais impactos ambientais negativos gerados pelos cemitérios estão ligados ao descumprimento das normas vigentes, ausência de fiscalização, gerenciamento ambiental e uma equipe multidisciplinar de profissionais capacitados. Considerando estas áreas como potenciais fonte de impactos ambientais é necessário licenciar, fiscalizar, monitorar e acompanhar a atividade cemiterial rigorosamente;

- No cemitério estudado é notável a falta de cuidados sanitários e ambientais, que podem gerar impactos ambientais significativos para o meio ambiente e para a saúde pública. Os efluentes líquidos e gasosos gerados pelo processo de putrefação podem contaminar o solo, os corpos hídricos superficiais e subterrâneos;
- Diante dos problemas enfatizados, pode-se considerar as áreas de estudos suspeitas de contaminação e poluição ambiental, porém, faz-se necessário realizar uma análise ambiental mais aprofundada das características geológicas e hidrogeológicas;
- A aplicação da matriz PEIR tentou mostrar o funcionamento do cemitério de São Luís-PE, demonstrando as ligações entre os elementos ambientais, agentes sociais e políticos. Foram selecionados vários dados para a aplicação da matriz, porém a dificuldade ao acesso das informações que deveriam ser públicas, a inexistência de outros e até a não autorização para repasse de dados, prejudicou a análise.

## REFERÊNCIAS

1. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 368, de 28 de março de 2006**. Altera dispositivos da Resolução n o 335, de 3 de abril de 2003, que dispõe sobre o licenciamento.
2. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 335, de 03 de abril de 2003**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitério
3. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 402, de 17 de novembro de 2008**. Altera os arts 11 e 12 da Resolução CONAMA no 335/03. Revoga o art. 3º da Resolução CONAMA no 368/06
4. BRASIL. **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.
5. BRASIL. **Constituição Federal**. Código Penal Brasileiro. Arts. 208 a 212 tratam dos crimes contra o sentimento religioso e contra o respeito aos mortos.
6. CAMPOS, A. P. S. **Avaliação do potencial de poluição no solo e nas águas subterrâneas decorrente da atividade cemiterial**. 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
7. FERRAZ, R. L. S. **Estudos dos impactos ambientais causado por necrochorume: proposta de adequações ao cemitério Santo Antônio do município de Sorocaba - SP**. 67 p., Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de São Paulo, - Campus São Roque, São Roque - SP, 2014.
8. FRANCISCO, A. M.; SILVA, A. K. G.; SOUZA, C. S.; SANTOS, F. C. S. Tratamento do necrochorume em cemitérios. **Revista Atas de Saúde Ambiental** (São Paulo, online), ISSN: 2357-7614 - Vol. 5, janeiro, 2017, p. 172-188.
9. HINO, T. M. O; Necrochorume e a Gestão Ambiental dos Cemitérios. **Revista Especialize On-line IPOG** - Goiânia - Edição nº 10 Vol. 01/ 2015 dezembro/2015.

10. IBGE. **Censo Demográfico 2017** - População do município de Escada. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/escada>. Acesso em 17/01/2018.
11. KEMERICH, P. D. C.; BIANCHINI, D. C.; FANK, J. C.; BORBA, W. F.; WEBER, D. P.; UCKER, F. E. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM**, Santa Maria Revista Monografias Ambientais - REMOA, V. 13, N. 5 (2014): Edição Especial LPMA/UFSM, p. 3777-3785.
12. NASCIMENTO, W. G. **Investigação geofísica ambiental e forense nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém – PA)**. 153 p., Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.
13. NECKEL, A.; COSTA, C.; MARIO, D. N.; SABADIN, C. E. S.; BODAH, E. T.; Environmental damage and public health threat caused by cemeteries: a proposal of ideal cemeteries for the growing urban sprawl. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management)**, 2017 maio/ago, 9(2), 216-230.
14. SANTOS, Aline Silva. Espaços Cemiteriais e suas Contribuições para a Paisagem e Meio Ambiente Urbano. **Revista LABVERDE** nº6 - Artigo nº04. Jun, 2013.

## ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICO DO CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÃO DA CINZA DO COCO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO

Data de aceite: 01/08/2022

Data de submissão: 09/06/2022

### João Paulo Monteiro Carvalho

Instituto Federal do Ceará  
Sobral-CE

<http://lattes.cnpq.br/8422617084980377>

### Simone de França Cardoso

Faculdade Luciano Feijão  
Sobral-CE

<http://lattes.cnpq.br/133254399653159>

### Wilson Linhares dos Santos

Estácio de Sergipe  
Aracaju-SE

<http://lattes.cnpq.br/5081094478451532>

### Mércia Maria Pinheiro Gambarra

Universidade Federal de Sergipe  
São cristovão-SE

<http://lattes.cnpq.br/1163924309071699>

**RESUMO:** O presente trabalho tem como objetivo utilizar cocos descartados no meio ambiente provenientes da atividade agrícola e da sua comercialização in natura e transformar em matéria-prima capaz de substituir percentuais dos agregados miúdos em concretos, a fim de avaliar seu desempenho. Os cocos foram colhidos no município de Barra dos coqueiros/ Sergipe, queimados, peneirados, para que sua granulometria fosse semelhante à da areia (2,36 – 0,74 mm). Em seguida, foram produzidos concretos leves com argila expandida, com

traço de 1:2,40:1,84:0,55 (cimento: areia: argila expandida: água) com percentuais de 0, 10, 20 % de substituição de cinza do coco ao agregado miúdo. Os blocos de concreto leve com argila expandida e cinza de coco em seus respectivos percentuais foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e os resultados submetidos à análise estatística. O pó da cinza do coco calcinado a 700°C e 800°C foi caracterizado por Difração de Raios X (DRX) bem como a areia, a argila, a argila expandida, e a fibra coco in natura à fim de comparar com material já utilizado (areia), e verificar a possibilidade de utilização desses materiais na produção do concreto. Foram feitos procedimentos de extinção da matéria orgânica (calcinação) e verificação da granulometria com a cinza do coco para a fabricação dos corpos de prova. Os resultados mostraram que a cinza do coco é fonte promissora de sílica, elemento esse fundamental para a produção do concreto, podendo assim ser utilizada para a fabricação de concreto leve com argila expandida em substituição de percentual de agregado miúdo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coco, agregado miúdo, concreto.

### PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH EXPANDED CLAY AND ADDITION OF COCONUT ASH TO REPLACE THE FINE AGGREGATE

**ABSTRACT:** The present work aims to use coconuts discarded in the environment from agricultural activity and their marketing in natura and transform into raw material capable of

replacing percentages of fine aggregates in concrete, in order to evaluate their performance. The coconuts were collected in the municipality of Barra dos Coqueiros/Sergipe, burned, sieved, so that their granulometry was similar to that of sand (2.36 – 0.74 mm). Then, lightweight concretes were produced with expanded clay, with a trace of 1:2,40:1,84:0,55 (cement: sand: expanded clay: water) with percentages of 0, 10, 20% of ash replacement from coconut to fine aggregate. The lightweight concrete blocks with expanded clay and coconut ash in their respective percentages were submitted to compressive strength tests and the results were submitted to statistical analysis. The coconut ash powder calcined at 700°C and 800°C was characterized by X-Ray Diffraction (XRD) as well as sand, clay, expanded clay, and in natura coconut fiber in order to compare with material already used (sand), and verify the possibility of using these materials in the production of concrete. Procedures were carried out to extinguish the organic matter (calcination) and check the granulometry with the coconut for the manufacture of the specimens. The results showed that coconut ash is a promising source of silica, which is a fundamental element for the production of concrete, and can thus be used for the manufacture of lightweight concrete with expanded clay to replace the percentage of fine aggregate.

**KEYWORDS:** Oyster shells, mortar, aggregate.

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, tem-se observado um aumento expressivo em pesquisas voltadas para a utilização de resíduos industriais na construção civil e o seu reaproveitamento tem trazido benefícios econômicos e, principalmente, ambientais.

Um dos resíduos estudados é o do coco, que é gerado pelo seu processamento e produção de derivados, como óleos, leites, materiais de beleza, e pelo consumo de sua água industrializada ou consumida em praias e outras regiões, que são descartados no meio ambiente sem nenhum tratamento que minimize os impactos ambientais, como a produção de metano, oriundo de sua decomposição e poluição de terrenos, rios e lagoas através do chorume.

A utilização do coco in natura em praias, outros ambientes, ou na indústria que são descartados sem nenhum tratamento junto com outros resíduos, apresentam valores elevados, de acordo com o IBGE (2018), o consumo de água de coco no Brasil ultrapassou os 360 milhões de litros. Números expressivos de descarte de sua casca, porém os números são ainda maiores quando levado em consideração o mercado informal principalmente no Nordeste, que continua sendo o maior produtor, com 81,3% da área e 71,2% da produção nacional, Brainer e Ximenes (2020).

Ainda Segundo Brainer e Ximenes (2020), o Brasil é o quinto maior produtor mundial de coco, com a participação de 4,5% da produção total, estimada para 63,6 milhões de toneladas em 2020, elevando assim o potencial de utilização do coco para diversas atividades. Essa grande quantidade de coco sendo consumida gera muitos resíduos, pequena parte desse resíduo é reaproveitada para reciclagem, biomassa dentre outros,

porém, grande parte desse resíduo é descartada no meio ambiente e sem tratamento, gerando assim, problemas sem solução para o meio ambiente.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi produzido com o intuito de apresentar uma modelagem de corpos de prova de um concreto leve com argila expandida e cinza de coco em substituição do agregado miúdo, observar a sua resistência aos 7 e 28 dias de cura bem como caracterizar a sua matéria prima e observar a viabilidade de sua aplicação para produção do concreto beneficiando o meio ambiente.

### 2.1 Preparação da Cinza do Coco

Os cocos usados nesse trabalho foram coletados no município de Barra dos Coqueiros, no estado de Sergipe, Brasil, cuja latitude e longitude corresponde a **10°55'13.6"S 37°01'30.4"W** conforme a Figura 1, próximo ao Residencial Damha e à Av. José de Campos.

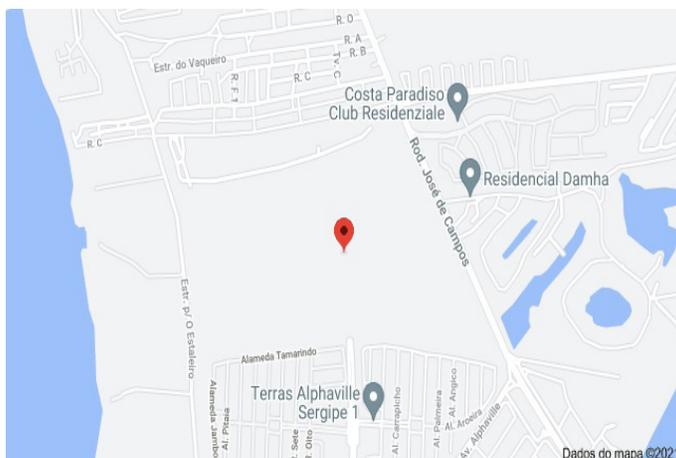


Figura 1 - Mapa, fazenda de coco.

Fonte: Google Maps (2020)

Após serem coletados, os cocos foram calcinados, as cinzas armazenadas para o peneiramento sobre uma mesa vibratória em peneiras com malha de 28, 8 e 16 para conseguir a granulometria desejada (2,36 – 0,74 mm), conforme a NBR 248(2003), em seguida, armazenadas para a produção dos corpos de prova.

### 2.2 Análise Química

O percentual de elementos constituintes na cinza do coco foi encontrado através da técnica de Espectroscopia de Fluorescência de Raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) através de medidas semiquantitativas. As medidas foram realizadas

em vácuo, em um equipamento da marca BRUKER, modelo S8 Tiger 4KW, no modo *Full Detection*, no Laboratório de Caracterização/DCEM/UFS. As amostras encontravam – se em forma de pó e devido a isso se fez necessário o uso de uma membrana polimérica para a leitura da técnica (Figura 2 – aparelho de difração por raio X).

### 2.3 Análise Estrutural

As caracterizações cristalográficas das amostras foram obtidas utilizando o difratômetro de raios X da marca Brucker D8 Advance. As amostras foram analisadas com comprimento de onda  $K = 1,54056 \text{ \AA}$ , no Laboratório de Caracterização Estrutural do NUPEG/UFS. As condições estabelecidas para obtenção dos difratogramas foram: radiação  $\text{CuK}_\alpha$  obtida em 30 kV (com corrente de filamento em 15 mA), intervalo de medição de  $20^\circ < 2\theta < 80^\circ$ , varredura com passo angular  $0,02^\circ$ , e tempo de contagem por passo de  $5^\circ/\text{min}$  (Figura 2 – aparelho de difração por raio X).

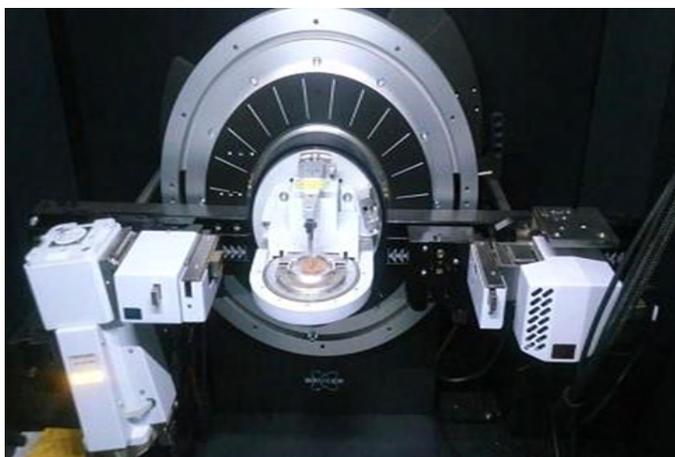


Figura 2 – DRX (DIFRAÇÃO POR RAIOS X)

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

### 2.4 Fabricação dos Corpos de Prova

Foram produzidos 18 corpos de prova cilíndricos em três composições diferentes, três para o ensaio de resistência à compressão de 7 e 28 dias, com teor de cinza zero, três para o ensaio de resistência à compressão de 7 e 28 dias com o teor de 10% da cinza e três para ensaio de compressão de 7 e 28 dias com o teor de cinza de 20%, os corpos de prova foram produzidos mantendo o traço de 1:2,4:1,8:0,55 onde a areia foi aos poucos substituída pela cinza do coco. Para a produção foi utilizado cimento Portland CP II F-32, água, areia lavada, argila expandida com a referência de granulometria de 15069 (indicada para concreto estrutural) e cinza de coco.

A mistura dos constituintes feita em betoneira, foram dispostas em moldes, com uma fina camada de óleo lubrificante para facilitar a desmoldagem, seguindo a NBR 5738 (2015), permanecendo por 24 horas nestes, a fim de atingirem cura suficiente para a desmoldagem. Em seguida, os corpos de prova foram postos em recipientes cheios de água para a cura úmida, permanecendo submersos por 7 e 28 dias.

## 2.5 Resistência à Compressão

A resistência mecânica dos corpos de prova produzidos foi realizada após um período de 7 e 28 dias. Os corpos de prova foram submetidos a carga vertical até o seu rompimento, no Laboratório de Ensaio Mecânicos da empresa POLIMIX, com a prensa seguindo a norma ASTM C 109 e NBR 5739(2007) conforme a Figura 3.



Figura 3 - Ensaio de compressão dos blocos de argamassas

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

## 3 | RESULTADOS E DISCURSÕES

### 3.1 Análise Química por Difração de Raios X

#### *Difração de matéria prima e Análise Química*

Para a difração e análise de matéria prima (Figura 2 – aparelho de difração por raio X) nomeamos as amostras em:

AR – Argila

AE- Argila expandida

Ar- Areia

F700- fibra calcinada a 700 graus

F800- fibra calcinada a 800graus

IN- fibra in natura

A técnica de difratometria de raios X (DRX) foi utilizada para a determinação das fases cristalinas das cinco amostras, denominadas por AR, AE, Ar, F700, F800 e fibra de coco seco IN. O equipamento utilizou a radiação  $K_{\alpha 1}$  do cobre (Cu) com comprimento de onda ( $\lambda$ ) igual a 1,5418 Å, em modo de varredura contínua com incremento de 0,02° no intervalo de 5 a 60°.

As amostras com diâmetro de 2  $\mu\text{m}$  foram inicialmente colocadas em um suporte de acrílico próprio para a difração, e em seguida colocada dentro da máquina (Figura 9). Para esse tipo de análise, a máquina foi calibrada para a potência máxima de 40x40 seguindo o procedimento padrão em modo de varredura contínua com incremento de 0,02° no intervalo de 5 a 60°.

Os padrões de difração das matérias-primas e a porcentagem de cada fase cristalina presente nas amostras foi estimada a partir da intensidade relativa de seus picos principais através do programa de análise Match! versão Demo, de acordo com o banco de dados da ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*), sendo os valores apresentados na Tabela 1.

Minerais (%)	Argila	Argila expandida	Areia
Quartzo	59,2	84,1	93,1
Caulinita	5,8		
Muscovita	12,1		
Feldspato	6,8		5,7
Hematita	6,1		
Calcita	3,2	5,1	
Silicato de magnésio/óxido de alumínio e magnésio		9,2	

Tabela 1 - Quantificação em Porcentagem dos elementos caracterizados

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

### *Para a Argila (AR)*

A Argila é o nome dado a um sedimento formado por partículas de dimensões abaixo de 4 micrômetros de diâmetro (SANTOS,2016). Em particular, essa amostra de argila é constituída, predominantemente, por quartzo, caulinita, muscovita, feldspato, calcita e hematita, comuns em grande parte da crosta terrestre, sendo predominante a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), com percentuais de 59,2% como observado no difratograma abaixo, outras substâncias encontradas na amostra como a caulinita (5,8%), muscovita (12,1%), feldspato (6,8%), calcita (3,2%) e hematita (6,1%) possuem percentuais bem abaixo do encontrado para o quartzo (Figura 4 - Gráfico de difração por raio x da argila). Na amostra

temos um percentual relevante de sílica, quando comparado com a areia.

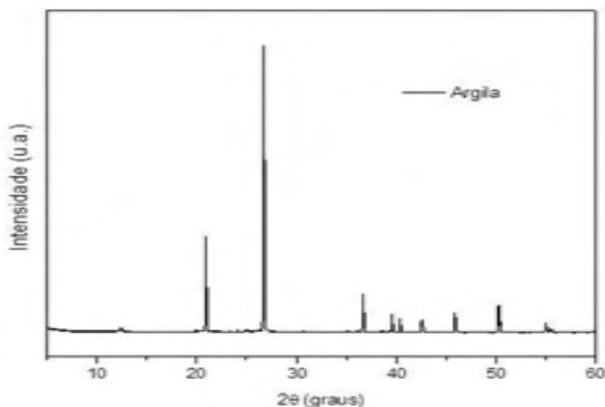


Figura 4- Padrão de Difração da Argila

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

#### *Para a Argila Expandida (AE)*

A argila expandida apresentou em sua composição majoritariamente quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) com percentual de 84,1%, uma pequena quantidade de silicato de magnésio ( $\text{Mg}(\text{SiO}_4)$ ) em um percentual de 5,1%, e óxido de alumínio e magnésio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) com percentual de 9,2%. Observa-se ainda nesse difratograma, uma elevação da linha de base entre, aproximadamente, 15 e 36° indicando a presença de fases amorfas na referida argila, (Figura 5 - Gráfico de difração por raio x da argila expandida). Essa amostra tem percentual de  $\text{SiO}_2$ (sílica) muito próximo do percentual de sílica da areia.

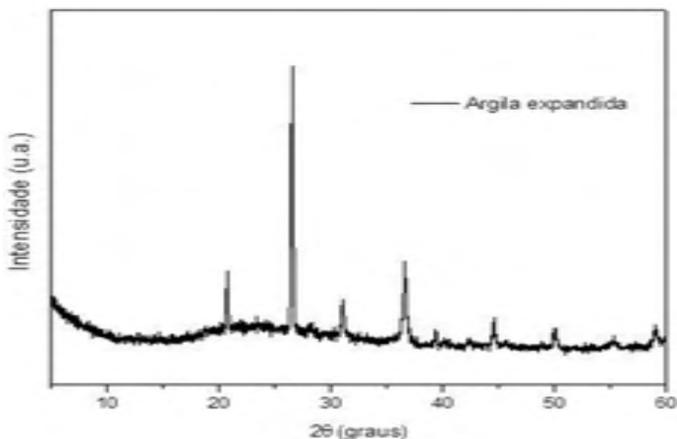


Figura 5- Padrão de Difração da Argila expandida

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

### *Para a Areia (Ar)*

A areia é composta por uma grande quantidade de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) com percentual de 93,7%, e uma pequena quantidade de feldspato ((K, Na Ca) (Si, Al) $_4$  O $_8$ ), como já previsto por se tratar o quartzo do mineral mais abundante da crosta terrestre e o feldspato de constituintes de rochas que formam cerca de 60% da crosta terrestre. Como observado nesse difratograma, (Figura 6 - Gráfico de difração por raio x da areia). A porcentagem de  $\text{SiO}_2$  (Sílica) contida nessa amostra, será parâmetro para a porcentagem das cinzas de coco.

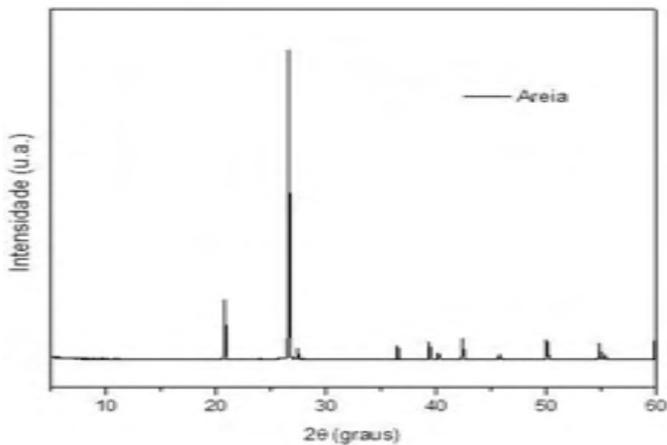


Figura 6- Padrão de Difração da Areia

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

### *Para a Fibra de coco calcinada a 800°(F800)*

Na Fibra de coco calcinada a 800 °C, há uma grande quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) com percentual acima de 55% os níveis de cálcio, magnésio, potássio e enxofre são encontrados, mas em pequenas quantidades com percentuais bem menores que o da sílica na amostra, como observado no difratograma abaixo apresentando na Figura 7 (Gráfico de difração por raio x da cinza do coco calcinada a 800°C) ainda fases amorfas na referida amostra. Essa amostra tem valores relevantes de  $\text{SiO}_2$  quando comparados com o percentual da areia.

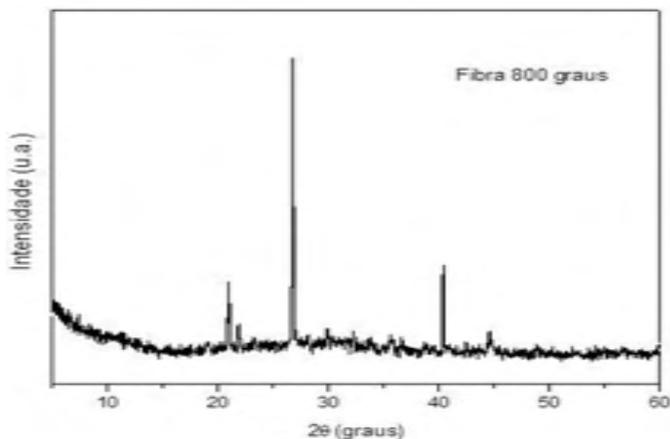


Figura 7 - Padrão de Difração da F800.

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

*Para a Fibra de coco calcinada a 700°(F700)*

Na fibra calcinada a 700 °C, observa-se em maior quantidade a sílica (SiO<sub>2</sub>) com percentuais de 55% e o cálcio (Ca) com percentuais de 23%, típicos dessas substâncias.

Apresentando ainda de acordo com o seu difratograma, mostrado na Figura 8 (Gráfico de difração por raio x da cinza do coco calcinada a 700° c), fases amorfas nessa amostra. Essa amostra apresenta assim como a amostra de 800° percentual relevante de SiO<sub>2</sub>, quando comparado com o percentual da areia.

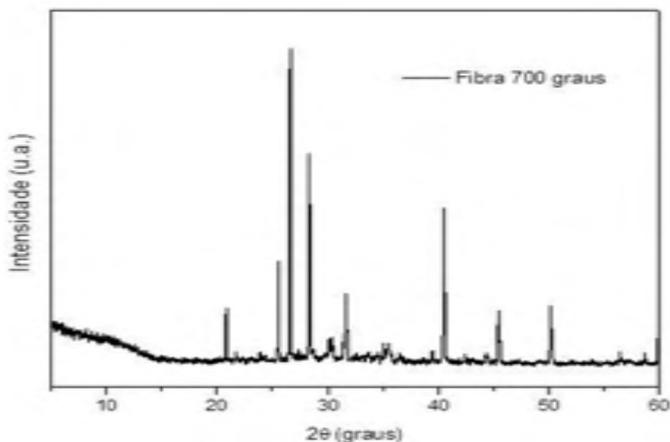


Figura 8 - Padrão de Difração da F700

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

### Para a Fibra de coco In Natura (IN)

Na fibra calcinada não calcinada, observa-se em menor quantidade a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) com percentuais inferiores a 55% e o cálcio (Ca) com percentuais maiores a 23%. Apresenta ainda de acordo com o seu difratograma (Figura 9 - Gráfico de difração por raio x da fibra de coco in natura), fases amorfas, como já era previsto nessa amostra por se tratar de uma substância com sílica que tem sua formação em condições normais. Essa amostra não apresenta porcentagem de  $\text{SiO}_2$ (sílica) relevante para a sua utilização em substituição do agregado miúdo.

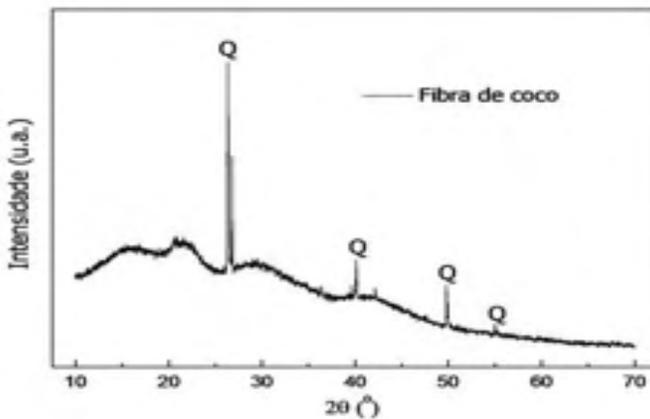


Figura 9 - Padrão de Difração da IN

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

A fibra de coco natural IN apresentou uma quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) com percentuais abaixo de 55% de acordo com o difratograma. Para a produção do concreto estrutural não seria o mais aconselhável entre as três amostras analisadas (IN, F700, F800), por apresentar percentual relativo de  $\text{SiO}_2$ , visto que em comparação a outros agregados a porcentagem de sílica fica bem abaixo do esperado. Porém sua aplicação pode ser explorada na produção de concretos não estruturais. A fibra de coco F700 apresentou percentual de  $\text{SiO}_2$  de 55%, o que é fundamental para a produção do concreto. A sílica é um componente importante na produção do concreto, pois reage com a pasta de cimento para formar silicato de cálcio hidratado (CSH), oferecendo maior resistência, reduzindo o vazamento de água e aumentando o vínculo entre a pasta de cimento e os demais agregados, além de que graças ao seu efeito pozolânico (reação com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), este elemento contribui para a melhoria da força e da rigidez do concreto, podendo ser aproveitada na redução do teor de cimento da mistura, restringindo o total de calor de hidratação, podendo melhorar o desempenho do concreto em termos de resistência

química (BAUER, 2019), podendo assim ser a F700 utilizada na composição do concreto estrutural em substituição parcial ao agregado miúdo, ou como aditivo do agregado miúdo, por apresentar parâmetros significativos da presença da sílica SiO<sub>2</sub>. A fibra de coco F800 apresentou percentual de sílica maior que 55% com valores aproximados aos das amostras já utilizadas e aqui analisadas, (Ar,AE,AR) sendo viável o seu emprego na produção do concreto estrutural como aditivo ou em substituição a agregados miúdos. O estudo das propriedades da fibra de coco para a utilização na produção de concreto evidencia que em relação a presença de sílica, há parâmetros significativos para a sua utilização desde a fibra IN que pode ser empregada para a produção de concretos para pavimento ou guias de ruas até a fibra calcinada a 700° e 800° que podem ter a mesma empregabilidade da fibra IN ou podem ser empregadas na produção de concreto estrutural.

### 3.2 Resistência à compressão

Foi utilizado para o processo de produção do concreto o método de dosagem adotando para isso o cálculo do traço da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) para uma resistência normal do cimento aos 28 dias de 20 Mpa (fck mínimo para concreto estrutural). O traço calculado foi o de 1:2,40:1,84:0,55 (cimento:areia:argila expandida:água).

A resistência à compressão foi testada no laboratório de ensaios mecânicos da POLIMIX (Aracaju –SE) para os corpos de prova C0, C10 e C20 respectivos à sua porcentagem de cinza substituída no concreto.

Todas as amostras foram realizadas em triplicatas. Os resultados obtidos através do ensaio mecânico, foram apresentados como média e desvio padrão, aplicados a uma análise estatística com intervalo de confiança de 95% determinados em planilhas eletrônicas produzidas no Excel 2013. Como mostra a tabela 2.

Tipo de Concreto	Cimento (kg)	Areia (kg)	Coco (kg)	Argila expandida (kg)	Água (ml)	Cura molhada após 7 dias (fck) Kgf/cm <sup>2</sup>	Cura molhada após 28 dias (fck) Kgf/cm <sup>2</sup>
0% cinzas	1	2,4	0	1,84	0,55	37,48 ± 2,7	43,39 ± 0,9
10% cinzas	1	2,16	0,24	1,84	0,55	24,26 ± 0,9	26,94 ± 2,2
20% cinzas	1	1,92	0,48	1,84	0,55	27,64 ± 0,8	33,67 ± 0,5

Tabela 2 - Quantidades de matéria/resultados(fck)

Fonte: Autor da pesquisa (2020)

## 4 | CONCLUSÃO

Com isso, conclui-se que a cinza do coco em substituição ao agregado miúdo no concreto leve com argila expandida pode ser usada para a produção de um novo concreto mais econômico, visto que a argila expandida pode ser produzida no Brasil, e o coco de fácil acesso e a sua queima pode ser utilizada para a produção de cimento, produção de energia elétrica, dentre outras alternativas, e mais ecológico quando se retira do ambiente toneladas de cascas.

A caracterização e análise da matéria prima, dá um parâmetro de que é possível utilizar a cinza do coco para a produção do concreto, quando observado que a cinza do coco apresenta um teor de sílica bastante elevado, quando comparado à quantidade de sílica presente na areia, também caracterizada nesse trabalho. Já a caracterização da argila expandida confirma a sua eficácia, visto que, já é um produto que vem sendo bastante utilizado na indústria da construção civil.

A resistência à compressão mostra que a resistência dos corpos de provas está acima do mínimo para ser considerado concreto estrutural segundo a ABCP aos 7 e principalmente aos 28 dias de cura molhada, quando foi observado um elevado fck do concreto produzido.

A análise estatística dos dados das amostras que foram submetidas ao ensaio de compressão dos corpos de prova mostra um intervalo de valores com 95% de confiança, resistência compatível com o estabelecido pela norma para ser considerado concreto estrutural.

Desse modo, conclui-se que há um promissor material para ser utilizado na construção civil, a resistência verificada está acima da resistência indicada nas normas técnicas, conotando que o material estudado pode ser utilizado na indústria da construção civil.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 5738/2015** – Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 5739/2007**– Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 248/2003** - Agregados - Determinação da composição granulométrica.

Associação Brasileira de Cimento Portland, "**Guia Básico de Utilização Cimento Portland**," 2012.

American Society for Testing and Materials "Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (C 109)," *ASTM Int.*, pp. 29–31, 2009.

BAUER, L. A. **“Materiais de Construção”**, 6ª edição -Rio de Janeiro, 2019. LTC;

BRAINER M. S. DE C. P., XIMENES L. F. **“PRODUÇÃO DE COCO – SOERGUIMENTO DAS ÁREAS TRADICIONAIS DO NORDESTE”**, Caderno setorial ETENE-BNB. Agosto 2020.

IBGE. **Tabela 6705 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos** - Prodlist Indústria 2018. Pesquisa Industrial Anual - Produto. Brasília: IBGE, 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/6705>>. Acesso em: 22 07. 2021.

SANTOS, do P. C. **ESTUDO DE VARIÁVEIS DE PROCESSO E DA CINÉTICA DE SINTERIZAÇÃO DE MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**, Tese de doutorado UFS-São Cristóvão, Sergipe,2016

## EFFECT OF BASALT POWDER AND METAKAOLIN FILLERS ON ASPHALT MASTIC BEHAVIOR

*Data de aceite: 01/08/2022*

*Data de submissão: 20/06/2022*

### **Ana Luiza Rezende Rodrigues**

Department of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia  
Uberlândia – MG, Brazil

Present position: Ph.D Student at Iowa State University, USA

Orcid: 0000-0002-6644-0434

### **Rodrigo Pires Leandro**

Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia  
Uberlândia – MG, Brazil

Orcid: 0000- 0003-4244-5692

**ABSTRACT:** Asphalt mastic is the mix between filler and the asphalt binder that can influence the mixture's compaction characteristics and the optimal asphalt content. Filler is defined as the mineral portion that passes through the sieve n°. 200 and it acts in the asphalt mixture by filling voids and modifying the viscosity, elasticity, and thermal susceptibility of asphalt binders. This study sought to determine the influence of different filler types and amounts on asphalt mastics' behavior. For this, physical tests, such as penetration, softening point, ductility, and elastic recovery were performed to evaluate the characteristics of binder and mastics with filler addition. The filler types used were basalt powder and metakaolin in the proportion of 0.6 and 1.2 filler/asphalt. The fillers' additions significantly

influenced the mastic, and metakaolin had a more considerable effect on asphalt binder behavior than basalt powder. It made the mastic more rigid, more viscous, less elastic, and less susceptible to temperature. These changes are strong insights that the filler insertion improves the mixture performance regarding fatigue cracking and permanent deformation.

**KEYWORDS:** Asphalt mastic, filler, binder, asphalt mixture.

**RESUMO:** O mástique asfáltico é uma mistura de filler e o ligante asfáltico que influencia nas características de compactação e no teor de asfalto das misturas. O filler é um material de enchimento, caracterizado por ser a parcela que passa pela peneira n° 200, atua na mistura asfáltica preenchendo os vazios e alterando algumas características dos ligantes asfálticos como viscosidade, elasticidade e suscetibilidade térmica. Esse estudo busca determinar a influência da adição de diferentes tipos de filler em diferentes proporções no comportamento de mástiques asfálticos. Para isso, foram realizados ensaios físicos, como penetração, ponto de amolecimento, ductilidade e recuperação elástica para avaliar as características do ligante e dos mástiques. Os fileres usados foram pó de basalto e com metacaulim para relações filler/asfalto de 0,6 e 1,2. Pode-se verificar que as adições dos fileres agiram tornando o mástique mais rígido, mais viscoso, menos elástico e menos suscetível à temperatura. Essas mudanças são fortes indícios de que a inserção do filler melhora o desempenho da mistura em relação a trincas por fadiga e deformação permanente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Asfalto, mástique asfáltico, ligante asfáltico.

## 1 | INTRODUCTION

The primary objective of paving a road is to provide an operational improvement of traffic, achieving efficient, safe, and fast flow of vehicles. Pavements are designed for structural and functional purposes. First, the structural aims are to reduce and distribute traffic loads to the subgrade considering the weather and expected traffic. Besides, it is essential that the pavement functionality meet users' needs regarding safety and comfort.

In flexible pavements, dynamic loads caused by traffic generate stresses in the asphalt layer, such as compression, tensile, and shear stresses. The repetition of stresses and deformations caused by compression and shear is responsible for the permanent deformations that, accumulated over time, form the rutting. Simultaneously, bending moments generate stresses and tensile deformations at the bottom of the asphalt surface course, which, when acting repeatedly, cause fatigue cracking of the asphalt concrete.

In this scenario, asphalt layers must be formulated and designed to minimize the main phenomena that contribute to reducing the useful life of asphalt pavements: fatigue cracking and permanent deformation (Bardini, 2013).

Asphalt concrete mixture is a multi-level structure system that is composed of asphalt binder, aggregates, and filler. Formulating the mixture is a complex task that aims to balance asphalt concrete's susceptibility to the two leading causes of defects in asphalt pavements by choosing a design asphalt content for a predefined granulometric distribution. When selecting this asphalt content, the main controlled characteristics are the volume of air voids ( $V_a$ ), the voids filled with asphalt (VFA), and the volume of voids in the mineral aggregate (VMA) (Antunes et al., 2016). In this situation, fillers' association with the available asphalt binder represents the formation of the so-called asphalt mastic. The mastic affects the lubrication between the larger aggregates, the volume of voids in the mineral aggregate mixture, and, consequently, the compaction characteristics and the design asphalt content. The quality of this mastic is dependent on the type and quantity of asphalt and filler.

Filler definition is a fraction of mineral dust that passes the 200-mesh sieve. It fills the voids between the coarse aggregates in the asphalt mixes, increasing its density, stability, and rigidity, and it also changes the properties of the asphalt binders. Particles smaller than 0.020 mm incorporate the asphalt binder and form the mastic. The quality of the mastic is directly related to the quality of the asphalt mixture and its workability. Particles larger than 0.040 mm function is to fill the voids, close the mix, and modify its resistance to water and aging (Bardini, 2013).

However, the relationship between the benefits of adding filler and the amount of asphalt binder available is not linear. The high amount of filler in an asphalt mix negatively affects the mastic workability, flexibility, and durability. The fillers change the mastic's stiffness

and, consequently, the asphalt mixture's behavior concerning permanent deformation at high temperatures and fatigue at intermediate temperatures (Bardini et al., 2010). Fatigue occurs due to the development and growth of microcracks in the mastic. It is related to the asphalt binder's characteristics, filler's properties, and physical-chemical interaction between these two materials.

Several studies have suggested that the filler proportion on the mastic and its physical properties, such as size, shape, void space, and surface characteristics significantly influence the physical-chemical interaction between asphalt binder and filler (Bardini, 2013; Kavussi and Hicks 1997; Liao et al., 2012; Zhu et al., 2018). Thus, the main purpose of this work is to analyze the effects of the amount of two different filler types in an asphalt mastic formulation and behavior using polymer-modified petroleum asphalt cement.

## 2 | FILLER

The filler can be defined as a material that has more than 65% of its particles passing through the 200-mesh sieve (DNER-ME, 1997) or as a material derived mainly from coarse and fine aggregates that are used in asphalt mixtures and can improve the rheological, mechanical, thermal and water sensitivity behavior (Santana, 1995). In addition, Santana (1995) points out that the use of filler in the asphalt mixture improves the consistency uniformity and thermal susceptibility.

According to Barra (2005), the filler can act in two different ways in the asphalt mixture due to its granulometry — the larger particles as aggregate and the smaller ones as active filler. The filler working as a fraction of the aggregate is a fine and inert material that acts to fill the voids and promotes the contact between the larger particles, promoting greater resistance of the mixture. The active filler acts in the formation of the mastic because it is a particle in suspension. The mastic is the mixture of the filler with the asphalt binder to form a matrix that involves the coarse aggregates and fills the asphalt mixture's voids (Bardini, 2013). The asphalt mixture's behavior is significantly affected by the rheological characteristics of the asphalt mastic (Bechara et al., 2008).

In the formation of asphalt mastic, the active portion of the filler mixes with the binder, increasing the consistency and cementing the larger parts, which provides changes in the binder's viscosity and elasticity (Traxler, 1937). The filler's function that will predominate depends on several factors: the granulometry of the aggregates, degree of compaction, the thickness of the binder film, and filler/binder ratio.

The filler influences the asphalt mixture's properties by increasing the mastic stiffness, decreasing thermal susceptibility, and increasing its stability. However, as pointed out by Faheem et al. (2008), Kavussi and Hicks (1997), and Zhu et al. (2018), the results of the interaction between the filler and changes in the mixture depend mainly on the type of filler (gradation and texture), its nature (mineralogical composition and physical-chemical

activity), and the content of filling material in the mixture.

### 3 | TYPES OF FILLER

There are different types of materials that have been used as filler in asphalt mixtures. Between them, limestone, cement, and aggregate dust are the most commonly used. In recent years, the replacement of mineral filler by waste materials, such as fly ash, glass powder, slag powder, brick powder, and waste concrete powder, has been studied (Taherkhani and Kamsari, 2020).

Among the sources and types of fillers, there are those derived from the aggregate's larger fractions, such as basalt powder, and industrialized ones such as lime, cement, and metakaolin. Basalt is a fine-grained eruptive igneous rock, known for its hardness between 4.8 to 7. Basalt is rich in magnesium and iron silicates and has a basic characteristic that can improve adhesion to the asphalt binder (Bernucci et al., 2007).

Additionally, the type of filler influences other characteristics of the mixture. According to Bardini (2013), Portland cement used as filler in dense asphalt mixes has a better behavior in terms of tensile strength concerning limestone powder, hydrated lime, and silica. For Barra et al. (2005), fillers' active behavior is not related to the size of the particles but mainly to their shape, surface texture, specific surface area, and mineralogical nature. On the other hand, Motta and Leite (2000) point out that the thinner filler must be associated with a lower filler-binder ratio because it will reduce the aggregate covering's thickness, changing the properties of the mixture.

In this context, metakaolin appears as an alternative for replacing fillers derived from natural rocks. Metakaolin is a very fine powder, characterized by particles with an average diameter of 12.4  $\mu\text{m}$ . However, this material has a pozzolanic characteristic, consisting basically of silica ( $\text{SiO}_2$ ) and alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in the amorphous phase, which can impair the adhesion characteristics of the mixture with asphalt binders.

### 4 | FILLER'S INFLUENCE ON THE PERFORMANCE OF THE MIXTURE PERFORMANCE

The presence of filler in the asphalt mixture modifies some physical-chemical properties of the mixture, affects the workability and flexibility during the mixing and compaction process and increases the optimal asphalt content due to the dust higher surface area and absorption potential (Zulkati et al., 2012). The addition of filler to the asphalt mix can affect the mastic response to the pavement's main defects, such as fatigue cracking and rutting (Taherkhani and Kamsari, 2020).

According to Liao et al. (2012), the addition of filler to asphalt concrete makes it stiffer and the filler particles interrupt the crack growth in the mastic, influencing the fatigue life of

the mixture. Besides, the filling material fills the voids in the mixture and promotes the best interaction between the mastic and the aggregates, leading to longer fatigue life Bardini (2013).

The resistance of asphalt mixture to permanent deformation is related to the stiffness of asphalt binder, mixture volumetrics, and the bonding interaction between asphalt binders and aggregate. The addition of filler, increases the stiffness of the mixture and improves its density and strength, consequently improving rutting resistance (Wang et al., 2011). Besides, the presence of filler decreases the mastic temperature susceptibility, which is an important characteristic for preventing rutting in hot regions pavements (Taherkhani and Kamsari, 2020).

## 5 | MATERIALS AND METHODS

A modified 65/90 petroleum asphalt concrete (CAP) and two types of fillers were used to carry out this work, derived from basalt powder and the other metakaolin. The first was obtained in a quarry in the city of Uberlandia, Brazil, and is a common material in road paving. Metakaolin is an industrialized product and was supplied by the company *Metacaulim do Brasil*, located in the city of Jundiai, Brazil. Table 1 shows the chemical characterization of this product according to the manufacturer's information. Note, from the analysis of Table 1 and 2, that metakaolin is a product consisting essentially of silicon oxide and aluminum oxide with high pozzolanic activity.

Element	%
SiO <sub>2</sub>	51.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.8
Na <sub>2</sub> O	0.08
K <sub>2</sub> O	0.18
Moisture	0.6
PF	2.62
Total	97.8
Alkaline equivalent	0.2
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94.87

Table 1 - Characteristics of metakaolin: chemical composition

Source: Adapted from Metacaulim do Brasil (2003).

Average diameter (µm)	12.4
Specific gravity (g/m <sup>3</sup> )	2.650
Pozzolanic activity at 90 ± 5 °C (mg CaO/g sample)	771.2

Table 2 - Characteristics of metakaolin: physical characterization and pozzolanic activity

Source: Adapted from Metacaulim do Brasil (2003).

As for the characterization of metakaolin by the Scanning Electron Microscopy (SEM), it appears that the material does not have a well-defined shape (Figure 1). Dispersive energy spectroscopy (EDS) was also performed on metakaolin. Results showed that the main chemical elements present in the material were predominantly silica and aluminum. Alves (2018) carried out in her work the metakaolin's diffraction characterization. The results indicated a crystalline kaolinite peak, and quartz appeared as the main mineral phase.

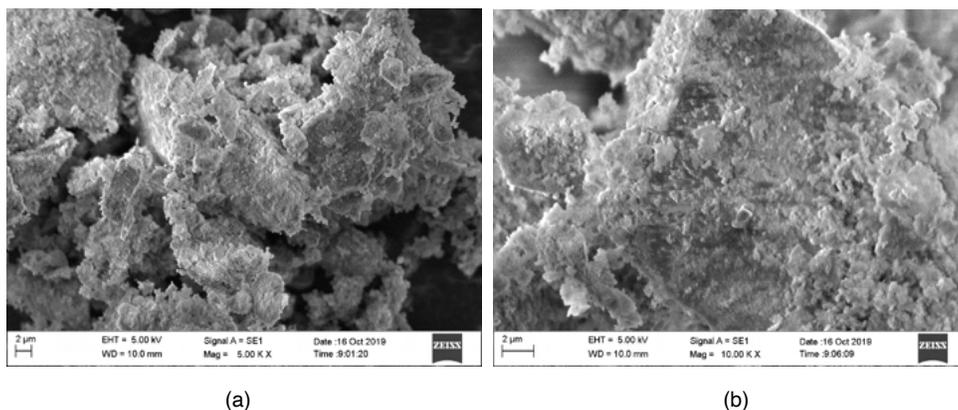


Figure 1 – Metakaolin SEM: (a) image magnified 5,000 times e (b) image magnified 10,000 times.

The filler's characterization derived from the basalt powder was made through SEM and a specific gravity test. The basalt-powder specific gravity was  $2.985 \text{ g/cm}^3$ . The SEM test results indicated that the basalt powder grain has a definite shape that resembles an angular aggregate. Figure 2 shows the image of a sample of basalt powder magnified 5,000 and 10,000 times. From the EDS test, it was possible to observe silica as the material's main chemical element.

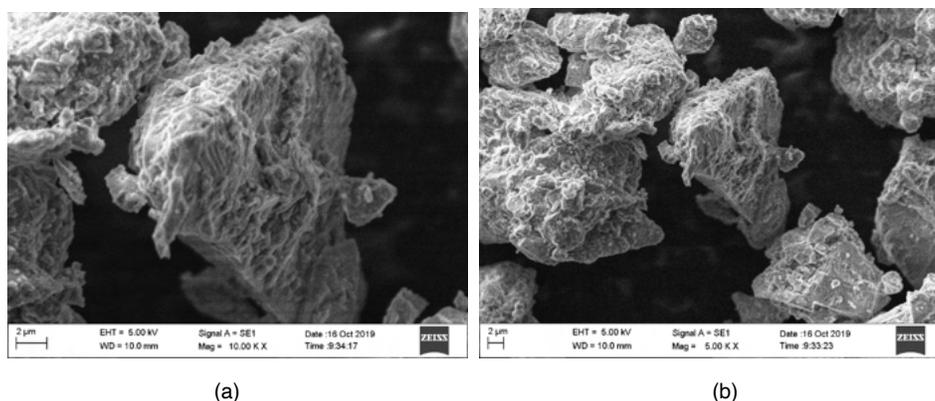


Figure 2 – Basalt powder SEM: (a) image magnified 5,000 times e (b) image magnified 10,000 times.

Dutra and Leandro (2020) performed X-ray diffraction tests (XRD) in the basalt powder and indicated an outstanding amount of silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ), and anorthite ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), and the presence of albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) and quartz. Anorthite and albite belong to the group of feldspar minerals called plagioclase. This group of minerals constitutes a complete isomorphous series.

Comparing Figures 1 and 2, it is possible to infer that the basalt powder filler particles are larger and have a smoother surface than the metakaolin. Besides, the metakaolin particles had sharp angles, different from the basalt powder ones that had round angles.

The asphalt binder was characterized in penetration, softening point, ductility, and elastic recovery, using ASTM standards. The supplier performed the asphalt binder viscosity and density tests, and the results are shown in Table 3.

Test	Unit	Result	Specification (ANP Resolution No. 32, 2010)
Softening point, minimum	°C	69,5	
Elastic recovery at 25°C, 20 cm, minimum	%	92,67	
Penetration (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	51,67	
Ductility	cm	73	
Brookfield Viscosity at 135°C, spindle 21, 20 rpm, max	cP	1883	≤ 3000
Brookfield Viscosity at 150°C, spindle 21, 50 rpm	cP	566	≤ 2000
Brookfield Viscosity at 177°C, spindle 21, 100 rpm	cP	220	≤ 1000
Density		1,006	

Table 3 – Results of the CAP viscosity and density tests performed by the product supplier

Following the recommended filler-to-binder mass ratio of 0.6–1.2 by the Superpave volumetric mix design method, the proportions of filler/asphalt to produce asphalt mastic were 0.6 and 1.2. The mixtures of each type of filler with the CAP were carried out by homogenization in the laboratory. Initially, the asphalt reached a temperature sufficient to allow its workability in an oven. The mix between the binder and dust occurred for 30 minutes in a mixing container, maintaining the temperature between 180 and 185 ° C. The mixing speed needs to be sufficient to create a central vortex without generating bubbles during the process, so it is important to control it. The introduction of filler was gradually at a rate of 10 g/min.

## 6 | RESULTS AND DISCUSSION

In order to analyze and evaluate the impact of the filler type and amount in the mixture, characterizations tests were made. Table 4 shows the results for CAP and mastics made with the two types of fillers. Table 5 shows the percentage changes in mastic results concerning pure CAP.

Test	Unit	CAP	Mastic with metakaolin		Mastic with basalt powder	
			Filler/asphalt ratio		Filler/asphalt ratio	
			0,6	1,2	0,6	1,2
Softening point, minimum	°C	69,5	76,2	89,5	73,1	79,5
Elastic recovery at 25°C, 20 cm, minimum	%	92,6	73,5	62,4	84	77,7
Penetration (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	51,6	20,6	8,25	26,9	22,1
Ductility	Cm	73	27,5	7,15	33,2	21,5
Temperature susceptibility index		2,85	1,77	1,82	1,87	2,36

Table 4: Test results on CAP and mastics made with filler derived from basalt powder and metakaolin.

Test	Mastic with metakaolin		Mastic with basalt powder	
	Filler/asphalt ratio		Filler/asphalt ratio	
	0,6	1,2	0,6	1,2
Softening point, minimum	9,7%	28,8%	5,2%	14,4%
Elastic recovery	-20,7%	-32,7%	-9,4%	-16,1%
Penetration	-60,1%	-84,0%	-47,9%	-57,1%
Ductility	-62,3%	-90,2%	-54,5%	-70,5%
Temperature susceptibility index	-37,9%	-36,3%	-34,6%	-17,3%

Table 5: Percentage variations of the test results in mastics made with filler derived from basalt powder and metakaolin compared to the modified CAP.

Table 4 shows that the insertion of the different types of fillers increased the hardness of the asphalt and reduced the elastic recovery, resulting in higher temperatures of softening point and less ductility of the mixtures. These effects were most evident for the most considerable amounts of filler. The temperature susceptibility index results were also significantly influenced by the insertions of different types of fillers in the CAP, mainly for the basaltic filler/asphalt ratio of 1.2, but without compromising the degree of sensitivity of the mixtures to high temperatures. Table 4 also indicated that doubling the metakaolin

amount resulted in a variation of about 4% in the temperature susceptibility index from the smallest to the most considerable dust amount. Besides, there was no significant difference between the two types of filler for the filler/asphalt ratio of 0.6. However, the more significant proportion of the basaltic filler resulted in a greater influence on the mastic's temperature susceptibility.

Tables 4 and 5 also show that the fillers' insertion promoted a more significant effect on the CAP's ductility and penetration than on the softening point results. It is also evident that metakaolin was more efficient in altering the properties of asphalt than basaltic filler. In general, the mastic produced with metakaolin results in a more rigid, less elastic, and less ductile mixture. Also, when molding the specimens and handling the mastics, it was noticed the loss of workability and increased viscosity of the mastics in comparison with CAP, especially for the mastic made with metakaolin. The more efficient absorption of this dust can explain the lower workability of metakaolin mixtures by the asphalt, which increases the effects of the filler in the mixture. This greater absorption occurs because of metakaolin's fineness and the fact that the proportions were made by weight. The basalt powder's actual specific mass is greater than that of metakaolin, which in volume is about 13% greater than that of the natural filler. The cementation reaction of metakaolin could not explain this behavior given the unavailability of calcium hydroxide and moisture in the mixture, which activates the pozzolanic characteristic's activating elements. Figures 3, 4, 5, and 6 show the results of penetration, softening point, elastic recovery, and ductility as the filler/asphalt ratio function.

The results from Tables 4 and 5 and Figures 3, 4, 5, and 6 give insights into the mixture's improvement regarding the main pavement distresses. With the addition of filler, the penetration test results decreased, as shown in Figure 3, indicating that the mastic stiffness increased. The increased stiffness and the high amount of filler particles that can prevent cracking growth in the mastic improve the fatigue life of the mixture. The softening point increased for both mixtures with metakaolin and basalt powder compared to the virgin binder (Figure 4). That indicates that the filler improved the thermal susceptibility of the mixture.

Thus, a stiffer mastic and less susceptible to temperature is ideal for preventing permanent deformation, especially in regions of a hot climate. However, there was a slight decrease in elastic recovery (Figure 5), which can be a problem if the deformations become nonreversible and increase permanent deformation. The ductility also decreased as filler is incorporated into the mixture (Figure 6), making the mastic more brittle.

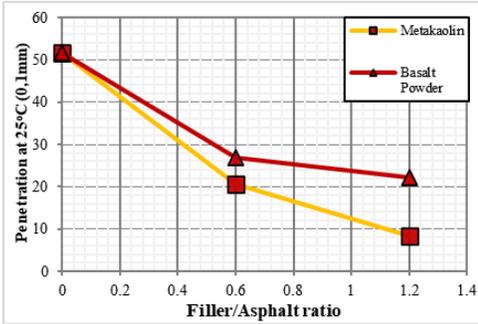


Figure 3 – Penetration results as a function of filler/asphalt ratio

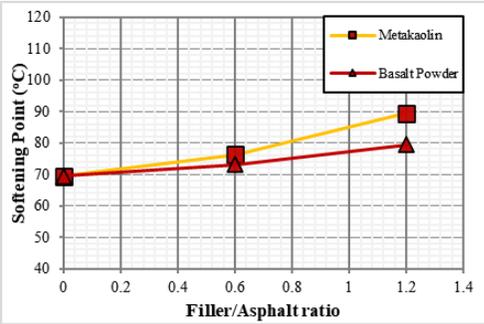


Figure 4 – Softening point results as a function of filler/asphalt ratio

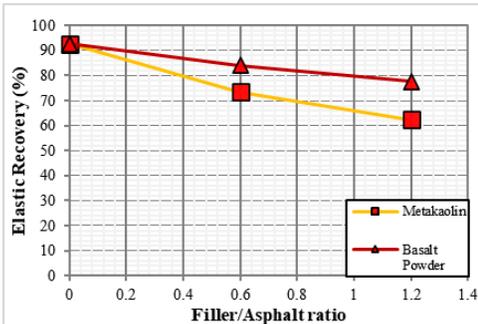


Figure 5 – Elastic recovery results as a function of filler/asphalt ratio

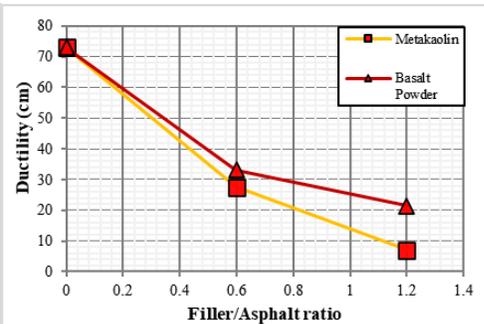
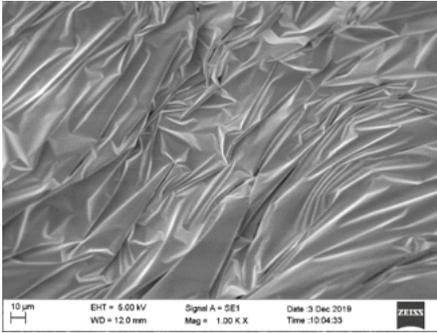


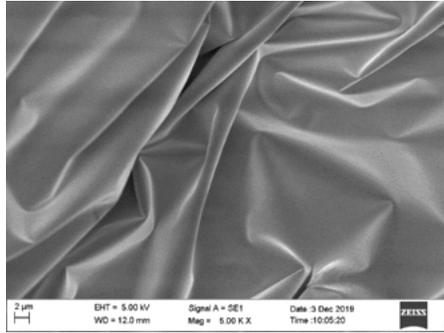
Figure 6 – Ductility results as a function of filler/asphalt ratio

The metakaolin additions' greater effectiveness as fillers is evident from the analysis of Figures 3, 4, 5, and 6. The rate of change in physical characteristics is always more remarkable than for the cases in which basalt powder is dust in the mastic. The highest variation rates occur for the lowest filler/asphalt ratio, regardless of the type of filler except for the softening point results.

From the SEM test, the visual changes that occurred in the binder were evaluated with the addition of metakaolin and basalt powder in the 1.2 filler/asphalt ratio. The CAP, shown in Figure 7, has a plastic aspect because a polymer modifies it. Also, the surface is very irregular.



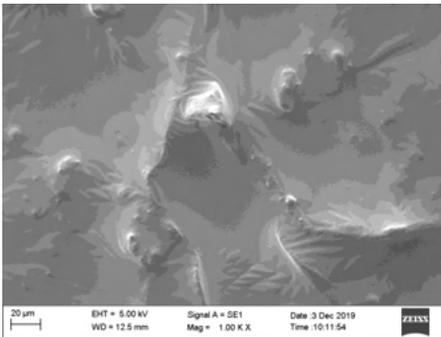
(a)



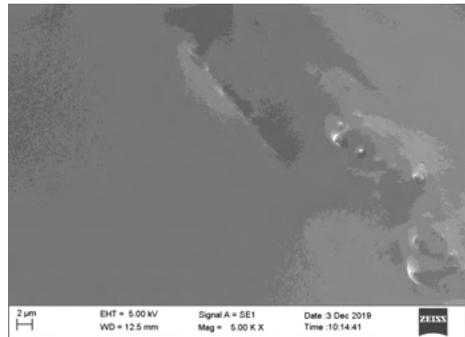
(b)

Figure 7 – CAP 65/90 sample SEM images: (a) magnified 1,000 times e (b) magnified 5,000 times

Figure 8 shows the SEM images for the mastic made with metakaolin with a 1.2 filler/asphalt ratio. The mixture is heterogeneous, and the matrix is more regular than that of the asphalt binder. There are some irregularities in the matrix that may have occurred due to particle agglomeration.



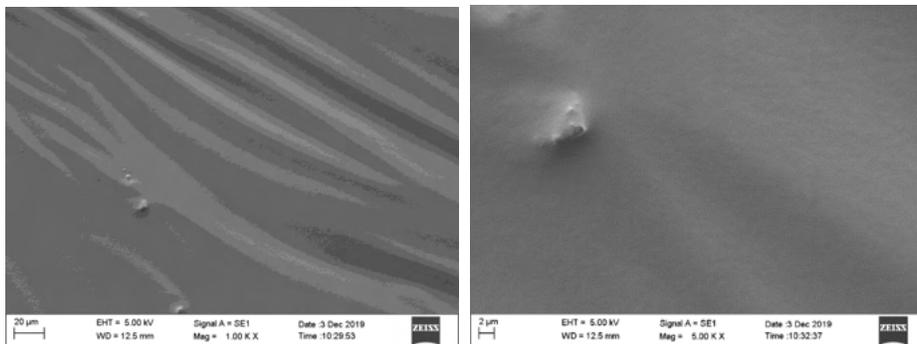
(a)



(b)

Figure 8 – Mastic with metakaolin sample SEM (filler/asphalt ratio = 1,2): (a) image magnified 1,000 times e (b) image magnified 5,000 times

The mastic made with filler derived from basalt powder in the 1.2 filler/asphalt ratio presents a more regular and more homogeneous matrix (Figure 9) than the metakaolin mastic. Some irregularities in the matrix may have occurred due to the particles' agglomeration, but in lesser quantities than in the mastic samples with metakaolin.



(a)

(b)

Figure 9 – Mastic with basalt powder sample SEM (filler/asphalt ratio = 1,2): (a) image magnified 1,000 times e (b) image magnified 5,000 times.

## 71 CONCLUSION

In summary, higher filling material content yield the following effects: lower penetration, higher softening point temperature, lower ductility, less elastic recovery, and reduced mixture workability. The stiffness increases and the high amount of filler particles in the mastic preventing cracking growth are strong evidence that the addition of filler improves mixture performance regarding fatigue life. Besides, the insertion of filler in mastic can also improve the mixture's permanent deformation performance since there was a decrease in temperature susceptibility and an increase in strength and stiffness. However, the increase of filler amount in the mixture ductility and elastic recovery decrease, making the mixture more brittle and increasing the probability of non-reversible deformation. Therefore, further studies are required to determine asphalt mixture rheology and the proper filler dosage.

Comparing the two types of fillers, it is evident that, for the same proportions, the metakaolin acted more efficiently in altering the CAP's physical characteristics. Asphalt mixtures with metakaolin are more rigid, less elastic, and have worse workability than mixtures with basaltic filler. These differences provided by using these two different fillers may be due to the shape of the particles verified in the SEM analysis. The SEM's results showed metakaolin particles surface rougher and sharper, which contributes to better adhesion and bonding with the asphalt-binder in the mixture. The greater volume of metakaolin associated with the smaller size of its particles may favor the occurrence of agglomerations in the interaction with the asphalt binder, contributing to the mastic's workability reduction when compared to mastics made with basaltic filler. Thus, it is expected that the asphalt mixtures produced with metakaolin will inherit the behavior verified for the mastics in this study, showing greater rigidity and less elasticity than the mixtures made with the basaltic filler.

The more significant effect of the metakaolin on the asphalt characteristics cannot be explained by the cementation reaction of the pozzolanic material because calcium hydroxide

and moisture, which activates the pozzolanic characteristic's activating elements, were not present in the mixture. Besides, due to this more intense effect on the asphalt mastic, this work's recommendation is the use of a lower metakaolin/asphalt ratio for the formation of mastics to minimize the damage in workability and not result in a product that is too rigid.

It is noteworthy that the interaction between fillers and asphalt should continue to be investigated by tests that assess the behavior of mastics under dynamic stresses, in addition to assessing the effects on mechanical behavior and moisture-induced damage of hot mix asphalt.

## DATA AVAILABILITY

All data, models, and code generated or used during the study appear in the submitted article.

Some or all data, models, or code generated or used during the study are available in a repository online in accordance with funder data retention policies.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Federal University of Uberlândia.

## REFERENCES

Alves L.C.S. (2018). **Geopolímero à base de metacaulim com adição de fibras de sisal**. Master's dissertation - Universidade Federal de Uberlândia, <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1233>.

Antunes V.F., Freire A.C., Quaresma L. (2016). **Influência do fíler no comportamento betuminoso**. 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil, Lisboa.

Bardini V.S.S. (2013). **Influência do Fíler mineral em Propriedades de Misturas asfálticas densas**. Doctoral's thesis - Programa de pós graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos.

Bardini V.S.S., Klinsky L.M.G., Fernandes J.L.J.R., Roque R. (2010). **A Importância do Fíler para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas**. Revista Minerva, <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i4.603>.

Barra B.S. (2005). **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com emprego de pó calcário**. Master's dissertation – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Bechara M.F., Faxina A.L.; Fabbri, G.T.P., Gigante A.C., Nascimento D.R. (2008). **Propriedades Reológicas de Mástiques Asfálticos a Altas Temperaturas**. 39ª Reunião Anual de Pavimentação, Recife/PE. Associação Brasileira de Pavimentação.

Bernucci L.B., Motta L.M.G., Ceratti J.A.P., Soares J.B. (2007). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, p.504.

DNER-ME 367/1997 (1997). **Material de enchimento para misturas betuminosas**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dner-em367-97.pdf>.

Dutra L.R., Leandro R.P. (2020). **Influência da degradação do agregado na permeabilidade de lastro ferroviários**. *Matéria* (Rio J.) [online], vol.25, n.4, e-12877, <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1177>.

Faheem, A., Wen, H., Stephene, L., and Bahia, H. (2008). **Effect of mineral filler on damage resistance characteristics of asphalt binders**. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 77, 885–908.

Kavussi, A.; Hicks, R.G. (1997). **Properties of bituminous mixtures containing different fillers**. Asphalt Association of Paving Technologists.

Liao M., Chen, J, and Tsou K. (2011). **Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures**. *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 24, Issue 7 (July 2012). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000450).

Motta L.M.G., Leite L.F.M. (2000). **Efeito do Fíler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas**. Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp 1007 – 1017.

Santana H. (1995). **Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e definições de Fíler em Misturas Asfálticas**. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá/MT. Associação Brasileira de Pavimentação.

Taherkhani K., Kamsari S.V. (2020). **Evaluating the properties of zinc production wastes as filler and their effects on asphalt mastic**, *Construction and Building Materials*, Volume 265, 120748, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120748>.

Traxler R.N (1937). **The Evaluation of Mineral Powders as Filler for Asphalts**. Asphalt Association of Paving Technologists.

Wang, H., Al-Qadi, I. L., Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S.-H., & Reinke, G. H. (2011). **Effect of Mineral Filler Characteristics on Asphalt Mastic and Mixture Rutting Potential**. *Transportation Research Record*, 2208(1), 33–39. <https://doi.org/10.3141/2208-05>

Zhu X., Du Z., Ling H., Chen L., and Wang Y. (2018). **Effect of filler on thermodynamic and mechanical behaviour of asphalt mastic: a MD simulation study**, *International Journal of Pavement Engineering*, DOI: 10.1080/10298436.2018.1535120

Zulkati A., Diew W.Y., Delai D.S. (2012). **Effects of Fillers on Properties of Asphalt-Concrete Mixture**, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, Issue 7 (July 2012). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000395](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000395)

## MASSA CERÂMICA À BASE DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA IMPRESSÃO 3D POR EXTRUSÃO

*Data de aceite: 01/08/2022*

*Data de submissão: 21/06/2022*

### **Márcia Silva de Araújo**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
DAMEC  
Curitiba - Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/5114251476191021>

### **Gabriel Elias Toledo Ferreira**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
DACOC  
Curitiba - Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/6579844692926494>

### **José Alberto Cerri**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
DACOC  
Curitiba - Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/5969194630840866>

**RESUMO:** Em busca de alternativas sustentáveis ao cimento Portland, um dos aglomerantes promissores é baseado na álcali-ativação de materiais com elevado teor de sílica. No Brasil, dentre os componentes dos resíduos de construção civil (RCC), a fração vermelha (FV) é composta por produtos cerâmicos, a qual predomina em relação à fração cinza. Resíduos que compõe fração vermelha como: tijolos, telhas, louças sanitárias e até solo de escavação são derivados de argilo-minerais e tem potencial para serem ativados alcalinamente, quando finamente moídos. Paralelamente aos estudos sobre cimento álcali-ativado, é crescente o

número de empresas em diversos países, que tem investido na produção de impressoras 3D de grande porte e em soluções construtivas utilizando essa tecnologia. A proposta deste trabalho é adaptar uma massa à base de pó de bloco cerâmico ativada com hidróxido de cálcio e adicionar argila com silicato de sódio, para adequá-la à manufatura aditiva por extrusão de massa. A capacidade de plasticização da argila foi avaliada pelo método de Pfefferkorn e por curvas de força versus deslocamento, obtidas em uma máquina universal de ensaios. Nessa máquina foi acoplada um aparato de extrusão sobre uma mesa de deslocamento 3D para obtenção de peças impressas. Foram também realizados ensaios de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos após 3 dias de cura. Bastaram 10% de argila para tornar a composição, de FV com cal, fluída o suficiente para impressão 3D. Foi verificada uma correlação linear entre a força de escoamento da massa e a quantidade de silicato na suspensão de argila. Os resultados de resistência mecânica à compressão dessa cerâmica atendem aos requisitos da norma brasileira de alvenaria de vedação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impressão 3D. Manufatura aditiva. Massa cerâmica. Resíduo de construção civil. RCC.

### CERAMIC PASTE MADE OF BUILDING WASTE FOR EXTRUSION-BASED 3D PRINTING

**ABSTRACT:** In search of sustainable alternatives to Portland cement, one of the promising binders

is based on the alkali-activation of materials with high silica content. In Brazil, among the components of construction and demolition waste (CDW), the red fraction (RF) is composed of ceramic products and prevails over the gray fraction. Products such as bricks, tiles, sanitaryware, and even excavation soil are derived from clay minerals and have the potential to be alkaline activated when finely ground. In parallel with the studies on alkali-activated cement, the number of companies, in several countries, which have invested in the production of 3D big printers and in solutions based on this technology has increased. The purpose of this work is to adapt a ceramic brick powder-based paste activated with calcium hydroxide by adding clay and sodium silicate, to use it in additive manufacturing by paste extrusion. The plasticization capacity was evaluated by the Pfefferkorn method and by force versus displacement curves, obtained by a universal testing machine to which an extrusion apparatus was attached to a 3D dislocation table to obtain printed parts. Compressive strength tests were also performed on cylindrical specimens after 3 days. 10% clay was enough to make the RF with lime composition fluid enough for 3D printing. A linear correlation was verified between the force edge to slip and the amount of silicate in the clay suspension used. The mechanical strength results of this ceramic have reached the Brazilian masonry standard requirements.

**KEYWORDS:** 3D printing. Additive Manufacturing. Ceramic paste. Building waste. CDW.

## 1 | INTRODUÇÃO

Apesar de todos os esforços da indústria cimenteira mundial para mitigar a liberação de  $\text{CO}_2$ , esse fato é inerente ao processo devido a descarbonatação do calcário, principal matéria-prima na fabricação de cimento. Outro componente do processo que libera  $\text{CO}_2$  é a queima de combustíveis fósseis, de resíduos industriais ou agrícolas, esses dois últimos utilizados no processo de co-geração. Alternativas ainda experimentais, incluem o direcionamento das emissões das chaminés dos fornos de clinquerização para fotobiorreatores com algas que fixam o  $\text{CO}_2$  no processo de fotossíntese. Esse processo fixa 2 toneladas de  $\text{CO}_2$  para tonelada de alga, as quais podem ser aproveitadas no manejo para produção de ração animal, fertilizantes ou como fonte de energia para fornos industriais. Dessa forma, esse setor industrial é responsável por 7% do  $\text{CO}_2$  gerado no planeta e, cerca de 2,6% no Brasil (CIRILO, 2019; ISTO É DINHEIRO, 2021).

Tendo em vista este cenário, a busca por materiais cimentantes alternativos de baixo carbono tem sido intensificada devido ao contexto da crise climática, tais como cimentos verdes baseados na conversão de resíduos em material cimentante. Um aglomerante alternativo ao cimento Portland são os sistemas geopoliméricos, desenvolvidos e patenteados por Davidovits (2013). Esse cimento apresenta desempenho superior ao cimento Portland, tais como: redução nas emissões de  $\text{CO}_2$ , elevada resistência a altas temperaturas, resistência química ao ataque de sulfatos e alta durabilidade (McLELLAN *et al.* 2011; ZAKKA, LIM e KHUN, 2021).

A ação pozolânica de matérias-primas ou resíduos com elevado teor de silício já é amplamente estudada. O cimento romano era confeccionado por meio da mistura

de cal, cinza vulcânica e água. O próprio nome pozolana advém da região italiana de onde se retirava a melhor matéria-prima para confecção de concreto, nos arredores de Pozzuoli. Entretanto, quando tal material se encontrava indisponível, a recomendação era que fossem utilizadas peças cerâmicas moídas (BLEZZARD, 2001). Matias *et al* (2014) reportam também que nas inspeções da argamassa de antigas construções romanas foi detectada a presença de argila tratada termicamente. Torgal e Jalali (2009) afirmam que todo material com alto teor de sílica é um potencial precursor de geopolímeros.

Uma fonte de material silicoso, de baixo custo, pode ser obtida nos resíduos de materiais cerâmicos de olarias, mas principalmente oriundo da fração vermelha dos resíduos de construção civil (RCC). Segundo Augusto Junior (2020) ao analisar estudos em diversos estados do Brasil, foi possível concluir que a fração vermelha do RCC, composta por resíduos de cerâmica vermelha, representa em média, cerca de 30% da composição. Segundo Garcia *et al.* (2015) estima-se que, por perdas, nos canteiros de obras e nas empresas cerâmicas, sejam gerados anualmente no Brasil, entre 4 e 6,5 milhões de toneladas de fração vermelha. Esses valores mostram o potencial desse resíduo como matéria-prima para produção de cimentos álcali-ativados, sendo uma solução tecnicamente viável também na gestão dos RCC.

A ativação alcalina de resíduos cerâmicos silicoso ou alumino mostra-se viável em diversos estudos (MACIOSKI, 2017, BEZERRA, 2014, HWANG *et al.*, 2019). Tuyan *et al.* (2018) reportaram que amostras de cerâmica moída ativada com 10% de hidróxido de sódio, obtiveram 36,2 MPa de resistência à compressão. Outros autores como Hwang *et al.* (2019), Cwirzena *et al.* (2014) e Li *et al.* (2016) relatam também a formação de  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (CSH) quando íons de cálcio estão presentes no sistema, sugerindo que o ganho de resistência pode ser obtido por intermédio desse meio alcalino.

Apesar dos vários sucessos já relatados, a dificuldade de desenvolver materiais cerâmicos álcali-ativados consiste na alta variabilidade dos compostos, principalmente quando as fontes de sílica advêm de produtos cerâmicos moídos. Estudos como os de RASHAD (2013), de SOARES *et al.* (2022), de RAKHIMOVA e RAKHIMOV (2019) utilizam silicato de sódio ou hidróxido de sódio ou ainda hidróxido de potássio e, matérias-primas de alto valor, como o metacaulim, o qual dificulta a aplicação em larga comercial.

Um outro aspecto que deve ser analisado juntamente com os cimentos álcali-ativados, é o crescente desenvolvimento no cenário mundial da tecnologia de impressão 3D para edificações (ALL3DP PRO, 2022). A aplicabilidade desta tecnologia em várias situações confere um ponto de inflexão na construção civil ou até mesmo, tem sido definida com potencial para se tornar uma tecnologia disruptiva. Existem aplicações deste método construtivo com custo viável (ICON, 2019; ALQUIST, 2022), embora no outro extremo já foram construídas residências por impressão 3D, avaliadas em US\$ 1 milhão (ALL3DP PRO, 2022b).

Macioski (2017) mostrou ser possível obter matriz de fração vermelha com resistência

mecânica satisfatória por meio da álcali-ativação de resíduos cerâmicos com hidróxido de cálcio devido a formação de C-S-H. O tratamento térmico é uma etapa a ser considerada no processo de álcali-ativação para potencializar o desempenho da resistência mecânica à compressão. Esse estudo propõe a álcali-ativação de resíduos provenientes de blocos cerâmicos utilizando hidróxido de cálcio como reagente ativador, bem como a adequação do comportamento da massa para impressão 3D pela introdução de argila e silicato de sódio.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados pó de bloco cerâmico com dimensão de partículas menor que 0,15 mm, referenciado no restante do estudo como fração vermelha (FV), cal hidratada dolomítica CH-III, fornecido pela empresa Hidra, argila utilizada em olaria e, solução de silicato de sódio C-112, fornecido pela empresa Bushle and Lepper com composição 32,5 - 38%  $\text{SiO}_2$ , 14,5 - 19,1%  $\text{Na}_2\text{O}$  e 51,20 - 53,00 % em peso de água, com relação molar [ $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ] entre 2,12 e 2,31 p/p. Os materiais são os mesmos utilizados no estudo de álcali-ativação por cal hidratada realizado por Macioski (2017), com exceção da argila e do silicato de sódio que foram adicionados para dar extrusabilidade a massa.

A análise da composição química por meio de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) da FV e da cal foi realizada por Macioski (2017). Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Óxidos	FV* (%)	cal* CH-III (%)	Argila (%)
$\text{SiO}_2$	52,6	1,3	59,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	30,0	0,1	34,3
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8,4	0,3	-
$\text{TiO}_2$	1,7	-	0,02
$\text{K}_2\text{O}$	0,9	-	0,18
$\text{MgO}$	0,8	25,2	-
$\text{CaO}$	0,5	46,4	-
$\text{SO}_3$	< 0,1	< 0,1	0,35
$\text{MnO}$	< 0,1	< 0,1	-
$\text{ZrO}_2$	< 0,1	-	-
$\text{Na}_2\text{O}$	< 0,1	-	-
Cl	-	< 0,1	-
$\text{K}_2\text{O}$	-	< 0,1	-
$\text{SrO}$	-	< 0,1	-
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	< 0,1	-

Tabela 1 - Composição química por FRX

\*Fonte: Macioski (2017)

As composições e respectivos teores de água utilizados no experimento para definir o procedimento de mistura mais eficientes estão apresentados na Tabela 2.

	FV (g)	Argila (g)	Cal (g)	Restante adicionado (g)	Total (g)
Mistura a seco	0,00	0,00	57,93	49,60	107,53
FV úmida e Argila seca	37,70	0,00	58,17	11,69	107,56
FV seca e Argila dispersa	0,00	11,91	59,25	36,50	107,66
FV úmida e Argila dispersa	37,08	11,92	58,89	0,00	107,89

Tabela 2 - Quantidade de água adicionada a cada componente da pasta

Após o estudo do método de mistura, as suspensões de argila em silicato de sódio foram estudadas quanto ao comportamento reológico utilizando um viscosímetro Brookfield DV-DIII. A análise foi realizada com soluções contendo 60 % de argila, com adições de silicato de sódio que variaram de 0,11 % a 1,5 % em massa em relação à parcela de argila.

No preparo das massas foi usada uma argamassadeira para garantir homogeneidade. As composições preparadas têm as proporções indicadas no Tabela 3.

	Argila (g)	H <sub>2</sub> O na Argila (g)	Cal (g)	H <sub>2</sub> O de Hidratação (g)	FV (g)	Silicato de Sódio (%)	H <sub>2</sub> O Faltante (g)
1	28,45	18,72	115,60	96,09	255,96	0	57,19
2	28,45	18,91	115,60	91,29	255,96	0,11	61,80
3	28,45	19,24	115,60	94,04	255,96	0,21	58,72
4	28,45	19,21	115,60	92,77	255,96	0,21	60,02
5	28,45	22,36	115,60	91,75	255,96	0,32	57,89
6	28,45	19,35	115,60	92,49	255,96	0,42	60,16
7	28,45	18,79	115,60	93,62	255,96	0,42	59,59
8	28,45	19,32	115,60	91,06	255,96	0,49	61,62
9	28,45	19,47	115,60	92,02	255,96	0,63	60,51
10	28,45	18,98	115,60	91,22	255,96	0,74	61,80

Tabela 3 - Quantidade de água adicionada em cada componente da massa

Posteriormente, foi determinado o índice de plasticidade da massa com o Plasticímetro de Pfefferkorn.

Os corpos de prova cilíndricos com 16 mm de diâmetro e 32 mm de altura foram usados no ensaio de resistência de compressão axial, realizado pela máquina universal de ensaio EMIC numa taxa de incremento de 0,25 MPa/s. O teste de Fisher foi usado para

comparar as médias com um nível de significância de 0,05 %, letras diferentes indicam médias estatisticamente diferentes.

Para imprimir as peças e captar as curvas força por deslocamento foi utilizada uma mesa de deslocamento 3D desenvolvida por Silva e Gnoato (2018), a qual está acoplada a uma máquina universal de ensaios EMIC DL 10.000, responsável por aplicar pressão de extrusão em um sistema reservatório-êmbolo.

Três requisitos devem ser atendidos para impressão por extrusão de massa: (a) extrusabilidade; (b) resistência mecânica; (c) qualidade da peça.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo a dar plasticidade a composição desenvolvida por Macioski (2017), composta FV e cal, para impressão 3D por extrusão, foi adicionada argila gorda, usada para a fabricação de tijolo, em substituição de 10, 20 e 30% de fração vermelha, o efeito sobre a plasticidade e a resistência mecânica pode ser observado na Figura 1 e na Tabela 4.

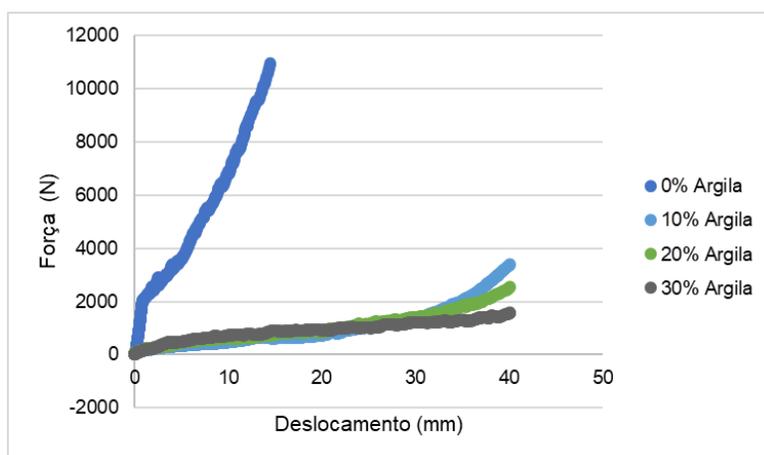


Figura 1 - Força versus deslocamento da massa no pistão da extrusora com diferentes adições de argila

Sem argila a composição apresenta exsudação de água e não tem extrusabilidade. A introdução de argila na composição reduz a força de extrusão de 92 a 88 % com relação a amostra sem argila, sendo que com 10% de argila já foi possível observar um platô de escoamento.

Argila (%)	Tensão Máxima (MPa)	Plasticidade
0	0,5*	3
10	0,96a	3,5
20	0,72b	3,1
30	0,86ab	3,3

Tabela 4 – Resultados da substituição de FV por argila

\* Macioski (2017).

Não houve uma tendência clara de aumento da resistência mecânica à compressão após 3 dias de cura com relação à quantidade de argila, ficando entre 0,7 e 1 MPa, sendo um pouco maiores do que o valor observado sem argila. O valor do teste de Chapelle da FV feito por Macioski (2007) foi de 300 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de amostra, a de argila gorda foi de 383,4 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de amostra. Apesar de maior o valor da argila, nem ela nem a FV são consideradas material pozolânico, visto ser o valor mínimo para tal igual a 436 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$  por grama de pó cerâmico. A substituição de 10 % de FV por argila foi escolhida para dar continuidade ao estudo.

Os resultados obtidos na primeira etapa do estudo para definir o método de preparação dos compostos podem ser vistos na Tabela 5.

	Umidade (%)	Plasticidade	Resistência à compressão (MPa)
Mistura a seco	41,62	1,9	1,45 <sup>a</sup>
FV úmida e Argila seca	40,69	2,0	1,18ab
FV seca e Argila dispersa	37,92	2,1	1,29ac
FV úmida e Argila dispersa	40,15	2,1	1,20bc

Tabela 5 - Resultados das condições de mistura

Percebe-se que a mistura a seco apresentou a menor plasticidade associada a maior resistência à compressão. Entretanto, o teste F indicou que não há diferença estatística significativa entre essa amostra e as outras, isso porque a variância da amostra foi muito alta. Contudo, quando a FV é adicionada seca com a argila previamente umedecida, o material apresenta a melhor relação entre resistência à compressão e plasticidade. Portanto, este método foi considerado o mais adequado para obter as amostras para os experimentos de impressão. Uma vez que o método no qual se mistura FV seca com a argila dispersa foi o escolhido, para melhorar ainda mais o efeito da argila, foi definido utilizar a suspensão de argila defloculada com silicato de sódio. Assim, foi necessário determinar o comportamento reológico em função da concentração de silicato de sódio, cujos resultados são apresentados na Figura 2.

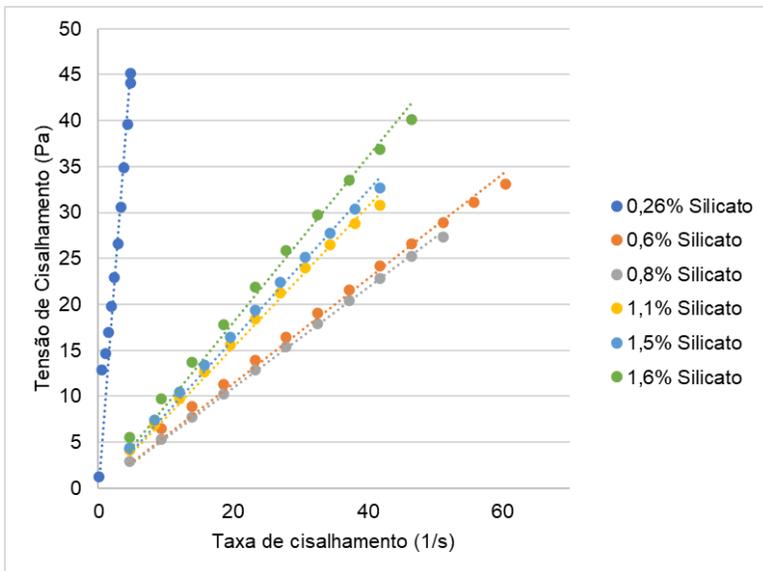


Figura 2 - Comportamento reológico de suspensão de argila com silicato de sódio

Todas as suspensões apresentaram comportamento de fluido Newtoniano, visto que apresentaram uma relação linear entre tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e taxa de cisalhamento ( $dv/dy$ ), definida pela Equação 1.

$$\tau = \mu \frac{dvx}{dy} \quad (1)$$

As composições que apresentaram menor viscosidade ( $\mu$ ) foram as de 0,8% e 0,6% de silicato de sódio em relação à massa de argila, como pode ser constatado na Tabela 6.

Silicato de Sódio (%)	Viscosidade (Pa.s)	R <sup>2</sup>
0,26	9,4636	0,9901
0,6	0,5692	0,9985
0,8	0,5447	0,9998
1,1	0,7683	0,9990
1,5	0,8101	0,9991
1,6	0,9004	0,9983

Tabela 6. Viscosidade e coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>) calculadas a partir das retas apresentadas na Figura 2

Antes da impressão foi medido o índice de plasticidade Pfefferkorn, apresentado na Tabela 7, a qual também mostra os valores de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos maciços após cura por 3 dias.

Silicato de Sódio (%)	Plasticidade Pfefferkorn	Resistência à compressão (MPa)
0	5,33	1,64 a
0,11	5,71	2,62 b
0,31	5,71	-
0,42	4,53	1,89 ac
0,63	2,50	2,12 c
0,74	4,44	2,54 bc

Tabela 7 - Resultados do efeito do silicato de sódio

As amostras com 0,63 e 0,74 % de silicato de sódio apresentaram menores valores de plasticidade da massa fresca, sendo o ideal entre 3 e 5. Os valores de resistências mecânicas após 3 dias de cura das amostras 0,42, 0,63 e 0,74 % foram considerados estatisticamente iguais. Não se esperava mudanças significativas de resistência à compressão, porque não houve mudança nas relações molares  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  (2,6),  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (3,0), nem  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  (0,9). Entretanto, todas as amostras atenderam aos valores referenciais de resistência à compressão de 1,5 MPa da NBR 15270-1 / 2017, “Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria”.

Os primeiros testes de impressão mostraram a necessidade de deposição da massa com diâmetro de camada menor ao diâmetro do bico extrusor. Esse procedimento resultou em camadas achatadas durante a impressão para provocar estabilidade dimensional entre as camadas, conforme mostrado na Figura 3.

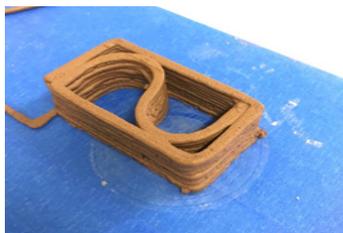


Figura 3 - Peça recém impressa com achatamento dos filamentos

Um aspecto relevante observado foi a exsudação da água durante o processo de impressão, devido ao empacotamento das partículas, como mostrado na Figura 4. A composição cerâmica carece ainda de um aditivo para reter a água da mistura durante a compressão, ou, de que seja usado um cabeçote de impressão com uma rosca sem fim para o transporte da massa até o bico.



Figura 4 - Perda de água na junção do êmbolo com o cilindro do reservatório

Simultaneamente à impressão do corpo de prova foi feito o registro da força necessária para deslocar o êmbolo a uma taxa constante, como explicado por Silva *et al.* (2018). As curvas obtidas podem ser vistas na Figura 5.

No início é possível observar um comportamento linear, até atingir a força necessária para o escoamento plenamente desenvolvido. Essa força de escoamento foi medida e plotada em relação a concentração de silicato de sódio, Figura 6, cujo comportamento resulta em uma relação linear.

Com o prosseguimento do ensaio, ocorre o aumento da força devido ao aumento do empacotamento das partículas e a exsudação da água, o que reduz a plasticidade. Pelos gráficos mostrados nas Figuras 5 e 6, a composição com 0,74% de silicato de sódio apresentou a menor força de escoamento, um resultado previsível, visto que está entre as menores viscosidades determinadas na curva de defloculação.

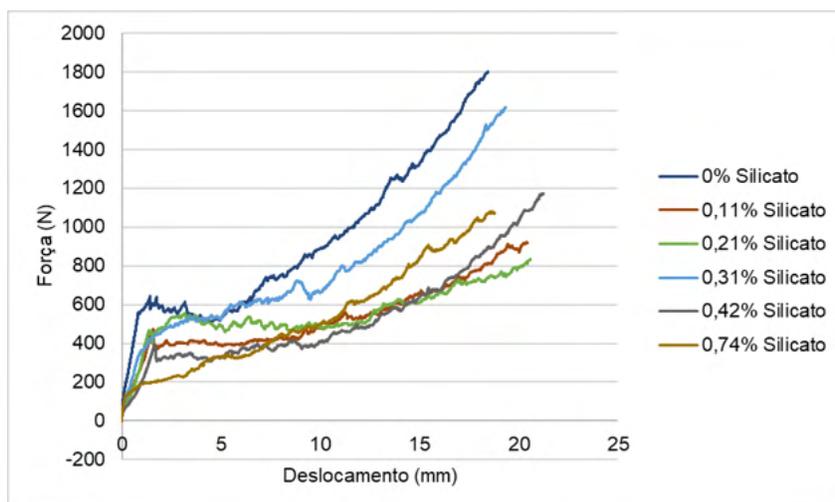


Figura 5 - Força versus deslocamento da massa no reservatório em função da concentração de silicato de sódio

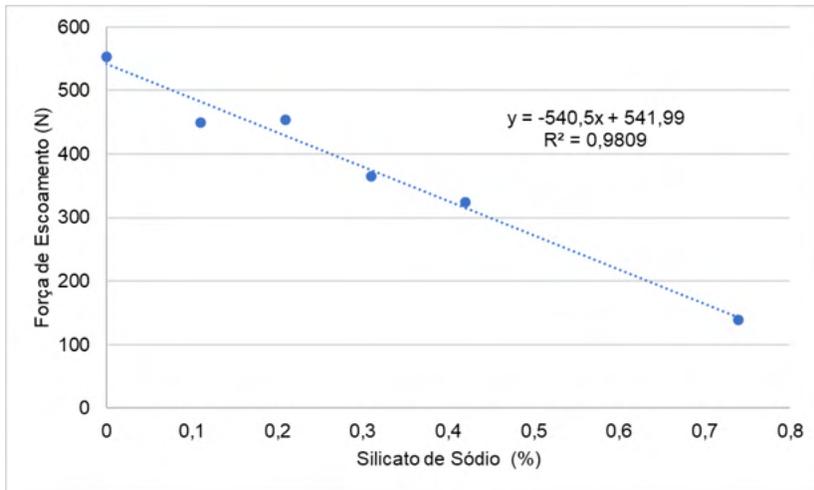
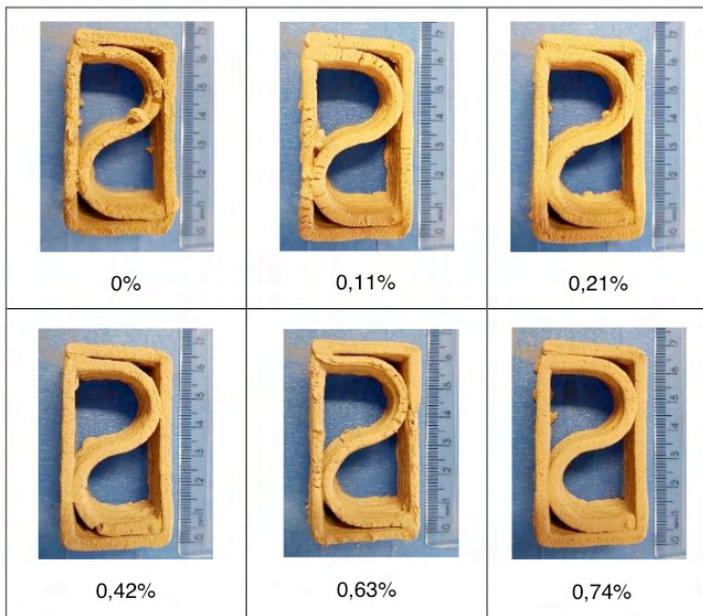


Figura 6 - Correlação entre força de escoamento e concentração de silicato de sódio

Quanto à qualidade das peças impressas, observa-se que após período de cura, um dos maiores desafios está em garantir a integridade das amostras. Depois da cura algumas amostras apresentam muitas fissuras, provavelmente devido a retração de secagem. As fotos das peças podem ser vistas no Quadro 1.

A composição com 0,74% de silicato de sódio foi a de melhor aparência, sem fissuras ou irregularidades superficiais, atingindo os três requisitos para a confeccionar as peças com a massa cerâmica: (a) extrusabilidade; (b) resistência mecânica e, (c) qualidade da peça impressa.



Quadro 1. Amostras impressas curadas com diferentes quantidades de silicato de sódio

## 4 | CONCLUSÕES

Quanto ao procedimento para preparação da massa de impressão 3D, por meio dos resultados obtidos conclui-se que é a homogeneização do pó de bloco cerâmico seco com a argila dispersa em água com silicato de sódio, potencializando o comportamento plasticizante.

A resistência mecânica à compressão das amostras com 10% de argila e silicato de sódio apresentaram todos os valores acima de 1,5 MPa.

Pode-se destacar o fato de que bastaram 10% de argila para tornar a composição de FV com cal fluida, o suficiente para uma adequada impressão 3D. Contudo, houve dificuldades em obter uma massa coesa, pois não se deve negligenciar a exsudação de água durante a extrusão, bem como a fissuração das massas após cura das amostras. Para obter uma peça, houve a necessidade de achatamento da camada impressa para melhorar a adesão e estabilidade das camadas subsequentes. Um dos resultados mais importantes foi a relação linear entre a força de escoamento e a quantidade de silicato durante o processo de impressão. A melhor composição obtida continha 0,74% de silicato de cálcio, a qual se encontra na faixa de menor viscosidade da suspensão de argila, entre 0,6 e 0,8%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Fundação Araucária pela bolsa de iniciação tecnológica, ao técnico Felipe Perretto e aos estagiários de engenharia mecânica: Lucas Elias Caldart da Silveira e Bianca Bassetto Thiago pela ajuda.

## REFERÊNCIAS

ALL3DP PRO - **A rising trend: the top 8 companies building 3D printed houses**. Disponível em: [https://all3dp.com/2/best-companies-building-3d-printed-houses/?utm\\_source=push](https://all3dp.com/2/best-companies-building-3d-printed-houses/?utm_source=push) (2022). Acesso em 20/06/2022.

ALL3DP PRO b - **Luxury 3D Printed House Redefines Expectations**. Disponível em: <https://all3dp.com/4/luxury-3d-printed-house-redefines-expectations/> (2022). Acesso em 20/06/2022.

ALQUIST - **Project Virginia**. Disponível em: <https://www.alquist3d.com/projectva> (2022). Acesso em 20/06/2022.

AUGUSTO JUNIOR, J. - **Reciclagem e caracterização de resíduos cerâmicos de construção civil para aplicação como adição pozolânica como componente de clínquer visando novos cimentos**. 168f. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2020.

BEZERRA, I. M. T. **Desenvolvimento de corpos cerâmico utilizando ativação alcalina no resíduo da cerâmica vermelha**. 109f. Tese (doutorado), Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2014.

BLEZZARD, R.G. The history of calcareous cements, **Lea's Chemistry of cement and concrete**. In: HEWLETT, P. C. ed. Butterworth-Heinemann. Oxford, p 1 - 23, 2001

CIRILO, F., In: **ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland** "Redução na emissão de CO<sub>2</sub> é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento. Disponível em: <https://abcp.org.br/reducao-na-emissao-de-co2-e-sinonimo-de-competitividade-na-industria-global-do-cimento/>, 2019. Acesso em 16/06/2022

CWIRZENA, A.; PROVISO, J. L.; PENTTALAA V.; HABERMEHL-CWIRZENA, K. - The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 53-62, 2014.

DAVIDOVITS, J. - **Geopolymer Cement Review 2013**. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/21-geopolymer-cement-review-2013/>. Acesso em 20 de mar. 2020.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v.61, n.358, p. 251-258, jun. 2015.

HWANG, C. L.; YEHALAW, M. D.; VO, D.-H.; HUYNH, T.-P. Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 519-529, 2019.

ICON - ICON + New Story + ECHALE Unveil **First Homes in 3D-Printed Community**. Disponível em: <https://www.iconbuild.com/updates/icon-new-story-echale-unveil-first-homes-in-3d-printed-community>, 2019. Acesso em: 20/06/2022.

ISTO É DINHEIRO - **O concreto: terceiro maior emissor mundial de gases de efeito estufa**.

Disponível em: <https://www.istoedinheiro.com.br/o-concreto-terceiro-maior-emissor-mundial-de-gases-de-efeito-estufa/>, 2021. Acesso em: 16/06/2022

LI, H.; DONG, L.; JIANG, Z.; YANG, X.; YANG, Z. - Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls. **Journal of Cleaner Production**, v.133, p. 1017-1026, 2016.

MACIOSKI, G. **Estudo da álcali-ativação de pó de blocos cerâmicos com cal hidratada**. 2017. p. 174. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

McLELLAN, B. C.; ROSS, P. W.; LAY, J.; RIESSEN, A. V.; CORDER, G. D. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v.10, 2021.

MATIAS, G.; FARIAS, P.; TORRES, I. Lime mortars with ceramic wastes: characterization of components and their influence on the mechanical behavior. **Construction and Building Materials**. v.73, p 523 - 534, 2014.

RAKHIMOVA, N. R.; RAKHIMOV, R. Z. - Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials - a review. **Journal of Materials Research and Technology**, 8(1), p. 1522 - 1531, 2019.

RASHAD, A. M. - Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer – An overview. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 751 - 765, 2013.

SOARES J. C.; AZEVEDO A. S.; DIAS D. P. - Effect of temperature on metakaolin-quartz powder geopolymer binder with different combinations of silicates and hydroxides. **Case Studies in Construction Materials**. v.16, 2022.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **Ligantes obtidos por ativação alcalina**. Universidade de Minho, Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, p. 152, 2009.

TUYAN, M.; ANDIÇ-ÇAKIR, Ö.; RAMYAR, K. Effect of alcali activator concentration and curing condition on strenght and microstructure of waste clay brick poder-based geopolymer. **Composites Part B: Engineering**, v.135, p. 242-252, 2018.

ZAKKA, W. P.; LIM, N. H. A. S.; KHUN, M. C. A Review: A scientometric review of geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production**, v.208, p. 1-24, 2021.

ZAWRAH, M. F.; GADO, R. A.; NELTIN, N.; DUCOURTIEUX, S.; DEVOILLE, L. Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. **Process Safety and Environmental Protection**, p. 237-251, 2016.

## VALORIZATION OF SLATE WASTE TO PRODUCE MATERIALS CERAMICS AND COMPOSITES

*Data de aceite:* 01/08/2022

*Data de submissão:* 03/07/2022

### **Luciana Boaventura Palhares**

Federal Center for Technological Education of  
Minas Gerais – CEFET  
Belo Horizonte, MG, Brazil  
<http://lattes.cnpq.br/1279991367828978>  
<https://orcid.org/0000-0001-6887-9101>

### **Douglas Filipe Galvão**

Federal University Of Ouro Preto – UFOP  
Ouro Preto, MG, Brazil  
<http://lattes.cnpq.br/9560621782404376>

### **Tayna E. B. Lucena**

Aterra Ambiental  
Belo Horizonte, MG, Brazil  
<http://lattes.cnpq.br/1725666219364471>

### **Sthefany B. P. da Silva**

Conselho Regional de Química  
Belo Horizonte, MG, Brazil  
<http://lattes.cnpq.br/0289944615377049>

**ABSTRACT:** In slate extraction industries, mining and rock refining activities, up to the processing of products, generate a large quantity of tailings (~75% of the extracted rock). The block extraction for the production of slabs, floors and roofs generates a chip, dust or mud-shaped residue, composed mainly by water, lubricants and slate. This waste, which does not have a defined destination, accumulates in landfills, reservoirs and close to riverbeds, ensuing in technical,

economic, environmental and social problems. Due to the physical and chemical properties of slate, the generated waste has great prospects for recovery and recycling in ceramic processing. This research showed four uses to slate waste and the properties of the products produced.

**KEYWORDS:** Slate waste, characterization, processing, new materials, civil construction.

## 1 | INTRODUCTION

Mining is an activity that over the years has proven to be of paramount importance for development of the regions involved, as well as for the whole country, both for generating the raw material used on a large scale in various segments of industry and commerce, as well as for generating a net of jobs in the region where it is practiced and further, thus boosting development of the economy in various scales.

However, mining companies often do not properly dispose of their waste, causing their activities to become increasingly harmful to the local ecosystem. The residue generated by the extraction of slate, for example, as well as its processing, can have several heavy impacts on the environment. Industries that process these rocks have as their main activity sawing and polishing them for the production of plates, generally used in the civil construction industry.

The system of extracting rock blocks to produce plates generates a significant amount of waste in the form of sludge, basically composed

of water, lubricants and ground rock. This undestined waste accumulates in yards, landfills, reservoirs and streams, compromising the environment (Figure 1).

According to the Brazilian Association of the Ornamental Stone Industry (ABIROCHAS, 2021), until 2019, Brazil was the third largest exporter of slate products, losing this position to Turkey in 2021. Minas Gerais remains being the main producer state, accounting for about of 90% of its extraction.

In 2016, slate production in Minas Gerais totalled approximately 200,000 tons/year, distributed into sheets, tiles, billiard tops, tiles and other products, reaching a US\$ 21 million exportation rate (MME, 2019).

In 2021, Brazilian production of ornamental and cladding stones totalled around 10.2 million tons, of which 0.5 million were slates, with 6.5% consumed domestically (ABIROCHAS, 2021). In the quarries of ornamental and cladding rocks, there happens a significant loss in mining stages. Although the exploration has registered a technological evolution in the extraction process, there are still accountings of large quantities of tailings deposited in the mines which, on average, reach significant values, up to the order of 60% of the total of the material extracted in the mining fronts.



Figure 1: Mining area with the presence of tailing piles.

Source: APL, 2006.

The main environmental problems caused by the production of slate are mainly linked to three factors: reduced rate of use in mining and processing, which is also seen in other slate producing centres worldwide; low value aggregation to the commercial products elaborated, which reduces the attractiveness of business investments; and not using the scrap material in mining and processing, for various industrial uses (FILHO CHIODI, et al,

2014).

The main focus of slate extraction and processing in Minas Gerais is the city of Papagaios (60% of the total production), with gray slates (mostly). The deposits are mined in the open, on slopes and in pits. The pits have a regular and normally flat floor due to the horizontal cleavage. 137 dump piles were registered, accumulating almost 100 million tons of mining and industrial tailings (FILHO CHIODI, et al, 2014).

The production of alternative materials, having as constituents the waste generated in the rock transformation industries, can reduce and even aim to eliminate pollution in the extraction areas, as well as to promoting the emergence of new careers, job opportunities and profits, essential to progress and development, locally, regionally and nationally. Many authors CATARINO et al. (2003); PALHARES et al. (2004); CAMBRONERO et al. (2005); PALHARES et al. (2012); FRÍAS et al. (2014), among others, have studied the production of industrial and commercial pieces with slate residue through traditional ceramic processes such as pressing, extrusion and bonding, in addition to the insertion of these residues in concrete and mortars.

The civil construction industry is the human activity with the greatest environmental impact. The sector is the biggest extractor of natural resources in the world, and biggest polluter. It is the largest consumer of natural raw materials (up to 50% of the total resources), involves processes with high energy consumption (of which, about 80% of the energy used in the execution of a structure is consumed in the production and transport of materials), generates pollution in almost all of its processes (from the extraction of raw materials to the production of inputs, such as cement and concrete), and even finished and being used, buildings cause numerous environmental impacts, there being data acknowledging that the volume of resources consumed in the maintenance of a building is practically equivalent to that consumed during its construction.

The present work aims to show results of alternatives for the use of waste from quarries and sawmills in various products/processing that can be used in civil construction and other applications. In addition, they can generate revenue for slate extracting companies and reduce the environmental impact caused by the disorderly deposition of these materials. The application and use of these products in the civil construction sector will contribute to reducing the discomfort caused by a sector known as one of today's society main foes and reduce the clay and sand extraction in world.

The slate residue used was generated in the extraction and processing site of the Micapel Slate company in Pompéu – Minas Gerais - Brazil. In previous work the author showed the characterization of slate powder in terms of morphology, crystallography, chemical, thermal and mineralogical analysis, to verify the minerals present in the rock.

## 2 | USE OF SLATE WASTE

### 2.1 Production of ceramic bricks via extrusion

The traditional ceramic industry is one of the most prominent in the recycling of industrial waste, due to its high production volume that allows the consumption of large amounts of waste and that, combined with the physicochemical characteristics of the raw materials ceramic and the particularities of ceramic processing, makes the ceramic industry one of the great options for recycling solid waste. Furthermore, it is one of the few industrial areas that can benefit from its production process by incorporating waste into its raw materials, such as saving high quality raw materials, which are increasingly scarce and expensive, the diversification of supply of raw materials, and the reduction of energy consumption and, consequently, reduction of costs, the growing volume of solid waste, which puts public health at risk, occupies space and degrades natural resources.

The Brazilian traditional ceramic sector is the main supplier of materials for masonry and roofing for residential and commercial use and the ceramics companies are distributed throughout all regions of Brazil. According to the Ministry of Mines and Energy in the Statistical yearbook MME (2014), the sector is made up of 9,071 companies, with annual revenues exceeding R\$ 18 billion. Most of them are small companies, being a sector traditionally known for family management. The segment represents 4.8% of the civil construction industry and generates around 300 thousand direct jobs and 1.5 million indirect ones. Monthly, more than 4 billion sealing and structural blocks and 1.3 billion tiles are produced (ANICER, 2018).

Considering the average weight of a ceramic product (brick or tile) as 2Kg, and the incorporation of 30% of waste, it is possible to estimate the recovery of approximately 3 million tons of slate waste per month.

The ceramic bricks were produced in an extruder at Jacarandá Brick Enterprise, headquartered in Ribeirão das Neves – Minas Gerais - Brazil, in a traditional extruder for small-sized ceramic materials.

Pastes were produced from slate and clay powders, according to Table I. After the ceramic mass was formed, the pastes were molded in an extruder. Subsequently, the blocks were burned in a muffled furnace at a temperature gap of 900°C to 1000°C. Afterwards, the pieces were characterized in terms of mechanical and physical behaviour, according to NBR 15270-3 standards.

Designation	Clay	Slate
Formulation I	100	-
Formulation II	80	20
Formulation III	70	30

Table I: Designations for formulations (Palhares, et.al., 2012).

Table II presents the results obtained during the physical and mechanical characterization of the specimens worked at the temperature gaps between 900°C and 1000°C.

Formulation	Water Absorption (%)		Linear Retraction (%)		Mechanical Resistance (MPa)
	900°C	1000°C	900°C	1000°C	1000°C
I (100%clay)	23,0	21,9	13,6	16,1	1,79
II (80%clay/20%slate)	19,9	18,9	8,4	9,6	2,53
III (70%clay/30%slate)	21,8	20,2	9,7	15,2	2,33

Table II: Physical and Mechanical Characterization of parts produced as a function of burning temperature. (Palhares, et.al., 2012).

In general, water absorption and shrinkage after burning have the same configuration for the temperatures under study. Higher amounts of slate in the ceramic mass led to a decrease in the levels of water absorption and shrinkage when related to the ceramic mass without the presence of residues.

By increasing the burning temperature, a glassy phase is formed, which is responsible for closing the pores, causing a decrease in the piece's water absorption. The absorption values presented are within the NBR 15270-3 standards specified for red ceramic (AA ≤ 22%).

The addition of slate (20%) decreased the linear shrinkage rate compared to the regular ceramic brick. It is suggested that these residues improve the pieces' permeability, improving the drying and burning processes. The same amount of slate increased the object's strength by 41%. Figure 2 shows the bricks in green state (before thermal treatment) (A) and after thermal treatment (B).

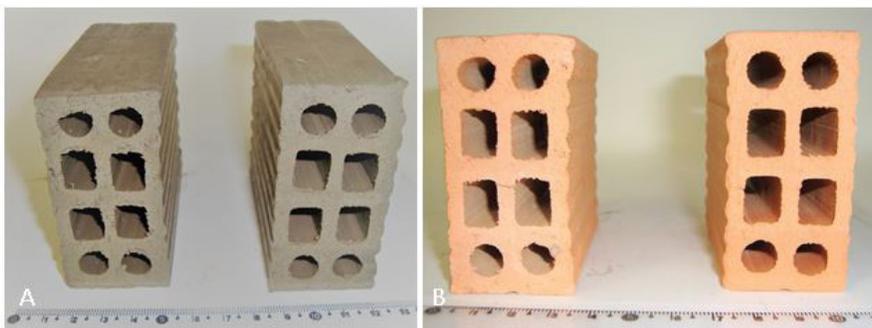


Figure 2: Bricks produced (A) before firing (B) after firing.

## 2.2 Production of ceramic pieces via slip casting

Slip casting is an old procedure that is widely applied in the production of ceramic pieces because it is considered a low-cost and simple process, in addition to the advantages of producing pieces of complex shapes, with thin and uniform walls. It is described as the consolidation of ceramic particles from a colloidal suspension, through the removal of the liquid part, by an absorbent mould, usually plaster.

The slip casting process is mainly used in Brazil for the production of sanitary ware and tableware. According to the Ministry of Mines and Energy, in 2014, Brazil has 18 manufacturing units, distributed in 8 states. The production is around 235 pieces/employee/month or 2,800 pieces/employee/year. The most automated and productive Brazilian units reach a productivity of 300 pieces/employee/month, in the same range production than leading international companies. The minimum productivity in the country is in the range of 180 parts/employee/month, related to some older and less automated units.

According to Ceramic World Review, in 2014, the Brazilian production of sanitary ware was 24 million pieces, corresponding to a turnover of around R\$ 2 billion, which places Brazil as the world's second largest producer country.

Based on annual production of 24 million large pieces and considering pieces with average weight of 13 kg, an estimated consumption of mineral raw materials (mainly clays and feldspars) is around 320,000 tons per year. Using slate waste this consumption can be reduced to more than half because the slip casting process can absorb up to 70% of the residue.

Slate powder suspensions in distilled water were produced with constant solids percentage (approximately 70% w/v) and dispersant (ammonium polyacrylate) also constant (1.5% v/v). The ammonium polyacrylate used was the Liosperse 51, supplied by Miracema-Nuodex.

Plaster moulds were made using plaster / water (P/W) ratios of 70. The plaster was first added to the water, mixed for one minute and poured into plastic matrix moulds, in order to form the plaster moulds. After hardening the mould, it was removed and dried at room

temperature for 15 days before use and characterization tests.

Mechanical rupture tests were performed according to procedures recommended by standard NBR 15270-1 (adapted) for ceramic slate pieces. The adaptation may be justified because the slate pieces can be framed in the group of traditional red ceramic materials. The tests were performed at room temperature, on the Autograph AG-X SHIMADZU universal mechanical testing machine.

In the heat-treated samples, new phases such as gehlenite, mullite and spinels were identified. The presence of these minerals was already expected due to the incidence of calcite in the raw material (PALHARES, et al. (2006). Gehelenite is formed through reactions of calcium oxide with Si and Al from the decomposition of clay (JORDAN et al., 2001). Figure 3 shows the pieces obtained by bonding, after heat treatment.

The compression tests performed disclosed a high strength for the pieces when compared to other common ceramics. The values are between 1.9 and 4.3 MPa.



Figure 3: Pieces produced after heat treatment.

Source: Palhares, et al. 2012.

### 2.3 Production of concrete with slate waste

To produce the concrete samples with slate residues (Figure 4), the composite cement CP II-E-32 was employed, being that it is already commonly applied in structural and conventional concrete, for pieces such as slabs, beams, pillars, foundations and in mortars in general.

The composition adopted was 1:2:3, where 1 is equivalent to the cement fraction, 2 to fine aggregates and 3 to coarse aggregates, by mass. The water/cement ratio used was 0.55. In addition to the slate dust, fine and coarse washed sand were used as fine aggregates, with maximum granulometries of 4.8 and 5.53 mm, respectively, and gravel

gneiss nº0, as the coarse aggregate.

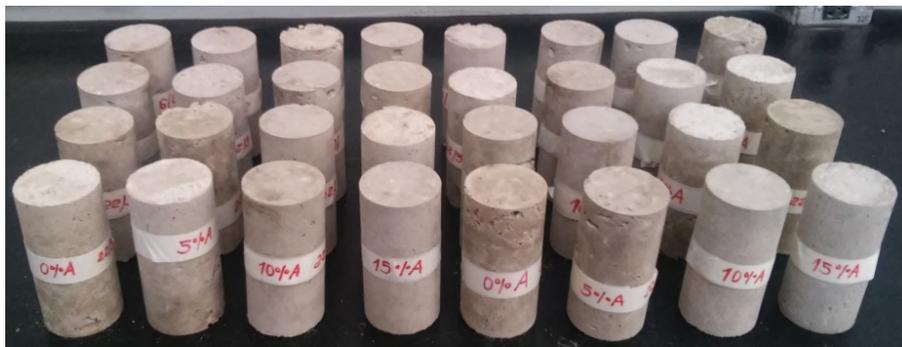


Figure 4: Specimens of reference concrete and with slate residue.

In addition to the reference concrete (without the addition of slate powder) specimens were produced with 5, 10 and 15% of slate powder instead of sand, by mass. For each percentage of slate and for each age of rupture, 4 cylindrical specimens of 50 mm in diameter and 100 mm in height were made, totalling 48 specimens. The production of specimens was referenced by NBR 5738.

To study the influence of slate on mechanical properties, the axial compressive strength of specimens at 3, 7 and 28 days of age was determined in a DL-30000 Emic universal testing machine. The water absorption by the concrete was evaluated through the immersion method, according to the NBR 9778.

It was observed that all concretes produced with slate presented, for all ages and all levels of substitution, higher compressive strengths when compared to the reference concrete (Figure 5). This result ensues the direct benefit of incorporating this technique to the regular industrial practice, justified by the use of residues in relation to the improved mechanical performance of the concrete. The specimen with 15% of slate residue presented resistance 38% greater than that of the reference concrete, for an example.

This gain in resistance indicates the occurrence of pozzolanic activity and the occurrence of the filler effect since the powder used as aggregate had a low granulometry. In other research about concrete made with slate waste were obtained similar results (OTI, et al. 2010). The particle size of the powder was sufficient to promote pore refinement and greater densification of the concrete.

The water absorption tests by immersion presented a tendency of absorbed water mass decrease with the increase of the substitute aggregate content, however, all the absorption levels are very close, being able to consider an average absorption of 7%, allowing their use as structural blocks according to the NBR 6136.

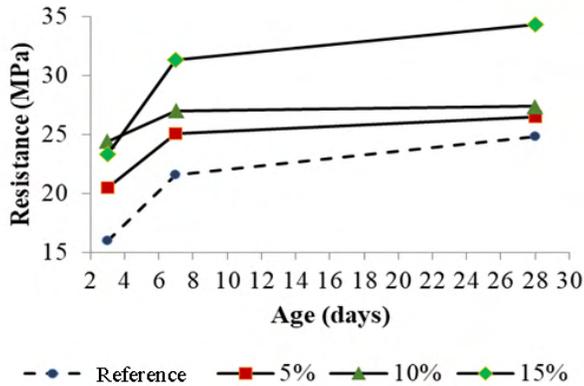


Figure 5: Evolution of axial compressive strength with age (Palhares and Da Silva, 2015).

## 2.4 Production of a slate/resin composite – Artificial Stone

According to Brazilian Association of the Ornamental Stone Industry [22], Brazil imported about 49.9 thousand tons of artificial stone materials in the period between January and September of 2020, totalling US\$ 28.3 million in expenses. Of it, the major amount came from China, summing 46.4 thousand tons (ABIROCHAS, 2020).

The price per  $m^2$  of artificial stone materials found in Brazil varies according to their size, aesthetics, region and brand. In general, the average price per  $m^2$  of this product ranges from R\$400.00 - R\$3,000.00. Aglostone®, for example, has a cost of around R\$500.00/ $m^2$  while the price of Silestone® ranges from R\$800.00 to R\$1,300.00/ $m^2$  (SILVA, 2017).

Due to the high prices attributed to artificial stones and the growing demand for these materials in Brazil, several studies, such as RIBEIRO et al. (2015,2017), SILVA et al. (2017), DEMARTINI (2017), among others, have been carried out in order to develop routes and means of producing these stones in the national territory.

Composites with resin (orthophthalic and epoxy) and slate were prepared with additions of 10, 30, 50 and 70% slate. The samples were poured into rectangular moulds and left to rest for 24 hours. Then, they were removed for characterization of physical and mechanical properties.

Figure 6 shows the artificial slate stone after demoulding and cutting. Artificial stone has properties that allow its cutting, polishing and colour change, by adding other reagents and/or pigments.

The stretching test was performed on a Shimadzu Autograph AG-X 10kN universal testing machine. The test was a three-point bending at a 2 mm/min speed.

The hardness of the materials was determined using a Shimadzu Model HMV 2T microhardness tester. 10 tests were carried out for each sample, with a load of 200gf and load application time of 15s, in order to generally evaluate the samples' structures.

For porosity, bulk density and water absorption measurement, the ASTM C373-88 standard (though adapted) was used.

Values of mechanical compressive strength of up to 78MPa were obtained for the artificial stone, showing that it can be used for floors and coatings in civil construction. Natural rock has a strength of approximately 336MPa. The water absorption values were in all samples less than 1%. The values obtained for flexural strength ranged from 3MPa to 11MPa and Vickers Hardness (HV) from 18 to 33 (HV).

Table III shows the values obtained for the physical properties of the artificial stone as a function of the slate percentage.

Formulations	Apparent porosity (%)	Water absorption (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
10	1,01 ± 0,24	0,74 ± 0	1.43 ± 0
30	1,09 ± 0.27	0,95 ± 0	1.46 ± 0,01
50	1,07 ± 0.23	0,63 ± 0,01	1.69 ± 0,01
70	1,04 ± 0.22	0,62 ± 0	1.84 ± 0,04

Table III: Porosity, water absorption and density for each formulation.

The results indicate that the slate increase causes a density increase of the composite, tending towards values closer to the natural stone's density,  $\sim 2.7\text{g/cm}^3$ . The lower density favours transportation and its application, however, it reduces the resistance.

Nowadays, the search for diversity in materials for finishing environments and spaces recently built or renovated, has shown a significant growth in Brazil due to the demands of customers in the areas of decoration and design. These demands have been generating an increase in the consumption of artificial stone materials in Brazil, leading it to qualify as a major importer of these materials.

It is extremely important to advance this technology in Brazil and increase the production of artificial stone, as it will allow for a reduction in imports from China and the reuse of ornamental stone waste such as slate.

It is believed that the artificial stone materials produced can compete with those already on the market, mainly for quality and lower cost.

The use of alternative materials (waste and orthophthalic resin) led to savings of around 71% in relation to the amount spent if standard raw material (natural rock and epoxy resin) was used (PALHARES and LUCENA, 2021).



Figure 6: Samples of artificial stone products.

### 3 | FINAL COMMENTS

The works developed by the author since 2000 have shown that the use of slate residues can help reducing existing environmental issues in Minas Gerais and world, reducing pollution in the extraction areas.

Accounting for the potential of the state of Minas Gerais on the slate sector, many benefits would come forth through the use of waste to generate jobs, as well as collaborating to reduce the extraction of other natural resources such as sand and gravel, air pollution, water and landscape in general.

It is understood that the transfer of technology (know-how) from the laboratory to the industry involves a series of tests and problems that must be solved. However, other issues must be considered for applications to be developed on a large scale, such as: lack of investment in waste recovery, large number of small companies operating, awareness that waste has the potential to be transformed into raw materials for other sectors, to name a few.

Another barrier in the Brazilian market within the civil construction industry is the use of waste for production processes. The lack of technical knowledge of managers and business owners makes it inviable to use waste that often has a highly added value and composition similar to the raw materials used, which can lead to the development of products with equal or superior quality to those found in the current market.

The author has been studying other applications of slate waste such as the production of porous ceramic filters, light aggregates for concrete, application in autoclaved cellular concrete, abrasive, among others.

## REFERENCES

1. ABIROCHAS – Brazilian Association of the Ornamental Stone Industry. **Balance of Brazilian exports and imports of natural and artificial rock materials for ornamentation and coating in 2021**. Report 01-2022. <https://abirochas.com.br/informes-abirochas/>
2. ABIROCHAS – Brazilian Association of the Ornamental Stone Industry. **Balance of Brazilian exports and imports of natural and artificial rock materials for ornamentation and coating in 2020**. Report 01-2021. <https://abirochas.com.br/informes-abirochas/>
3. **Os Arranjos Produtivos Locais (APL) de base mineral e a sustentabilidade**, APL 2006
4. ASTM C373-17, “Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired White Ware Products, Volume 15-02, Glass and Ceramic”. 2006.
5. Brazilian Association of Technical Standards. NBR 6136: Blocos Vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro: 2007. 25p.
6. Brazilian Association of Technical Standards. NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: 1987. 3p.
7. Brazilian Association of Technical Standards. NBR 5738: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: 2008. 12p.
8. Brazilian Association of Technical Standards. NBR 15270-3: Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação. Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: 2005. 6p.
9. Catarino L, Sousa J, Martins IM, et al. **Ceramic Products Obtained from Rock Wastes**. Journal of Materials Processing Technology 2003;143–144:843–845; doi: 10.1016/S0924-0136(03)00341-8.]
10. Cambroner L, Ruiz-Román J and Ruiz Prieto J. **Obtención de espumas a partir de residuos de pizarra**. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 2005;44(6):368–372. <http://hdl.handle.net/10261/22683>.
11. Ceramic World Review (CWR). **Technology news markets**. Itália. (114). 2015
12. Chiodi Filho C and Chiodi D.K. **O Setor de Rochas Ornamentais No Brasil. In: Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. In: O Setor de Rochas Ornamentais No Brasil CETEM/MCTI: Rio de Janeiro; 2014; pp. 495–527.
13. Demartini TJ da C, Rodríguez RJS and Silva FS. **Physical and Mechanical Evaluation of Artificial Marble Produced with Dolomitic Marble Residue Processed by Diamond-Plated Bladed Gang-Saws**. Journal of Materials Research and Technology 2018;7(3):308–313; doi: 10.1016/j.jmrt.2018.02.001.
14. Frías M, Vigil de la Villa R, García R, et al. **Scientific and Technical Aspects of Blended Cement Matrices Containing Activated Slate Wastes**. Cement and Concrete Composites 2014; 48: 19–25; doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.01.002.

15. Jordán MM, Sanfeliu T and de la Fuente C. **Firing Transformations of Tertiary Clays Used in the Manufacturing of Ceramic Tile Bodies**. *Applied Clay Science* 2001;20(1–2):87–95; doi: 10.1016/S0169-1317(00)00044-2.
16. National Ceramic Industry Association. **Profile of the Ceramic Materials Sector**. Rio de Janeiro. 2018
17. Ministry of Mines and Energy. **Statistical yearbook of the non-metallic transformation sector**. Brasília. 2014.
18. Oti JE, Kinuthia JM, Bai J, et al. **Engineering Properties of Concrete Made with Slate Waste**. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 2010;163(3):131–142; doi: 10.1680/coma.800062.
19. Palhares L, et al. **A Utilização de Rejeitos Na Produção de Tijolos Para Construção Civil**. In: *Proceedings of the 20th Brazilian Congress of Engineering and Material Sciences*. Joinville; 2012; p.8.
20. Palhares LB, dos Santos CG, Binda F, et al. **Characterization of Slate Powder Wastes from Minas Gerais - Brazil**. *Key Engineering Materials* 2020;848:10–19; doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.848.10.
21. Palhares L, Mansur AAP, Peres AEC, et al. **Study of Pore Size Distribution of Slate Ceramic Pieces Produced by Slip Casting of Waste Powders**. *Minerals Engineering* 2006;19(5); doi: 10.1016/j.mineng.2005.10.001.
22. Palhares L, Moreira B and Perini P. **Reaproveitamento de Resíduos de Ardósia Na Fabricação de Peças Cerâmicas Pela Técnica de Colagem de Barbotinas**. *Pós em Revista* 2012;5:157–161.
23. Palhares LB and Mansur HS. **Production and Characterization of Ceramic Pieces Obtained by Slip Casting Using Powder Wastes**. *Journal of Materials Processing Technology* 2004;145(1):14–20; doi: 10.1016/S0924-0136(03)00857-4.
24. Palhares LB and Lucena TE. 2021. **Case Study to Evaluate the Feasibility of Production of Artificial Ornamental Stones in Brazil by Reducing Raw Material Costs**. Federal Centre for Technological Education of Minas Gerais. Brazil.
25. Palhares L.B. and da Silva, S.B.P. 2015. **Reaproveitamento de Rejeitos Provenientes da Extração e Beneficiamento de Ardósia para Produção de Concreto**. Federal Centre for Technological Education of Minas Gerais. Brazil.
26. Ribeiro C. **Development of an Alternative Artificial Marble with Marble Industry Residue and Unsaturated Polyester**. Doctorate degree. State University of North Fluminense: Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro. 2015.
27. Silva FS, Ribeiro CEG and Rodriguez RJS. **Physical and Mechanical Characterization of Artificial Stone with Marble Calcite Waste and Epoxy Resin**. *Materials Research* 2017;21(1); doi: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0377.
28. State Mineral Yearbook - Minas Gerais. National Mining Agency. Ministry of Mines and Energy (MME). Brasília. 48 p. 2016.

## AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVERS PRODUZIDOS COM O USO DE SÍLICA ATIVA

*Data de aceite: 01/08/2022*

### **Martônio José Marques Francelino**

Professor Mestre, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE-UACSA

### **Fred Rodrigues Barbosa**

Pesquisador da Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA

### **João Manoel de F. Mota**

Professor Doutor, Instituto Federal de Pernambuco – IFPE

**RESUMO:** O sistema de pavimentação intertravado de concreto apresentou um crescimento bastante expressivo no transcorrer dos últimos anos, todavia, em que pese seu emprego ter se tornado mais perceptível em calçadas, praças, parques, condomínios etc., quando bem dimensionado e controlado em sua produção, pode ter aplicações em áreas com solicitações de cargas mais severas, conforme prevê a NBR-9781:2013, ao estabelecer que a resistência característica de peças com dimensões (20 x 10 x 8) cm deve enquadrar-se nas classes 35 MPa ou 50 MPa. Portanto, o presente trabalho objetiva avaliar a influência da adição de sílica ativa no percentual de 8% na forma de adição às matrizes cimentícias e também na forma de substituição parcial da massa de cimento portland, em concretos de consistência seca, vibro-prensados e, por conseguinte, adequados à produção de Pavers. Nessa premissa, moldaram-se três famílias

de concretos com proporcionalidade, à saber: (i) de referência (sem adição); (ii) com 8% de adição por substituição parcial de cimento; (iii) 8% com adição pura (sem retirar cimento). Buscou-se avaliar a influência da sílica ativa no comportamento mecânico e absorção das peças recém fabricadas, de acordo com o preconizado nas normas técnicas. Os resultados apresentam reflexões consideráveis para tomada de decisões para o uso da tecnologia associada ao respectivo sistema construtivo de pavimentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimento intertravado, sílica ativa, resistência à compressão.

### EVALUATION OF EFFICIENCY IN THE MECHANICAL BEHAVIOR OF PAVERS PRODUCED WITH THE USE OF SILICA FUME

**ABSTRACT:** The interlocking concrete pavement system has shown a very significant growth in recent years, however, although its use has become more noticeable on sidewalks, squares, parks, condominiums etc., when well sized and controlled in its production, may have applications in areas with more severe loads requests, as provided in NBR-9781: 2013, when it states that the characteristic strength of pieces (20 x 10 x 8) cm should fit in the classes 35 MPa or 50 MPa. Therefore, the present work aims to evaluate the influence of the addition of silica fume in the percentage of 8% in the form of addition to cementitious matrices and also in the form of partial replacement of the portland cement mass, in concretes of dry consistency, vibro-pressed, therefore suitable for Pavers production. In this premise, three families of

concrete with proportionality were molded, namely: (i) reference (without addition); (ii) with 8% addition by partial replacement of cement; (iii) 8% with pure addition (without removal of cement). The influence of the active silica on the mechanical behavior and absorption of the newly manufactured parts was evaluated, in accordance with the technical standards. The results present considerable considerations for decision making for the use of the technology associated with the respective paving system.

**KEYWORDS:** Interlocked pavement, active silica, compression strength.

## 1 | INTRODUÇÃO

O processo de fabricação e utilização da tecnologia de pavimentação intertravada teve, na década de 1940 na Alemanha, o mérito do desenvolvimento tecnológico dos primeiros equipamentos do tipo vibro-prensa para fabricação das peças de concreto em larga escala, conduzindo a excelente resistência mecânica e rigoroso controle dimensional, impulsionando, por conseguinte, o crescimento exponencial do sistema construtivo em todo o mundo a partir da década de 1970 (GODINHO,2009).

A partir deste ponto, o sistema relacionado ao pavimento intertravado apresentou um crescimento exponencial de seu emprego. Neste sentido, além de agregar uma importante contribuição estética e ecológica, possui ainda o condão de proporcionar menor consumo de energia e um bom aproveitamento das matérias primas locais, integrando-se aos ambientes de maneira harmoniosa. Todavia, esse incremento na demanda não ocorreu de forma linear, sendo mais acentuado em relação as peças com dimensões de (200 x 100 x 60) mm e (200 x 100 x 80) mm e com resistência característica à compressão de 35 MPa.

Este sistema pode ser contextualizado como um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento, tendo os espaços entre as peças um preenchimento com material de rejuntamento. Com tais características, o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção (ABNT, 2013).

Além disso, sua estrutura típica pode ser observada na Figura 1, onde será possível identificar uma camada de rolamento, formada por peças pré-moldadas de concreto (pavers), capazes de suportar as cargas e as tensões provocadas pelo tráfego, protegendo a camada de base do desgaste por abrasão e propiciando uma certa estabilidade nos materiais constituinte (HALLACK,1998). Ainda segundo este autor, a capacidade de distribuição dos esforços da camada de revestimento depende essencialmente de sua espessura, formato e arranjo.

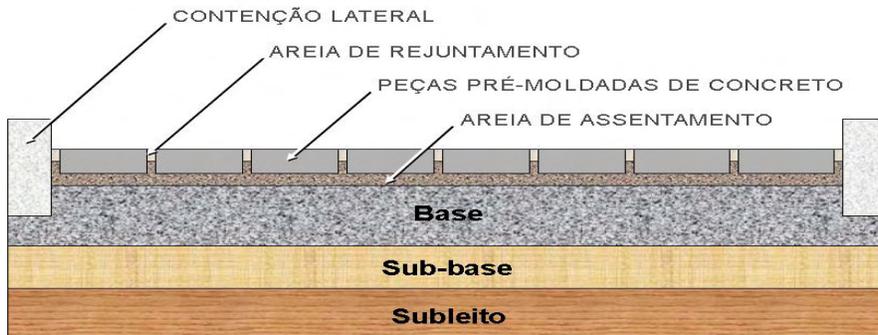


Figura 1 - Estrutura típica de um pavimento intertravado (HALLACK, 1998)

De uma forma geral, a especificação dos tipos de materiais que podem ser utilizados na fabricação e execução dos pavimentos intertravados, isto é, tipo de cimento, caracterização dos agregados miúdos e graúdos, aditivos, pigmentos e relação água/aglomerante, normalmente seguem as mesmas diretrizes estabelecidas para a utilização como insumo na produção de concretos.

Já no que diz respeito às características dimensionais destas, há que se destacar a necessidade de atendimento aos requisitos que seguem explicitados.

- a) Medida nominal do comprimento de no máximo 250 mm;
- b) medida real da largura de no mínimo 97 mm na área da peça destinada à aplicação de carga no ensaio de resistência à compressão;
- c) medida nominal da espessura de no mínimo 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm;
- d) tolerâncias dimensionais de  $\pm 3$  mm (comprimento, largura, espessura);
- e) o índice de forma (IF), relação entre o comprimento e a espessura da peça de concreto, sendo as peças de concreto utilizadas em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento, menor ou igual a 4.

Os requisitos de desempenho mecânico (resistência característica à compressão) devem ser determinados conforme estabelecido na NBR 9781/2013 e deve atender às especificações da Tabela 1.

Tipo de Solicitação	Resistência característica à compressão aos 28 dias (MPa)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50

Tabela 1 - Resistência característica à compressão

Ocorre que, uma observação nas condições de serviço das peças empregadas para a produção dos sistemas intertravados para pavimentação, acabou por evidenciar uma enorme dificuldade de que tais elementos atendam os requisitos normativos atualmente vigentes. Tal constatação tem atraído o interesse de pesquisadores e profissionais da cadeia produtiva, a fim de identificar-se os fatores responsáveis por tal situação e com isso apresentarem-se soluções que possam melhor atender às demandas do mercado.

Várias hipóteses têm sido levantadas, dentre as quais podem ser listadas: (i) limitação dos equipamentos de vibro-prensagem, (ii) características dos cimentos utilizados no processo, (iii) cura das peças, (iv) granulometria dos agregados etc.

Uma possível solução para esta problemática pode estar relacionada à tecnologia de utilização de adições minerais em matrizes cimentícias, particularmente em relação a possibilidade de utilização de sílica ativa nas misturas que darão origem aos pavers.

Sistemas binários com cimento portland e adições minerais têm sido amplamente discutidos e estudados pela comunidade científica de todo mundo nos últimos anos. Esse fato ocorre graças aos diversos benefícios que são promovidos em matrizes cimentícias em decorrência do incremento destes materiais. As adições minerais, por apresentarem elevada superfície específica, propiciam o preenchimento de pequenos espaços (refinamento dos poros), melhorando as propriedades mecânicas e a durabilidade das argamassas e concretos.

Assim, a porosidade é reduzida conduzindo a maior capacidade de resistir a agentes agressivos, como a carbonatação, lixiviação, eflorescência, salinidade, dentre outros (ROCHA, 2005).

Quando as adições minerais podem ser caracterizadas como materiais pozolânicos, o ganho nas matrizes cimentícias é ainda maior, haja visto que haverá um resultado combinado entre o refinamento dos poros proporcionado pela granulometria do material empregado, decorrente do efeito filler (fenômeno físico) e um efeito químico decorrente da reação da sílica da pozolana com o hidróxido de cálcio (portlandita) das matrizes cimentícias, produzindo, por conseguinte, C-S-H [silicato de cálcio hidratado (Figura 2)], responsável pelo desempenho mecânico destas matrizes (NEVILLE, 1997).

A este respeito, a NBR 12653/2014 define o material pozolânico como sendo um material silicoso ou silicoaluminoso que possui pouca atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos, calcinado e na presença da água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com ricas propriedades aglomerantes. Portanto, a vida útil das argamassas e concretos deriva da estrutura dos poros, já que são eles que controlam a entrada de umidade, oxigênio,  $\text{CO}_2$ , sulfatos, cloretos, dentre outros (CERVO; GASTALDINI; ISAIA, 2001).

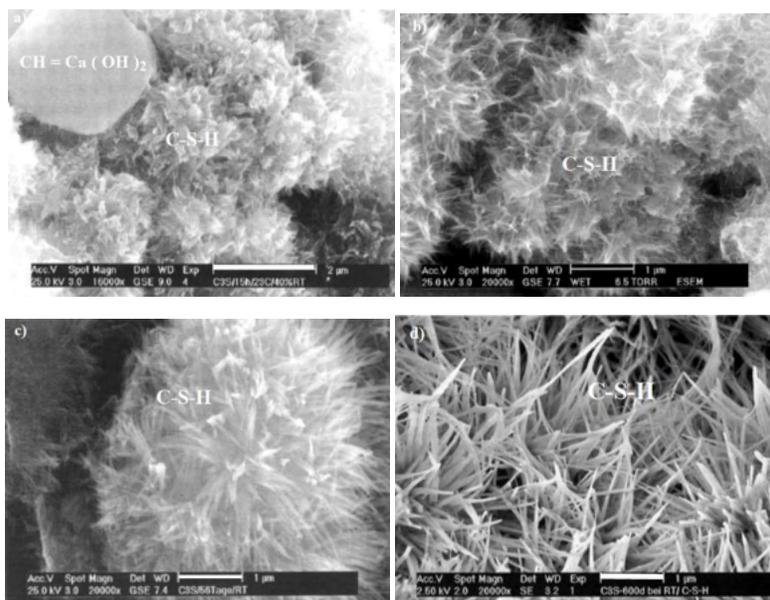


Figura 2 – C-S-H após: a) 15 horas, b) 7 dias, c) 56 dias, d) 600 dias

A utilização de pozolanas em compósitos cimentícios não se converte em ineditismo, tendo em vista que existem registros muito antigos desse uso, como é o caso das escavações arqueológicas realizadas na Grécia, durante os anos 70, que revelaram a existência de um reservatório de água com capacidade para 600 metros cúbicos construído com argamassa de cal e pozolana natural. Este reservatório de 600 a.C. esteve em uso até os anos 300 a.C., evidenciando o favorecimento das pozolanas, que mesmo diante de elevada condição de intemperismo, manteve-se estável ao longo dos anos (ACI, 1994 *apud* MONTANHEIRO *et al.*, 2002).

Diante de tantos benefícios, comprovados inclusive por meio do desempenho de elementos efetivamente em serviço, diversos pesquisadores vêm se dedicando ao estudo dos efeitos de diferentes elementos que possam ser caracterizados como pozolanas artificiais, a fim de determinar seu potencial efeito benéfico nas matrizes cimentícias.

Seguindo esta linha de pensamento, Gruber *et al.* (2001) realizou estudos em

concretos contendo adições minerais, particularmente metacaulim de alta reatividade (MCAR). Seus estudos consideraram variações nas relações água/aglomerante (0,3 e 0,4) e ainda a substituição parcial da massa de cimento portland por metacaulim nos teores de 0%, 8% e 12%, objetivando avaliar a influência desta adição nas condições de difusibilidade de cloretos. Apresentou como conclusão o fato de que a utilização do procedimento de substituição parcial da massa de cimento por metacaulim nos teores de 8% e 12% contribuíram para uma redução no coeficiente de difusão em 50% e 60%, respectivamente.

Outro exemplo desta linha de pesquisa pode ser observado no trabalho de Sabir *et al.* (2001) *apud* Medina (2011). Estes pesquisadores verificaram que concretos produzidos com 5% e 10% de substituição parcial da massa de cimento por MCAR apresentaram os maiores resultados de resistência à compressão aos 365 dias.

Também merece destaque a pesquisa realizada por Caldarone *et al.* (1994) *apud* Souza (2003). Os pesquisadores estudaram cinco tipos de mistura, considerando diferentes teores de substituição da massa de cimento por dois diferentes tipos de adições minerais: (i) sem adição; (ii) uso de MCAR nos teores de 5% e 10% e (iii) uso de sílica ativa nos teores de 5% e 10%. Neste estudo, todas as misturas foram produzidas com a mesma relação água/(cimento+adição), que foi de 0,40. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos e permite observar os acréscimos significativos evidenciados nas amostras contendo adições.

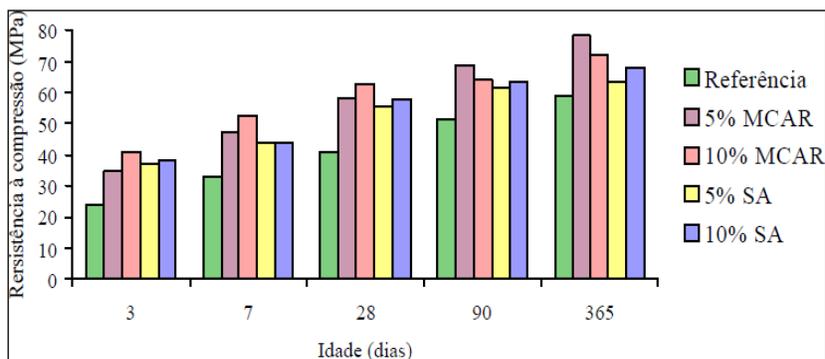


Figura 3: Comportamento da resistência à compressão de concretos com adições

Importante acrescentar que diversos pesquisadores acreditam que a variação do comportamento mecânico em amostras de concretos e argamassas contendo adições, encontra-se diretamente relacionada às características físicas, químicas e morfológicas da matéria prima de onde a adição mineral tenha sido originada.

A partir deste raciocínio, observa-se que os melhores resultados estarão atrelados a teores ótimos de utilização das adições minerais; contudo, tais teores irão variar não apenas com o tipo de adição e seu mecanismo de atuação (efeito filler ou pozolânico), mas

também em decorrência das características das matérias primas.

Encontrar o teor ideal de utilização das adições nas matrizes representa ação de elevado interesse para todos aqueles que se dedicam à utilização de matrizes cimentícias, particularmente quando se deseja obter propriedades particulares em relação à durabilidade.

A este respeito, Rocha (2005) explana que, no caso de utilização da adição mineral metacaulim, a sua dosagem ideal visando obter-se máximo desempenho em relação à resistência mecânica, situa-se entre 6% e 15% em relação a massa de cimento, entretanto, destaca que este percentual pode chegar até 50% em casos especiais, dependendo da aplicação e os demais materiais utilizados na mistura.

Mota *et al.*, (2011) também realizaram estudos buscando avaliar o teor ideal de adição de metacaulim em matrizes cimentícias para a produção de concretos e concluíram que as amostras com o teor de 8% de metacaulim apresentaram os melhores resultados em relação à resistência à compressão, à resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Partindo-se dos resultados observados na literatura e da necessidade de melhoria de desempenho das peças de pavimento intertravado, decidiu-se promover estudos para a utilização de sílica ativa como adição mineral na produção de pavers, tomando-se como premissa a adoção do percentual ótimo de 8% em relação à massa de cimento.

Sílica, fumo de sílica condensada, sílica volatilizada, microsílica e fumo de sílica são alguns nomes que esta adição mineral recebe, mas o nome mais comum na literatura brasileira é sílica ativa. Este material possui partículas variando de 0,1 a 2 $\mu$ m de diâmetro, sendo que a esfera média é 100 vezes menor que a média do cimento.

Destaque-se ainda, que a sílica ativa será utilizada tanto na condição de adição à massa de cimento nas matrizes, como também na condição de substituição parcial da massa de cimento portland; e que as misturas produzidas serão avaliadas em relação à sua resistência à compressão e absorção.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODO

### 2.1 Materiais

O concreto utilizado nas peças foi constituído por cimento portland CP V ARI, agregados miúdo (areia natural de origem quartzosa e pó de pedra) e gráudo (origem granítica), sílica ativa, aditivo tensoativo e água. Tanto o cimento, quanto os agregados se constituem materiais que são amplamente usados na Região Metropolitana do Recife.

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa), tendo pH no ato de sua utilização próximo de 6,7.

A sílica ativa empregada na produção das misturas, segundo dados fornecido pelo

fabricante, possui finura blaine de 20.000m<sup>2</sup>/kg e massa específica 2,22kg/dm<sup>3</sup>.

## 2.2 Método

Para as análises objeto deste estudo foram produzidas 3 (três) famílias de concretos, conforme descrição da Tabela 2.

Família	Nomenclatura	Características
1	Ref.	Amostras de referência, sem qualquer adição de sílica ativa. Produzidas com T.U.M.* 1:1,88:1,13:1,3.
2	Sub.	Substituição de 8% da massa de cimento por massa equivalente de sílica ativa a partir do T.U.M.* das amostras de referência.
3	Ad.	Adição do equivalente a 8% da massa de cimento portland em sílica ativa para ser incorporada ao T.U.M.* das amostras de referência.

\*T.U.M – traço unitário em massa (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo : relação água/cimento)

Tabela 2 – Características e nomenclatura das famílias de concreto produzidas

O concreto para a produção das peças foi confeccionado numa máquina de fabricação nacional modelo T-Prex (VP- 600).

Buscou-se prospectar a relação a/c (água/cimento) e traço ideal, formatando uma matriz possível diante de consultas a diversos trabalhos na literatura, concomitante com verificação visual concernente ao mais adequado empacotamento da mistura. O teor de argamassa variou entre 52% e 58%, no entanto, essa variação não influenciou significativamente a coesão das misturas.

Os insumos granulares e adições foram adicionados em massa pelo próprio equipamento. O aditivo plastificante foi diluído na água de amassamento. A homogeneização do compósito teve como tempo adotado 120 segundos, através de misturador com paletas horizontais, onde todos os insumos eram liberados para correia transportadora.

O tempo de mistura foi o mesmo para as 3 famílias de concretos produzidas. Esse tempo em comum foi necessário para que todos os traços tivessem o mesmo nível de homogeneidade. Assim, todos os compósitos das famílias estudadas tiveram consistência seca e vibro-prensada.

A cura das peças foi realizada em câmara úmida, sendo capeadas, imersas em água (Figura 4a) e ensaiadas aos 7 e 28 dias (Figura 4b). A Figura 4c apresenta parte das peças moldadas e prontas para serem transportadas para câmara úmida.



Figura 4a – Pavers imersos para posterior ruptura



Figura 4b – Ensaio de resistência à compressão



Figura 4c – Peças de concreto

A Tabela 3 mostra as proporcionalidades de cada família, sendo 6 (seis) exemplares

para verificação da resistência à compressão e 3 (três) para absorção.

Materiais	Unidades	Traço de referência	Adição pura (8%)	Substituição de cimento (8%)
Cimento CP V	kg	240	240	220
Areia Natural	kg	200	200	200
Brita 9,5	kg	270	270	270
Pó de Pedra	kg	250	250	250
Água	kg	72	72	72
Sílica Ativa	kg	-	20	20

Tabela 3 – Composição dos traços dos concretos

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta os resultados médios obtidos para o ensaio de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias para cada uma das famílias analisadas, após o devido tratamento estatístico.

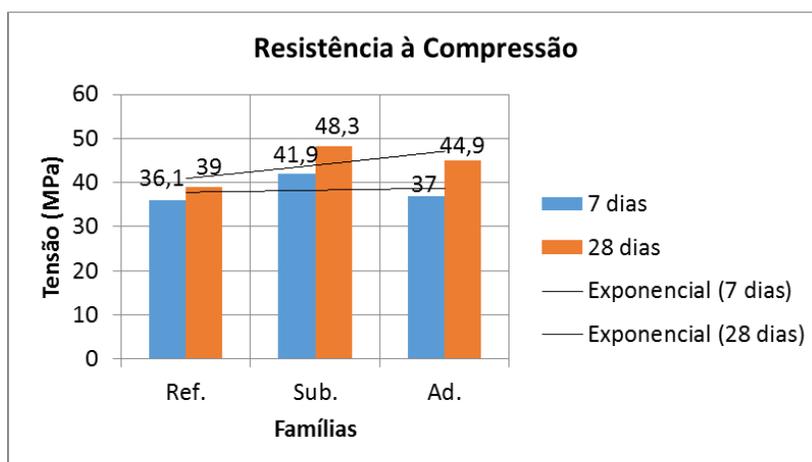


Figura 5 – Gráfico da resistência à compressão

Verifica-se ascendência na linha de tendência exponencial da resistência à compressão, devido a sílica, isso da família 1 (sem adição) para as famílias com sílica, aos 28 dias.

Aos 7 dias não se verificou efeito considerável entre a família de referência e as com adições, muito provavelmente pelas reações pozolânicas serem lentas, necessitando de maior tempo para se proceder. Tal situação é corroborada por diversos autores. Não obstante, rupturas em idades mais avançadas (90, 180, 360 dias por exemplo), poderiam

apresentar influência mais significativa da pozolana.

Sabendo que, possíveis não conformidades operacionais durante o processo de ensaio ocorrem, em que pese não terem sido detectadas, é possível refletir que, a amostra com adição pura (família 3) teve resistência inferior a de substituição parcial de cimento (família 2), devido relação a/c baixa (0,3), de tal forma que faltou água para hidratar parte do cimento, resultando, por conseguinte, em cimento anidro na mistura. Essa conclusão se embasa na necessidade de relação a/c para hidratar somente o cimento em aproximada 0,27 (hidratação dos grãos mais o gel que se precipita), donde o aumento significativo da superfície específica da família 3, provoca severa adsorção de água pelos grãos da pozolana, faltando água, provavelmente, para hidratar todo cimento, mitigando o potencial de resistência (MOTA, 2015).

Os resultados da absorção total por imersão aos 28 dias, estão mostrados na Figura 6.

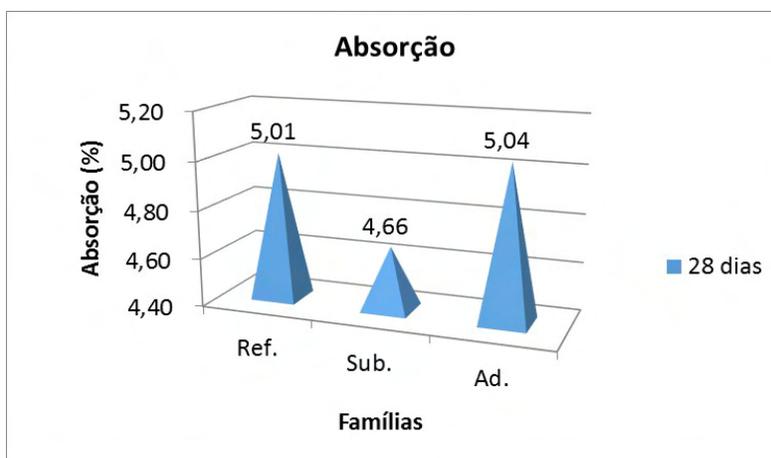


Figura 6 – Resultados médios de absorção aos 28 dias

Verifica-se que a média da absorção total por imersão aos 28 dias, corrobora com a tendência da resistência à compressão (melhor resultado da família por substituição), função do nível de porosidade nas devidas amostras. Assim, a família 2 mostra que a sílica influenciou, mesmo que timidamente, na redução da absorção (aproximadamente 7,5%), o que em idades mais elevadas, poderia se apresentar números mais significativos, e, fundamentalmente, da família com adição pura.

## 4 | CONCLUSÕES

Os dados apresentados neste trabalho permitem estabelecer conclusões delineadas e restritas aos materiais utilizados na presente pesquisa, não sendo cabível extrapolar-se

para uma generalização, pois o comportamento pode variar com a mudança na origem dos materiais que compõem o concreto e/ou, com o equipamento de vibro-prensagem.

Em que pesem tais condicionantes, pode-se relatar que a adição de sílica influenciou positivamente na resistência à compressão aos 28 dias das amostras ensaiadas. Este efeito foi observado de forma mais significativa na família 2, onde houve um incremento em quase 24% quando comparado com a família 1, sem adição.

Ademais, ainda foi possível verificar-se que a adição de sílica permitiu à família 2 reduzir os teores de absorção, quando comparados aos resultados observados para a família sem adição, mesmo que de forma tênue.

Dentre as famílias que foram produzidas com adição de sílica ativa, a com adição pura de sílica (família 3) apresentou menor desempenho nas duas propriedades analisadas. Portanto, é possível inferir que a maior superfície específica desta família, conduza à maior adsorção de água, propiciando que parte do cimento, fique sem se hidratar (cimento anidro), devido original reduzida relação a/c, adequada para o sistema deste material, contudo, aquém para satisfazer a adsorção dos agregados e hidratação de todos os grãos do aglomerante.

Não se pode deixar de sublinhar a importância em buscar realizar ensaios com idades maiores, uma vez que, as reações pozolânicas lentas, provavelmente ainda não se desenvolveram significativamente aos 28 dias.

Ademais, foi estabelecido teor para verificação da influência da sílica com 8% em relação à massa do cimento, devido à tendência deste número se apresentar próximo ao ideal pela literatura. Todavia, vale estudar outros teores objetivando conferir, com mais acurácia, maiores incrementos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a PRENORTE - Pré-fabricados do Nordeste Ltda pela contribuição com essa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781/13: Peças de concreto para pavimentação-Especificação e métodos de ensaio**, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos. Especificação**, 2014.

CERVO, T. C. **Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Santa Maria, Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 2001.

HALLACK, ABDO. **Dimensionamento de Pavimentos com Revestimento de Peças Pré-Moldadas de Concreto para Áreas Portuárias e Industriais**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica. São Paulo, 1998.

GRUBER, K.A.; RAMLOCHAN, T.; BODDY, A.; HOOTON, R.D; THOMAS, M.D.A. **Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolim**, 2001.

GODINHO, D.P. **Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Arquitetura. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2009.

MEDINA, Engler Apaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binário com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

MOTA, J. M. F. **Reforço de alvenaria resistente com argamassa armada e adição de metacaulim**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MOTA, J.M.F.; DOURADO, K.C.; BARBOSA, F.R.; COSTA e SILVA, A.J.; SILVA, E.J.; CARVALHO, J.R. **Concretos Adicionados com Metacaulim como agente de mitigação da RAA**. IBRACON. Florianópolis, 2011.

MONTANHEIRO, T. J.; YAMAMOTO, J. K.; SANT' AGOSTINO, L. M.; KIHARA, Y.; SAITO, M. M. **Terras diatomáceas: uma pozolana natural na Bacia do Paraná, estado de São Paulo**. Revista do Instituto Geológico. São Paulo, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. editora PINI. São Paulo, 1997.

ROCHA, G. G. N. Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Belo Horizonte, 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Porto Alegre, 2003. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## AValiação DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSA PRODUZIDO COM AGLOMERANTE ÂLCALI-ATIVADO À BASE DE RCV E CINZAS

Data de aceite: 01/08/2022

**Otaciso Gomes Teixeira**

Centro universitário UNIFG/ANIMA  
Bahia

<http://lattes.cnpq.br/6644029346243520>

**Mateus Ribeiro Caetano**

Universidade de Brasília (UnB)  
Brasília-DF

<http://lattes.cnpq.br/8027817248677375>

**RESUMO:** O cimento é um dos materiais mais utilizados pela construção civil mundial, apenas no Brasil em 2016 foram produzidas 57 milhões de toneladas de cimento, segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC). No entanto, existem aspectos negativos decorrentes de sua produção, como a extração da matéria prima, que degrada vastas áreas naturais e sua elevada emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em seu processo industrial. Outro fator contribuinte com a degradação do meio ambiente está vinculado a cerâmica vermelha e os resíduos gerados pela sua produção e seu descarte. Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de aglomerante produzido por meio da ativação alcalina com uso de materiais alternativos da indústria da cerâmica, sendo estes os resíduos de cerâmica vermelha (RCV) e cinzas resultantes da queima da madeira e como ativador o hidróxido de sódio (NaOH). Por tanto, foram realizados em laboratório experimentos de dosagem do aglomerante, avaliando os que

obtiveram melhores resultados de consistência, tempo de pega e resistência mecânica. Para a argamassa, foram determinadas as resistências à compressão em quatro idades diferentes (3, 7, 14, e 21 dias). A análise dos resultados mostra a viabilidade para uso na construção civil, além de ser uma forma de reutilização de resíduos da indústria da cerâmicos reduzindo o impacto produzido pelo seu descarte, dando utilidade a estes e evitando o uso de cimento que possui elevada degradação ambiental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Âlcali-Ativado; Cerâmica Vermelha; Argamassa; Sustentabilidade.

### EVALUATION MECHANICAL PROPERTIES OF MORTAR PRODUCED WITH ALKALI-ACTIVATED BINDER BASED ON RCV AND ASHES

**ABSTRACT:** Cement is one of the most used materials in civil construction, in Brazil alone, in 2016, 57 million tons of cement were produced, according to the SNIC (National Syndicate of the Cement Industry). However, there are negative aspects decurrent from its production, such as the extraction of primary matter, which degrades enormous natural areas, and elevated carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from its industrial process. Another contributing factor to the degradation of the environment is linked to the red ceramic and the residues generated by its production and discarding. Facing this, the present article aims to evaluate the physical and mechanical properties of binder produced through alkaline activation with the use of alternative materials of the ceramic industry, these being the red ceramic residues (RCV) and

ashes from the burned wood and, as activator, sodium hydroxide (NaOH). To that end, binder dosage laboratory tests were executed, evaluating those which acquired the best results in consistency, determination of setting times and mechanical resistance. For the mortar, the resistance to compression and traction were measured by diametral compression at four distinct ages (3, 7, 14 and 21 days). The analysis of the results reveals the viability of the use of the ceramic industry residues in civil construction, allowing reduction of the environmental impact of their discard by making use of them and avoiding the use of cement.

**KEYWORDS:** Alkali-Activated; Red Ceramic; Mortar; Sustainability.

## 1 | INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas o cimento tem sido amplamente usado pela construção civil em todo o mundo para produção de argamassas e concreto. No entanto, o produto resultante desse material apresenta algumas desvantagens, tais como: grande massa específica, alta fragilidade, baixa resistência à fadiga e tração, baixa tenacidade e resiliência (WANG; XU; LIU, 2016). Além de grandes impactos ambientais, tendo em vista que, para cada tonelada de cimento produzido, estima-se que seja emitido a mesma razão em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) sendo uma relação de escala 1:1 (MAJIDI, 2009 apud GERALDO et al., 2017).

Dessa forma, a busca por alternativas sustentáveis em ligantes que cumpram com as mesmas exigências a qual o cimento atende, tem atraído a atenção da comunidade científica internacional. Estudos sobre a reação da ativação alcalina tem subsidiado testes que buscam materiais alternativos aos atuais aglomerantes, visto que, esse tipo de ativação, possibilita a reutilização de materiais da construção civil, reduzindo os impactos dos descartes de entulhos.

Para que ocorra a álcali-ativação é necessária uma fonte de sílica, outra de alumínio, além de um meio alcalino para que ocorram as reações gerando calor com menor emissão de CO<sub>2</sub> (FAHIM HUSEIEN et al., 2017). Por ser considerada rica fonte de sílica, as cinzas podem ser utilizadas para a produção de um gel cimentício através do processo de ativação alcalina. Enquanto o RCV apresenta elevadas concentrações de alumínio (GERALDO et al., 2017).

Para que isso seja feito, é necessário ser constituído um ambiente com alta basicidade através de elementos à base de sódio ou potássio que seja capaz de promover o rompimento da sílica e do alumínio através de uma reação conhecida como dissolução exotérmica. (PALOMO, apud CASTRO, 2015). Dessa forma os ativadores alcalinos permitem que a sílica atinja a condição de reação podendo formar sílico- aluminato ou C-S-H. (MURTA, 2008).

Visando minimizar os impactos da produção do cimento e o descarte de resíduos decorrentes da produção de cerâmica vermelha o presente trabalho busca através de experimentos em laboratório dosar e avaliar as propriedades do aglomerante álcali- ativado

em estado fresco e suas propriedades quando incorporado agregado miúdo.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para a realização desta pesquisa, foi utilizado hidróxido de sódio em escamas (NaOH) de pureza 98%, resíduo de cerâmica vermelha (RCV), cinza de fornos da indústria de cerâmicas, água e areia. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Materiais do UniFG.

A coleta do material ocorreu no município de Guanambi, foram recolhidas cinzas e blocos cerâmicos de diversas fábricas do perímetro urbano da cidade. O hidróxido de sódio, comercializado sem restrições, foi adquirido em mercados da cidade.

Em trabalhos relacionados com a ativação alcalina, Geraldo et al, 2017 e Matos, 2018, utilizam materiais como resíduo de cerâmica vermelha e cinzas, a caracterização química realizada pelos autores trazem a seguinte composição para os materiais:

Óxidos	Cinza (%)	RCV (%)
SiO <sub>2</sub>	89,01	64,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3	12,3
TiO <sub>2</sub>	0,62	1,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,56	11,2
Na <sub>2</sub> O	-	-
SO <sub>3</sub>	0,34	-
K <sub>2</sub> O	2,16	6,3
MgO	-	1,6
CaO	1,5	1,2
CuO	0,08	-
ZnO	0,22	-
Outros	2,21	1,4

Tabela 1 – Caracterização química da cinza e RCV.

Fonte: GERALDO *et al*, 2017 e MATOS, 2018 (adaptado).

Também foram realizados testes com argamassa convencional, utilizando-se cimento, areia e água, com objetivo de ter um parâmetro de referência, comparando um dos materiais mais utilizado pela construção civil, o Cimento Portland, com um material totalmente alternativo, produzido por reações químicas.

## 2.2 Preparação do Material

O primeiro passo para preparação do material consistiu na redução de partículas do RCV, para isso foi necessário triturar blocos cerâmicos, também foram processados a cinza, seguido do peneiramento, admitindo-se grão de diâmetro máximo de 0,150 milímetros para ambos materiais.

O NaOH foi dosado e diluído em água, criando-se um meio base com elevada temperatura de reação exotérmica, atingindo em média 90°C, ideal para que ocorra as reações de quebra das ligações químicas da cinza, que, ao adicioná-la promoveu sua ativação. Após a mistura destes compostos foi adicionado gradativamente o RCV, responsável pela maior parcela de alumínio entre os materiais usados.

Foram dosados diferentes quantidade de cada material em diversos testes, visando encontrar o que melhor apresentasse consistência após a mistura. As dosagens obedeciam às relações molares de cada material, por se tratar de compostos alternativos e devido à falta de normatização para estes, quando possível, foi adotado as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aplicadas para testes com cimento Portland.

## 2.3 Ensaios

Para os experimentos que obtiveram melhores resultados iniciais de aspecto físico, foram executados ensaios de tempo de pega, obedecendo a norma ABNT NBR 16607:2018 (figura 1), utilizando o aparelho de Vicat foi realizada periodicamente a penetração da agulha, verificando assim o início e fim de pega do aglomerante.



Figura 1 – Execução de teste de tempo de pega no aparelho de Vicat.

Fonte: Autores, 2019.

Assim sendo, foi realizada a caracterização da areia para incorporação no aglomerante, para isso, o material foi colocado em estufa por 48 horas a 150°C para desidratação do material, seguido do peneiramento para separação granulométrica, os valores obtidos foram expressos em um gráfico de curva granulométrica, como mostra a figura 2. A determinação da massa específica foi executada conforme a ABNT NBR NM 52:2009, aferindo-se o valor de 2.54 kg/dm<sup>3</sup>, enquanto, a massa unitária, normatizada pela ABNT NBR NM 45:2006, obteve a leitura de 1.52 Kg/dm<sup>3</sup>.

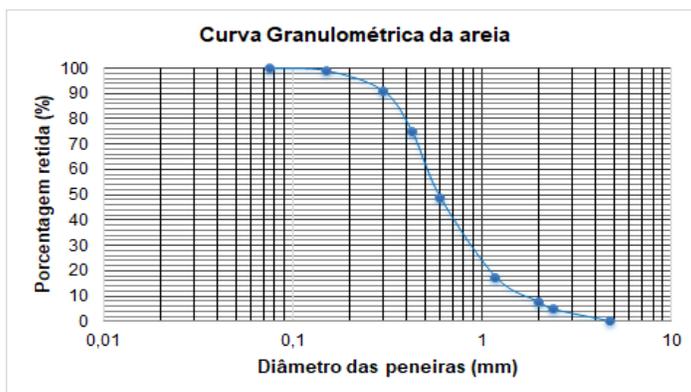


Figura 2: Análise granulométrica da areia.

Fonte: Autores, 2019.

Para o preparo da argamassa foi empregado o método de dosagem ACI-211.1- 1994, o traço de cimento, areia e água utilizado para a argamassa convencional foi de 2:4:1,6. Para realizar teste de consistência *Flow-Table* foi necessário a preparação da argamassa utilizando o traço de argamassa convencional e para o aglomerante álcali- ativado foi incorporando agregado miúdo, em uma relação de aglomerante e areia de 1:1 para todos os dois ensaios, variando apenas a quantidade de água.

Para a homogeneização de todo material fez se uso de misturador mecânico, adicionando-se o NaOH e água para sua diluição, seguido da cinza e RCV, misturando por 3 minutos seguindo a execução do teste de consistência conforme determinado pela ABNT NBR 13276:2016, o mesmo procedimento foi aplicado para a argamassa com cimento Portland.



Figura 3 - Misturador mecânico utilizado para preparo da argamassa.

Fonte: Autores, 2019.

Após o preparo da argamassa foram moldados corpos de prova em formas de dimensões 50x100 mm (conforme mostra a figura 4), decorrido 24 horas os mesmos foram desmoldados das formas e submetidos a cura térmica durante 12 horas a temperatura de 65°C, em seguida foram avaliadas as propriedades de resistência a compressão em quatro idades diferentes (3, 7, 14 e 21 dias), enquanto os corpos de prova de argamassa convencional foram desmoldados e submersos em água para o processo de cura úmida para as quatro idades.



Figura 4 – Corpos de prova de argamassa moldados em formas de 50x100 mm, a esquerda (A) argamassa álcali-ativada, a direita (B) argamassa convencional de cimento Portland.

Fonte: Autores, 2019.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados 25 testes de dosagem, tendo apenas 2 apresentado consistência, e não apresentaram exsudação e eflorescência no período monitorado de sete dias, sendo estes os principais fatores que levaram a inviabilizar os demais testes. Isso ocorre devido a dosagem entre os materiais e o ativador alcalino estarem diretamente ligadas ao desempenho do aglomerante produzido.

Fatores que levaram diversos testes a serem descartados está em um dos pontos principais da álcali-ativação, a dosagem correta do ativador NaOH com os demais componentes, pois este permite que o material alcance todas as suas propriedades, evitando a exsudação e a baixa reatividade, devido à falta de reagente, ou consequências decorrentes da grande abundância de reagente, como a eflorescência e o excesso de porosidade, prejudicando as propriedades do aglomerante. Estes aspectos também foram abordados por MURTA, 2008.

Para cada dosagem observa-se que o início e fim de pega obteve variações nos ensaios. O ensaio E01 manteve uma relação proporcional entre o início e o fim de pega (intervalo de 2 horas), enquanto o ensaio E02, que teve redução de cinza e acréscimo de RCV teve o aumento de uma hora para o início de pega, em relação E01, e o fim após oito horas e trinta minuto. Vale ressaltar que para o ensaio E02 houve adição de cinco gramas de NaOH e acréscimo de 40% de água comparado ao E01, apesar da reação de álcali-ativação não envolver a água como no cimento, este deve ser dosado criteriosamente para que não ocorra demasia e este interfira nas propriedades que garantem a trabalhabilidade.

Ensaio	NaOH (g)	Cinza (g)	RCV (g)	Água (g)	Início de Pega (horas)	Fim de Pega (horas)
E01	20	45	70	30	02:00	04:00
E02	25	40	80	50	03:00	08:30

Tabela 2 – Valores de dosagem e tempo de pega para os ensaios do aglomerante.

Fonte: Autores, 2019.

Os testes de consistência (figura 5) obtiveram os valores de 278, 260, milímetros, respectivamente para os ensaios E01, E02, podendo constatar-se a regressão no índice de consistência da argamassa produzida com o aglomerante álcali-ativado. Mesmo no teste onde houve maior acréscimo de água, obteve consistência inferior ao teste com menor quantidade de água, enquanto a argamassa convencional obteve 250 mm, conforme dados apresentados na tabela 2.

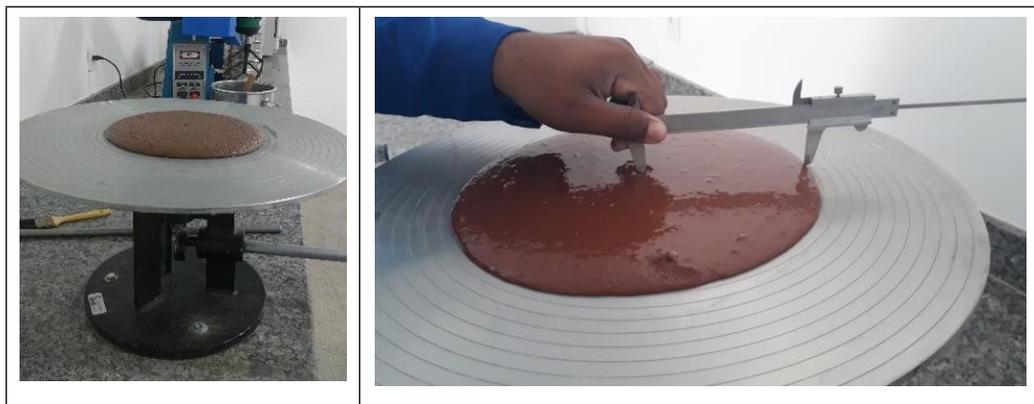


Figura 5 – Execução do teste de consistência do aglomerante álcali-ativado (Flow-Table).

Fonte: Autores, 2019.

Ensaio	Índice de consistência da argamassa (mm)
E01	278 ± 10
E02	260 ± 10
Convencional	250 ± 10

Tabela 3 – Tabela dos resultados de teste de executados na mesa de consistência (Flow-Table).

Fonte: Autores, 2019.

Após ser realizada o rompimento dos corpos de prova para avaliar sua resistência nas quatro idades, foi possível obter os resultados expressos na tabela a seguir:

Idade (dias)	Resistência atingida (MPa)		
	Convencional	Ensaio 01	Ensaio 02
3	1,11	0,81	0,74
7	1,39	0,98	0,96
14	2,04	1,04	1,04
21	1,36	1,02	0,97

Tabela 4 – Resultados obtidos pelo ensaio de compressão de corpos de prova de argamassa.

Fonte: Autores, 2019.

É possível observar, com os valores de resistência obtidos, que a argamassa álcali-ativada apresenta resistência inferior a argamassa convencional, e os testes mostras que para os ensaios 01 e 02, alcançaram resistências equiparadas.

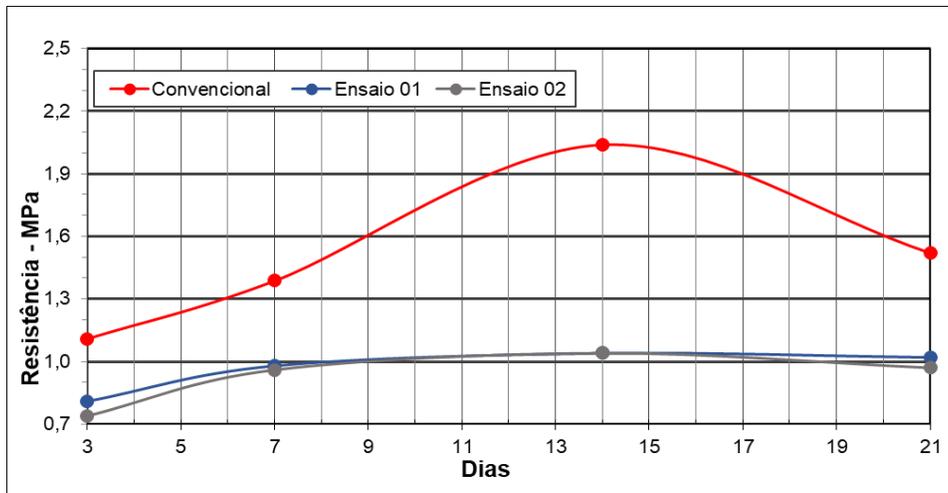


Figura 6 – Resistência a compressão de argamassa em quatro idades diferentes.

Fonte: Autores, 2019.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados do tempo de pega, os valores podem ser comparados a alguns tipos de cimento, tendo atingido o início de pega em tempo igual ou superior a uma hora e fim de pega inferior a 10 horas. Enquanto o teste de consistência Flow-Table possibilitou avaliar o fluxo da argamassa visando identificar os índices de consistências, com resultados variando 50 mm entre os ensaios.

Para tanto, os ensaios realizados de dosagem e os testes feitos em argamassa fresca com o novo aglomerante revelam a possibilidade de seu uso em assentamento e revestimentos, sendo um material que deve seguir à risca a dosagens padronizadas devido a facilidade de alteração das propriedades quando incorporado materiais de forma aleatória.

Outro fator que corrobora com a aplicação desse aglomerante na construção civil é seu baixo impacto ambiental, onde sua produção baseia-se no reaproveitamento de materiais da indústria da cerâmica vermelha e seu uso reduz a utilização de cimento, que requer muita energia em sua produção, emitindo enormes quantidades de CO<sub>2</sub> na atmosfera, enquanto o uso de aglomerante álcali-ativado utiliza como meio de reação um ambiente químico para gerar calor.

Dessa forma, o aglomerante possibilita a redução do impacto ambiental causado pela construção civil, possibilitando a reutilização de materiais evitando seu descarte e reinserindo-o no ciclo da construção civil.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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.

WANG, B.; XU, S.; LIU, F. **Evaluation of tensile bonding strength between UHTCC repair materials and concrete substrate**. Construction and Building Materials, v. 112, p. 595–606, 2016.

MAJIDI, B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. **Materials Technology**, v. 24, n. 2, p. 79-87, 2009.

GERALDO, R. H. et al. **Alkali-activated binder containing wastes: a study with rice husk ash and red ceramic**. Cerâmica, v. 63, n. 365, p. 44–51, 2017.

FAHIM HUSEIEN, G. et al. **Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, n. May, p. 54–74, 2017.

MURTA, F. L. **Produção de argamassas a partir da ativação alcalina de metacaulim e de resíduo de tijolo moído por cales virgem e hidratada**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, 2008.

CASSOL, G. **Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2015.

MATOS, S. R. C. **Desenvolvimento de Argamassa Alkali-Ativada para Utilização em Sistemas de Reparo com Incorporação de Cinza Agroindustrial**. Universidade Federal da Bahia – UFBA. Escola Politécnica. Salvador, 2018.

## ASPECTO HISTÓRICO DO PROJETO DO RESERVATÓRIO DO RIO ARICANDUVA NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO SOB O ASPECTO HIDROLÓGICO

*Data de aceite: 01/08/2022*

*Data de submissão: 08/07/2022*

### **Ariston da Silva Melo Júnior**

Doutor pela Unicamp e Pós- Doutor pelo IPEN/  
USP

São Paulo (SP), Brasil

<http://lattes.cnpq.br/0010807076892082>

### **Claudia de Oliveira Lozada**

Doutora pela USP e Pós- Doutora pela UFABC

São Paulo (SP), Brasil

<http://lattes.cnpq.br/0159685938643830>

### **João Jorge Pereira da Silva**

Mestre pela FIAM-FAAM

São Paulo (SP), Brasil

<http://lattes.cnpq.br/2994268404323406>

**RESUMO:** Desde o surgimento das primeiras civilizações na Mesopotâmia, berço dos impérios Babilônio e Assírio. O homem vem tendo uma forte ligação com a água. As primeiras civilizações começaram de modo rudimentar a estudar o comportamento das enchentes de modo a criar os primeiros sistemas de irrigação, bem como saber administrar os períodos de enchentes. Nos dias atuais, com a modernidade e o crescimento urbano fez com que seja cada vez mais importante o estudo da infraestrutura urbana, de modo a evitar ou diminuir as perdas materiais e de vidas, pelas chuvas intensas. A alta impermeabilização do solo pelo efeito de emprego de concreto e asfalto fez com que fosse necessário o estudo de metodologias de projetos

para captação de chuvas, tais projetos são os denominados reservatórios. São projetos que se popularizaram no Brasil ao final da década de 1990 e que vem sendo empregados em várias regiões do Brasil. Vale destacar a cidade de São Paulo que com seu crescente número populacional trouxe a necessidade de contenção de inundações. Entre os projetos de reservatórios vale destacar o reservatório do rio Aricanduva, localizado na região leste da área metropolitana de São Paulo. Sua construção e operação são objetos de estudo para o presente trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Piscinão; inundação; hidrologia; hidráulica.

### HISTORICAL ASPECT OF THE ARICANDUVA RIVER RESERVOIR PROJECT IN THE METROPOLITAN REGION OF SÃO PAULO FROM THE HYDROLOGICAL ASPECT

**ABSTRACT:** Since the birth of the first civilizations in Mesopotamia, cradle of the Babylonian and Assyrian empires. The man has a strong connection with water. Early civilizations began rudely to study the behavior of floods in order to create the first irrigation systems, as well as know how to manage flood periods. In today's modernity, urban growth makes it increasingly important to study urban infrastructure in order to avoid or reduce material and lives losses due to heavy rains. The high waterproofing of the soil due to the use of concrete and asphalt made it necessary to study the methodologies of projects to collect rainfall, such projects are called reservoirs. These projects were popularized in Brazil in the late 1990s and have been used

in various regions of Brazil. It is worth highlighting the city of São Paulo, which, with its increasing population, has brought the need to contain floods. Among reservoir projects it is worth mentioning the reservoir of the Aricanduva river, located in the eastern region of the metropolitan area of São Paulo. Its construction and operation are objects of study for the present work.

**KEYWORDS:** Big pool; inundation; hydrology; hydraulics.

## INTRODUÇÃO

O problema das inundações do rio Aricanduva veio se agravando com a intensificação do processo de urbanização, e consequente impermeabilização do solo da Bacia hidrográfica, evidenciada a partir da década de 1970.

Neste processo deve-se agregar como elemento adicional para o agravamento das condições hidráulicas da bacia, a profusão de obras de canalização, tanto do rio Aricanduva, como de vários de seus afluentes.

Nos últimos 30 anos foram observados uma gradual mudança do comportamento hidrológico da bacia, principalmente pela redução dos tempos de concentração; com isto as inundações passaram a ter uma periodicidade praticamente anual, sendo provocadas por em sua maior parte, por chuvas com durações entre 30 e 120 minutos (PMSP, 1999).

As obras de canalização e melhorias hidráulicas propriamente ditas do rio Aricanduva, e de vários de seus afluentes, desenvolveram-se entre 1970 e meados da década de 80, tendo-se no início da década de 1970 a implantação do trecho compreendido entre a sua foz e as imediações da Avenida Radial Leste.

O rio Aricanduva, no trecho compreendido entre as imediações da Avenida Radial Leste e a Avenida Itaquera foi canalizado pela Prefeitura de São Paulo através da EMURB, no período compreendido entre 1976 e 1980, com implantação de pistas marginais ao canal.

As primeiras intervenções no córrego Rincão, principal afluente da margem direita do rio Aricanduva, também foram efetuadas na década de 70. Posteriormente, em 1985, por ocasião da implantação da Linha Leste do METRÔ, a Companhia do Metropolitano de São Paulo efetuou a canalização do córrego Rincão no trecho compreendido entre a sua foz e proximidades da Estação Penha do METRÔ e nas imediações da Estação Vila Matilde; a transposição sob os ramais ferroviário e metroviário, e sob a Avenida Radial Leste foram efetuados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) (PMSP –SVP, 1986).

## CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA

O rio Aricanduva, afluente pela margem esquerda do rio Tietê, tem sua bacia localizada no setor leste - sudeste da cidade de São Paulo; com uma área de drenagem de cerca de 100 km<sup>2</sup>, tem suas nascentes próximas da cidade de Mauá, adjacentes ao divisor norte das cabeceiras do rio Tamanduateí. Morfologicamente, a bacia, orientando-se na

direção geral SSE-NNW, tem um eixo maior de 20 km e larguras variando entre 5 e 6 km (CAMPANA & TUCCI, 1994).

Os afluentes do rio Aricanduva, principalmente os da margem direita, são todos de pequena expressão, excetuando-se o ribeirão Rincão/Gamelinha, próximo à sua desembocadura.

Na margem esquerda os afluentes são de porte pouco maior, destacando-se o rio Caaguassu, localizado no trecho médio do rio Aricanduva, além dos córregos do Tabão e dos Machados.

Climatologicamente a região se classifica como tropical sub-úmida, com boa definição dos regimes pluviométricos. Tomando-se por base o Atlas Pluviométrico do Estado de São Paulo, verifica-se que a pluviosidade total anual média da bacia está compreendida entre 1.300 e 1.400 mm; a estação chuvosa (de outubro a março) tem um índice médio no entorno de 1.000 mm e a estação seca (de abril a setembro), um índice pouco inferior a 300 mm (CAMPANA & TUCCI, 1994).

## **CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA REGIÃO**

Destaca-se inicialmente o fato do relevo de uma região ser decorrente direto do litotipo presente, bem como de sua estruturação.

No caso da bacia do rio Aricanduva, tal dependência passa a ter grande evidência nas áreas de ocorrência dos micaxistos, que por ter sua marcante xistosidade orientada regionalmente na direção geral NE-SW, com mergulhos quase vertical, geralmente associada a sistemas de fraturas com ou sem cisalhamento, condiciona um relevo acentuado com vertentes íngremes.

Mesmo sob a influência de tão marcante controle estrutural, a elevada densidade da drenagem imprimiu um padrão quase dendrítico nestas áreas de micaxistos, principalmente nas porções mais altas dos cursos d'água (CAMPANA & TUCCI, 1994).

A área da bacia possui declividades superiores a 20%. Geomorfologicamente, sob um enfoque mais específico, tomando-se por base o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, a bacia do rio Aricanduva abrange duas Unidades Morfoesculturais principais: as porções Alta e Média da bacia situam-se na Unidade denominada Planalto Paulistano / Alto Tietê, pertencente ao Cinturão Orogênico do Atlântico, enquanto que o trecho Baixo situa-se na Unidade denominada Planalto de São Paulo, pertencente às Bacias Sedimentares Cenozóicas / Depressões Tectônicas (USP/IPT/FAPESP, 1997).

## **ESTUDO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DO PROJETO**

### **Critérios de Projeto - Precipitações Intensas na RMSP**

Existem três equações IDF (intensidade – duração - frequência) disponíveis para a

RMSP, determinadas por Paulo Wilken, Antonio Garcia Occhipinti e Felix Mero.

A equação 1 é a que fornece maiores valores de chuva no ponto, referindo-se ao posto do IAG (Instituto Astronomia e Geociências), cuja equação 1 é a seguinte, para durações entre 1 e 24 horas:

$$i = t^{-0,821} \cdot \{16,14 - 5,65 \cdot \log \ln [T/(T-1)]\} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$i$  = intensidade da chuva em mm/min;

$t$  = duração da chuva em minutos; e

$T$  = período de retorno em anos.

### Distribuição Espacial das Chuvas

Para a aplicação da equação 1 de Mero (válida para um ponto específico) em toda a área de drenagem é necessário aplicar-se um coeficiente de redução. Considerando-se a área de drenagem da bacia do rio Aricanduva em torno de 100 km<sup>2</sup>, aplica-se a seguinte equação 2 de redução:

$$P_{\text{área}} = P_{\text{ponto}} \cdot k \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$P_{\text{área}}$  = precipitação na área;

$P_{\text{ponto}}$  = precipitação no ponto;

$K = 1,0 - [0,1 \cdot \log(A/A_0)]$ ;

$A = 100 \text{ km}^2$ ;

$A_0 = 25 \text{ km}^2$ ; e

$K = 0,94$

Com estes critérios foram consideradas as seguintes condições para projeto:

- Chuvas analisadas com 2 horas de duração;
- Distribuição temporal segundo a distribuição de Huff 1º quartil; e
- Períodos de retorno analisados: 02, 10, 25, 50 e 100 anos.

As chuvas consideradas foram armazenadas na tabela 1, logo a seguir.

Chuva Distribuída	Precipitação de 2 horas (mm)			
	T=2	T=10	T=25	T=100
Ponto (k=1,00)	43,00	68,04	80,64	99,24
Área (k=0,94)	40,42	63,96	75,80	93,29

Tabela 1 - Precipitações de projeto (equação de Mero)

## Condições Básicas para as Simulações

As simulações hidrológicas foram efetuadas com o auxílio do modelo CABIC (Análise de Bacias Complexas), desenvolvido pela FCTH (1998), o qual utilizou a metodologia do HUT (Hidrograma Unitário Triangular) do USCS (*US Soil Conservation Service*).

O algoritmo do USCS, para o cálculo de chuva excedente, utilizou o conceito do “número de deflúvio” – CN, que procura definir, através de um único valor numérico, a influência do terreno no comportamento do escoamento superficial.

A definição destes valores está associada à constituição geológica da área, ao tipo de cobertura e uso do solo.

A maior dificuldade na definição do coeficiente “CN” deve-se ao fato do mesmo ser resultado da composição de diversas parcelas de tipos de solos e coberturas associadas a áreas permeáveis e impermeáveis.

Para as parcelas das áreas consideradas em condições naturais, utilizaram-se os dados do Relatório “Análise Geológica e Caracterização dos Solos da Bacia do Alto Tietê para a Avaliação do Coeficiente de Escoamento Superficial”.

Para a estimativa da parcela impermeável das sub-bacias, tomou-se como base a relação densidade populacional-área impermeável constante do trabalho “Estimativa de Área Impermeável de Macrobacias Urbanas”- (CAMPANA e TUCCI, 1994), considerando as equações 3 e 4 de ajuste:

$$A_{imp} = -3,86 + 0,55 d \text{ (para } 7,02 \leq d \leq 115 \text{ hab.ha}^{-1}\text{)} \quad \text{Equação 3}$$

$$A_{imp} = 53,2 + 0,054 d \text{ (para } d > 115 \text{ hab.ha}^{-1}\text{)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$A_{imp}$  = % de área impermeável; e

$d$  = densidade populacional (hab.ha<sup>-1</sup>).

## Condições de Ocupação da Bacia do Aricanduva

De acordo com os censos demográficos realizados pelo IBGE entre 1991 e 1996 para os Distritos da bacia do rio Aricanduva, com uma área de 100 km<sup>2</sup>, tinham-se dados de densidades populacionais que variavam entre 71,2 e 94,2 hab.ha<sup>-1</sup> na região das cabeceiras da bacia, onde estão concentradas as maiores reservas de áreas verdes, como nos distritos Parque do Carmo e São Mateus, até valores entre 137,4 e 163,4 hab.ha<sup>-1</sup> em áreas mais densamente urbanizadas, como os distritos de Vila Formosa e Vila Prudente. Para toda a bacia, a média desses valores foi de 114,4 hab.ha<sup>-1</sup> (DAEE, 1998).

O exemplo do verificado em estudos, para outros municípios como os integrantes da bacia do Aricanduva, os municípios que já atingiram valores desta ordem de grandeza (ver tabela 2), provavelmente já se encontram em estado de estagnação ocupacional, como é o caso específico do distrito de Vila Prudente (DAEE, 1998).

Entende-se que o valor de 153 hab.ha<sup>-1</sup> seria um limite máximo de ocupação a serem

alcançados também nos demais distritos integrantes da mesma bacia, onde se considerou que ainda haveria espaço para uma expansão populacional.

A tabela 2 a seguir apresenta os valores de área de ocupação para o período do projeto.

Administração Regional	Distrito	População 1991	População 1996	Variação (%)
Moóca	Carrão	87.336	79.424	-9,1
	Tatuapé	81.440	77.492	-4,8
Penha	Penha	133.006	126.960	-4,5
	Vila Matilde	109.023	99.414	-8,8
Aricanduva / Vila Formosa	Aricanduva	96.512	91.439	-5,3
	Vila Formosa	97.940	91.410	-6,7
Itaquera	Cidade Líder	97.370	98.313	+1,0
	Parque do Carmo	54.743	56.154	+2,6
	José Bonifácio	103.712	103.933	+0,2
Vila Prudente	Sapopemba	257.617	254.922	-1,0
São Mateus	São Mateus	150.764	160.114	+6,2
	Iguatemi	59.820	89.835	+50,2
	São Rafael	89.862	101.531	+13,0
<b>Total</b>		1.419.545	1.430.941	+0,8

Tabela 2 - Bacia do rio Aricanduva Censos Populacionais de 1991 e 1996.

Fonte: DAEE, 1998.

## COMPARTIMENTAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Para aplicação do modelo CABC com representação das vazões nas treze bacias de detenção na bacia do rio Aricanduva, foram compartimentadas em sub-bacias.

O trecho final canalizado do rio Aricanduva apresenta uma restrição de descarga em torno de  $280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; entre a foz do córrego Rincão até o rio Tietê. O que ocasionou na necessidade de revestimento do fundo desse canal.

Assim, a PMSP, através da GEPROCAV, realizou obras de combate às inundações que compreendem reforços e melhorias dos canais existentes e a construção de bacias de detenção (GEPROCAV, 1997).

## EFEITOS DA IMPLANTAÇÃO DAS BACIAS DE DETENÇÃO

Um aspecto bastante importante a ser considerado refere-se às condições de níveis d'água do rio Tietê que poderiam provocar efeitos de remanso ao longo do trecho final canalizado do Aricanduva (GEPROCAV, 1997).

Para as condições da calha do rio Tietê, os níveis d'água na foz do Aricanduva situavam-se em torno da cota 722,00, para eventos com períodos de retorno ( $T_R$ ) de 2 anos.

Com o rebaixamento completo da calha do rio Tietê até a barragem da Penha, os níveis na foz do Aricanduva foram para entre 721,00 e 721,50 para períodos de retorno de até 100 anos.

Verificou-se em cálculos preliminares de remanso que a cota 722,00 no rio Tietê representava uma condição extrema para não provocar efeitos de remanso no Aricanduva (GEPROCAV, 1997).

Daí a grande importância da implantação do projeto de rebaixamento da calha do rio Tietê, em toda a sua extensão. Para as simulações hidráulicas, foi admitida a curva cota-vazão na foz do rio Aricanduva com o rio Tietê, mostrada na figura 1, a seguir.

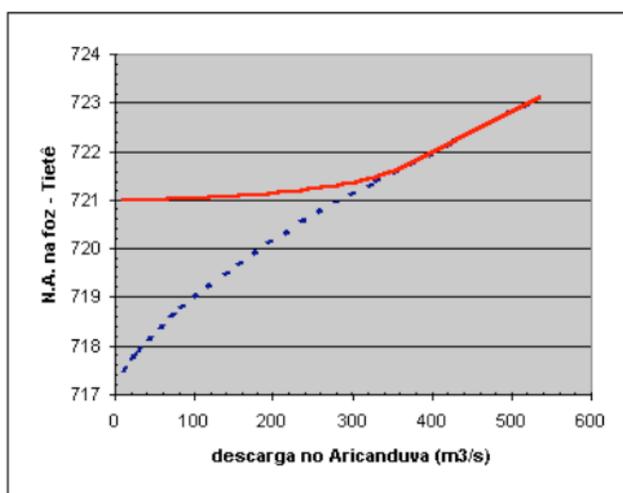


Figura 1 – Curva cota-vazão na foz do Aricanduva (GEPROCAV, 1997).

As simulações foram realizadas com o modelo CLIV, em regime permanente gradualmente variado, e abrangeram investigações das seguintes condições:

- Situação sem obras adicionais para  $T_R = 2$  anos, com a calha assoreada;
- Situação de projeto com 10 reservatórios (Etapa 1), com o fundo de projeto desassoreado, considerando-se revestimento entre estacas 103 e 325, para  $T_R = 10$  anos; e
- Idem, para a situação de projeto com 13 reservatórios (Etapa 2), para  $T_R = 25$  e 100 anos

As figuras 2 e 3 a seguir indicam os resultados dos cálculos efetuados.

ESTACA	DISTÂNCIA (m)	LOCAL	T= 2 anos		T= 10 anos		T= 25 anos		T= 100 anos	
			Sit. Sem Obras		Etapa 1 (10 Reserv.)		Etapa 2 (13 Reserv.)		Etapa 2 (13 Reserv.)	
			N.A.	Q (m <sup>3</sup> /s)	N.A.	Q (m <sup>3</sup> /s)	N.A.	Q (m <sup>3</sup> /s)	N.A.	Q (m <sup>3</sup> /s)
E665,8	13.316	jus-RAR-3	754,87	66	752,88	72	753,37	101	754,08	147
E637,2	12.744		752,78		750,87		751,41		752,19	
E593,7	11.874	jus-RAR-4	749,14	71	748,15	72	747,73	52	748,34	82
E548,1	10.922		746,09		746,14	746,14	746,14		746,34	
E503,9	10.078	MACHADOS	743,69	103	742,96	99	742,64	81	743,18	112
E460,8	9.016		740,62		740,21		739,87		740,65	
E437,8	8.756	INHUMAS	740,03	111	739,74	99	739,42	81	740,29	113
E379,4	7.588		737,24	119	737,28	137	737,22	132	738,08	184
E325,6	6.512	TAPÃO	735,32	128	734,55	173	734,78	185	735,88	262
E292,6	5.852		734,14		733,57		733,84		734,89	
E260,5	5.210		732,94		732,64	194	732,86	200	733,85	281
E230,2	4.604		731,79		731,53		731,76		732,83	
E179,6	3.692		730,21		729,69	196	729,99	216	731,13	304
E134,7	2.694	RAPADURA	727,82	138	727,91	207	728,23	232	729,38	325
E121,9	2.438		727,26		727,44		727,74		728,86	
E103,2	2.064		726,53		726,76		727,01		728,08	
E85,5	1.710	RINCÃO	724,88	198	725,96	283	725,93	280	727,19	397
E81,8	1.636		724,49		725,70		725,67		726,90	
E78,1	1.562		724,24		725,47		725,44		726,65	
E74,4	1.488		724,01		725,24		725,21		726,40	
E70,7	1.414		723,80		725,01		724,98		726,14	
E67,0	1.340		723,59		724,78		724,75		725,88	
E63,3	1.266		723,39		724,54		724,51		725,62	
E59,6	1.192		723,19		724,30		724,27		725,35	
E55,9	1.118		723,00		724,04		724,01		725,07	
E52,2	1.044		722,80		723,77		723,74		724,76	
E48,5	970		722,59		723,46		723,44		724,42	
E44,95	897		722,37		723,09		723,06		723,97	
E0	0	FOZ DE IETÊ	722,00	198	721,00	283	721,00	280	721,80	397

Figura 2 – Quadro dos resultados das Simulações em Regime Permanente com Bacias de Detenção e Revestimento (GEPROCAV, 1997).

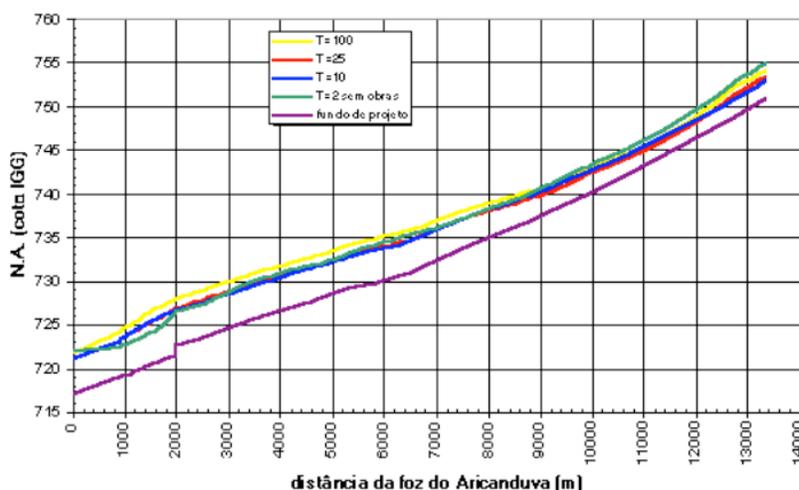


Figura 3 – Perfis das linhas d'água – Com bacias de detenção e revestimento (regime permanente) (GEPROCAV, 1997).

## AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE CN

O coeficiente CN (Coeficiente de Deflúvio), a ser aplicado à parcela de área permeável da bacia do rio Aricanduva, considerando as suas características geológicas, foi avaliado igual a 66, conforme referência do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica).

A parcela de área impermeável da bacia urbanizada, para o ano de 2020, considerando uma densidade populacional de 153 hab.ha<sup>-1</sup>, foi estimada em 61,5%.

Assim sendo, para as regiões consideradas com maior potencial de urbanização, as simulações hidrológicas da bacia, visando estabelecer vazões de projeto para o ano 2020, foi considerado um coeficiente CN médio ponderado, com base nas parcelas de áreas permeáveis e impermeáveis, na equação 5:

$$\text{CN}_{\text{méd}} = 66 \cdot A_{\text{perm}} + 98 \cdot A_{\text{imp}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$$A_{\text{perm}} = (1,000 - 0,615) = 0,385$$

$$A_{\text{imp}} = 0,615$$

$$\text{CN}_{\text{méd}} = 85,68 \text{ aprox. adotado } \text{CN}_1 = 86$$

Para levar em conta as reservas de áreas verdes e parques públicos existentes, para a região das cabeceiras, a montante do córrego Caaguassu, considerou-se uma redução do valor ponderado  $\text{CN}_1=86$ , fixando-se que 25% dessas áreas ainda permaneceriam intactas.

$$\text{CN}_2 = 0,75 \cdot 86 + 0,25 \cdot 66 = 81$$

Para áreas intermediárias entre a região das cabeceiras e a região mais urbanizada adotou-se um coeficiente  $\text{CN}_3=83$ .

Para efetivação dos dados foi instalado um limnógrafo à margem esquerda do ribeirão Gamelinha, a montante da passarela de pedestres próxima à esquina da Rua Geralda Maria de Jesus Santos com a Avenida Margarida Maria Alves.

O perfil do ribeirão é em cascata, na forma de trechos horizontais e quedas no perfil. O posto ficou entre duas dessas quedas.

O trecho reto e as laterais e fundo do canal são em concreto. Também foram instalados na bacia do ribeirão Gamelinha dois pluviográficos.

O primeiro, próximo a cabeceira do ribeirão na rua Cravo da Índia n.º 28 B, Parque Savoy City, e o segundo, próximo ao centro da bacia na praça Marcelo Tostes n.º 18, esquina com a rua Sabaudia no bairro Cidade Patriarca.

As respectivas áreas de influência de cada um dos postos foram as seguintes:

- Área de drenagem no local do limnógrafo: 7,57 km<sup>2</sup>;
- Área de influência do posto Sabaudia: 2,95 km<sup>2</sup>; e
- Área de influência do posto Savoy City: 4,62 km<sup>2</sup>.

A planta esquemática da calibração do CN encontra-se na figura 4, a seguir.

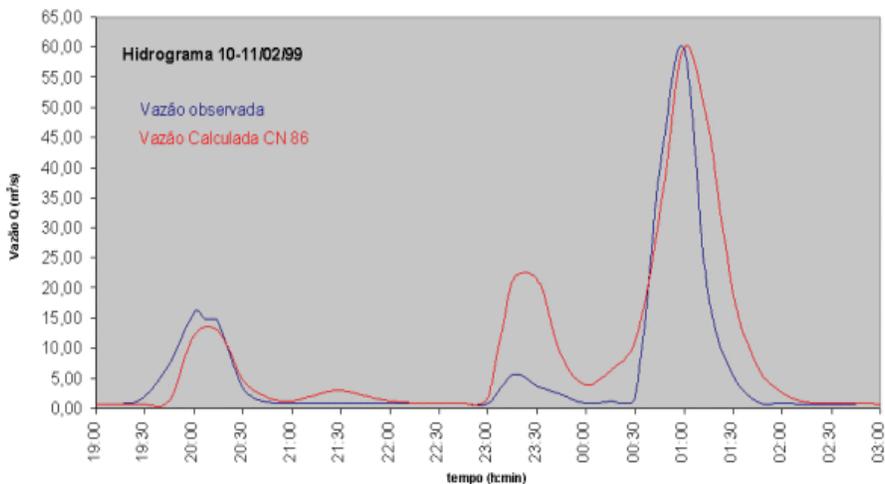


Figura 4 – Verificação da calibração do coeficiente CN=86

## AÇÕES NÃO ESTRUTURAIS

A bacia do rio Aricanduva sofreu um processo de ocupação urbana que não se limitou às porções média e inferior da bacia, propagando-se inclusive para as cabeceiras, colocando em risco uma das únicas áreas de preservação ambiental da bacia do Alto Tietê (DAEE, 1998).

As áreas preservadas na bacia do Aricanduva compreendia, até 1998, uma superfície estimada em 25 km<sup>2</sup>.

Estas áreas correspondiam a uma parte da APA do Parque do Carmo e um conjunto de vegetação abrangendo praticamente toda a cabeceira formadora do rio Aricanduva e de alguns de seus tributários.

O projeto desenvolveu trabalhos de campo com a preocupação de avaliar o impacto ocorrido nos últimos cinco anos no período de implantação, sobre as áreas ainda preservadas (DAEE, 1998).

Observou-se a supressão de grande quantidade de biomassa, estimando-se que a área total preservada na bacia não ultrapassa 12,4 km<sup>2</sup>, ou seja, 50% da área ainda não ocupada nos cinco anos de implantação.

A ilustração da figura 5 a seguir mostra o atual estágio de ocupação da bacia (DAEE, 1998).

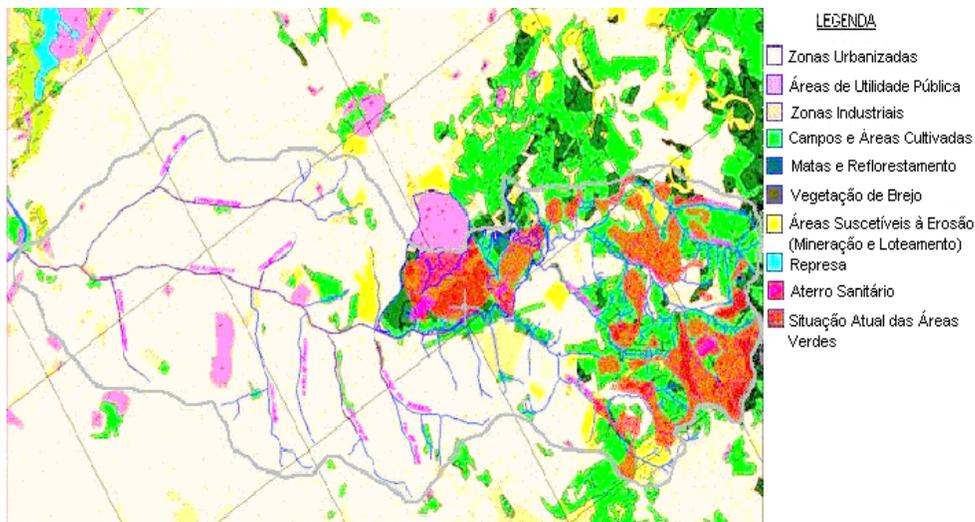


Figura 5 - Bacia do Rio Aricanduva - Evolução da Urbanização 1994/2018 (DAEE, 1998).

## CONCLUSÕES

Nas condições atuais da calha, a linha d'água resultante encaixa-se perfeitamente dentro da calha do rio Aricanduva, em toda a sua extensão, exceto sob as pontes existentes entre as estacas 150 (montante do Rincão) e 300 (jusante do Taboão) cuja face inferior das vigas encontra-se cerca de 0,50 a 1,0 m abaixo dessa linha d'água.

O desassoreamento da calha nesse trecho ou medidas na calha a montante do Taboão poderiam promover o desafogamento dessas pontes, para essa situação hidrológica.

A inserção do reservatório RAR-4, nesta etapa, foi de fundamental importância para controlar as vazões no referido trecho mais crítico e, conseqüentemente, manter a descarga na foz igual a  $280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

A calha do Aricanduva, compreendida no trecho entre as estacas 330 e 100, não suportaria um acréscimo das vazões ainda remanescentes, a jusante. Para atender tal situação, foi necessário implantar uma galeria auxiliar (sistema de desvio) dimensionada para uma vazão de aproximadamente  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , no seu trecho final junto ao Tietê.

## REFERÊNCIAS

CAMPANA & TUCCI. **Estimativa de Área Impermeável de Macrobacias Urbanas**. Revista Brasileira de Engenharia, nº 2, v. 12, 1994.

DAEE. **Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê**. Análise Geológica e Caracterização dos Solos da Bacia do Alto Tietê para Avaliação do Coeficiente de escoamento Superficial – Relatório PDAT1-GL-RT-037 – Dezembro de 1998.

GEPROCAV. **Projeto Básico do Córrego Rapadura no trecho Rua Comendador Gil Pinheiro à Rua Visconde de Balsemão** (extensão: 2.250m)- Estudos Hidrológicos – Rel. GEPROCAV 1-021/97-HIB-001-RT-001-rev 0-ago/97 e Desenhos GEPROCAV-1-021/97-HIB-002 a 008-DE-078 a 82;89 e 90–rev A, novembro de 1997.

PMSP. **Canalização do Córrego Rincão**. Trecho entre Estacas 20 e 47 – Desenhos 130.746 e 130.747, Maio de 1986.

PMSP. **Canal do Aricanduva – Trecho Inferior Proposição de Intervenções visando a sua Melhoria Hidráulica**. Abril de 1999.

USP / IPT / FAPESP. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. 1997.

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES DAS ÁREAS RIBEIRINHAS PÓS DESASTRE: UM OLHAR PARA O BANCO DA VITÓRIA, ILHÉUS-BA

*Data de aceite: 01/08/2022*

### **Igor Ângelo Lobão de Souza**

Graduando em Engenharia Civil, Faculdade de Ilhéus

### **Joandre Neres de Jesus**

Servidor Público, Prefeitura Municipal de Ilhéus/Ba

### **Vanessa Neri de Souza**

Especialista em Segurança do Trabalho, Faculdade de Tecnologia e Ciências

### **Kaique Ourives Silva**

Professor, Especialista em Segurança do Trabalho, Faculdade de Ilhéus

### **Ozana Almeida Lessa**

Doutora em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Pós-Graduada em Engenharia Ambiental Urbana pela Universidade Federal do Sul da Bahia-UFSB

**RESUMO:** Desastres são responsáveis por diversas perdas que afetam diretamente a população. No que tange às perdas materiais, danos causados às moradias implicam em perdas econômicas e afeta socialmente os ribeirinhos. Assim, o presente trabalho objetiva avaliar impactos estruturais ocorridos nos imóveis da população ribeirinha do bairro Banco da Vitória na cidade de Ilhéus/ Bahia após a enchente de 24 e 25 dezembro de 2021 e propor ações mitigadoras. Para isso, realizou-se um levantamento de dados através de documentos obtidos na Defesa Civil

da Prefeitura Municipal de Ilhéus/Ba e visita aos domicílios. Foi possível identificar que cerca de 20% da população do bairro em análise teve suas casas inundadas e em torno de 10% destas, tiveram suas casas destruídas. Patologias como fissuras, bolores e rachaduras foram identificadas. Fatores para além de ocupações indevidas de áreas ribeirinhas também foram verificados: construções em solo encharcado, obras sem supervisão de profissional habilitado, imóveis antigos e sem manutenção, expansão de bairro sem planejamento em conjunto com a enchente exerceram influência direta nos danos identificados. Como ação corretiva o governo propõe a construção de novas áreas de moradia para remanejamento dos ribeirinhos e é importante um trabalho de conscientização dos riscos ofertados a ocupações próximas ao rio, conscientização ambiental e melhoria nas condições socioeconômicas dos moradores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Enchente. Patologia da construção. Gerenciamento de riscos.

### STRUCTURAL ANALYSIS OF BUILDINGS IN RIVER AREAS AFTER DISASTER: A LOOK AT BANCO DA VITÓRIA, ILHÉUS-BA

**ABSTRACT:** Disasters are responsible for several losses that directly affect the population. With regard to material losses, damage caused to housing implies economic losses and socially affects riverside dwellers. Thus, the present work aims to evaluate structural impacts that occurred in the properties of the riverside population of the Banco da Vitória neighborhood in the city of Ilhéus / Bahia after the flood of December

24 and 25, 2021 and to propose mitigating actions. For this, a data collection was carried out through documents obtained in the Civil Defense of the Municipality of Ilhéus/Ba and visits to the homes. For this, a data collection was carried out through documents obtained in the Civil Defense of the City Hall of Ilhéus/Ba. It was possible to identify that about 20% of the population of the neighborhood under analysis had their homes flooded and around 10% of these had their homes destroyed. Pathologies such as fissures, mold and cracks were identified. Factors in addition to undue occupation of riverside areas were also verified: constructions on waterlogged soil, works without the supervision of a qualified professional, old and unmaintained buildings, unplanned neighborhood expansion together with the flood had a direct influence on the identified damages. As a corrective action, the government proposes the construction of new housing areas for the relocation of riverside dwellers and it is important to raise awareness of the risks offered to occupations close to the river, environmental awareness and improvement in the socioeconomic conditions of the residents.

**KEYWORDS:** Flood. Construction pathology. Risk management.

## 1 | INTRODUÇÃO

A história da construção de imóveis permeia pela necessidade do homem de armazenar seus mantimentos, se proteger das intempéries da natureza e também de firmar moradia em local de sua escolha (POUEY & LAROQUE, 2022). Segundo a NBR 5674 (2012), os elementos estruturais são projetados para determinada função e vida útil, ou seja, para um intervalo de tempo ao longo do qual uma edificação e suas partes constituintes atendem aos requisitos funcionais para os quais foram projetadas.

Souza e Hipper 2009 explicam que há diversos processos de deterioração das estruturas e, para este fim, classificam-se as origens em causas intrínsecas (inerentes às estruturas) e extrínsecas (externas ao corpo estrutural). Ambas as origens podem ser resultado de falhas humanas, causas naturais próprias ao material concreto e ações externas. Dentro das ações externas, que são aquelas que independem da composição interna do concreto e de falhas durante a execução da obra, é possível destacar a influência de fatores físicos que são oriundos de causas naturais como variação de temperatura, vento e atuação da água.

Ilhéus é uma cidade do interior da Bahia, Brasil cercada por águas. O bairro Banco da Vitória pertencente à ela é uma localidade centenária que antecede a própria emancipação da cidade. O Banco da Vitória é uma das localidades mais antigas do Sul da Bahia. Sua ocupação se iniciou no meado do século XV, quando do desbravamento da Capitania de São Jorge dos Ilhéus (BA). Devido ao trecho navegável do rio Cachoeira entre a sede da antiga vila de São Jorge dos Ilhéus e a localidade, onde estiveram padres jesuítas, desbravadores e bandeirantes portugueses, bem como estudiosos europeus. Antes da ocupação portuguesa, a região de Banco da Vitória era disputada por índios Tupiniquins e Aimorés, devido seu caráter religioso para estes povos. Por mais de quatro séculos essa localidade foi passagem obrigatória para os desbravadores, plantadores de

cacau e fundadores de localidades e cidades que surgiram na região Cacaueira do Sul da Bahia (RODRIGUES, 2017).

Segundo Tucci e Bertoni (2003) as inundações ribeirinhas são de ocorrência natural e ocorrem em bacias de grande e médio porte, onde o declínio da área é baixo e a seção de escoamento é pequena. Durante uma chuva muito intensa se for maior que a capacidade de drenagem do rio, resultará em inundações nas áreas ribeirinhas.

As enchentes e as inundações são fenômenos naturais, os impactos negativos estão relacionados com as intervenções antrópicas sob as condições e limites naturais do meio em que vive a população, principalmente em áreas suscetíveis, como as planícies de inundações (ALVES et al., 2013).

Segundo o IBGE e o CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) Ilhéus possui 11.285 pessoas expostas em áreas de risco, estando elas sujeitas a inundações, enxurradas e deslizamentos provocados por desastres naturais.

De acordo com o mapeamento de riscos da Coordenação Municipal de Defesa Civil de Ilhéus/BA o volume necessário para provocar deslizamentos de terra, alagamentos e outros eventos relacionado à desestabilização do solo pela chuva é de 50 mm em 24 horas corridos.

Porém nos dias 24 e 25 de dezembro de 2021 choveu na região sul da Bahia, o volume esperado para o mês inteiro em apenas 2 dias. Esse evento atípico foi provocado pelo fenômeno *El Niña*. Os fenômenos naturais tem aumentado no decorrer dos anos com o aquecimento global provocado pela emissão de gases poluentes. A normal climatológica deste município é de 160 mm a 204 mm para o mês de dezembro. Esse acumulado de chuvas levou a um desastre na região.

Os problemas de umidade, além de ser frequentes, representam um dos maiores problemas de uma edificação durante sua vida útil. A frequência da ocorrência da patologia de umidade está associada à idade da construção, ao clima, aos materiais e técnicas construtivas aplicadas e ao nível de controle de qualidade realizado nas construções (Jonov, et al., 2013) e esses fatores são agravados após enchentes onde os imóveis ficam horas ou dias submersos.

Diante desse contexto, o presente trabalho objetiva avaliar impactos estruturais ocorridos nos imóveis da população ribeirinha do bairro Banco da Vitória na cidade de Ilhéus/ Bahia após enchente de 2021 através de levantamento de dados obtidos pela Defesa Civil local e, expor ações mitigadoras para o pós desastre.

## 2 | METODOLOGIA

### 2.1 Área de Pesquisa

Ilhéus é uma cidade de Estado do Bahia, localizada no interior, ao sul e dista 310

Km da capital Salvador. O município se estende por 1.760 km<sup>2</sup> e contava com 184.236 habitantes e densidade demográfica de 104,67 habitantes por km<sup>2</sup> no último censo (IBGE, 2010) e, atualmente, estima-se uma população de 157.639 pessoas (IBGE, 2021). Situado a 9 metros de altitude, Ilhéus tem as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 14° 47' 50" Sul, Longitude: 39° 2' 8" Oeste (site oficial da Prefeitura Municipal de Ilhéus).

O bairro em estudo é um dos 27 bairros de Ilhéus e chama-se Banco da Vitória, ele está localizado à zona oeste de Ilhéus/Ba e possui em torno de 2.900 habitantes, sendo 30% de população moradora à margem do rio Cachoeira.

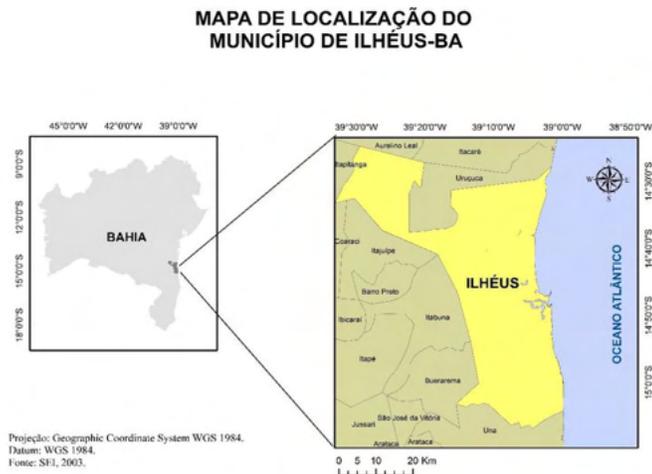


Figura 1. Mapa de localização da cidade de Ilhéus-Ba

Fonte: Santos et al., 2017.

## 2.2 Caracterização durante desastre

Para a realização desta pesquisa foi feito um estudo de caso após visita “*in loco*” ao bairro de população ribeirinha, banhado pelo rio Cachoeira chamado Banco da Vitória durante a enchente de 24 de dezembro de 2021 no município de Ilhéus-Ba. A visita foi realizada em conjunto com a Defesa Civil Municipal para avaliação estrutural das edificações e identificar os riscos que a população estava exposta. Além disso, posteriormente, foram feitas buscas em arquivos públicos gerados após o desastre.

## 2.3 Vistorias aos domicílios

A vistoria aos domicílios foi realizada no período entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022. Nas vistorias foram observadas características das edificações tais como idade, padrão construtivo, estado de conservação, manifestações patológicas e eventuais medidas de proteção existentes, bem como realizados registros fotográficos.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização do Evento

Fortes chuvas foram iniciadas na manhã do dia 24 de dezembro de 2021 e se estenderam ininterruptamente até o dia 25. Segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), nesse período de 48 horas, foram registrados 203,7 mm de chuvas no pluviômetro instalado no Bairro do Malhado, localizado à zona norte de Ilhéus/Ba e 151,12 mm no pluviômetro localizado no Bairro da Conquista, centro da cidade.

Esse evento atípico para a região nesta época, deve-se ao fenômeno *La Niña*, que esfria as águas do Pacífico equatorial, causando um aumento de chuvas no centro-norte do Brasil, reforçado pelo *El Niño*, que aquece o Atlântico, levando calor e umidade ao Nordeste. “Em resumo, tanto o oceano Atlântico como o Pacífico estão trabalhando juntos para termos chuvas acima da média na região nordeste”, explica o meteorologista Marcelo Seluchi, do CEMADEN.

Nos últimos anos, a ocorrência de extremos de precipitação tem aumentado e, segundo o IPCC (Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas) continuará crescendo, em decorrência das mudanças climáticas.

Além das questões ambientais, existem os condicionantes antrópicos que favorecem a ocorrência de enchentes como: uso e ocupação irregular nas planícies e margens de cursos d’água; disposição irregular de lixo nas proximidades dos cursos d’água; alterações nas características da bacia hidrográfica e dos cursos d’água (vazão, retificação e canalização de cursos d’água, impermeabilização do solo, entre outras). Sobretudo com a ocupação antrópica de várzeas e planícies fluviais é comum o enfrentamento de problemas com a ocorrência de enchentes e inundações (Guasseli; Oliveira; Alves, 2013).

A Figura 2 apresenta o mapa do bairro Banco da Vitória em Ilhéus/Ba com destaque em vermelho para a área afetada pela enchente de dezembro de 2021, em amarelo corresponde à área da população ribeirinha e em azul o trecho do Rio Cachoeira.

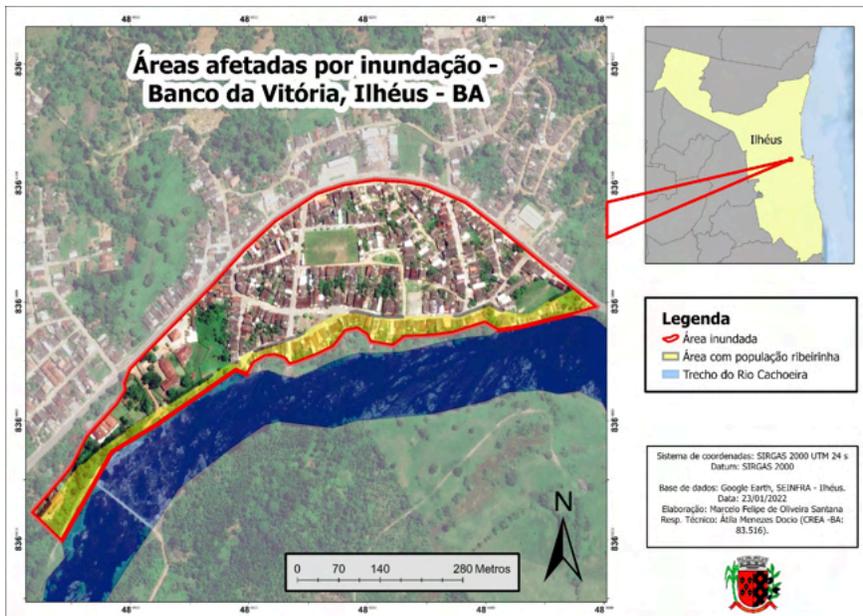


Figura 2. Mapa da área afetada pela inundação no Banco da Vitória, Ilhéus-Ba.

Fonte: Prefeitura de Ilhéus

### 3.2 Impactos na estrutura dos imóveis no Bairro Banco da Vitória

Desastres são responsáveis por diversas perdas que afetam diretamente a população. No que tange às perdas materiais, danos causados às moradias implicam em perdas econômicas e afeta socialmente os ribeirinhos que já vivem em situação de vulnerabilidade social.

No evento ocorrido no Banco da Vitória imóveis foram danificadas pelas inundações (Figura 3), em algumas casas não houve danos estruturais perceptíveis enquanto em outras ocorreram níveis altos de danos, onde todo imóvel foi destruído (Figura 4).



Figura 3. Ruas e imóveis do Banco da Vitória inundados.

Fonte: Defesa Civil Ilhéus, 2021



Figura 4. Imóvel totalmente destruído pela enchente no Banco da Vitória.

Fonte: Defesa Civil Ilhéus, 2021

As patologias identificadas nos imóveis da população ribeirinha do bairro Banco da Vitória durante e após desastre foram: pinturas danificadas, presença de rachaduras e fissuras no interior do imóvel, paredes com infiltrações e mofo, destacamento do revestimento argamassado em paredes, portas e janelas de madeira danificadas, quedas de muros e paredes, sedimento de pisos e casos de perda total do imóvel.

Fissuras em estruturas de concreto armado, como exposto na Figura 5, são aberturas superficiais, que afetam o elemento estrutural tornando-se um facilitador para a entrada de

agentes agressivos à estrutura. Conforme a NBR 9575 (2010), as fissuras são definidas como aberturas até 0,5 mm; trincas entre 0,50 mm a 1,00 mm; rachaduras de 1,00 mm a 1,5 mm e fendas para as aberturas acima de 1,50mm.



Figura 5. Casa inundada no Banco da Vitória apresentando fissura na parede superior.

Fonte: Defesa Civil Ilhéus, 2021

A patologia mostrada da Figura 6 provoca alteração na superfície, exigindo na maioria das vezes a recuperação ou até mesmo a necessidade de se refazer revestimentos, gerando gastos dispendiosos.



Figura 6. Infiltração e bolor em parede danificando a pintura após o desastre no Banco da Vitória.

Fonte: Defesa Civil Ilhéus, 2021

A umidade age como um meio necessário para que grande parte das manifestações patológicas em construções ocorra. Ela é fator principal para o aparecimento de eflorescências, bolores, deterioração de pinturas, de rebocos e, em casos mais extremos, ela pode ser a causa de acidentes estruturais (VERÇOZA, 1991).

A Figura 7 podemos identificar rachadura na alvenaria de forma vertical que pode ter como causa a falta de manutenção na estrutura e pela baixa qualidade dos materiais utilizados na construção ocasionando tal abertura em decorrência da forte enchente. É interessante, ainda, vincular a intensidade do desastre aos modelos construtivos, pois o bairro Banco da Vitória, por se tratar de uma localidade centenária, possui alguns imóveis do tipo vertical, sem suas devidas amarrações em vigas e pilares.



Figura 7. Rachadura da parede da alvenaria em imóvel no Banco da Vitória.

Fonte: Defesa Civil Ilhéus, 2021

A Figura 8 apresenta dados sobre o impacto da enchente de 2021 no Banco da Vitória, Ilhéus/Ba. Nota-se que cerca de 20% da população afetada tiveram suas casas inundadas e em torno de 10% destas, tiveram suas casas destruídas, ou seja, com alto nível de impacto estrutural.



Figura 8. Dados da população e imóveis afetados pela enchente.

Fonte: Dados Defesa Civil Ilhéus, Mapa o Autor.

Com o exposto, é possível elencar fatores que influenciaram em danos estruturais nos imóveis do Banco da Vitória durante a enchente de 2021 além das ocupações

indevidas de áreas ribeirinhas: construções em solo encharcado, obras sem supervisão de profissional habilitado, imóveis antigos e sem manutenção, expansão de bairro sem planejamento, dentre outros. Segundo JONOV et al., 2013, se a qualidade da edificação na condição pré-inundação é boa, os impactos sobre a edificação serão reduzidos.

### 3.3 Ações Mitigadoras

Para lidar com os impactos de desastres como o ocorrido na região sul da Bahia foram elaborados Planos de Emergência. Estes, como base da administração de desastres, atuam no estabelecimento de procedimentos, bem como na definição dos recursos necessários.

Os sistemas de Defesa Civil fornecem guias e orientações gerais para tal planejamento. Com base no Plano Setorial de Proteção e Defesa Civil, as principais etapas são o diagnóstico, os objetivos e a estruturação do plano. No primeiro, há um diagnóstico da visão do presente sobre as ações de proteção e defesa civil. Em seguida, há a definição dos objetivos para o período a ser planejado, com uma visão no futuro. Então, o plano é estruturado com o estabelecimento de itens estruturantes que abrangem ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e de recuperação (GOMES, 2017).

Após uma análise em principais jornais de circulação para o entendimento das atuações governamentais e comunitárias durante a enchente ocorrida em dezembro de 2021, é possível elencar os principais atores na gestão de desastres: a Defesa Civil Municipal, a Prefeitura e suas secretarias, o Governo Estadual através de liberação de verbas, disponibilização do corpo de bombeiros; o Governo Federal desde o monitoramento de estrada, atuação do exército e liberação de verbas federais; participação ativa da comunidade não afetada através de doações, entidades religiosas, instituições reconhecidas socialmente, principalmente a Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), ONG's (Organização sem Fim Lucrativo) locais e a iniciativa privada.

Oliveira et al., 2019 afirmam que é pertinente pontuar que a solução para os problemas de infraestrutura e serviços urbanos não pode ser dissociada das esferas política, econômica, ambiental e social. Ou seja, é imprescindível a participação dos mais diversos setores da sociedade junto à gestão pública.

Sobre imóveis, mais especificamente, existe um projeto habitacional de parceria do Governo Federal com a Prefeitura local que busca remanejar a população ribeirinha do Banco da Vitória para moradias sociais em área segura. A Figura 9 mostra mapa desse projeto que contempla a construção de 98 imóveis.

## Área destinada a implementação de moradias sociais "Minha casa minha vida" ( Banco da Vitória, Ilhéus - BA)

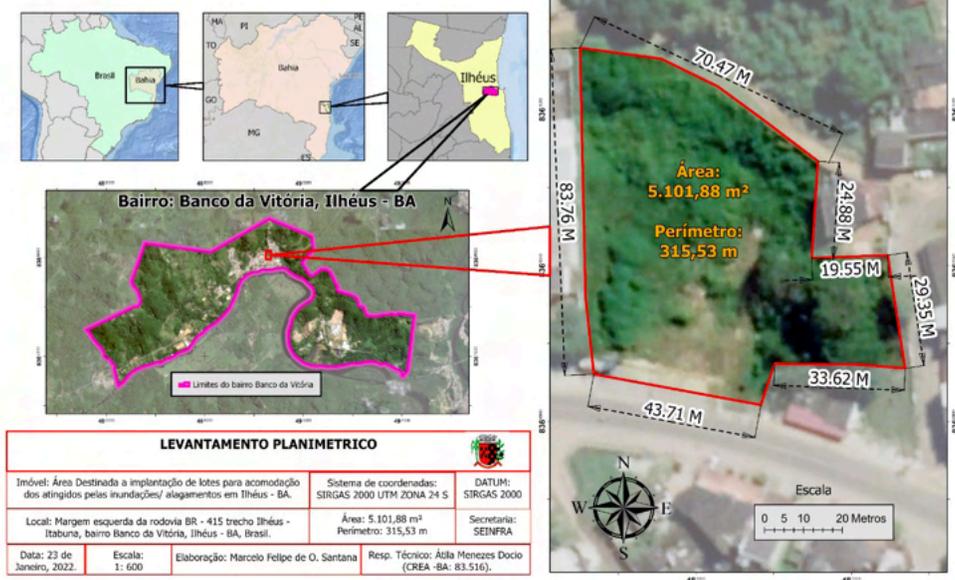


Figura 9. Mapa de Projeto de remanejamento da população ribeirinha do Banco da Vitória, Ilhéus/BA

Fonte: Arquivo Prefeitura Municipal de Ilhéus

Para Melo et al., 2019 a construção de cidades mais resilientes passa obrigatoriamente pela construção de cidades socialmente inclusivas, minimizando sua vulnerabilidade através da redução da quantidade de moradias informais, em especial em áreas de risco ambiental.

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos causados nas estruturas dos imóveis que passam por desastres envolvendo água como enchentes, costumam deixar a população em situação crítica durante e após desastre, pois a recuperação destes demanda tempo e envolve altos custos que, geralmente, a vulnerabilidade sócio-econômica dos moradores não lhes permite arcar.

Medidas preventivas custam menos do que medidas corretivas, principalmente em casos de desastres naturais que envolve perda de vidas e destruição de parte da cidade.

Por se tratar de uma problemática que envolve questões de política pública, faz-se urgente um olhar para ações mitigadoras e de prevenções, pois o crescimento desordenado e sem planejamento de cidades expõe a população a diversos riscos de desastres naturais que tem aumentado no decorrer dos anos devido aos danos ambientais, sendo urgente a busca por obtenção de cidades resilientes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Prefeitura Municipal de Ilhéus/Ba por disponibilizar arquivos, fotos e documentos para a elaboração deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5674: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção.** Rio de Janeiro, 2012.

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9575: Impermeabilização – Seleção e projeto.** Rio de Janeiro, 2010.

ALVES, A.; BIANCHINI, C. D.; MALHEIROS, M.; QUARTIERI, M. T.; SALVADOR P. F.; ECKHARDT, R. R. **Correlação entre o nível atingido e os prejuízos causados pelas inundações do Rio Taquari no Município de Cruzeiro do Sul-RS.** Revista Destaques Acadêmicos, vol. 5, n. 4, 2013.

BRASIL. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

GUASSELLI, L. A.; OLIVEIRA, G. G de; ALVES, R. de C. M. (orgs.) **Eventos Extremos no Rio Grande do Sul: Inundações e Movimentos de Massa.** Porto Alegre: Evangraf, 2013.

JESUS, Joandre Neres. **Parecer Técnico nº 07 da Defesa Civil da Prefeitura Municipal de Ilhéus.** Dez/2021.

JONOV, C. M. P.; NASCIMENTO, N. O.; SILVA, A. P. **Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos de recuperação.** Ambient. constr. 13 (1), 2013.

MELO, A.O. et al., **Conceito de Ecologia Urbana: um estudo de revisão sistemática associado à cidade e sustentabilidade.** Livro Discutindo a Cidade. UFSB, Itabuna, 2019.

OLIVEIRA, C.A. et al., **Análise das estratégias de planejamento urbano nas cidades inteligentes/sustentáveis.** Livro Discutindo a Cidade. UFSB, Itabuna, 2019.

POUEY, J.F.F.; LAROQUE, L.F.S. **Construção Civil E Meio Ambiente: O Homem Versus Necessidades Básicas E Suas Contradições.** Revista Educação Ambiental em Ação. Volume XXI, Número 79 · Junho-Agosto/2022.

RODRIGUES, Roberto Carlos. **Banco da Vitória: a história esquecida das margens vitoriosas do Rio Cachoeira.** 2ª Ed. Editora Mondrongo, 2017.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo, Pini, 2009.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): **AR5 Climate Change 2014 Report: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.** 2014.

VERÇOZA, E. J. **Patologia das Edificações.** Porto Alegre, Editora Sagra, 1991.

## ESTUDO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DA PRAIA DO BAIRRO NOVO, OLINDA, PERNAMBUCO

*Data de aceite: 01/08/2022*

**Eduardo Antonio Maia Lins**

Universidade Católica de Pernambuco –  
UNICAP / Instituto Federal de Pernambuco –  
IFPE – Campus Recife

**Daniele de Castro Pessoa de Melo**

**Diogo Henrique Fernandes da Paz**

**Sérgio Carvalho de Paiva**

**Adriane Mendes Vieira Mota**

**Luiz Vital Fernandes Cruz da Cunha**

**Luiz Oliveira da Costa Filho**

**Fábio José de Araújo Pedrosa**

**Fábio Correia de Oliveira**

**Rosana Gondim de Oliveira**

**Fabio Machado Cavalcanti**

**Maria Clara Pestana Calsa**

**Fernando Arthur Nogueira Silva**

**Hugo Vinicius Arruda de Sales**

**RESUMO:** A capacidade de suporte está cada dia mais presente no cotidiano, desde a carga exercida no solo por meio da agricultura em virtude de uma grande produção para atender ao crescimento populacional, ao mercado imobiliário com edifícios cada vez mais

alongados, inchando as regiões metropolitanas. Nas praias, a capacidade é testada e necessária pelo propósito de avaliar a qualidade em que os banhistas podem usufruí-la e por ser uma das maiores fontes de lazer no mundo e no litoral brasileiro. Utilizou-se o auxílio de uma trena para medir tanto o comprimento do trecho tal como a largura de cada célula, totalizadas em doze, além das entrevistas que permitiram uma análise mais crítica e prática dos fatores evidenciados no trecho. Diagnosticando os resultados, verificou-se a alta utilização do espaço praiano, indicando um alto nível de intensidade da capacidade de suporte sendo medida em m<sup>2</sup> para cada banhista. Em virtude dos vetores analisados e dos resultados obtidos, conclui-se que as seis primeiras células tendem a ser determinantes para uma intensa capacidade de suporte em relação as demais, principalmente em fins de semana e feriados em que a concentração de banhistas aumenta consideravelmente, além de o trecho apresentar uma precária infraestrutura, apresentando diversos problemas ao longo de sua observação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impactos, Pressão, Litoral, População, Densidade.

**ABSTRACT:** Carrying capacity is more and more present in daily life day since the load exerted on the ground by agriculture because of a big production to meet population growth, the real estate market with increasingly elongated buildings swelling the metropolitan areas. On the beaches, the ability is tested and necessary for the purpose of assessing the quality where bathers can enjoy it and be one of the largest

leisure sources in the world and the Brazilian coast. We use the help of a measuring tape to measure both the compliance with the stretch as the width of each cell, totaled twelve, in addition to interviews, which allowed a more critical and practical analysis of the factors highlighted in the stretch. Diagnosing the results was found a high use of beachy space, indicating a high level of intensity of the carrying capacity is measured in square meters for each bather. Because of the analyzed vectors and the results obtained, it is concluded that the first six cells tend to be decisive for a strong bearing capacity in relation to the other, especially on weekends and holidays when the concentration of bathers increases considerably, beyond of the passage present a precarious infrastructure, presenting many problems throughout his observation.

**KEYWORDS:** Impacts, Pressure, Coastal, Population, Density.

## INTRODUÇÃO

Na atualidade, a população planetária é composta aproximadamente de 7,6 bilhões de pessoas (ONU, 2017), as quais utilizam um terço do planeta para manter o estilo de vida humano. Nesse contexto, incluem-se não apenas água, solo e alimentos, mas também as florestas e os oceanos, que se vêm se tornando cada vez mais degradados em razão do crescimento populacional e o consumo desordenado, reduzindo, com o tempo, a capacidade de suporte do meio ambiente.

A capacidade de suporte é definida como o número máximo de pessoas que pode visitar, simultaneamente, determinada região sem destruir as condições físicas, ecológicas, econômicas e socioculturais, sem causar também redução inaceitável da satisfação dos visitantes (ZACARIAS, 2013). Segundo Inglis et al. (2000), a capacidade de suporte de uma determinada região descreve a relação entre o tamanho da população que dela faz uso e as mudanças causadas por ela nos recursos naturais. Segundo os autores, o conceito de capacidade de suporte admite que exista um determinado número de pessoas que os recursos podem suportar sem que haja a deterioração da qualidade ambiental.

Segundo dados do censo demográfico 2018 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), Olinda tem 391.835 habitantes para uma área de 41.681 km<sup>2</sup>. Constitui uma grande densidade demográfica de 9.063,58 habitantes por km<sup>2</sup>, refletindo uma urbanização acelerada com grande aumento de loteamentos e construções irregulares, o que acarreta problemas na linha costeira derivados da falta de saneamento básico e da falta de planejamento ambiental. Além disso, por seu forte acervo cultural, Olinda se torna um dos destinos mais procurados pelos turistas ao longo do ano, especialmente no período carnavalesco quando aumenta o quantitativo populacional da cidade, tendo as praias como um forte atrativo tanto para os turistas quanto para a população local, desse modo, pondo em teste sua capacidade de suporte.

## OBJETIVOS

Este trabalho buscou uma maior compreensão da educação ambiental da população da cidade de Olinda, especificamente na Praia do Bairro Novo, onde há maior concentração de banhistas e turistas na cidade, notadamente no período de verão. Nesse contexto, tem como objetivo a aplicação de um questionário a fim de estimar a preferência dos usuários acerca da escolha da praia e da disponibilidade do espaço praiano. Além disso, será estimada a densidade demográfica em horário de menor e maior fluxo populacional em um determinado período.

## METODOLOGIA

### • Localização

A cidade, conforme já referido, liga-se, ao norte, ao município de Paulista, ao sul e oeste, ao município de Recife e a leste ao Oceano Atlântico, e de acordo com os dados apresentados pelo IBGE (2018), conta com 391.835 habitantes, distribuídos em uma área de 41.681 km<sup>2</sup>, constituindo-se de uma densidade demográfica de 9.063,54 habitantes por km<sup>2</sup> e uma área rural de 5,2 km<sup>2</sup>, fato que comprova intensa urbanização.

Para fins de pesquisa científica, contudo, objeto deste trabalho, fora escolhido o terceiro trecho da terceira unidade, que tem início no vigésimo segundo espigão, culminando na Rua Tertuliano Francisco Feitosa, conforme Figura 1. É importante destacar que, no trecho estudado, foram considerados alguns aspectos ambientais, julgados importantes para a identificação dos impactos ambientais estudados. São eles: os efeitos provocados pelos dois quebra-mares existentes, um em alto mar e outro no início do trecho estudado; pouca declividade da praia; intensa urbanização pós-calçada; granulometria de areia fina; esgoto correndo atrás do afloramento rochoso; uma calçada arborizada com rampas de acesso à praia; quiosques; aparelhos de ginástica; bicicletário; parque infantil e ampla área para prática de esportes.



Figura 1. Trecho territorial da orla de Olinda selecionado para o estudo.

Fonte: Googlemaps (2022)

Do ponto de vista econômico-financeiro, registram-se atividades nas áreas de serviço no ramo de gastronomia e atividades desportivas, tendo em vista a existência de uma escolinha de futevôlei, dois campos de areia para futebol, slackline e outros esportes náuticos.

- **Questionário Aplicado**

Aplicaram-se questionários a cem frequentadores da praia, com uma média de 8 questionários por célula em estudo, com a pretensão de obter resultados para maior análise dos fatores negativos tal como os motivos de atração que fizeram os banhistas optarem pela escolha do trecho além da curiosidade em saber da população sobre uma possível satisfação da praia caso ela viesse a duplicar o quantitativo de pessoas que a frequentam

- **Medição da Orla**

Para a medição da orla, utilizou-se uma trena de 20 metros para a medição precisa, sendo efetivada tanto para a separação das células de 30 metros em 30 metros de comprimento, estipulados neste estudo em conformidade com a largura total do trecho estudado, o qual tem 360 metros, ocasionando 12 células ao longo do trecho; foi imprescindível para a medição das larguras em cada uma delas a fim de obter a área de estudo em metros quadrados, sendo fundamental para o cálculo da capacidade de suporte. Em busca de maior eficácia dos resultados, as medidas das células da praia foram feitas com o auxílio da tábua de marés da Marinha nos dias em que as marés estavam com uma

amplitude máxima, segundo os dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha (Figura 2).

SETEMBRO											
dia:01		dia:02		dia:03		dia:04		dia:05		dia:06	
Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura
03:39	2.4	04:13	2.4	04:51	2.4	05:24	2.3	06:00	2.2	06:26	0.5
10:00	0.2	10:34	0.2	11:04	0.2	11:38	0.3	12:09	0.4	06:38	2.1
16:00	2.3	16:34	2.3	17:06	2.3	17:43	2.2	18:17	2.1	12:46	0.6
22:09	0.2	22:45	0.2	23:17	0.3	23:53	0.4			18:56	2.0
dia:07		dia:08		dia:09		dia:10		dia:11		dia:12	
Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura
01:02	0.6	01:47	0.8	02:43	0.9	04:08	0.9	05:36	0.8	00:04	1.8
07:17	1.9	08:04	1.8	09:06	1.7	10:23	1.7	11:41	1.7	06:39	0.7
13:23	0.7	14:09	0.8	15:17	0.9	16:49	0.9	18:04	0.9	12:43	1.9
19:39	1.9	20:32	1.8	21:39	1.7	22:66	1.7			19:00	0.7
dia:13		dia:14		dia:15		dia:16		dia:17		dia:18	
Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura
01:00	2.0	01:47	2.2	02:30	2.4	03:11	2.5	03:56	2.6	04:41	2.7
07:26	0.5	08:09	0.3	08:51	0.2	09:32	0.0	10:11	0.0	10:56	0.0
13:32	2.0	14:13	2.2	14:58	2.4	15:39	2.5	16:19	2.5	17:02	2.5
19:46	0.5	20:26	0.3	21:06	0.2	21:47	0.0	22:28	0.0	23:11	0.0
dia:19		dia:20		dia:21		dia:22		dia:23		dia:24	
Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura
05:24	2.8	06:11	2.5	06:51	0.3	01:49	0.4	03:04	0.6	04:36	0.7
11:41	0.1	12:26	0.3	07:06	2.3	08:06	2.1	09:21	1.9	10:49	1.8
17:49	2.4	18:36	2.3	13:19	0.5	14:24	0.6	15:47	0.8	17:15	0.8
23:58	0.1			19:28	2.1	20:32	2.0	21:53	1.9	23:15	1.9
dia:25		dia:26		dia:27		dia:28		dia:29		dia:30	
Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura	Hora	Altura
06:00	0.6	00:28	2.0	01:21	2.1	02:04	2.2	02:41	2.3	03:13	2.3
12:08	1.8	07:02	0.5	07:53	0.4	08:30	0.4	09:02	0.3	09:34	0.3
18:28	0.7	13:08	1.9	13:53	2.0	14:28	2.1	15:00	2.2	15:32	2.3
		19:23	0.6	20:04	0.5	20:41	0.4	21:11	0.3	21:45	0.2

Figura 2. Tábua de marés da Marinha.

Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha (DHN).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### • Potencialidades observadas

A identificação do ambiente costeiro na Praia do Quartel em Bairro Novo, Olinda, foi realizada através de suas características locais, indicando o tipo de construção fixa à beira-mar – casas e edifícios –, quiosques, ocorrência do processo erosivo, declividade, largura, comprimento da face da praia, a granulometria, presença de lixo, ocorrência de esgoto,

altura das ondas, vegetação nativa, presença de animais além dos afloramentos rochosos.

Ao longo do trecho estudado, observou-se pouca vegetação nativa, removida propositalmente em consequência da construção de residências tanto civis quanto militares, restaurantes e barracas de praia, restando uma pequena concentração de coqueiros (*Cocos nucifera L.*) e coração de negro (*Poecilanthe parviflora*), o que acarreta impacto na harmonia da sedimentação costeira e na movimentação da faixa arenosa, aumentando sua tendência aos eventos erosivos.

As progressões dos processos erosivos com as construções permanentes evidenciam um problema tanto ambiental quanto social; segundo informa Bird (1985), essa temática torna a capacidade de recreação da praia propícia a uma redução elevada em razão do impedimento do livre recuo da linha de costa representando um perigo à infraestrutura costeira, seja com a subida do nível do mar, por conta do aquecimento global, acarretando diretamente a potencialidade do poder erosivo das ondas em virtude de um aumento na frequência de incidência e na magnitude das tempestades tropicais, que passam a incidir na região leste-nordeste do Brasil, segundo observado por Spencer (1995).

No caso da Praia do Quartel em Bairro Novo, Olinda, o processo erosivo das ondas diminui em detrimento da existência de afloramentos rochosos com a formação de um molhe hidráulico, conforme observado na Figura 3. Trata-se de uma obra de engenharia marítima que consiste em uma estrutura costeira semelhante a um pontão, que avança para o mar com perfil alongado, e de um quebra-mar, que também tem a mesma estrutura de um molhe. Entretanto, com as duas pontas no mar, tendo o intuito de acumular sedimentos, proporcionando, assim, maior prevenção dos efeitos do avanço marítimo.

Outra evidência constatada foi a falta de infraestrutura ao não disponibilizar banheiros químicos para a população, o que a leva a utilizar o mar para fazerem suas necessidades fisiológicas, culminando em uma grande probabilidade de contaminar outros banhistas e o ambiente costeiro por doenças bacteriológicas, além da forte presença de animais como pombos, cachorros e cavalos; alguns deles são trazidos pela própria população para banhar os respectivos animais de estimação, o que agrava esse problema. Além disso, a forte presença do lixo ao longo do trecho evidencia a falta de planejamento costeiro, tendo como consequência, uma manutenção precária do local.



Figura 3. Presença do afloramento rochoso promovendo a diminuição da ação das ondas e formando um bolsão de areia.

Fonte: Os autores, 2022.

A falta de policiamento também foi observada tanto nos dias da pesquisa quanto em relato dos banhistas, os quais sofrem com a insegurança ocasionada por furtos e arrastões em dias de maior fluxo populacional da praia, ocorrendo com maior frequência nos finais de semana e feriados.

Outro elemento que merece destaque é a quantidade de quiosques, sendo oito no trecho estudado, os quais atraem o fluxo de pessoas para as células onde eles se localizam, motivadas pelo bom fornecimento de comidas e bebidas. Por conseguinte, os locais desprovidos de quiosques tendem a se tornar mais desertos, são preteridos pela maioria dos banhistas.

A praia ainda possui uma grande extensão de areia, onde a maré de sizígia não consegue afetar. Esse espaço vem sendo utilizado para as mais diversificadas atividades esportivas e de lazer para a população, como é o caso da utilização dos coqueiros para a prática do Slackline – esporte de manobras acrobáticas – além de cinco quadras de areia para práticas esportivas, sendo três quadras para jogos de futebol e duas para a prática de vôlei ou futevôlei. O trecho estudado também apresenta uma orla com atividades diversificadas para a população, contando com apetrechos que servem de amparo para a prática da musculação, uma boa área para praticar caminhada/corrida/treinamento funcional, além dos esportes que utilizam rodas, com um bicicletário à disposição dos frequentadores e outras atividades que necessitem de acompanhamento de um professor de Educação Física. Existe também um grande interesse da população por esportes náuticos que utilizam a força do vento para impulsionar a prancha e assim fazer manobras radicais como é o caso do windsurf e o kitesurf.

Com o propósito de observar o fluxo do contingente populacional na ocupação da praia no decorrer do tempo, foi realizada uma linha do tempo das 8 horas às 18 horas, mostrando nessa perspectiva a análise dos resultados corroborando os trechos preferidos pela população graças ao fornecimento de comida e bebida pelos quiosques ali presentes; da mesma maneira, os outros potenciais ora salientados como a poluição e sujeira mais evidenciadas no fim do dia (Figura 4).

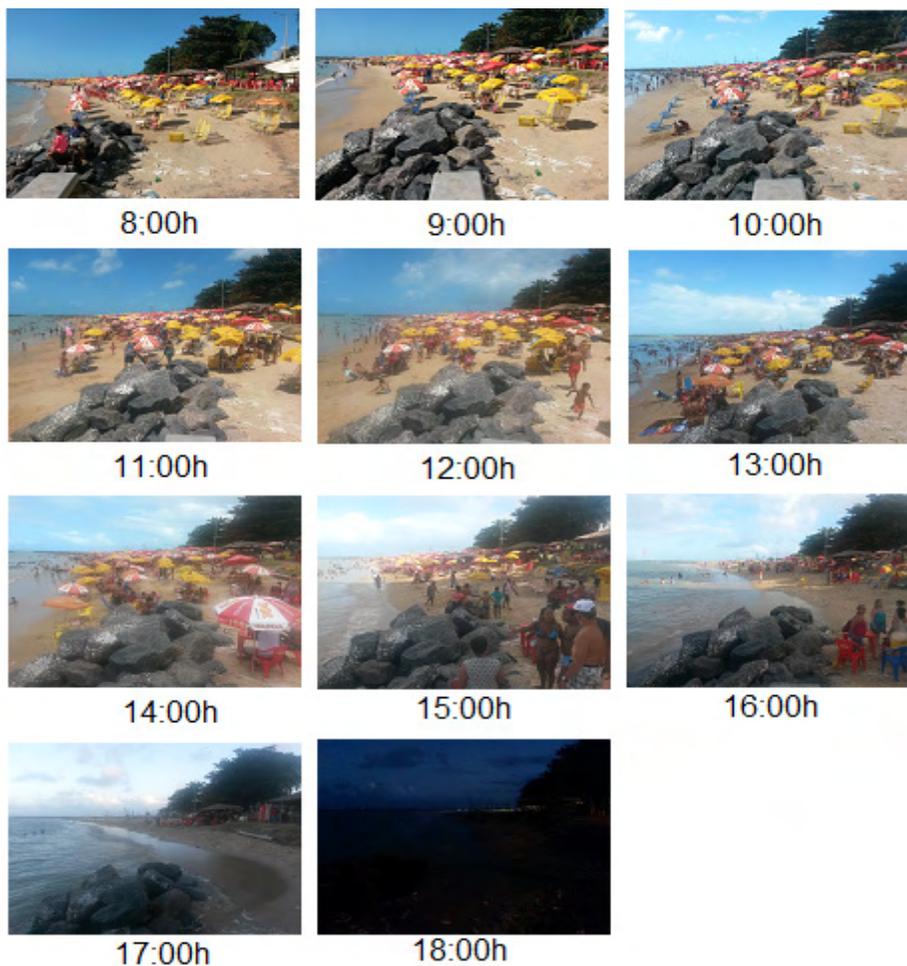


Figura 4. Observação do Fluxo Contingente Populacional.

Fonte: Os autores (2022).

- **As entrevistas**

Efetivaram-se cem entrevistas com o número de pessoas proporcionalmente divididas pelas células, buscando opiniões da população sobre a temática em toda a

extensão do trecho estudado. Deu-se ênfase àquelas onde havia o maior fluxo de pessoas tendo as células (1,2,3,4) e as outras oito células (5,6,7,8,9,10,11,12) com o objetivo de buscar entre a população a essência de uma análise mais aprofundada sobre a capacidade de suporte.

Ao se questionar os fatores negativos que a praia evidenciava naquele trecho (Figura 5), os banhistas/recreacionistas indicaram a sujeira (37%) como principal fator negativo; alertaram quanto à falta de planejamento da gestão costeira pela falta das sacolinhas de lixo, que não são distribuídas, e a falta de educação ambiental da população ao não preservarem o patrimônio natural, o que acarreta um turismo selecionado e local, não atraindo os turistas de outras regiões. Desse modo, prejudicando o comércio local conforme salienta Pereira et al. (2003). Outro fator negativo evidenciado foi o esgoto (35%), que escorre camuflado por trás dos afloramentos rochosos, representando um forte proporcionador de doenças bacteriológicas transmissíveis à população como a diarreia, leptospirose, cólera, hepatite e doenças de pele como micoses e frieiras; a falta de infraestrutura (15%) pela falta de banheiros químicos, o que agrava a transmissão de doenças bacteriológicas dado que os banhistas utilizam o mar para fazerem suas necessidades fisiológicas. A segurança (15%) foi citada pela população haja vista a presença de poucos policiais no trecho nos fins de semana e feriados, dias que atraem o maior número de pessoas, sendo evidenciados arrastões e furtos com frequência no dia a dia.

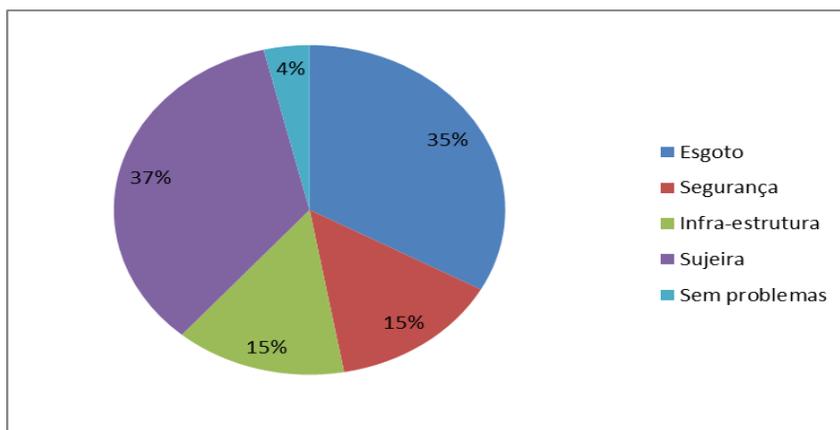


Figura 5. Respostas dos entrevistados quanto aos problemas da praia local.

Fonte: Os autores (2022)

Também se constatou que a localização/acesso foi o principal motivo para a população buscar o trecho para lazer, com uma porcentagem de 50% das entrevistas, seguida por tranquilidade com 28%, indicação e amizade com 12% e ambiente natural com 7% das entrevistas. Ainda que o Corpo de Bombeiros tenha boa frequência no trecho

estudado, a segurança para banho foi manifestada pela população com apenas 3% das entrevistas, e o atendimento com 1% apesar do número de quiosques no trecho estudado (Figura 6).

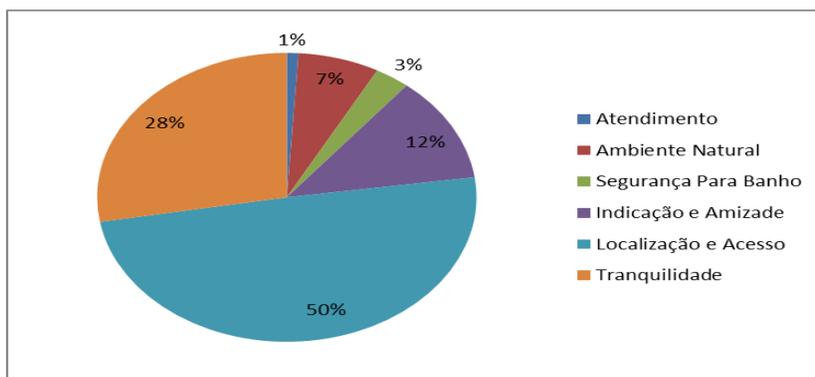


Figura 6. Respostas dos entrevistados quanto aos pontos positivos da praia local.

Fonte: Os autores (2022).

#### • Divisão das células e as respectivas capacidades de suporte

O trecho estudado compreende uma largura de 360 metros de comprimento. A partir da , tendo como base os estudos de Silva et al. (2009), esse comprimento foi dividido em partes fracionadas de 30 metros de comprimento, e com a largura de cada fração desta, formaram-se 12 células com dimensões em metros quadrados com o intuito de medir a capacidade de suporte (Figura 7). A primeira célula tem uma largura de 20,3 metros, acarretando uma extensão de 609 m<sup>2</sup> para uma populacional de 152 pessoas criando assim uma área acessivel de 4 m<sup>2</sup> para cada banhista/recreacionista, conforme observado na Figura 8. Já a segunda célula demonstrou uma largura de 23,7 m formando uma área de 711 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 177 banhistas, gerando um território disponivel de 4 m<sup>2</sup> por pessoa. Já a terceira, tem uma largura de 28,1 m apresentando uma área de 843 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 210 banhistas tendo a disposição um espaço de 4 m<sup>2</sup> por pessoa.



Figura 7. Divisão das Células.

Fonte: Google Earth (2022).

A quarta célula tem uma largura de 23,8 metros, acarretando uma extensão de 714 m<sup>2</sup> para uma populacional de 142 pessoas criando assim uma área acessível de 5 m<sup>2</sup> para cada banhista/recreacionista. A quinta célula demonstrou uma largura de 21,2 m formando uma área de 636 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 106 banhistas, gerando um território disponível de 6 m<sup>2</sup> por pessoa. Já a sexta, tem uma largura de 22 m apresentando uma área de 660 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 110 banhistas tendo a disposição um espaço de 6 m<sup>2</sup> por pessoa (Figura 8).

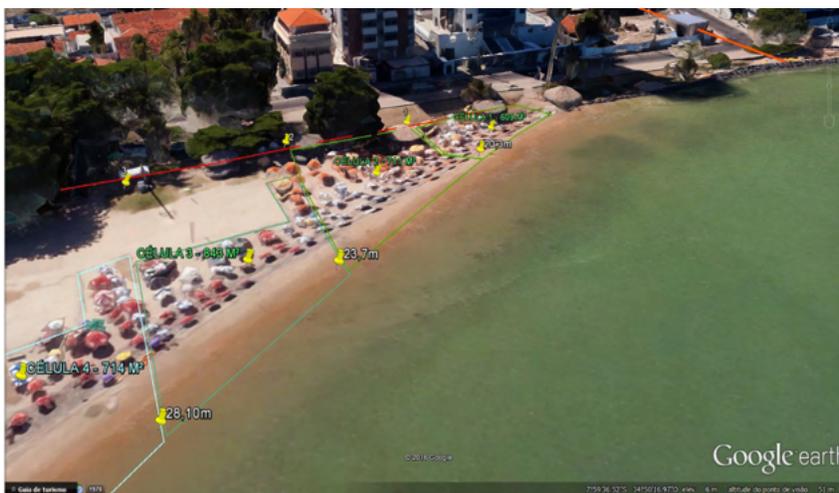


Figura 8. Divisão das Células 1, 2, 3 e 4.

Fonte: Google Earth (2022).

A sétima célula tem uma largura de 25 metros, acarretando uma extensão de 750 m<sup>2</sup> para uma populacional de 44 pessoas criando assim uma área acessível de 17 m<sup>2</sup> para cada banhista/recreacionista. A oitava célula demonstrou uma largura de 33 m formando uma área de 990 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 38 banhistas, gerando um território disponível de 26 m<sup>2</sup> por pessoa. Já a nona, tem uma largura de 26,3 m apresentando uma área de 789 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 27 banhistas tendo a disposição um espaço de 29 m<sup>2</sup> por pessoa (Figura 10).



Figura 9. Divisão das Células 5, 6 e 7.

Fonte: Google Earth (2022).



Figura 10. Divisão das Células 7, 8, 9 e 10.

Fonte: Google Earth (2022).

A décima célula tem uma largura de 24,2 metros, acarretando uma extensão de 728 m<sup>2</sup> para uma populacional de 26 pessoas criando assim uma área acessível de 27

m<sup>2</sup> para cada banhista/recreacionista. A décima primeira célula demonstrou uma largura de 35,7 m formando uma área de 1071 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 30 banhistas, gerando um território disponível de 35 m<sup>2</sup> por pessoa. Já a décima segunda, tem uma largura de 30,1 m apresentando uma área de 903 m<sup>2</sup> para uma quantidade de 30 banhistas tendo a disposição um espaço de 30 m<sup>2</sup> por pessoa (Figura 11).

Baseando-se no estudo de Silva et al. (2009), a capacidade de suporte das células divide-se por agrupamentos, com nível intenso de 4 m<sup>2</sup> a 10 m<sup>2</sup>, nível intermediário de 11 m<sup>2</sup> a 20 m<sup>2</sup>, nível baixo de 21 m<sup>2</sup> a 50 m<sup>2</sup> e muito baixo acima de 50 m<sup>2</sup>, salientando-se a afirmação de Silva (2002), que considera como um valor máximo tolerável para a capacidade de suporte ou para as praias de maneira em geral o valor atribuído de 3 m<sup>2</sup> a 5 m<sup>2</sup> por banhista/recreacionista (Tabela 1).

Comparando a capacidade de suporte do trecho em estudo com os resultados obtidos nas praias de Itapuã, em Salvador, BA, estudadas por Silva et al. (2009), evidenciase que essas capacidades podem variar em virtude dos fatores já estudados, entretanto, o fornecimento de lazer com a alimentação e bebidas proporciona maior volume populacional das células.

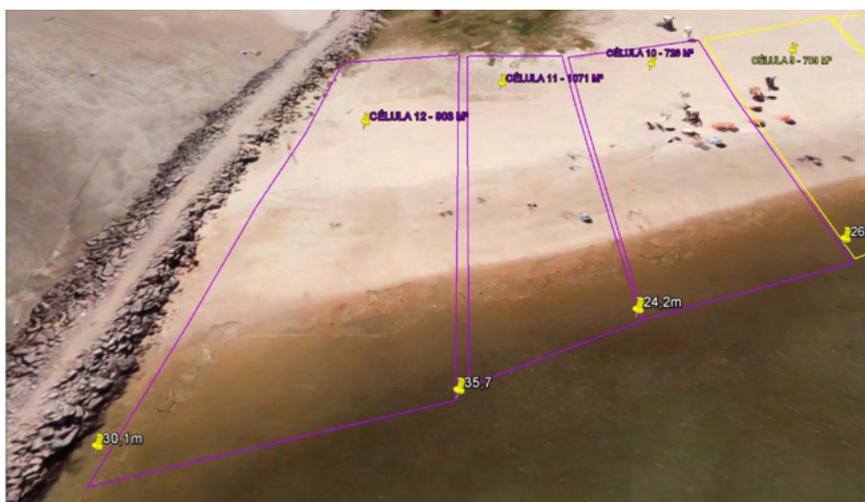


Figura 11. Divisão das Células 10, 11 e 12.

Fonte: Google Earth (2022).

Na Praia do Quiosque de Janaína no estudo de Silva et al. (2009) em Itapuã, como exemplo, ficou evidenciada a porcentagem de 100% do seu nível de uso graças ao fornecimento de alimentação e bebidas. Esse fator também pode ser observado na Praia do Farol, onde já diminui esse fornecimento, o que acarreta a diminuição da população nas células, tendo 33,3% do nível intenso de uso, de nível médio 50% e 16,7% de nível baixo.

**Praia do Quartel no Bairro Novo em Olinda**

<b>Células</b>	<b>Número de banhistas/ recreacionistas em cada célula de 30 m de comprimento</b>	<b>Área de praia disponível para acomodação de banh/rec, (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Nível de uso atual por praia (área média atualizada por banh/ rec.) (m<sup>2</sup>) (setembro 2016)</b>	<b>Nível de uso</b>
1	152	609	4	Intenso
2	177	711	4	Intenso
3	210	843	4	Intenso
4	142	714	5	Intenso
5	106	636	6	Intenso
6	110	660	6	Intenso
7	44	750	17	Intermediário
8	38	990	26	Baixo
9	27	789	29	Baixo
10	26	728	27	Baixo
11	30	1071	35	Baixo
12	30	903	30	Baixo

Tabela 1 – Nível de uso da Praia do Bairro Novo em Olinda .

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2009, p. 78).

Já na Praia da Sereia, o nível de uso das células são de 80% de nível médio e 20% de intenso, enquanto a Praia da Rua K é constituída de 32,14% de nível médio, de baixo 3,57%, de muito baixo 21,42 e 42,82% de intenso. No local de estudo da Praia do Quartel em Olinda, também se averiguou essa tendência nas células onde os fatores negativos não fossem evidenciados; com o fornecimento de bebidas e alimentação com lazer, tenderiam a um maior fluxo de pessoas nessas células, assim gerando um nível de uso de 50% de nível intenso, de nível baixo 41,6% e 18,4% de nível intermediário.

## **CONCLUSÕES**

Diante dos resultados obtidos, pôde-se considerar que:

- O presente estudo buscou definir a capacidade de carga de uma praia, durante o período de alta estação. Foi possível identificar a distribuição dos padrões de

uso e ocupação da orla em função da densidade dos usuários, além de avaliar a percepção destes em função dos diferentes índices de ocupação da orla e da qualidade dos bens e serviços da praia;

- Os locais altamente densos das praias, dificulta o acesso a serviços urbanos básicos, além de muitas vezes serem áreas mais vulneráveis à criminalidade, principalmente nos períodos de recessos ou feriados;
- A capacidade de suporte demonstrou maior intensidade nas seis primeiras células em virtude do maior fornecimento de serviços e lazer, porém, não apresenta uma boa qualidade de água do mar para os banhistas. Nas demais células, o nível de uso da célula foi de intermediário a baixo apresentando uma densidade populacional menor;
- Alta capacidade de contaminação da praia pelo esgoto que escorre em sua direção, aliada a falta de banheiros químicos e sacolas plásticas indica falta de infraestrutura básica para acomodar a população, o que agrava a contaminação do ambiente;
- Faz-se necessário desenvolver ações que visem uma melhor utilização do espaço, criando alternativas ao uso em horas de 'pico', impulsionando ofertas alternativas que aliviem a pressão sobre os espaços praiieiros, de modo que a praia não seja o principal meio recreativo; distribuir as infraestruturas ao longo da orla visando o melhor aproveitamento das áreas da praia. Desta forma, ter-se-ia uma redução do grau elevado de congestionamento durante os períodos de 'pico', conservando assim, a integridade do local para as gerações futuras.

## REFERÊNCIAS

1. ALVES, José Eustáquio Diniz. A terra no limite. **Revista Veja**, 22 dez. 2010, Edição Especial Sustentabilidade, p. 24-27.
2. BIRD, Eric C. F. **Coastline changes: a global review**. Chichester: J. Wiley, 1985.
3. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Limites da zona costeira**. Brasília, [s. d.]. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/a-zona-costeira-e-seus-m%C3%BAltiplos-usos/caracteristicas-da-zona-costeira>>. Acesso em: 19 maio 2016.
4. BRASIL. Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 24 set. 1981.
5. BRASIL. Lei n.º 7.661, de 16 de maio de 1988. **Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 maio 1988.

6. BRASIL. Decreto n.º 5.300 de 7 de dezembro de 2004. **Regulamenta a Lei no 7.661, de 16 de maio de 1988, que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro - PNGC, dispõe sobre regras de uso e ocupação da zona costeira e estabelece critérios de gestão da orla marítima, e dá outras providências.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 dez. 2004.
7. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Gerenciamento costeiro no Brasil.** Brasília, [2014]. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro>>. Acesso em: 19 maio 2016.
8. FLICK, R. E. Comparison of California tides, storm surges, and mean sea level during the El Niño winters of 1982-83 and 1997-98. **Shore & Beach**, v. 66, n. 3, p. 7-11, 1998.
9. IBGE. **Censo demográfico 2017.** Características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro, 2017.
10. IBGE. Pernambuco, **Olinda: informações completas.** 2017. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=260960&search=pernambucolindainfograficos:-informacoes-completas>>. Acesso em: 20 set. 2018.
11. INGLIS, G. J.; HAYDEN, B. J.; ROSS, A. H. **An overview of factors affecting the carrying capacity of coastal embayment for mussel culture.** New Zealand: National Institute of Water & Atmospheric Research, 2000.
12. KOMAR, P. D.; REA, C. C. **Erosion of Siletz Spit, Oregon.** *Shore and Beach*, v. 44, n. 1, p. 9-15, 1976.
13. MEDEIROS, E. C. S.; MAIA, P. L.; ARAÚJO, R. C. P. Capacidade de carga de uma praia sob o impacto do processo de erosão costeira (praia do Icarai). Subsídios para o gerenciamento costeiro do estado do Ceará, Brasil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, 16, 2016.
14. MUEHE, D.; Geomorfologia costeira. In: GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da. Geomorfologia do Brasil: exercícios, técnica e aplicação. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 253-306.
15. OLINDA. Prefeitura Municipal de Olinda. Secretaria de Meio Ambiente. **Plano de Gestão Integrada da Orla de Olinda.** Olinda, 2015. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/secomolinda/projeto-orka-plano-de-gesto-integrada-da-orka-de-olinda>>. Acesso em: 14 jun. 2018.
16. OLINDA. Eleição da Capital Brasileira da Cultura 2006. **Carta Maior**, 7 jul. 2005. Disponível em: <[http://www.cultura.gov.br/o-dia-a-dia-da-cultura/-/asset\\_publisher/waaE236Oves2/content/olinda-eleita-capital-brasileira-da-cultura-2006-45146/10883](http://www.cultura.gov.br/o-dia-a-dia-da-cultura/-/asset_publisher/waaE236Oves2/content/olinda-eleita-capital-brasileira-da-cultura-2006-45146/10883)>. Acesso em 14 jun. 2018.
17. PEDROSA, F. J. A. **Aspectos da evolução da linha de costa e da paisagem litorânea do município de Olinda entre 1915 e 2004: evidências do Tecnógeno em Pernambuco**, 2007. 193 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
18. PEREIRA, L. C. C. et al. **Diretrizes para um melhor gerenciamento costeiro integrado no litoral de Olinda, PE (Brasil).** In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 9., 2003, Recife. Anais... Recife, 2003. 1 CD-ROM.

19. PERNAMBUCO. Lei n.º 14.258, de 23 de dezembro de 2010. **Institui a Política Estadual de Gerenciamento Costeiro, e dá outras providências**. Disponível em: < [http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS\\_ANEXO/Lei%20Est%2014258;141010;20101228.pdf](http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/Lei%20Est%2014258;141010;20101228.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2016.
20. SILVA, C. P. Beach carrying capacity assessment: how important is it. **Journal of Coastal Research**, v. 36, p. 190-197, 2002.
21. SILVA, I. R. et al. Nível de antropização X nível de uso das praias de Porto Seguro/BA: subsídios para uma avaliação da capacidade de suporte. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 8, n. 1, p. 81-92, 2008.
22. SILVA, I. R et al. Diagnóstico ambiental e avaliação da capacidade de suporte das praias do bairro de Itapoã, Salvador, Bahia. **Revista Sociedade e Natureza**, v. 21, n. 1, p. 71-84, 2009.
23. SPENCER, T. **Potentialities, uncertainties and complexities in the response of coral reefs to future sea-level rise. Earth surface processes and landforms**, v. 20, n. 1, p. 49-64, 1995.
24. SUGUIO, K.; MARTIN, L.; **Brazilian coastline quaternary formations: the states of Sao Paulo and Bahia littoral zone evolutive schemes**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, n. 48, p. 325-334, 1976.
25. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables**. Working Paper No. ESA/P/WP/248
26. ZACARIAS D.A. (2013) - Avaliação da capacidade de carga turística para gestão de praias em Moçambique: o caso da Praia do Tofo. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, 13(2):205-214.

## TAIPA DE PILÃO: UMA TÉCNICA CONSTRUTIVA COM TERRA

*Data de aceite: 01/08/2022*

### **Kauan de Jesus Oliveira**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **Júlio Coura Diniz**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **Erick Roberto Campos**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **Sayonara Espinoza Silva**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **Samuel Velasques Fernandes de Noronha**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **João Victor Rech Ruiz da Silva**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **Muriellen Cristina Cavalheiro da Frota Monteiro**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **Rafael Luis da Silva**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

### **Alex Gomes Pereira**

Centro Universitário São Lucas, Brasil

**RESUMO:** Nas últimas décadas, a humanidade tem vivido um momento de grandes avanços tecnológicos e desenvolvimento industrial, em função, principalmente, da implementação de novas ideias e de práticas de desenvolvimento sustentável. No setor da construção civil, a combinação de soluções construtivas tem-se apresentado como uma maneira de atenuar o

impacto gerado pelo aproveitamento abusivo de novas jazidas e de áreas naturais ainda intactas e, conseqüentemente, ajudar na redução do esforço físico dos trabalhadores. Nesta temática, observa-se, atualmente, uma atenção crescente no uso de técnicas construtivas fundadas em terra no território brasileiro, especialmente a técnica taipa de pilão no Brasil. Tendo em mente a importância histórica da utilização da taipa de pilão no Brasil, e o crescente interesse observado nos últimos anos pela metodologia, este trabalho tem como objetivo geral apresentar as características e os efeitos positivos do uso de método construtivo taipa de pilão no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Taipa de pilão, construção civil, soluções construtivas.

**ABSTRACT:** In the last decades, humanity has lived a moment of great technological advances and industrial development, mainly due to the implementation of new ideas and sustainable development practices. In the civil construction sector, the combination of constructive solutions has been presented as a way of mitigating the impact generated by the abusive use of new deposits and still intact natural areas and, consequently, helping to reduce the physical effort of workers. In this theme, there is currently a growing attention to the use of construction techniques based on land in Brazilian territory, especially the rammed earth technique in Brazil. Bearing in mind the historical importance of the use of rammed earth in Brazil, and the growing interest observed in the methodology in recent years, this work aims to present the characteristics and positive effects of the use of rammed earth

construction method in Brazil.

**KEYWORDS:** Pestle rammed earth, civil construction, constructive solutions.

## 1 | A TECNOLOGIA CONSTRUTIVA DA TAIPA DE PILÃO

A técnica taipa de pilão (solo estabilizado compactado) (Figura 1), também conhecida como taipa no Brasil e Portugal, tapial ou apisonado em outros países ibero-americanos, refere-se ao procedimento de construção de paredes no próprio local.



Figura 1: a) Parede de taipa de pilão com compactação pneumática; e b) protótipo de taipa de pilão executado no congresso Terra Brasil (2018)

Fonte: Heise, Minto & Hoffmann (2012); Caldas, Martins & Toledo Filho (2021).

Para Feiber (2012) a taipa de pilão é um sistema construtivo presente em diferentes culturas, que consiste em socar com o auxílio de um pilão a terra, ligeiramente umedecidas, dentro de uma fôrma de madeira (taipal ou tapial) (Figura 2), que vão acompanhando o avanço da construção da alvenaria, garantindo o prumo e a espessura da parede (NEVES & FARIA, 2011; PEIXOTO, 2017). Possuindo paredes de grande espessura, sendo calculado em função da sua altura ( $e = 0,10H$ ) (GIRALDELLI et al., 2020).

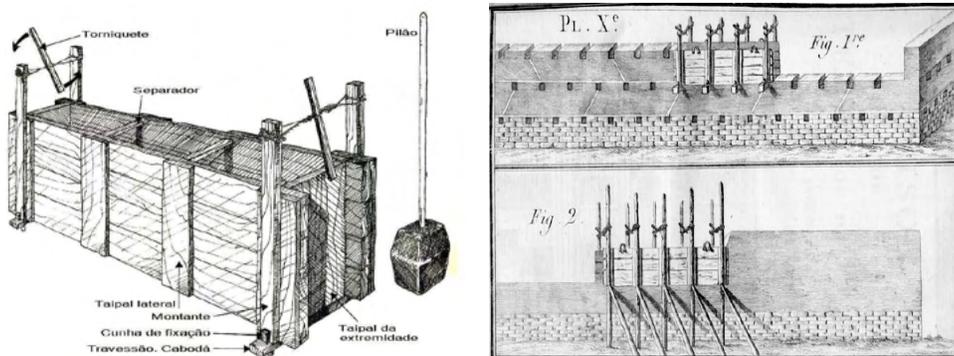


Figura 2: Sistemas de fôrmas de madeira

Fonte: Bardou & Arzoumanian (1986); Jaquin (2008).

## 1.1 História das construções em taipa de pilão

A técnica construtiva em taipa de pilão pode ser encontrada em todos os continentes do mundo, sendo usada em diferentes tipos de culturas, sendo introduzida pelos árabes, na região do Algarve, região no extremo sul de Portugal (PEIXOTO, 2017).

Silva (2015) relata que indícios da utilização da taipa foram encontrados em sítios arqueológicos nas culturas Yangshao e Longshan. Na China, também foram descobertas evidências do uso de taipa de pilão que datam cerca de 5000 a.C. Os historiadores estimam que cerca do ano 2000 a.C., as técnicas de taipa de pilão eram largamente usadas na China para construir muros e estabilizar as fundações das edificações (XINIAN et al., 2020). Exemplos de estruturas construídas com taipa na China, destaca-se parte da Grande Muralha da China em Jiayuguan (Figura 3) e uma torre de vigia em Dunhuang, ambas localizadas na província de Gansu, e datam cerca do século II a.C.



Figura 3: Parte da Muralha da China construída em taipa, China, século II a.C.

Fonte: ARCA Terra (2012)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://arcatterblog.wordpress.com/arquitetura-de-terra/25-taipa-muralha-da-china/>> Acesso em:

Os primeiros registros do uso da taipa em Portugal datam do século X, durante o domínio Muçulmano. Entretanto, teria sido somente durante o período dos Califados Almorávida e Almóada (que dominaram o Sul do país no período compreendido entre 1086 e 1250) que este sistema construtivo foi difundido e largamente empregado na construção de castelos e torres de vigia em Portugal (BRUNO, 2005).

A tecnologia construtiva da taipa de pilão foi introduzida no Brasil, pelos bandeirantes, portugueses e paulistas, que partiam de São Paulo e São Vicente em direção ao interior do Brasil em busca de riquezas minerais como ouro, prata e diamante, metais preciosos (PEIXOTO, SOUZA & REZENDE, 2017).

Os primeiros registros históricos da utilização da taipa de pilão no Brasil datam do período colonial brasileiro (período que compreende os anos de 1530 a 1822) na região de São Paulo (Figura 4).



Figura 4: A casa do Butantã, na cidade de São Paulo

Fonte: KON (2008) citado em Peixoto (2017).

Em 25 de janeiro de 1554, por ordem do padre Manuel da Nóbrega (superior da Companhia de Jesus no Brasil) foi construído o Colégio de Piratininga de São Paulo (atual cidade de São Paulo), localizado no alto de uma colina entre os rios Anhangabaú e Tamandateí. Aos poucos, ao redor do colégio, foram sendo construídos anexos e assim foi se formando um conjunto único de feições coloniais construídas com taipa e pilão e,

consequentemente, o surgimento de um povoado de índios cristianizados, sendo elevado à categoria de vila em 1557.

O uso da técnica de taipa de pilão pelo povoado de São Paulo de Piratininga se deu em função de que construir na época era procedimento difícil e demorado, além de não existirem materiais convencionais para construção (tijolos, concreto e rochas), em contrapartida, possuía barro em abundância, sendo empregado pelos primeiros habitantes da Vila de São Paulo de Piratininga para edificar as primeiras construções. Leal (1977), expõe outros fatores para o emprego em larga escala, seriam o baixo custo e a facilidade de execução desse sistema construtivo.

O uso dos métodos de taipa de pilão no Planalto de Piratininga continha algumas alterações no que se refere à arquitetura luso-árabe, por exemplo, a eliminação de alicerces e baldrame de pedra. Em substituição a esses elementos construtivos, as fundações eram feitas em terra compactadas. Essas adequações, aplicadas ao sistema construtivo da taipa de pilão, colaboraram para o surgimento da “tipologia Bandeirista” (MAYUMI, 2008; WEIMER, 2012).

Posteriormente, levada para os outros estados do país, como Paraná, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. (Figura 5) (PEIXOTO, SOUZA & REZENDE, 2017). Em Goiás, a técnica foi amplamente utilizada; já em Minas Gerais, acabou sendo substituída por outras metodologias de construção em terra, por não se ajustar às características topográficas locais (MELLO, 1985).



Figura 5: a) Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário; b) Paredes de taipa de pilão; e c) Cidade de Pirenópolis/Goiás

Fonte: Caldas, Martins & Toledo Filho (2021).

No presente, são observados poucos exemplares, dado que poucas edificações, erguidas pela taipa de pilão, resistiram ao tempo, sendo o Mosteiro da Luz (Figura 6) e as 29 construções no Estado de Minas Gerais (Figura 7), um dos poucos acervos construídos pelo método, a sobreviverem como um todo, no Brasil, tornando-se importantes referências da técnica de pilão no país.



Figura 6: Mosteiro da Luz, localizado em São Paulo

Fonte: Peixoto (2017).



Figura 7: 29 construções catalogadas no Estado de Minas Gerais

Fonte: Peixoto, Souza & Rezende (2017).

## 1.2 Característica da taipa de pilão

A taipa de pilão é um sistema construtivo moldado *in loco* com elevada resistência à compressão e baixa resistência à tração. O sistema possui vários produtos em sua composição, destacando o solo, como matéria-prima principal, e outros materiais tais como areia (caso exista alguma necessidade de correção), água, aditivo químico, sendo o cimento Portland e a cal hidratada os mais tradicionais (NEVES & FARIA, 2011).

### 1.2.1 O processo executivo da taipa de pilão

No processo de execução da técnica da taipa de pilão, primeiramente são construídas as fundações, logo depois a execução da fundação, as paredes começam a ser erguidas. Para iniciar a construção, a fôrma de madeira compensada é travada nas duas extremidades por peças móveis denominadas frontais. A terra umedecida deve ser colocada aos poucos, em camadas de aproximadamente 10cm de altura, e compactada de forma uniforme (MELLO, 1985; LEAL, 1977; VASCONCELOS, 1979; WEIMER, 2012). Referente ao processo de compactação, pode-se ser realizado de duas formas (CALDAS, MARTINS & TOLEDO FILHO, 2021):

- a) Manual com a utilização de um pilão (Figura 8), compacta camada de 10 a 15cm de altura (SATO, 2011); e

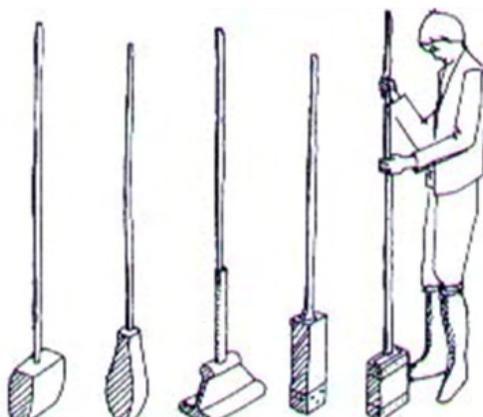


Figura 8: Taipa manual

Fonte: Montoro (1994).

- b) Mecanizada com o emprego do pilão pneumático (Figura 9) que compacta camada de 20 a 30cm (SATO, 2011).



Figura 9: Taipa mecanizada

Fonte: Montoro (1994).

Na atualidade, a técnica da taipa de pilão mecanizada vem sendo amplamente utilizada no mercado internacional, principalmente nos Estados Unidos e Austrália. De acordo com Lopes et al. (2016) salienta que o uso dos métodos mecanizados estão cada vez mais comuns, já que além de aprimorar o procedimento executivo, também possibilita uma melhor qualidade visual, acabamento e uniformidade dos materiais (NEVES, FARIA, 2011). Para Sato (2011) a execução da taipa por meio da tecnologia mecanizada, produz paredes com rigidez comparadas às alvenarias de concreto, visto que o processo mecanizado resulta em paredes mais compactadas, sólidas e menos permeáveis, além de proporcionar baixa retração e o não surgimento de manifestações patológicas, como trincas e rachaduras.

Ainda segundo Sato (2011) a tecnologia mecanizada para execução paredes de taipa de pilão, apresenta uma alternativa viável e econômica em relação à construção tradicional de paredes de tijolos. Todavia, o emprego da tecnologia mecanizada no Brasil ainda é um desafio, uma vez que existem poucas empresas do ramo de construção que construam com a técnica mecanizada. Entre os fatores, estão o pequeno e fragilizado mercado, devido à falta de mão-de-obra e profissionais qualificados, bem como a falta de especificações e normas técnicas para construção com terra.

## 2 | CONCLUSÃO

A otimização dos sistemas e processos construtivos que utilizam a terra como

matéria-prima é importante para contribuir na busca de soluções para diminuir o consumo de energia, a produção de resíduos e a ocorrência de desperdícios na indústria da construção civil. Nesta temática, arquitetura de terra tem chamado a atenção, nos últimos anos, dos estudiosos sobre o assunto, em virtude do solo ser um material natural, ou seja, seu tratamento inclina a ser menos poluente, além de consumir menos energia quando comparado com os materiais tradicionais da construção, cimento, a cerâmica e o aço.

Nesta perspectiva, o presente trabalho cumpriu com o objetivo apresentado de mostrar a técnica construtiva taipa de pilão, partindo de seu histórico, processo executivo e sua importância, o qual possui diferentes benefícios tanto para a construção de ambientes quanto para o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

BARDOU, P.; ARZOUMANIAN, V. **Arquitecturas de adobe**. 3ª ed. México: Gustavo Gili, 1986.

BRUNO, P. **Taipa Militar - Fortificações do período de domínio muçulmano**. Arquitectura de Terra em Portugal, Lisboa: Argumentum, p. 39-44, 2005.

CALDAS, L. R.; MARTINS, A. P. de S.; TOLEDO FILHO, R. D. Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021015, 2021.

FEIBER, S. D. Técnicas construtivas tradicionais: Os primórdios da sustentabilidade. **Revista Thêma et Scientia**, v.2, p. 32-38, 2012.

GIRALDELLI, M. A.; MELO, F. C. L.; PEREIRA, O. A.; DOMINGUES, M. A.; PINHEIRO, S. K. T.; BRASIL, M. A. Construção com Terra: Breve Histórico e Técnicas. **Ensaio**, v. 24, n. 4, p. 357-364, 2020.

HEISE A.F.; MINTO F.C.; HOFFMANN M. V. **Proposta de contribuição para análise do desempenho técnico construtivo das paredes de taipa de pilão**. In: CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL. 4. Anais... Fortaleza-CE, 2012.

JQUIN, P. **Analysis of historic rammed earth construction**. Tese (Doctor of philosophy) – School of Engineering, Durham University, Durham, 2008.

LEAL, F M. **Restauração e conservação de monumentos brasileiros**. Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, 1977.

LOPES, C.; BARRETO, M.; YUBA, A. N.; LATOSINSKI, K. T. Medição de manifestações patológicas em paredes de taipa e levantamento dos desperdícios decorrentes. In: **Terra Brasil 2016, Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil**. Bauru: UNESP, 2016.

MAYUMI, L. **Taipa, Canela Preta e Concreto – Estudo sobre o restauro de casas bandeiristas**. São Paulo, SP: Romano Guerra Editora, 2008.

MELLO, Suzy. **Barroco Mineiro**. São Paulo: Brasiliense, 1985. 288p.:Il.

MONTORO, P. **Como Construir Paredes de Taipa**. Folheto desenvolvido à partir do workshop sobre paredes de taipa, ministrado pelo arquiteto Davi Easton e equipe para protótipo habitacional em Pindamonhangaba – SP. Produzido pelo ILAM – Instituto Latino Americano, e escritório Arquiteto Paulo Montoro e Associados. São Paulo. 1994.

NEVES, C.; FARIA, O. B. (Org.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru, São Paulo: FEBUNESP/ PROTERRA, 2011.

PEIXOTO, M. V. S. Avaliação da integridade mecânica em paredes de taipa de pilão utilizando a técnica do ultrassom. Tese (Doutorado) - Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

PEIXOTO, M. V, S.; SOUZA, L. A. C.; REZENDE, M. A. P. O acervo em taipa de pilão em Minas Gerais. 1º Simpósio Científico ICOMOS Brasil, 2017.

SATO, M. H. Y. **Análise de estruturas em taipa de pilão**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, M. B. G. O **Ecoturismo como propulsor da Bioconstrução no PNSACV**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

VASCONCELOS, S. **Arquitetura no Brasil: sistemas construtivos**. 5. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1979.

WEIMER, G. **Arquitetura popular brasileira**. 2. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2012.

XINIAN, F.; DAIHENG, G.; XUJIE, L.; GUXI, P.; YUN, Q.; DAZHANG, S.; STEINHARDT, N. S. **Chinese Architecture**, New Haven, Yale University Press, pp. 12-22, 2002.

## ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DO SOFTWARE ANSYS

Data de aceite: 01/08/2022

**Henrique Cardoso Koch**

**Bruna Manica Lazzari**

**RESUMO:** Com a importância e necessidade do avanço dos conhecimentos no projeto utilizando concreto armado, busca-se a otimização dos materiais e esclarecimento das variáveis presentes dentro do dimensionamento. Este trabalho traz um modelo computacional tridimensional, através do método dos elementos finitos, utilizando o *software* ANSYS, versão 18.0, para o estudo de vigas de concreto armado. Como validação, foram utilizadas as vigas da série ET ensaiadas por Leonhardt e Walther (1962), sendo comparados os resultados numéricos com os valores experimentais. A partir da análise das tensões de ruptura do concreto, das barras de aço e dos estribos, concluiu-se que os resultados foram satisfatórios, evidenciando que o modelo proposto traz grande aproximação aos projetos de vigas em concreto armado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Vigas em concreto armado. Análise por elementos finitos. ANSYS.

### 1 | INTRODUÇÃO

Em virtude da importância das estruturas de concreto armado no contexto da construção civil, tal assunto tem sido alvo de muitas publicações no meio acadêmico e profissional (LAZZARI, 2015). Estes estudos visam

compreender as muitas variáveis presentes dentro do dimensionamento do concreto armado, conseguindo assim melhorar a sua utilização. É necessário o avanço do conhecimento do comportamento das estruturas em concreto armado, tendo em vista que o desenvolvimento da engenharia e da arquitetura, trazem em suas novas abordagens, estruturas mais arrojadas, com vãos maiores e peças estruturais mais esbeltas. Este desenvolvimento visa o ganho de área nas construções trazendo um melhor retorno financeiro dos investimentos empregados.

A medida em que a complexidade das estruturas cresce, aumenta também a dificuldade no estudo de cada caso. Para a análise destas estruturas de concreto armado, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é, seguramente, o processo numérico mais utilizado (AURICH, 2001). A ideia do MEF é a discretização de um meio contínuo, ou seja, a divisão das estruturas em partes menores, com menor complexidade, de forma a facilitar os cálculos. Essas partes, são divididas em um número finito de elementos que são conectados por nós. Este conjunto de nós é denominado de malha de elementos finitos. Para cada nó podem ser determinados os deslocamentos nodais, as tensões e deformações no interior dos elementos, assim como as reações nos pontos de apoio da estrutura. O modelo permite considerar o comportamento não-linear destes materiais e

também os processos de fissuração do concreto e plastificação do aço (SORIANO, 1998). Dentro da engenharia de estruturas, o método tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido, de geometria qualquer, estando este exposto a ações externas (AZEVEDO, 2003).

Este trabalho visa apresentar uma modelagem adequada para as estruturas de concreto armado utilizando o MEF, determinando as propriedades tanto do concreto como das armaduras, permitindo que sejam feitas simulações em diferentes estruturas de concreto armado. Para caracterização destas variáveis, de forma confiável, é necessário definir o comportamento de cada material, assim como a geometria que se pretende analisar. Para criação do modelo computacional, foi utilizado o programa ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*), versão 18.0. Conforme Lazzari (2015), a grande aceitação do programa no meio acadêmico, faz com que ele seja uma ótima ferramenta para estudos relacionados ao MEF permitindo fazer análises estáticas, dinâmicas, de fluídos, sejam os materiais lineares ou não-lineares, atribuindo comportamentos, os quais podemos controlar: elásticos, plásticos, viscosos ou a combinação que for conveniente utilizar. Através do *software* ANSYS, foi analisado o estado de deformações e tensões de elementos em concreto armado após a aplicação de um carregamento instantâneo, através de incrementos de deslocamento de curta duração.

A validação do modelo computacional para estruturas em concreto armado, implica o uso de ensaios experimentais ou até mesmo de resultados obtidos diretamente por meio da aplicação da norma vigente de concreto armado (NBR 6118/2014). Os resultados dos procedimentos experimentais devem ser consistentes e renomados, fazendo com que seja comprovada a utilidade da modelagem computacional. Dentro das inúmeras possibilidades de experimentos para validação estão as vigas de Leonhardt e Walther (1962); Bresler e Scordelis (1963); as vigas de concreto protendido de Tao e Du (1985); e as vigas de concreto armado com furos de Mansur (2006). Devido à grande utilização em trabalhos acadêmicos e sua grande abrangência de comportamentos em situação de ruptura, optou-se por utilizar as vigas de Leonhardt e Walther (1962) para a comprovação da eficácia do modelo proposto.

## 1.1 Objetivos

Os objetivos desta pesquisa estão separados em principal e secundário, conforme descrito a seguir.

### 1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a realização de análise numérica tridimensional, em vigas de concreto armado ensaiadas por Leonhardt e Walther (1962), aplicando o método dos elementos finitos, através do sistema ANSYS. A partir da validação do modelo

exposto, através da comparação entre os resultados numéricos e experimentais, entende-se possível fazer simulações em peças de qualquer geometria e carregamento.

### 1.1.2 *Objetivo Secundário*

Como objetivo secundário têm-se:

- a) estudo das ferramentas do programa de elementos finitos ANSYS;
- b) descrição dos modelos de comportamento dos materiais aço e concreto;
- c) elaboração de *scripts* com a entrada de dados das peças analisadas.

## 1.2 Delimitações

O trabalho apresenta duas delimitações importantes. A primeira é o fato de o modelo computacional proposto para o concreto armado ser testado apenas no *software* de elementos finitos ANSYS. Outro fator é a validação do modelo exposto, que trará como comprovação de sua eficácia apenas as vigas da série ET, proposta por Leonhardt e Walther.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

Para elaboração do modelo computacional foi essencial, nesta pesquisa, a realização de uma revisão bibliográfica a respeito do método dos elementos finitos e também dos modelos dos materiais que foram adotados. Os itens a seguir apresentam alguns aspectos importantes, que foram necessários para a continuidade do trabalho.

### 2.1 Método dos Elementos Finitos

Na grande maioria dos casos, é muito difícil determinar a data em que ocorreu um avanço do conhecimento. No caso do MEF, é relatado diversas vezes que a primeira ocorrência do termo “elementos finitos” é o artigo, que data de 1960 e tem como autor Ray Clough. Os grandes avanços em termos do MEF vieram na década de 60 e início da década de 70, trazendo as análises de modelos ao formato mais aceitável atualmente. Inicialmente, os elementos finitos mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, passando-se mais tarde a dar preferência aos quadriláteros e aos hexaedros. Ao contrário de outros métodos que eram utilizados no passado, o MEF necessita de um grande esforço computacional, devido à complexidade das equações matemáticas necessárias para reproduzir os fenômenos naturais. Sabendo desse esforço computacional, não é ao acaso que a utilização do método cresceu com o desenvolvimento de computadores melhores e tecnologias mais avançadas. Com isso, em meados da década de 90 esse método passa a ser muito utilizado pelos projetistas de estruturas (AZEVEDO, 2003).

### 2.2 ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*)

Existem muitos programas de análise pelo MEF, entre os quais é possível

destacar os mais utilizados: ANSYS, ABAQUS, NASTRAN e SAP2000. Para este trabalho foi utilizado o ANSYS 18.0, que abrange inúmeros materiais e formas de avaliação de resultados o que o torna superior a muitos outros *softwares* de análise pelo MEF. Através desta plataforma pode-se definir as propriedades dos materiais e seus comportamentos, assim como a geometria das estruturas que se deseja analisar, não havendo um meio único de composição (GONÇALVES JUSTO, 2010).

O ANSYS apresenta dois ambientes de trabalho: o sistema APDL (*ANSYS Parametric Desing Language*) e o sistema *workbench*. O *workbench* apresenta um design de tela mais amigável e intuitiva. Já o sistema ADPL, apesar de trazer uma aparência mais antiga, permite com que o usuário manipule melhor a simulação que se deseja fazer, trazendo junto ao *software* uma ferramenta de desenho e modelagem de maneira simplificada. Outro fator importante que influenciou na escolha deste sistema para este trabalho, foi a possibilidade de inclusão de comandos por meio de arquivo de texto (arquivos com extensão *.txt*). Este arquivo pode conter todos os tipos de informações necessárias para modelagem conforme a lista de comandos do ANSYS.

## 2.3 Modelagem computacional

Neste item são apresentados aspectos da modelagem e das propriedades dos elementos finitos da biblioteca do ANSYS, que foram utilizados para representar as vigas em concreto armado. Para a modelagem do concreto, armadura, pontos de apoio, e pontos de aplicação de carregamento, foram empregados, respectivamente, os seguintes elementos: SOLID 65; LINK 180; e SOLID 185.

### 2.3.1 Modelagem do concreto

A seguir são apresentadas as descrições do elemento escolhido para representação do concreto, de acordo com a biblioteca do ANSYS. Também são descritos, os modelos de comportamento responsáveis por caracterizar o material dentro do sistema.

#### 2.3.1.1 SOLID 65

Para a modelagem do concreto, foi utilizado, neste trabalho, o elemento SOLID 65, o qual é composto por oito nós, com três graus de liberdade em cada um deles, conforme mostra a figura 1. Este elemento é comumente utilizado para modelagem tridimensional de estruturas de concreto, pois pode simular o comportamento da superfície de ruptura de materiais frágeis. Desta forma, é capaz de representar a fissuração, quando submetido ao esforço de tração, e o esmagamento do concreto quando solicitado à compressão, apresentando inclusive, deformações plásticas e por fluência. Para representação do concreto no sistema, foram adotados quatro parâmetros para o comportamento deste material sendo eles: *Linear Isotropic, Multi-linear Elastic, Concrete e Density*.

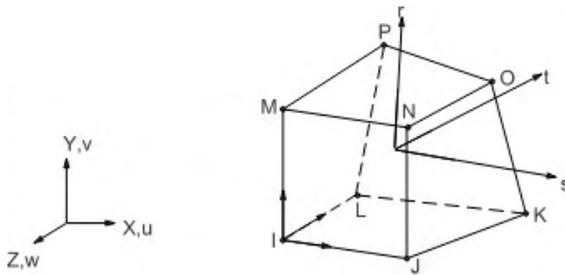


Figura 1 – Geometria do elemento SOLID 65  
(fonte: ANSYS, 2017)

O modelo *Linear isotropic* considera um material elástico linear. É necessário definir duas variáveis para determinação de seu comportamento: o coeficiente de Poisson, o qual o valor adotado foi de 0,2; e o módulo de elasticidade do material, o qual foi definido conforme o Código Modelo *fib* 2010 (2012), apresentado pela Equação 1.

$$E_{ci} = E_{co} \cdot \alpha_E \cdot f_{cm}^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$E_{ci}$ : módulo de elasticidade do concreto (kN/cm<sup>2</sup>);

$E_{co}$ : 2150 kN/cm<sup>2</sup>;

$\alpha_E$ : adotado 1,00 para agregado tipo quartzo;

$f_{cm}$ : resistência média a compressão do concreto (kN/cm<sup>2</sup>).

### 2.3.1.2 Modelo Multilinear Elástico (MELAS)

O modelo *Multi-linear Elastic* é um modelo constitutivo elástico, não linear, que foi utilizado visando reproduzir o comportamento do concreto à compressão. A informação de entrada é a curva de tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial, que tem seus valores definidos a partir das Equações 2, 3 e 4, conforme o Código Modelo *fib* 2010 (2012), e está representada na figura 2. A tabela 1 fornece os valores das propriedades para o concreto C25, conforme o Código Modelo *fib* 2010 (2012). Desta forma é possível simular a plastificação do concreto e a perda da sua capacidade resistente após o limite de resistência do material.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = - \left( \frac{\kappa \cdot \eta - \eta^2}{1 + (\kappa - 2) \cdot \eta} \right) \text{ para } |\varepsilon_c| < \varepsilon_{c,lim} \quad | \quad (\text{Equação 2})$$

$$\eta = \frac{\sigma_c}{\sigma_{c1}} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\kappa = \frac{E_{ci}}{E_{c1}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$\varepsilon_c$ : deformação de compressão;

- $\varepsilon_{c1}$ : deformação na máxima tensão de compressão;
- $\varepsilon_{c,lim}$ : deformação última de compressão;
- $E_{ci}$ : módulo de elasticidade do concreto;
- $E_{c1}$ : módulo secante da origem do pico de tensão de compressão;
- $k$ : número plástico.

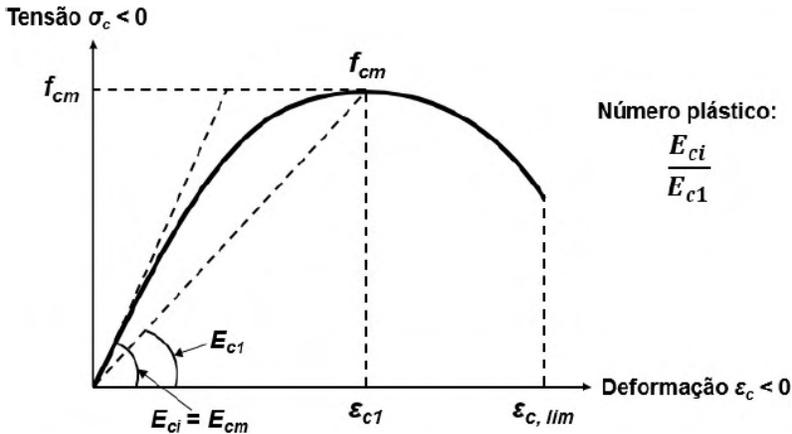


Figura 2 – Diagrama tensão-deformação do concreto comprimido  
(fonte: Código Modelo *fib* 2010, 2012)

CONCRETO	$f_{ck}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{ci}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{c1}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$S_{c1}$ (‰)	$S_{c,lim}$ (‰)	k
C25	2,5	3200	1490	-2,2	-3,5	2,15

Quadro 1 – Valores das propriedades para o concreto C25  
(fonte: Código Modelo *fib* 2010, 2012)

### 2.3.1.3 Modelo Concreto (Concrete)

O modelo *Concrete* do ANSYS, foi utilizado para representação do comportamento a tração do concreto. Esse modelo utiliza o critério de ruptura de *Willan-Warnke* segundo o manual do ANSYS (2017). Os parâmetros necessários para utilização do modelo são:

- a) coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura aberta;
- b) coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura fechada;
- c) resistência última uniaxial à tração;
- d) resistência última uniaxial à compressão;
- e) resistência última biaxial à compressão;
- f) estado de tensão hidrostática ambiente;
- g) resistência última biaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostático

ambiente;

h) resistência última uniaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostático ambiente;

i) coeficiente multiplicador de rigidez para condição fissurada na tração.

Os coeficientes para transferência de cisalhamento foram adotados conforme Kunzler (2013) onde os itens “a” e “b” são respectivamente 0,2 e 0,4. A resistência última uniaxial à tração é calculada conforme recomendação do Código Modelo *fib* 2010 (2012), apresentada pela Equação 5.

$$f_t = 0,03 \cdot (10 \cdot f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$f_t$ : resistência à tração do concreto (kN/cm<sup>2</sup>);

$f_{ck}$ : resistência característica a compressão do concreto (kN/cm<sup>2</sup>).

O limite à compressão foi desativado, aplicando o valor -1. Este valor foi adotado para evitar problemas de convergência com os outros modelos adotados para compressão. É possível utilizar os valores pré-estabelecidos pelo programa.

#### 2.3.1.4 Valor da massa específica do concreto

O modelo utilizado para representação da massa específica do concreto armado foi o *Density*, sendo que o valor adotado foi de 2,54e-8 t/cm<sup>3</sup>. Além disso, foi definido dentro do ANSYS que o valor da aceleração da gravidade seria 981 cm/s<sup>2</sup>, assim tem-se o peso específico de 25e-6 kN/cm<sup>3</sup>.

#### 2.3.2 Modelagem da armadura

Dentro da estrutura de concreto armado, as barras de aço resistem basicamente a esforços axiais. As barras de aço podem ser modeladas de três maneiras, conforme figura 3: discreta; incorporada; e distribuída.

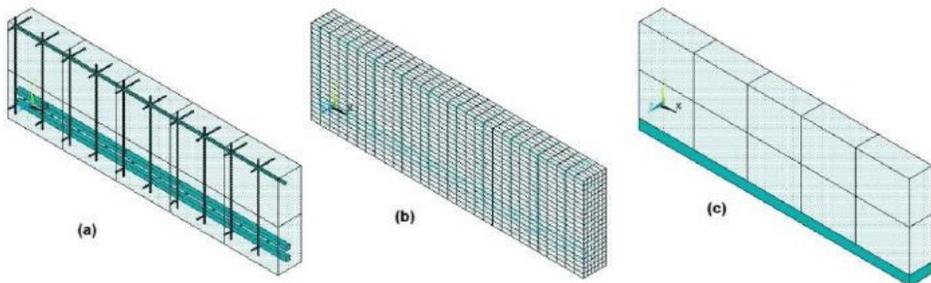


Figura 3 – Armaduras: (a) modelo incorporado, (b) modelo discreto, (c) modelo distribuído

(fonte: LAZZARI, 2016)

O modelo discreto representa as armaduras por elementos unidimensionais, tipo treliça, e pressupõe que os nós das armaduras estejam sobrepostos aos nós do concreto, restringindo a armadura à malha do concreto. O modelo incorporado traz o aço como uma linha de material mais rígido dentro do concreto, posicionado em qualquer ponto da malha. No modelo distribuído admite-se o concreto uniformemente armado dentro de cada elemento, sendo conveniente ser usado no caso de placas e cascas. Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas armaduras do modelo discreto (LAZZARI, 2016).

### 2.3.2.1 LINK 180

Para a modelagem das barras longitudinais de armadura e dos estribos, foi utilizado, neste trabalho, o elemento LINK 180, que é um elemento unidimensional, composto de dois nós com três graus de liberdade em cada um deles conforme mostra a figura 4. Este elemento é capaz de considerar de forma discreta a armadura passiva, considerando aderência perfeita entre os elementos de aço e de concreto.

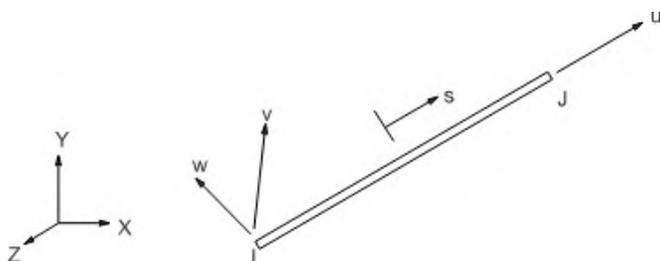


Figura 4 – Geometria do elemento LINK 180

(fonte: ANSYS, 2017)

Para representação das armaduras, foram adotados dois parâmetros de comportamento sendo eles: *Linear Isotropic* e *Bilinear*. O modelo *Linear Isotropic* segue as mesmas propriedades já descritas, sendo necessário definir duas variáveis: o coeficiente de Poisson, o qual o valor adotado foi 0,3; e o módulo de elasticidade do material. O modelo bilinear é descrito a seguir.

### 2.3.2.2 Modelo Bilinear (BISO)

O modelo BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*) é um modelo elastoplástico com endurecimento linear. As armaduras seguem dois comportamentos, dependendo do processo de fabricação do material. Para os aços com patamar de escoamento bem definido, foi adotado o modelo elastoplástico perfeito (antiga classe A); já para os aços que são encruados a frio (antiga classe B), foi usado o modelo elastoplástico com endurecimento

linear (figura 5). Para esta representação foram definidos os parâmetros de tensão de escoamento inicial e o módulo de endurecimento, dados pelas Equações 6 e 7.

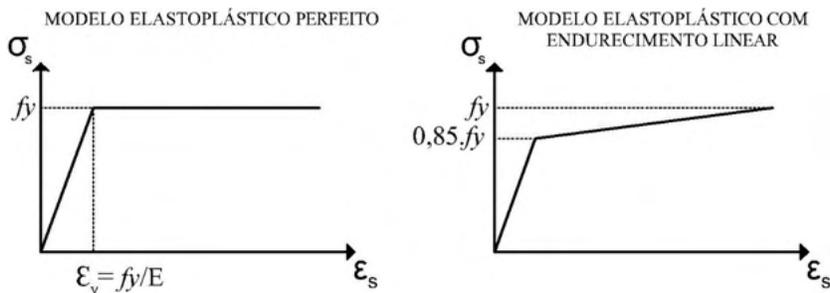


Figura 5 - Modelos elastoplástico perfeito e elastoplástico com endurecimento linear  
(fonte: elaborada pelo autor)

$$\sigma_0 = 0,85 \cdot f_y \quad (\text{Equação 6})$$

$$Et = \frac{0,15 \cdot f_y}{0,01 - \frac{f_y}{E_s}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$\sigma_0$ : tensão de escoamento inicial;

$Et$ : módulo de endurecimento;

$f_y$ : tensão de escoamento.

### 2.3.3 Modelagem dos suportes

A modelagem dos aparelhos de apoio e de aplicação de cargas foi feita utilizando o elemento SOLID 185, presente na biblioteca do ANSYS. Este elemento é composto por oito nós, com três graus de liberdade em cada um deles, conforme mostra a figura 6. O mesmo é capaz de simular deformações de materiais praticamente incompressíveis, reproduzindo os apoios das vigas e também os pontos de carga, sem alterar os resultados da viga analisada.

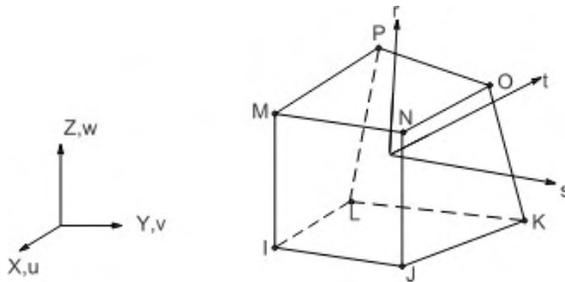


Figura 6 – Geometria do elemento SOLID 185  
(fonte: ANSYS, 2017)

Para representação destes elementos, foi adotado um único parâmetro de comportamento, o modelo *Linear Isotropic*. Este modelo segue as mesmas propriedades já descritas, sendo necessário definir duas variáveis: o coeficiente de Poisson, o qual o valor adotado foi 0,2 e o módulo de elasticidade do material para o qual foi convencionado,  $E_{ci} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$ , um valor extremamente elevado, apenas para que o material não influencie nas simulações.

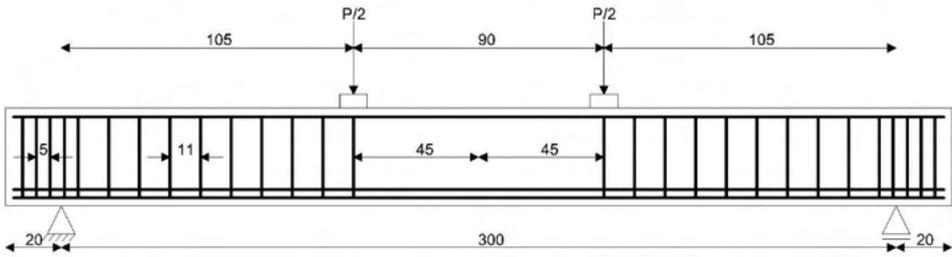
### 3 I DESENVOLVIMENTO

Com o objetivo de comprovar a eficácia do modelo proposto, são apresentados os comparativos entre as análises experimentais e as numéricas. Sendo então utilizadas as quatro vigas em concreto armado que foram ensaiadas por Leonhardt e Walther (1962).

#### 3.1 Vigas de Leonhardt e Walther (1962)

As quatro vigas isostáticas bi-apoiadas de concreto armado estudadas são denominadas: ET1, ET2, ET3 e ET4. Nessas vigas foram empregados ensaios de flexão em quatro pontos, onde duas cargas concentradas são aplicadas nos terços das vigas, conforme apresenta a figura 7. Todas as vigas possuem o vão de 3,0 m com a mesma altura de 35 cm. As variações são devidas as diferentes seções transversais. De acordo com os dados experimentais, a resistência média à compressão do concreto utilizado é de  $2,42 \text{ kN/cm}^2$ .

## SEÇÃO LONGITUDINAL: VIGAS DE LEONHARDT E WALTHER (1962)



## SEÇÕES TRANSVERSAIS

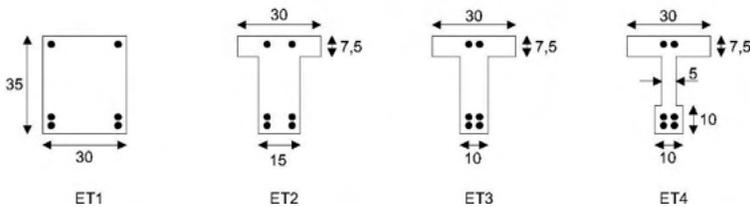


Figura 7 – Vigas de Leonhardt e Walther (1962) (cotas e medidas em centímetros)

(fonte: adaptada de LEONHARDT; WALTHER, 1962)

Todas as vigas possuem as mesmas armaduras longitudinais, compostas por barras de aço encruadas a frio (antiga classe B). Estas consistem de 4 barras inferiores de 20 mm de diâmetro, com a tensão de escoamento  $f_y = 42,8 \text{ kN/cm}^2$ , sendo duas localizadas a 3 cm e duas a 6 cm da borda inferior da viga. Tem-se também duas barras superiores com diâmetro de 8 mm e tensão de escoamento  $f_y = 46,5 \text{ kN/cm}^2$ , localizadas a 3 cm da borda superior da viga.

Os estribos dispostos verticalmente, são compostos por barras de aço com dureza natural (antiga classe A), com 6 mm de diâmetro e tensão de escoamento  $f_y = 32 \text{ kN/cm}^2$ . A distribuição e espaçamento das barras são apresentados na figura 7. Os módulos de elasticidade utilizados são iguais a 210 GPa para o aço classe A e 195 GPa para o aço classe B.

## 3.2 Entrada de dados no ANSYS

### 3.2.1 Lançamento de volumes, linhas, seções e propriedades

Para inclusão dos volumes de concreto, da placa de apoio, e da placa de aplicação de carga no programa, foi utilizado o comando BLC4, conforme mostra a figura 8. Através desta figura é possível verificar como se definem os parâmetros deste comando, sendo eles: a coordenada inicial no eixo X, a coordenada inicial no eixo Y, o comprimento no eixo X, o comprimento no eixo Y e por fim o comprimento no eixo Z. Essas cinco informações

são utilizadas para moldar os volumes desejados no programa.

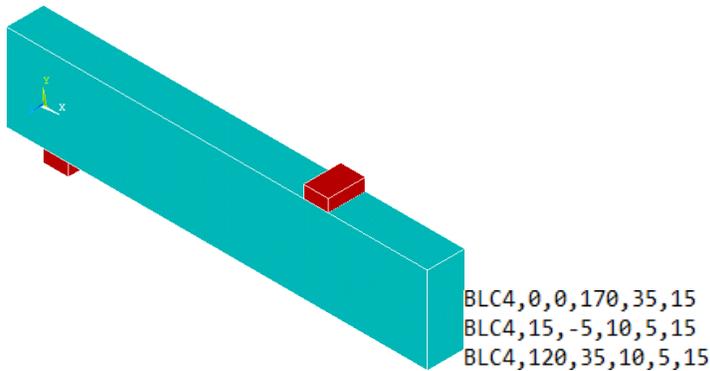


Figura 8 – Volumes de concreto e comandos de lançamento em formato *.txt*  
(fonte: elaborada pelo autor)

Para o lançamento das linhas internas, que formaram as barras e estribos, primeiro são lançados os *KEYPOINT*. Este comando criará pontos base dentro do plano de trabalho do programa, onde o primeiro valor é a numeração do ponto, e os três números seguintes são a localização nos eixos X, Y e Z, respectivamente. Logo após, são inseridos comandos para criar linhas de determinado ponto base até outro. Estes procedimentos são apresentados na figura 9.

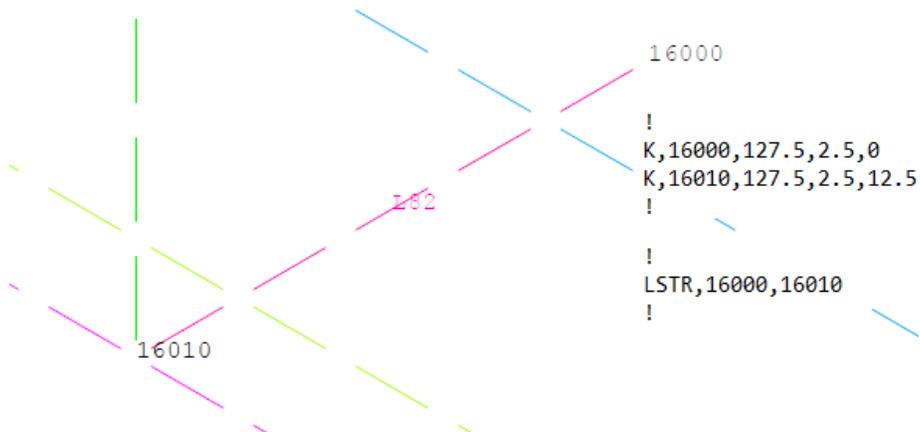


Figura 9 – Criação de linhas e comandos de lançamento em *.txt*  
(fonte: elaborada pelo autor)

As três seções correspondentes aos diferentes tipos de armadura foram incluídas conforme os comandos da figura 10. Na primeira linha de comandos, são escolhidas as denominações de cada seção a ser criada e é indicado o tipo de elemento a ser utilizado.

Na linha dois, são informadas as áreas das seções transversais das barras. E por fim, na linha três, são informadas as *SECCONTROL*, onde foram utilizados os valores padrão do ANSYS. Neste trabalho, as seções 2, 3 e 4 indicam, respectivamente, os parâmetros adotados para as barras longitudinais inferiores, superiores e estribos, conforme apresenta a figura 10.

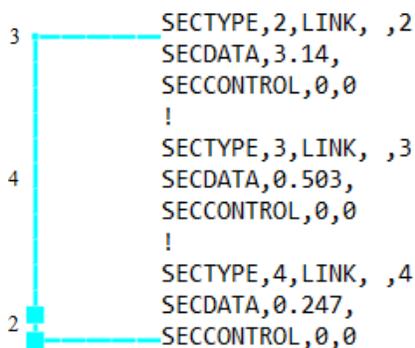


Figura 10 – Seções das barras de aço e comandos de lançamento em formato .txt

(fonte: elaborada pelo autor)

Por fim, para incluir as propriedades e seções dos materiais e fazer a divisão dos volumes e linhas em elementos finitos, utiliza-se o comando *MESH*. A figura 11, traz os comandos de lançamento das propriedades dos materiais no ANSYS. Através do comando *TYPE*, se define o tipo de elemento a ser adotado, conforme a ordem inicial inserida no programa. Na figura 11, o número 1 indica a utilização do SOLID 65, e o número 2, o LINK 180. Os comandos *MAT*, *REAL* e *SECCNUM* indicam, respectivamente, as propriedades dos materiais a serem utilizados; a constante real; e a seção transversal no caso das barras de armadura. Logo abaixo, o comando *LESIZE*, define a linha em que devem ser incorporadas as características e o número de divisões necessárias para a malha de elementos finitos. Para os volumes de concreto, o comando *MSHAPE*, define a análise como elemento tridimensional e hexaedro, e o comando *VMESH*, aplica os parâmetros gerados. Já para as linhas que representam as barras de armadura, apenas se utiliza o comando *LMESH*. Para elaboração da viga ET1, que é mostrada na figura 12, foram necessários 7370 elementos finitos.

```

!
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
LESIZE,2, , ,68, , , ,1
LESIZE,4, , ,68, , , ,1
LESIZE,5, , ,68, , , ,1
LESIZE,7, , ,68, , , ,1
!
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!
VMESH,1
!
!
TYPE, 2
MAT, 4
REAL, 0
ESYS, 0
SECNUM, 4
! y
!
LESIZE,38, , ,12, , , ,1
LMESH,38
!

```

Figura 11 – Mesh dos volumes e linhas por comandos .txt  
(fonte: elaborada pelo autor)

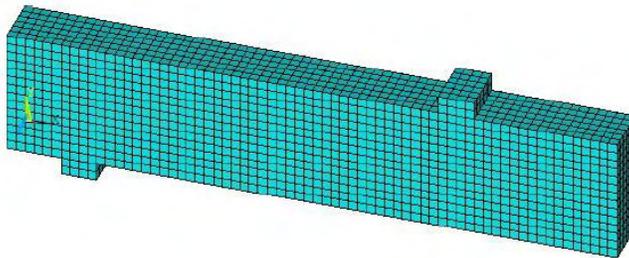


Figura 12 – Discretização da viga ET1  
(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.2.2 Lançamento de propriedades dos materiais

Os dados de entrada para o concreto foram calculados conforme as equações já apresentadas. O módulo de elasticidade previsto para o concreto foi de 2886,53 kN/cm<sup>2</sup> (Equação 1). Para o parâmetro *concrete*, foram utilizadas as propriedades descritas na tabela 2. Os coeficientes de transferência de cisalhamento a fissuras abertas e fechadas, foram retirados de testes experimentais, segundo Kunzler (2013). Já os itens representados com valor nulo, indicam que foram adotados os valores pré-definidos pelo ANSYS. Para a definição do parâmetro MELAS, empregou-se os valores da curva tensão deformação do concreto comprimido, conforme a tabela 3. Os valores foram calculados conforme equações já apresentadas no item 2.3.1.2 deste trabalho.

Para caracterização do comportamento do aço foram utilizados valores diferentes para cada armadura dentro dos parâmetros *Linear Isotropic* e BISO. A tabela 4 apresenta os dados informados para cada armadura, de acordo com os valores calculados e propriedades já esclarecidas no processo experimental apresentado. O valor de módulo de endurecimento dos estribos foi adotado 0, visando eliminar a inclinação do trecho após a tensão de escoamento inicial, pois o aço em questão obedece ao modelo elastoplástico

perfeito.

a) Coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura aberta;	0,2	f) Estado de tensão hidrostática ambiente;	0
b) Coeficiente de transferência de cisalhamento para fissura fechada;	0,4	g) Resistência última biaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostática ambiente;	0
c) Resistência última uniaxial à tração;	0,25	h) Resistência última uniaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostática ambiente;	0
d) Resistência última uniaxial à compressão;	-1	i) Coeficiente multiplicador de rigidez para condição fissurada na tração.	0
e) Resistência última biaxial à compressão;	0		

Quadro 2 – Valores do parâmetro *concrete*

(fonte: KUNZLER, 2013)

Tensão (σc)	Deformação (εc)	Tensão (σc)	Deformação (εc)	Tensão (σc)	Deformação (εc)
0,23	0,0001	2,05	0,0013	2,38	0,0025
0,45	0,0002	2,13	0,0014	2,35	0,0026
0,65	0,0003	2,20	0,0015	2,31	0,0027
0,84	0,0004	2,26	0,0016	2,27	0,0028
1,02	0,0005	2,31	0,0017	2,22	0,0029
1,19	0,0006	2,35	0,0018	2,15	0,003
1,35	0,0007	2,38	0,0019	2,09	0,0031
1,49	0,0008	2,40	0,002	2,01	0,0032
1,62	0,0009	2,42	0,0021	1,93	0,0033
1,75	0,001	2,42	0,0022	1,84	0,0034
1,86	0,0011	2,42	0,0023	1,74	0,0035
1,96	0,0012	2,40	0,0024		

Quadro 3 – Valores da curva tensão deformação do concreto comprimido (Unidades de tensão em kN/cm<sup>2</sup>)

(fonte: elaborada pelo autor)

	Longitudinais inferiores	Longitudinais superiores	Estribos verticais
Poisson	0,3	0,3	0,3
Tensão de escoamento inicial	36,38 kN/cm <sup>2</sup>	39,53 kN/cm <sup>2</sup>	32,00 kN/cm <sup>2</sup>
Módulo de endurecimento	789,24 kN/cm <sup>2</sup>	874,82 kN/cm <sup>2</sup>	0
Módulo de elasticidade	19500 kN/cm <sup>2</sup>	19500 kN/cm <sup>2</sup>	21000 kN/cm <sup>2</sup>

Quadro 4 – Valores aplicados nas armaduras

(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.2.3 Restrições

Para diminuir o esforço computacional, aproveitando as condições de simetria das peças apresentadas na figura 7, foi feita a modelagem de apenas um quarto do volume total de cada viga. No centro da placa de apoio foram restringidos os deslocamentos na direção Y. Nos nós localizados no final do quarto de viga, foram restringidos os deslocamentos na direção X. Além disso, foram limitados os deslocamentos na direção Z de todos os nós pertencentes à lateral da peça, simulando a continuidade do elemento nesta direção.

### 3.2.4 Carregamentos

Foram aplicados na rotina do *software*, duas etapas de carregamento. Primeiramente foi aplicado na viga a deformação instantânea devido ao peso próprio do concreto armado, incorporando a aceleração da gravidade em conjunto com a propriedade *density*. Logo após, para simular a aplicação da carga concentrada até a ruptura da viga, foram aplicados sucessivos deslocamentos verticais nos mesmos pontos em que foram aplicadas no ensaio experimental.

## 4 | RESULTADOS

O diagrama de carga e deslocamento obtido a partir do ANSYS, foi gerado multiplicando por quatro os resultados obtidos como reações no nó de apoio. Os valores dos deslocamentos foram medidos no nó interno da viga, na extremidade oposta ao apoio, onde se localiza a metade do seu vão. Na figura 13 é possível observar as curvas de carga-deslocamento da viga ET1 e a evolução das flechas na referida viga ao longo dos incrementos de deslocamento, ficando assim exposto que o modelo adotado para modelagem das vigas se aproxima dos ensaios experimentais, comprovando a eficácia do mesmo.

Na figura 14, é apresentada a deformação máxima atingida na viga ET1 no instante onde foi identificada a ruptura da estrutura. Tal deformada representa a flecha atingida no momento do seu colapso. A carga de ruptura foi de 235 kN, com uma deformação de 1,31 cm no centro do vão.



Figura 13 – Comparação da flecha das vigas experimentais com o modelo computacional  
(fonte: elaborada pelo autor)

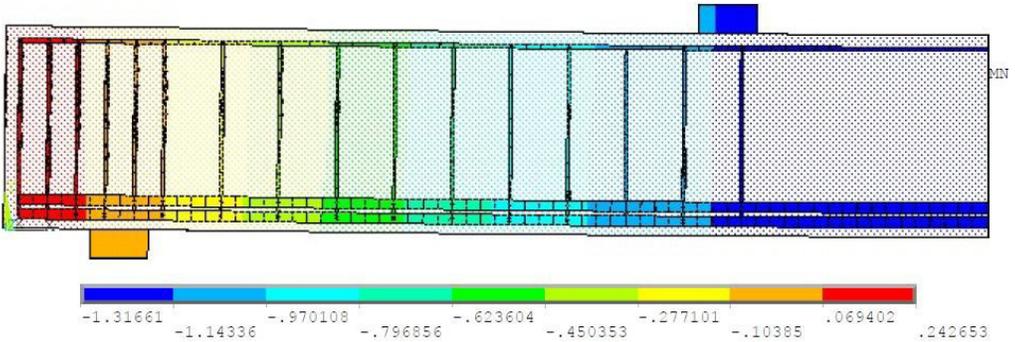


Figura 14 – Deformada no instante de ruptura da viga ET1  
(fonte: elaborada pelo autor)

A figura 15 traz as tensões impostas nas armaduras longitudinais da viga ET1 no instante da ruptura. A barra atinge a tensão de escoamento no momento da ruptura, sendo considerada assim a ruptura por flexão.

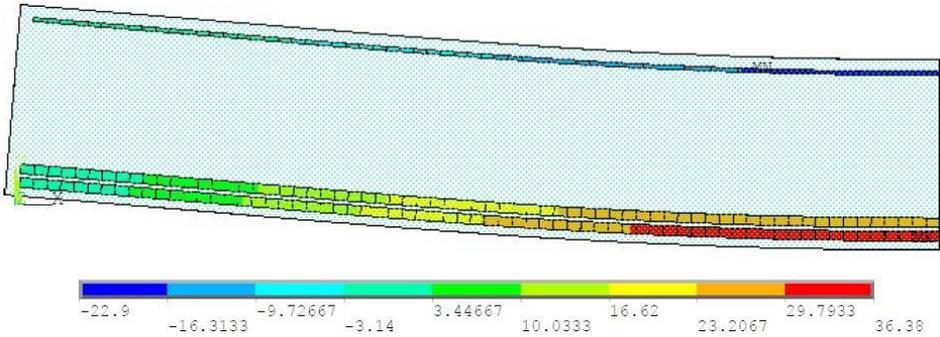


Figura 15 – Tensão nas armaduras longitudinais da viga ET1

(fonte: elaborada pelo autor)

Na figura 16, estão representadas as tensões atuantes somente nos estribos da viga ET1, no momento da ruptura. Verificou-se que os estribos não atingiram a tensão de escoamento de 32 kN/cm<sup>2</sup>, o que comprova que não houve ruptura por cisalhamento.

Na figura 17, tem-se o diagrama de abertura de fissuras para a viga ET1. A observação da direção dessas fissuras no instante da ruptura, auxilia no processo de análise do comportamento das vigas. As fissuras são representadas pela cor vermelha, as retas verticais, são características de flexão, que se evidenciou principalmente no centro da viga. Já as inclinadas são de cisalhamento, observadas nos pontos mais próximos do apoio. Pode-se visualizar também na Figura, que os trechos com círculos azuis representam o esmagamento do concreto e os círculos verdes mostram aberturas na estrutura.

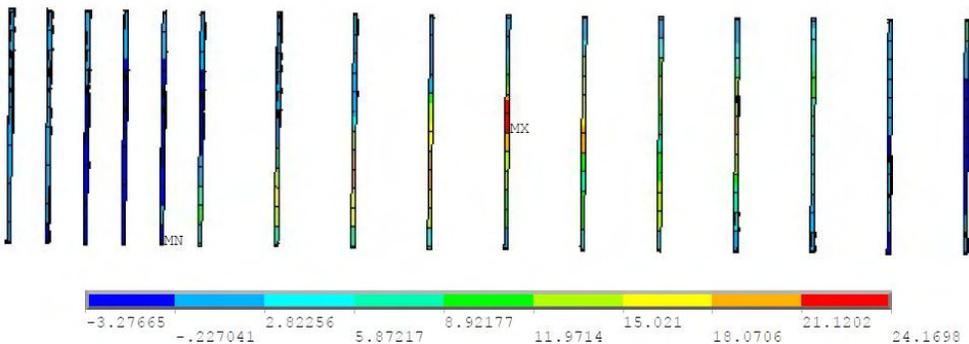


Figura 16 – Tensão nas armaduras transversais da viga ET1

(fonte: elaborada pelo autor)

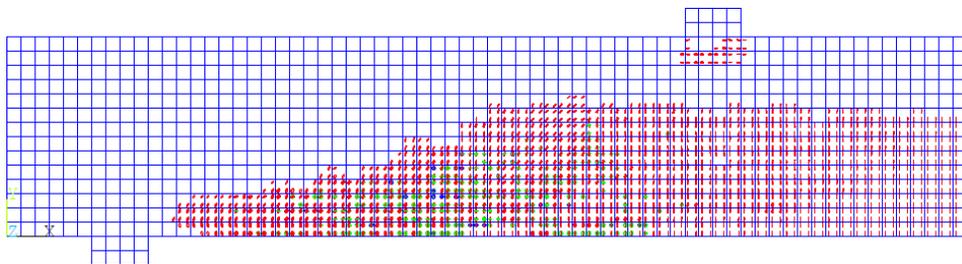
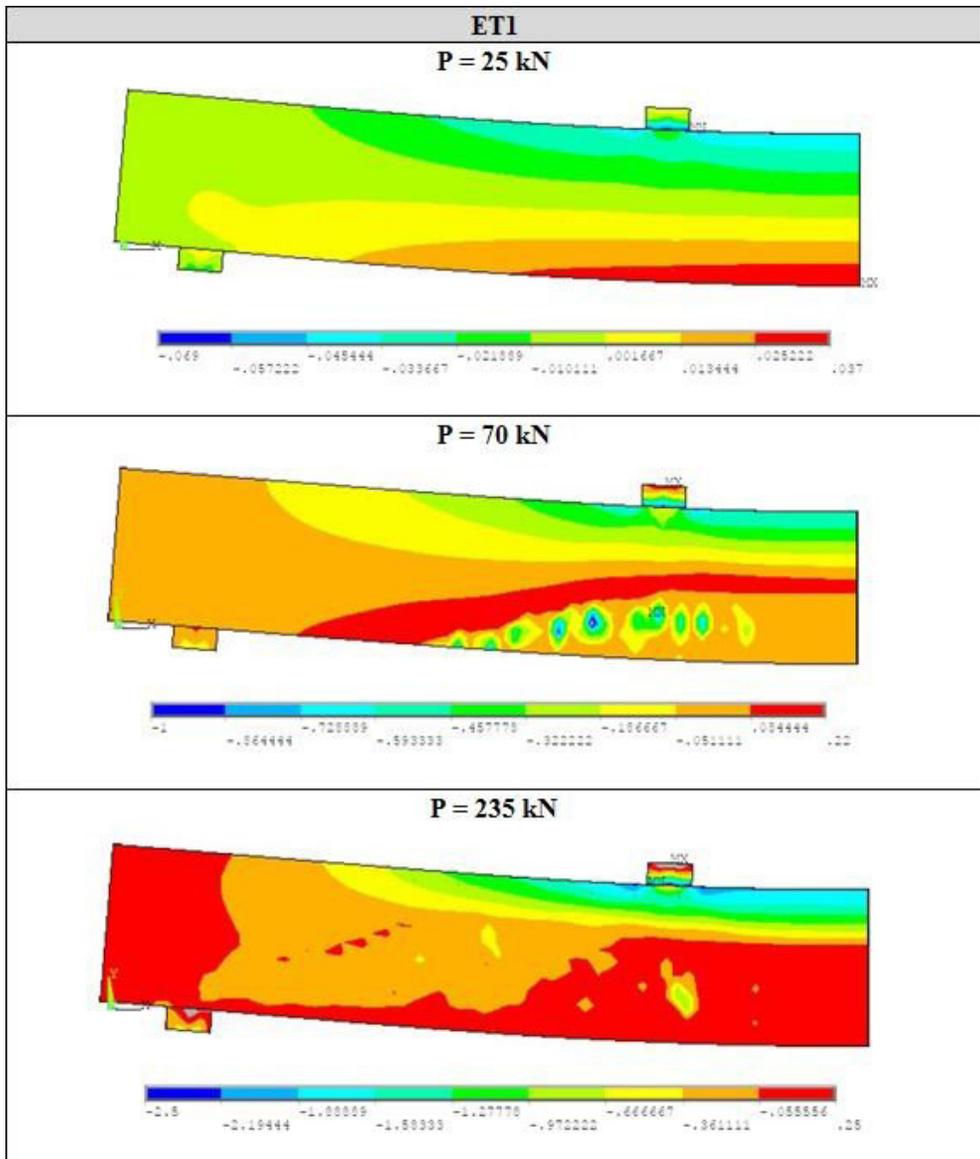


Figura 17 – Diagramas de fissuração da viga ET1  
(fonte: elaborada pelo autor)

Por fim, no quadro 5, foram apresentados os dados de tensão dos elementos de concreto da viga ET1. Neste quadro foram analisadas três etapas de carga, afim de ressaltar a evolução das tensões no concreto. Analisando os resultados apresentados, é possível observar o deslocamento da linha neutra a partir do incremento de carga na estrutura, bem como o efeito predominante de flexão como contribuição para a ruptura da peça. Os resultados completos das demais vigas (ET2, ET3 e ET4) estão apresentados no apêndice (B).

A partir das análises feitas, ficam evidentes os mecanismos de ruptura de cada viga. Para a ET1, tem-se o colapso por flexão, visto que a armadura longitudinal inferior se encontra no patamar de escoamento enquanto os estribos estão com um baixo carregamento. Analisando os resultados das vigas ET2 e ET3, é possível destacar que ambas chegaram ao limite de carga por cisalhamento, pois os estribos atingiram a carga de ruptura, apesar das barras inferiores também estarem muito próximas da tensão de escoamento. E por fim a ET4, rompe por cisalhamento com o escoamento das armaduras verticais, sem que as barras inferiores atingissem a sua tensão limite.



Quadro 5 – Evolução da tensão  $\sigma_x$  no concreto para a viga ET1 (unidades em  $\text{kN/cm}^2$ )  
(fonte: elaborada pelo autor)

## 5 I CONCLUSÕES

### 5.1 Considerações finais

O presente artigo teve como objetivo a realização de análise numérica tridimensional, nas vigas da série ET ensaiadas por Leonhardt e Walther (1962), através do *software* de análise via elementos finitos, ANSYS, o qual obteve convergência com os resultados

experimentais já citados. O modelo foi desenvolvido através de lançamento de códigos .txt, os quais se encontram disponíveis no apêndice deste trabalho, visando possibilitar o aperfeiçoamento das simulações.

Tal modelo foi embasado nos trabalhos desenvolvidos por Lazzari (2015) e Kunzler (2013), ambos dentro do PPGEC/UFRGS. Foram atualizados e revisados os dados dos modelos implementados, para simulação de vigas de concreto armado, submetidas a cargas de curta e longa duração, conforme o Código Modelo *fib* 2010 (2012).

A partir deste trabalho foi possível, dentro do *software* ANSYS, criar um modelo computacional para simulação de vigas experimentais. Com a divisão da estrutura, sendo utilizado apenas um quarto de viga na análise, o esforço computacional foi reduzido e o tempo de análise otimizado. O programa se mostrou muito eficiente também por ter uma biblioteca de elementos e comportamentos muito vasta e com inúmeras possibilidades de simulações de materiais. Outro ponto a se destacar do ANSYS são as formas de visualização dos resultados após a análise ter sido concluída, possuindo ferramentas gráficas interessantes, as quais tornam de fácil identificação os resultados que se deseja analisar.

O modelo proposto foi exposto a uma abrangência grande de comportamentos, podendo-se destacar entre eles as falhas por flexão e corte. Tendo em vista os bons resultados obtidos neste trabalho, verifica-se a possibilidade de simulação de outras estruturas de concreto armado.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Visando o aperfeiçoamento deste trabalho, está previsto a utilização desde modelo para análise de outros ensaios experimentais. Dentre eles se encontram as vigas ensaiadas: por Bresler e Scordelis (1963); as vigas de concreto protendido de Tao e Du (1985); e as vigas de concreto armado com furos de Mansur (2006).

Como sugestões de avanço do estudo, sugere-se a análise de estruturas com protensão, sejam elas aderentes ou não aderentes ao longo do tempo, tanto na área experimental como na numérica. Outra sugestão seria a aplicação de armadura incorporada e distribuída com futura comparação de resultados com a armadura discreta aplicada neste artigo.

## REFERÊNCIAS

ANSYS, Inc. **Theory reference** (Version 18.0), 2017

AURICH, M. **Modelo da ligação entre concreto e armadura na análise de estruturas de concreto pelo método dos elementos finitos**. 2001. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

AZEVEDO, F.M.A. **Método dos elementos finitos**, 1.ed. Porto: Faculdade de Engenharia do Porto, 2003.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model code 2010**. Bulletin N° 65, 2012.

GONÇALVES JUSTO, R.A.E. **Comparação de desempenho e de funcionamento de Programas Comerciais (ANSYS e SAP2000) focada à análise sísmica**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

KUNZLER, P.S. **Análise paramétrica por elementos finitos de vigas de concreto armado e protendido pré-tracionadas com abertura na alma**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

LAZZARI, B.M. **Análise por elementos finitos de peças de concreto armado e protendido sob estados planos de tensão**. 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LAZZARI, P.M. **Simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas através do método dos elementos finitos**. 2016. 276 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LEONHARDT, F.; WALTHER, R. **Beiträge zur behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau. Beton und Stahlbetonbau**. v. 57. n. 7. Jul. 1962.

SORIANO, H. L.; LIMA S.S. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. 392 p. 1998

## APÊNDICE A – *SCRIPTS* ANSYS ADPL 18.0

### A.1 Exemplo de *script* para viga ET1 de Leonhardt e Walther (1962)

```
! *****
!  
! Programador: Henrique Cardoso Koch  
! Data: 19/06/17  
! unidades: cm, kN  
!  
! *****  
!  
/NOPR          ! Suppress printing of UNDO process  
/PMACRO        ! Echo following commands to log  
FINISH         ! Make sure we are at BEGIN level  
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found  
/NOPR  
/PMETH,OFF,0  
/title, VIGA LEONHARDT ET1  
!
```

```

! .....
!      DEFINIÇÃO DO TIPO DE ANÁLISE
! .....
! KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
!
/GO
!
! .....
!      DEFINIÇÃO ELEMENTOS
! .....
/PREP7
!* ET,1,SOLID65
!* ET,2,LINK180
!* ET,3,SOLID185
!*
!
! .....
!      PARAMETROS DOS MATERIAIS
! .....
!
! .....
! CONCRETO - material 1
! .....
MPTMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2886.53
MPDATA,PRXY,1,,0.2
TB,MELA,1,1,35,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.229932
TBPT,,0.0002,0.446906
TBPT,,0.0003,0.651118
TBPT,,0.0004,0.843009
TBPT,,0.0005,1.022637
TBPT,,0.0006,1.190306
TBPT,,0.0007,1.346247
TBPT,,0.0008,1.49069
TBPT,,0.0009,1.623854
TBPT,,0.001,1.745957
TBPT,,0.0011,1.857209
TBPT,,0.0012,1.957815
TBPT,,0.0013,2.047975
TBPT,,0.0014,2.127884
TBPT,,0.0015,2.197732

```

```

TBPT,,0.0016,2.257705
TBPT,,0.0017,2.307984
TBPT,,0.0018,2.348745
TBPT,,0.0019,2.380161
TBPT,,0.002,2.4024
TBPT,,0.0021,2.415626
TBPT,,0.0022,2.42
TBPT,,0.0023,2.415678
TBPT,,0.0024,2.402813
TBPT,,0.0025,2.381553
TBPT,,0.0026,2.352046
TBPT,,0.0027,2.314434
TBPT,,0.0028,2.268855
TBPT,,0.0029,2.215446
TBPT,,0.003,2.15434
TBPT,,0.0031,2.085666
TBPT,,0.0032,2.009552
TBPT,,0.0033,1.926122
TBPT,,0.0034,1.835498
TBPT,,0.0035,1.737798
TB,CONC,1,1,9,
TBTEMP,0
TBDATA,,0.20,0.40,0.25,-1,,
TBDATA,,,,,,,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.54E-8
!
! .....
! ARMADURA ATIVA (INFERIOR) - material 2
! .....
!
! .....-
! PARAMETROS DO ACO
! .....
! v1=0.3
ES2 = 19500
FY2 = 42.8*0.85
FY22 = 42.8
ES22 = .15*FY22/(0.01-FY2/ES2)
!
! Modelo Linear Isotrópico
! MPTEMP,,,,,,,, MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,ES2 MPDATA,PRXY,2,,V1
!

```

```

! Modelo Bilinear - entra com a tensão inicial e inclinação da curva de endurecimento
!
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY2,ES2,,,,
!
! .....
! ARMADURA PASSIVA (SUPERIOR) - material 3
! .....
! .....
! PARAMETROS DO ACO
! .....
! v2=0.3
ES3 = 19500
FY3 = 46.5*0.85
FY33 = 46.5
ES33 = .15*FY33/(0.01-FY3/ES3)
!
! Modelo Linear Isotrópico
! MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,ES3
MPDATA,PRXY,3,,V2
!
! Modelo Bilinear - entra com a tensão inicial e inclinação da curva de endurecimento
!
TB,BISO,3,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY33,ES33,,,,
!
! .....
! ARMADURA ESTRIBOS - material 4
! .....
! .....
! PARAMETROS DO ACO
! .....
! .....
! v3=0.3
ES4 = 21000
FY4 = 32
ES44 = 0
!
! Modelo Linear Isotrópico

```

```

!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,ES4
MPDATA,PRXY,4,,v3
!
! Modelo Bilinear - entra com a tensão inicial e inclinação da curva de endurecimento
!
TB,BISO,4,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,FY4,ES44,,,,
!
! .....
! APOIOS E PONTOS DE CARGA - material 5
! .....
v4=0.2
ES5 = 20000
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,ES5
MPDATA,PRXY,5,,v4
!
! .....
!          GEOMETRIA
! .....
!
! VOLUMES CONCRETO (coord X, coord y, comprim x, comprim y,comprim z)
!
BLC4,0,0,170,35,15
BLC4,15,-5,10,5,15
BLC4,120,35,10,5,15
!
K,1000,2.5,2.5,0 ! keypoint 1000 em x=2.5, y=2.5 e z=0
K,1010,2.5,2.5,12.5
K,1020,2.5,5,12.5
K,1030,2.5,32.5,0
K,1040,2.5,32.5,12.5
!
K,2000,7.5,2.5,0
K,2010,7.5,2.5,12.5
K,2020,7.5,5,12.5
K,2030,7.5,32.5,0
K,2040,7.5,32.5,12.5
!

```

K,3000,12.5,2.5,0  
K,3010,12.5,2.5,12.5  
K,3020,12.5,5,12.5  
K,3030,12.5,32.5,0  
K,3040,12.5,32.5,12.5  
!  
K,4000,17.5,2.5,0  
K,4010,17.5,2.5,12.5  
K,4020,17.5,5,12.5  
K,4030,17.5,32.5,0  
K,4040,17.5,32.5,12.5  
!  
K,5000,22.5,2.5,0  
K,5010,22.5,2.5,12.5  
K,5020,22.5,5,12.5  
K,5030,22.5,32.5,0  
K,5040,22.5,32.5,12.5  
!  
K,6000,27.5,2.5,0  
K,6010,27.5,2.5,12.5  
K,6020,27.5,5,12.5  
K,6030,27.5,32.5,0  
K,6040,27.5,32.5,12.5  
!  
K,7000,37.5,2.5,0  
K,7010,37.5,2.5,12.5  
K,7020,37.5,5,12.5  
K,7030,37.5,32.5,0  
K,7040,37.5,32.5,12.5  
!  
K,8000,47.5,2.5,0  
K,8010,47.5,2.5,12.5  
K,8020,47.5,5,12.5  
K,8030,47.5,32.5,0  
K,8040,47.5,32.5,12.5  
!  
K,9000,57.5,2.5,0  
K,9010,57.5,2.5,12.5  
K,9020,57.5,5,12.5  
K,9030,57.5,32.5,0  
K,9040,57.5,32.5,12.5  
!  
K,10000,67.5,2.5,0  
K,10010,67.5,2.5,12.5  
K,10020,67.5,5,12.5

K,10030,67.5,32.5,0

K,10040,67.5,32.5,12.5

!

K,11000,77.5,2.5,0

K,11010,77.5,2.5,12.5

K,11020,77.5,5,12.5

K,11030,77.5,32.5,0

K,11040,77.5,32.5,12.5

!

K,12000,87.5,2.5,0

K,12010,87.5,2.5,12.5

K,12020,87.5,5,12.5

K,12030,87.5,32.5,0

K,12040,87.5,32.5,12.5

!

K,13000,97.5,2.5,0

K,13010,97.5,2.5,12.5

K,13020,97.5,5,12.5

K,13030,97.5,32.5,0

K,13040,97.5,32.5,12.5

!

K,14000,107.5,2.5,0

K,14010,107.5,2.5,12.5

K,14020,107.5,5,12.5

K,14030,107.5,32.5,0

K,14040,107.5,32.5,12.5

!

K,15000,117.5,2.5,0

K,15010,117.5,2.5,12.5

K,15020,117.5,5,12.5

K,15030,117.5,32.5,0

K,15040,117.5,32.5,12.5

!

K,16000,127.5,2.5,0

K,16010,127.5,2.5,12.5

K,16020,127.5,5,12.5

K,16030,127.5,32.5,0

K,16040,127.5,32.5,12.5

!

K,17010,170,2.5,12.5

K,17020,170,5,12.5

K,17040,170,32.5,12.5

!

!

! traça linhas entre os pontos criados

!  
! ESTRIBOS  
!  
LSTR,1000,1010  
LSTR,1010,1040  
LSTR,1040,1030  
!  
LSTR,2000,2010  
LSTR,2010,2040  
LSTR,2040,2030  
!  
LSTR,3000,3010  
LSTR,3010,3040  
LSTR,3040,3030  
!  
LSTR,4000,4010  
LSTR,4010,4040  
LSTR,4040,4030  
!  
LSTR,5000,5010  
LSTR,5010,5040  
LSTR,5040,5030  
!  
LSTR,6000,6010  
LSTR,6010,6040  
LSTR,6040,6030  
!  
LSTR,7000,7010  
LSTR,7010,7040  
LSTR,7040,7030  
!  
LSTR,8000,8010  
LSTR,8010,8040  
LSTR,8040,8030  
!  
LSTR,9000,9010  
LSTR,9010,9040  
LSTR,9040,9030  
!  
LSTR,10000,10010  
LSTR,10010,10040  
LSTR,10040,10030  
!  
LSTR,11000,11010

```

LSTR,11010,11040
LSTR,11040,11030
!
LSTR,12000,12010
LSTR,12010,12040
LSTR,12040,12030
!
LSTR,13000,13010
LSTR,13010,13040
LSTR,13040,13030
!
LSTR,14000,14010
LSTR,14010,14040
LSTR,14040,14030
!
LSTR,15000,15010
LSTR,15010,15040
LSTR,15040,15030
!
LSTR,16000,16010
LSTR,16010,16040
LSTR,16040,16030
!
! BARRAS
!
LSTR,1010,17010
LSTR,1020,17020
LSTR,1040,17040
!
! .....
! SECTION
! .....
! Definição das espessuras de barras em cm²
!
SECTYPE,2,LINK, ,2
SECDATA,3.14,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,3,LINK, ,3
SECDATA,0.503,
SECCONTROL,0,0
!
SECTYPE,4,LINK, ,4
SECDATA,0.247,

```

```

SECCONTROL,0,0
!
!
! .....
!     MESH
! .....
!
! .....
! MESH CONCRETO:
! .....
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,2,,68,,,,1 !seleciona barra "X" e divide em 68 partes
LESIZE,4,,68,,,,1
LESIZE,5,,68,,,,1
LESIZE,7,,68,,,,1
!
! y
!
LESIZE,1,,14,,,,1 !seleciona barra "Y" e divide em 14 partes
LESIZE,3,,14,,,,1
LESIZE,6,,14,,,,1
LESIZE,8,,14,,,,1
!
! z
!
LESIZE,9,,6,,,,1 !seleciona barra "Z" e divide em 6 parte
LESIZE,10,,6,,,,1
LESIZE,11,,6,,,,1
LESIZE,12,,6,,,,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1     ! define malha mapeada
!

```

```

VMESH,1 !aplica a mesh 1
!
! .....
! MESH APOIOS:
! .....
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,14,, ,4, , , ,1
LESIZE,16,, ,4, , , ,1
LESIZE,17,, ,4, , , ,1
LESIZE,19,, ,4, , , ,1
!
! y
!
LESIZE,13,, ,2, , , ,1
LESIZE,15,, ,2, , , ,1
LESIZE,18,, ,2, , , ,1
LESIZE,20,, ,2, , , ,1
!
! z
!
LESIZE,21,, ,6, , , ,1
LESIZE,22,, ,6, , , ,1
LESIZE,23,, ,6, , , ,1
LESIZE,24,, ,6, , , ,1
!
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,2 !aplica a mesh 2
!
! .....
! MESH APOIOS:

```

```

! .....
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 3
MAT, 5
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!
! x
!
LESIZE,26,,4,,,,1
LESIZE,28,,4,,,,1
LESIZE,29,,4,,,,1
LESIZE,31,,4,,,,1
!
! y
!
LESIZE,25,,2,,,,1
LESIZE,27,,2,,,,1
LESIZE,30,,2,,,,1
LESIZE,32,,2,,,,1
!
! z
!
LESIZE,33,,6,,,,1
LESIZE,34,,6,,,,1
LESIZE,35,,6,,,,1
LESIZE,36,,6,,,,1
!
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1 ! define malha mapeada
!
VMESH,3 !aplica a mesh 3
!
! .....
! MESH ARMADURAS - BARRAS:
! .....
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!

```

```

TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 0
ESYS, 0
SECNUM, 2
!
! x
!
LESIZE,85,, ,67,,,,,1
LESIZE,86,, ,67,,,,,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1      ! define malha mapeada
!
LMESH,85,86
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 3
REAL, 0
ESYS, 0
SECNUM, 3
!
! x
!
LESIZE,87,, ,67,,,,,1
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1      ! define malha mapeada
! LMESH,87
!
! Especifica as características dos elementos 3D:
!
TYPE, 2
MAT, 4
REAL, 0
ESYS, 0
SECNUM, 4
!
! y

```

!  
LESIZE,38,, ,12, , , ,1  
LESIZE,41,, ,12, , , ,1  
LESIZE,44,, ,12, , , ,1  
LESIZE,47,, ,12, , , ,1  
LESIZE,50,, ,12, , , ,1  
LESIZE,53,, ,12, , , ,1  
LESIZE,56,, ,12, , , ,1  
LESIZE,59,, ,12, , , ,1  
LESIZE,62,, ,12, , , ,1  
LESIZE,65,, ,12, , , ,1  
LESIZE,68,, ,12, , , ,1  
LESIZE,71,, ,12, , , ,1  
LESIZE,74,, ,12, , , ,1  
LESIZE,77,, ,12, , , ,1  
LESIZE,80,, ,12, , , ,1  
LESIZE,83,, ,12, , , ,1  
!  
! z  
!  
LESIZE,37,, ,5, , , ,1  
LESIZE,39,, ,5, , , ,1  
LESIZE,40,, ,5, , , ,1  
LESIZE,42,, ,5, , , ,1  
LESIZE,43,, ,5, , , ,1  
LESIZE,45,, ,5, , , ,1  
LESIZE,46,, ,5, , , ,1  
LESIZE,48,, ,5, , , ,1  
LESIZE,49,, ,5, , , ,1  
LESIZE,51,, ,5, , , ,1  
LESIZE,52,, ,5, , , ,1  
LESIZE,54,, ,5, , , ,1  
LESIZE,55,, ,5, , , ,1  
LESIZE,57,, ,5, , , ,1  
LESIZE,58,, ,5, , , ,1  
LESIZE,60,, ,5, , , ,1  
LESIZE,61,, ,5, , , ,1  
LESIZE,63,, ,5, , , ,1  
LESIZE,64,, ,5, , , ,1  
LESIZE,66,, ,5, , , ,1  
LESIZE,67,, ,5, , , ,1  
LESIZE,69,, ,5, , , ,1  
LESIZE,70,, ,5, , , ,1  
LESIZE,72,, ,5, , , ,1  
LESIZE,73,, ,5, , , ,1

LESIZE,75,,5,,,,1  
LESIZE,76,,5,,,,1  
LESIZE,78,,5,,,,1  
LESIZE,79,,5,,,,1  
LESIZE,81,,5,,,,1  
LESIZE,82,,5,,,,1  
LESIZE,84,,5,,,,1  
!LMESH,37  
LMESH,38  
LMESH,39  
LMESH,40  
LMESH,41  
LMESH,42  
LMESH,43  
LMESH,44  
LMESH,45  
LMESH,46  
LMESH,47  
LMESH,48  
LMESH,49  
LMESH,50  
LMESH,51  
LMESH,52  
LMESH,53  
LMESH,54  
LMESH,55  
LMESH,56  
LMESH,57  
LMESH,58  
LMESH,59  
LMESH,60  
LMESH,61  
LMESH,62  
LMESH,63  
LMESH,64  
LMESH,65  
LMESH,66  
LMESH,67  
LMESH,68  
LMESH,69  
LMESH,70  
LMESH,71  
LMESH,72  
LMESH,73  
LMESH,74

```

LMESH,75
LMESH,76
LMESH,77
LMESH,78
LMESH,79
LMESH,80
LMESH,81
LMESH,82
LMESH,83
LMESH,84
!
! Opções da malha:
!
MSHAPE,0,3D ! define problema 3D e define elemento hexaedro
MSHKEY,1      ! define malha mapeada
!
! Esse comando executa um merge dos nos - elimina nos repetidos
! Faz a renumeração dos nos
!
NUMMRG,NODE, , , ,LOW
NUMCMP,NODE
!
! Inspect newly created reinforcing elements
!
esel,s,type,,1
! adjust the translucency level of the
! base element to reveal the embedded reinforcing
! elements
/trlcy,elem,0.9
esel,all
/view,1,1,1,1
! Turn on the expaned element shapes
/eshape,1
eplot
!
! .....
!          RESTRIÇÕES NOS APOIOS
! .....
!
nset,s,loc,x,20
nset,r,loc,y,-5
d,all,uy
!
DA,6,UX,
DA,1,UZ,

```

```

DA,7,UZ,
DA,13,UZ,
allsel
!
! .....
!          CARREGAMENTO
! .....
! .....
!          1o CASO DE CARGA - Etapa 1 - Peso Próprio
! .....
!
/PREP7
! ALLSEL,ALL
ACEL,0,981,0,
!
nsel,s,loc,x,125
nsel,r,loc,y,40
nsel,r,loc,z,0
f,all,fy,-0.0
allsel,all
!
antype,0 !Análise estática
solcontrol,on
!
autots,on
nlgeom,on
NCNV,2,0,0,0,0  !critério de parada para terminar a análise
neqit,100
CNVTOL,F, ,0.1,2, ,
CNVTOL,U, ,0.1,2, ,
NSUBST,1,100,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
!
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
TIME,1
LSWRITE,1,
!
! .....
!          2o CASO DE CARGA - Etapa 2 - Incremento de DESLOCAMENTO
! .....
!

```

```

/PREP7
!
nset,s,loc,x,125
nset,r,loc,y,40
nset,r,loc,z,0
d,all,uy,-2
allsel
!
antype,0
solcontrol,on
!
autots,on
CNVTOL,F, ,0.4,2, ,
CNVTOL,U, ,0.4,2, ,
NSUBST,25,100,25
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
EQSLV,SPAR
LNSRCH,0
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,100
!
RESCONTRL,DEFINE,ALL,1,1
time,25
LSWRITE,2,

```

## A.2 Exemplo de *script* para traçar diagrama carga-deslocamento – pós processamento

```

/POST26
!
! Rotina para se fazer o gráfico carga-deslocamento quando se usa incremento de
deslocamento
!
!
*SET,FATOR1,-1.00      ! Fator para multiplicar o deslocamento se necessário (por
exemplo: torna positivos os deslocamentos)
*SET,FATOR2,4.00      ! Fator para multiplicar a carga se necessário (por exemplo: Ptotal
= 4xP)
*SET,NNUY,84      ! Número do nó do qual se quer fazer o gráfico carga-deslocamento (ver
listagem dos nós com coordenadas)
!
/AXLAB,Y,CARGA P      ! Label Y

```

```

/AXLAB,X,FLECHA UY! Label X
NSOL,2,NNUY,U,y      ! Especifica o nó cujo deslocamento Uy vai ser plotado.
NSOL,3,1,U,Z      ! Variável muda, serve para armazenar a soma das reações (corresponde
ao deslocamento UZ do nó 1).
!
NSEL,S,LOC,x,20      ! Seleciona os nós cuja coordenada y é igual a -2.50 (escolher a
coordenada de onde estão as reações).
NSEL,R,LOC,y,-5
*GET,NUMNOD,NODE,0,COUNT ! Captura os números dos nós de onde estão as reações.
*GET,CURNOD,NODE,0,NUM,MIN !Captura as coordenadas dos nós onde estão as reações
de apoio.
!
*DO,I,1,NUMNOD      ! Laço que faz a soma das reações Fy dos nós selecionados
antes.
RFORCE,4,CURNOD,F,y
ADD,3,3,4,SOMA
CURNOD=NDNEXT(CURNOD)
*ENDDO
!
PROD,2,2,,,,,FATOR1 ! Ajuste dos deslocamentos pelo fator FATOR1
PROD,3,3,,,,,FATOR2 ! Ajuste das cargas pelo fator FATOR2
!
XVAR,2 ! Plota os deslocamentos no eixo X
PLVAR,3! Plota a carga total no eixo Y Y
! ALLSEL,ALL
FINISH

```

## APÊNDICE B – RESULTADOS VIGAS ET2, ET3 E ET4

### B.1 ET2

Na figura 18 é possível observar as curvas de carga-deslocamento da viga ET2 e a evolução das flechas na referida viga ao longo dos incrementos de deslocamento. Ficando assim exposto que o modelo adotado para modelagem das vigas se aproxima dos ensaios experimentais comprovando a eficácia do mesmo.

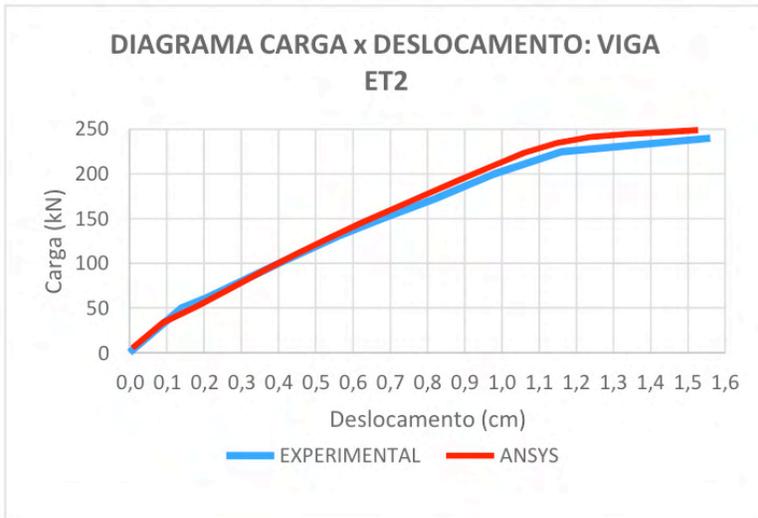


Figura 18 – Comparação da flecha das vigas experimentais com o modelo computacional  
(fonte: elaborada pelo autor)

Na figura 19, é apresentada a deformação máxima atingida na viga ET2 no instante onde foi identificada a ruptura da estrutura. Tal deformada representa a flecha atingida no momento do seu colapso. A carga de ruptura foi de 248 kN, com uma deformação de 1,53 cm no centro do vão.

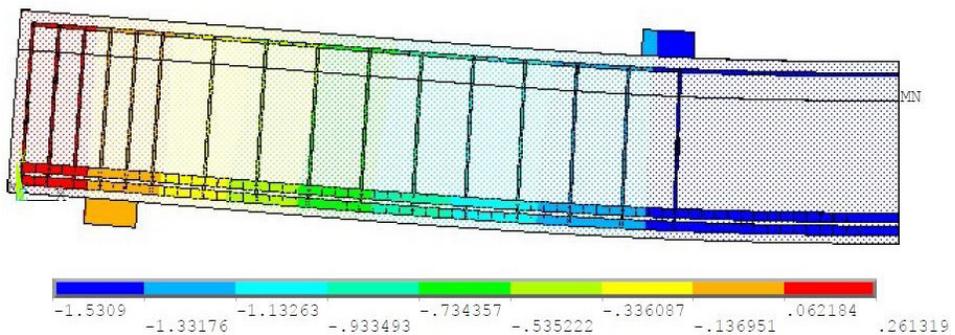


Figura 19 – Deformada no instante de ruptura da viga ET2  
(fonte: elaborada pelo autor)

A figura 20 traz as tensões impostas nas armaduras longitudinais da viga ET2 no instante da ruptura. Foi separado o esforço nas tensões de ruptura da viga. A barra chega a 36 kN/cm<sup>2</sup>, valor muito próximo ao escoamento.

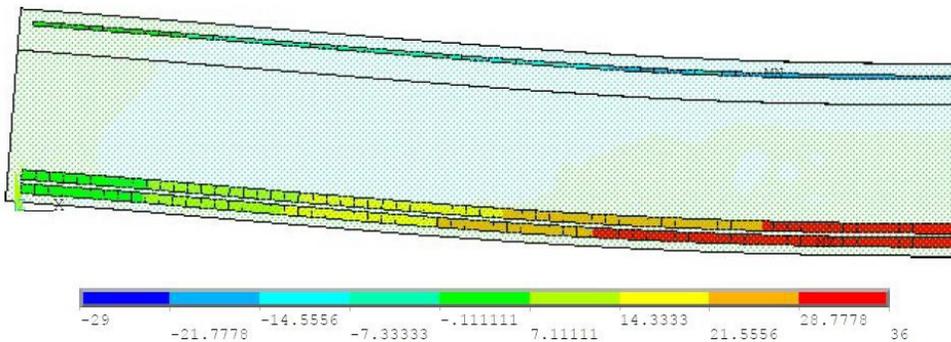


Figura 20 – Tensão nas armaduras longitudinais da viga ET2

(fonte: elaborada pelo autor)

Na figura 21, estão representadas as tensões atuantes somente nos estribos da viga ET2, no momento da ruptura. Verificou-se que os estribos atingiram a tensão de escoamento de 32 kN/cm<sup>2</sup>, o que comprova que houve ruptura por cisalhamento.

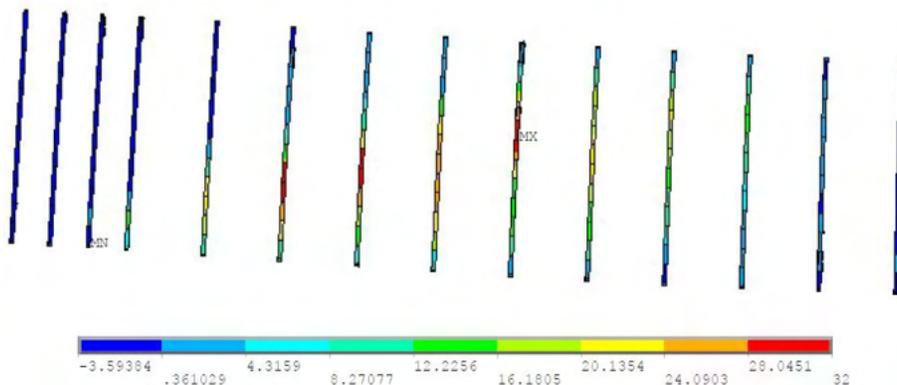


Figura 21 – Tensão nas armaduras transversais da viga ET2

(fonte: elaborada pelo autor)

Na figura 22, tem-se o diagrama de abertura de fissuras para a viga ET2. Ficando assim evidente no gráfico a ruptura por cisalhamento nos trechos centrais da viga mostrada, mas as fissuras de flexão também presentes.

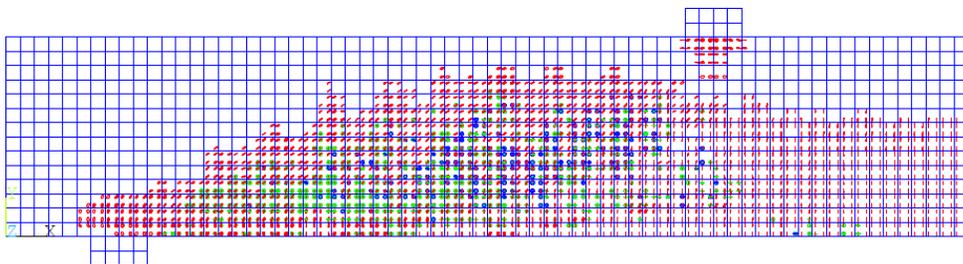
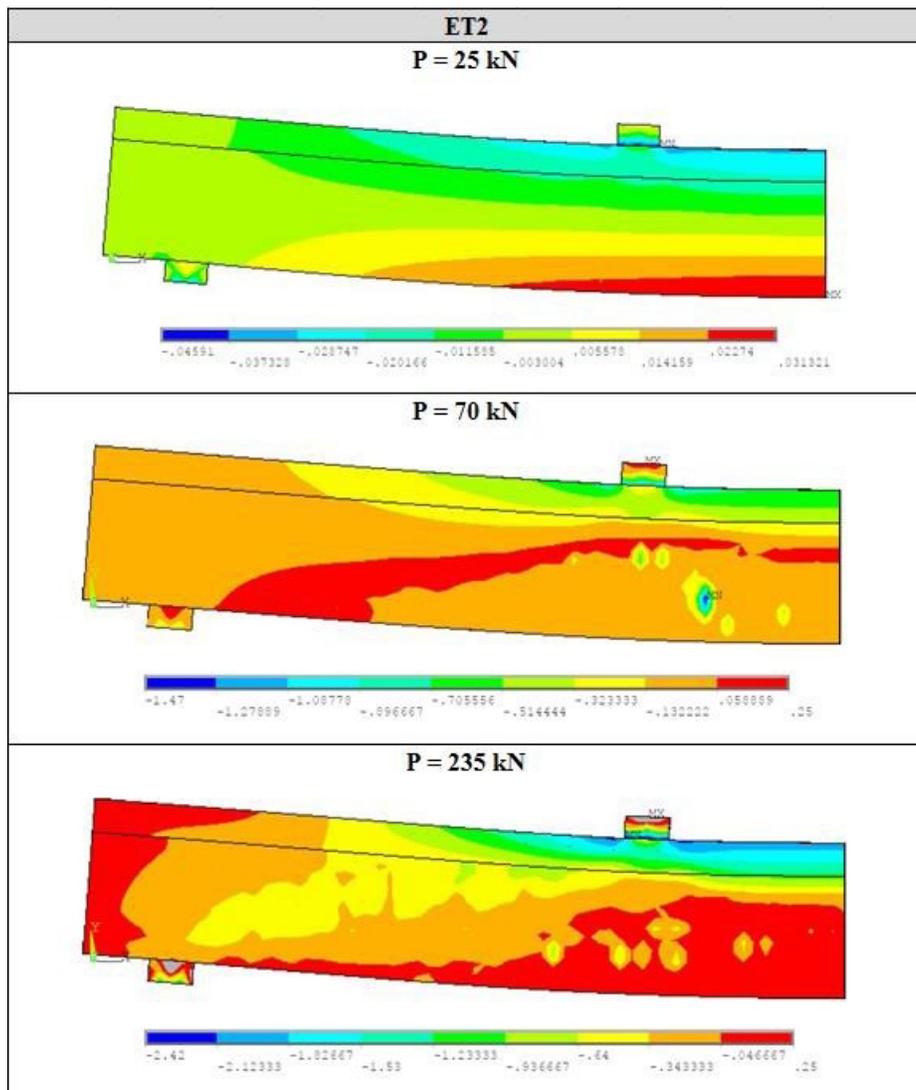


Figura 22 – Diagramas de fissuração da viga ET2

(fonte: elaborada pelo autor)



No quadro 6, foram apresentados os dados de tensão dos elementos de concreto da viga ET2. Neste quadro foram analisadas três etapas de carga, afim de ressaltar a evolução das tensões no concreto. Analisando os resultados apresentados, é possível observar o deslocamento da linha neutra a partir do incremento de carga na estrutura.

## B.2 ET3

Na figura 23 é possível observar as curvas de carga-deslocamento da viga ET3 e a evolução das flechas na referida viga ao longo dos incrementos de deslocamento. Ficando assim exposto que o modelo adotado para modelagem das vigas se aproxima dos ensaios experimentais comprovando a eficácia do mesmo.

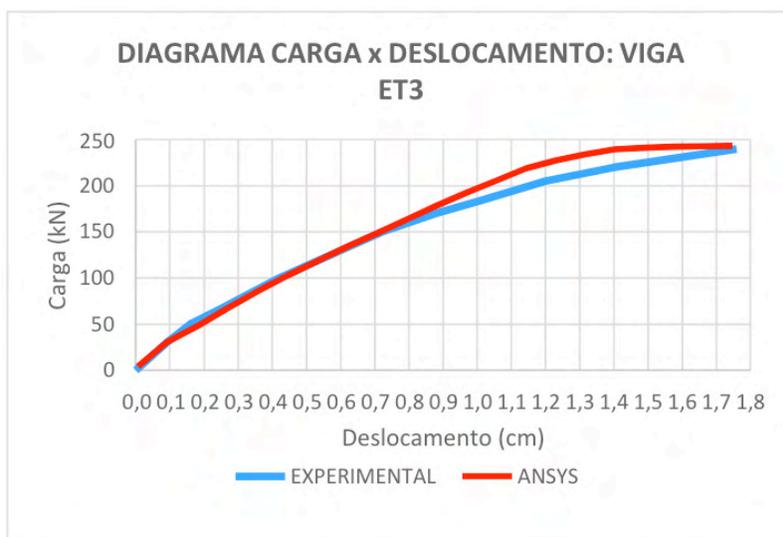
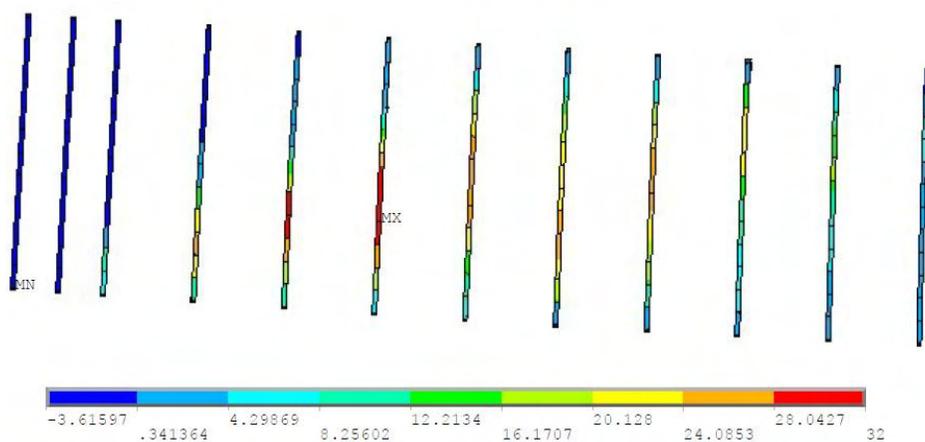
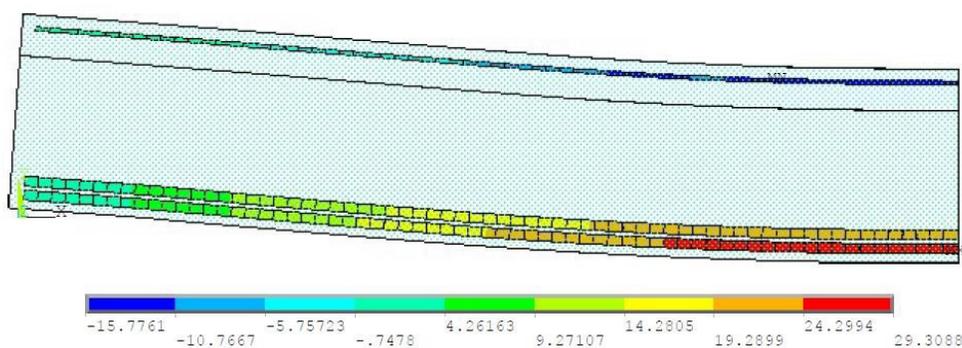
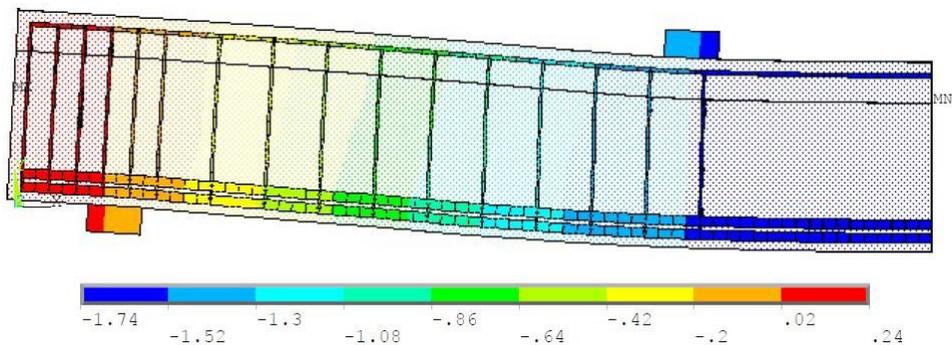


Figura 23 – Comparação da flecha das vigas experimentais com o modelo computacional  
(fonte: elaborada pelo autor)

Na figura 24, é apresentada a deformação máxima atingida na viga ET3 no instante onde foi identificada a ruptura da estrutura. Tal deformada representa a flecha atingida no momento do seu colapso. A carga de ruptura foi de 244 kN, com uma deformação de 1,74 cm no centro do vão.

A figura 25 traz as tensões impostas nas armaduras longitudinais da viga ET3 no instante da ruptura. Foi separado o esforço nas tensões de ruptura da viga. A barra chega a 29,3 kN/cm<sup>2</sup>, valor próximo ao escoamento.

Na figura 26, estão representadas as tensões atuantes somente nos estribos da viga ET3, no momento da ruptura. Verificou-se que os estribos atingiram a tensão de escoamento de 32 kN/cm<sup>2</sup>, o que comprova que houve ruptura por cisalhamento.



Na figura 27, tem-se o diagrama de abertura de fissuras para a viga ET3. Ficando assim evidente no gráfico a ruptura por cisalhamento nos trechos centrais da viga mostrada,

mas as fissuras de flexão também presentes, mas de forma mais amena que na ET2.

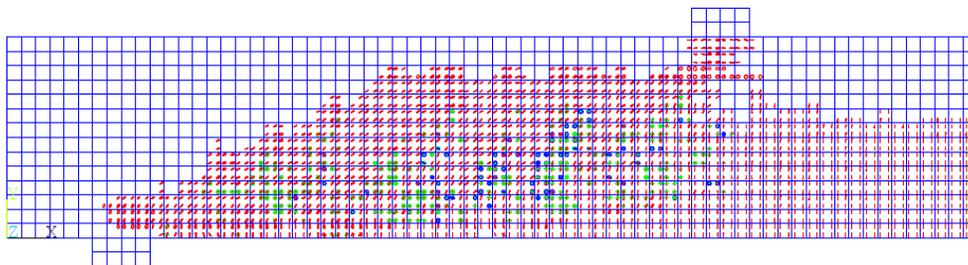
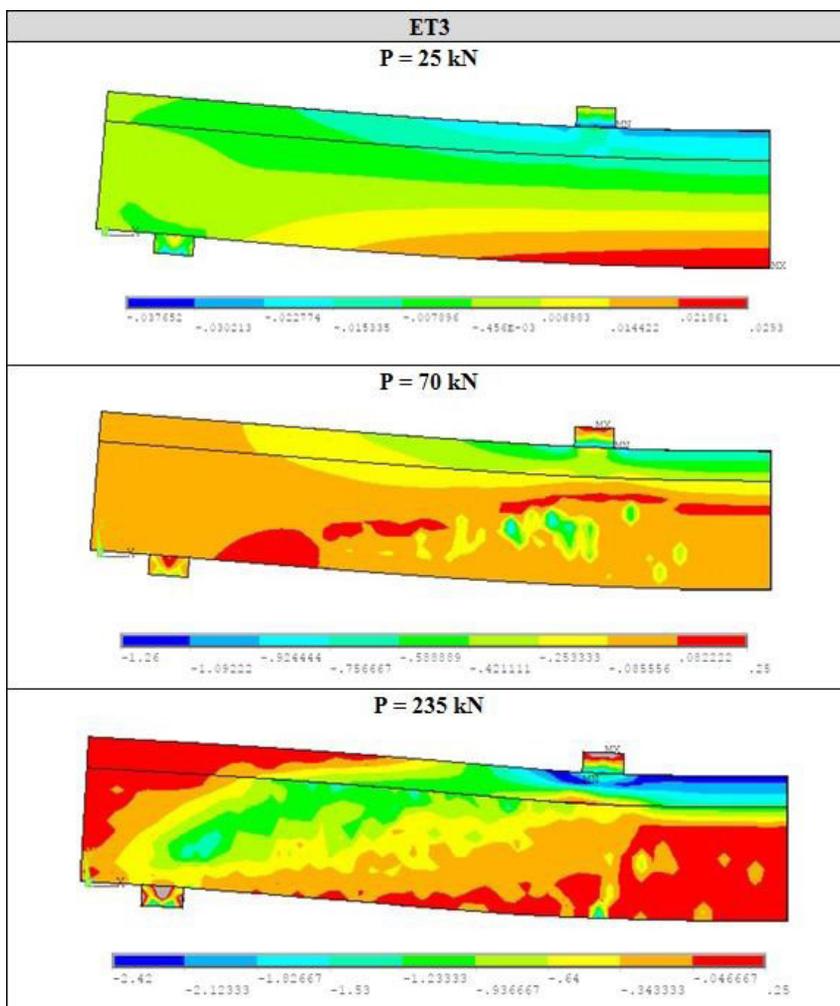


Figura 27 – Diagramas de fissuração da viga ET3

(fonte: elaborada pelo autor)



Quadro 7 – Evolução da tensão  $\sigma_x$  no concreto para a viga ET3 (unidades em kN/cm<sup>2</sup>)

(fonte: elaborada pelo autor)

No quadro 7, foram apresentados os dados de tensão dos elementos de concreto da viga ET2. Neste quadro foram analisadas três etapas de carga, afim de ressaltar a evolução das tensões no concreto. Analisando os resultados apresentados, é possível observar o deslocamento da linha neutra a partir do incremento de carga na estrutura.

### B.3 ET4

Na figura 28 é possível observar as curvas de carga-deslocamento da viga ET4 e a evolução das flechas na referida viga ao longo dos incrementos de deslocamento. Ficando assim exposto que o modelo adotado para modelagem das vigas se aproxima dos ensaios experimentais comprovando a eficácia do mesmo.

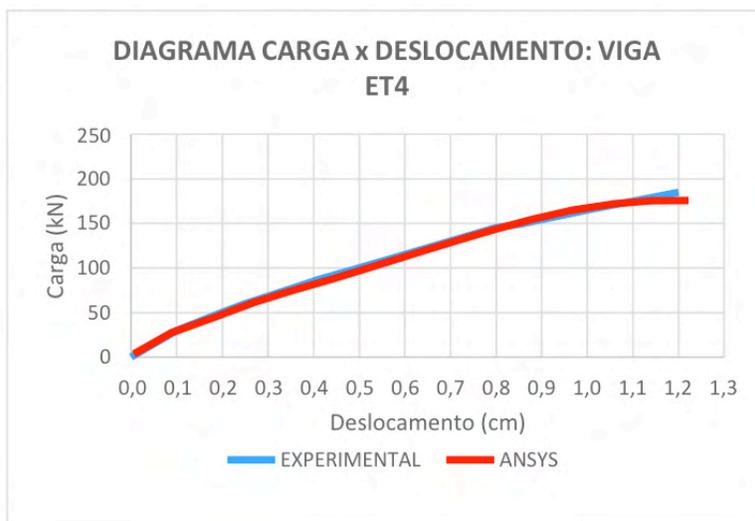


Figura 28 – Comparação da flecha das vigas experimentais com o modelo computacional (fonte: elaborada pelo autor)

Na figura 29, é apresentada a deformação máxima atingida na viga ET4 no instante onde foi identificada a ruptura da estrutura. Tal deformada representa a flecha atingida no momento do seu colapso. A carga de ruptura foi de 175 kN, com uma deformação de 1,22 cm no centro do vão.

A figura 30 traz as tensões impostas nas armaduras longitudinais da viga ET4 no instante da ruptura. Foi separado o esforço nas tensões de ruptura da viga. A barra chega a 24,9 kN/cm<sup>2</sup>, valor ainda distante de escoamento.

Na figura 31, estão representadas as tensões atuantes somente nos estribos da viga ET4, no momento da ruptura. Verificou-se que os estribos atingiram a tensão de escoamento de 32 kN/cm<sup>2</sup>, o que comprova que houve ruptura por cisalhamento.

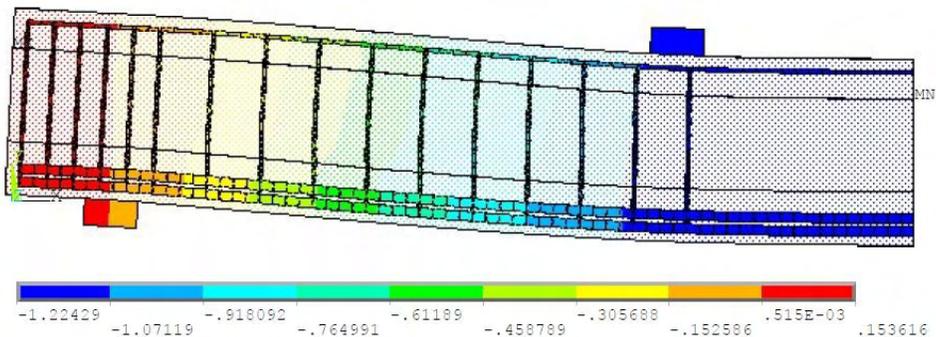


Figura 29 – Deformada no instante de ruptura da viga ET4

(fonte: elaborada pelo autor)

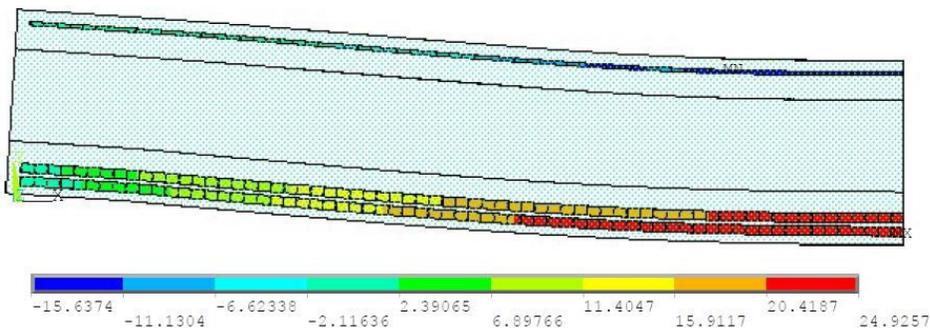


Figura 30 – Tensão nas armaduras longitudinais da viga ET4

(fonte: elaborada pelo autor)

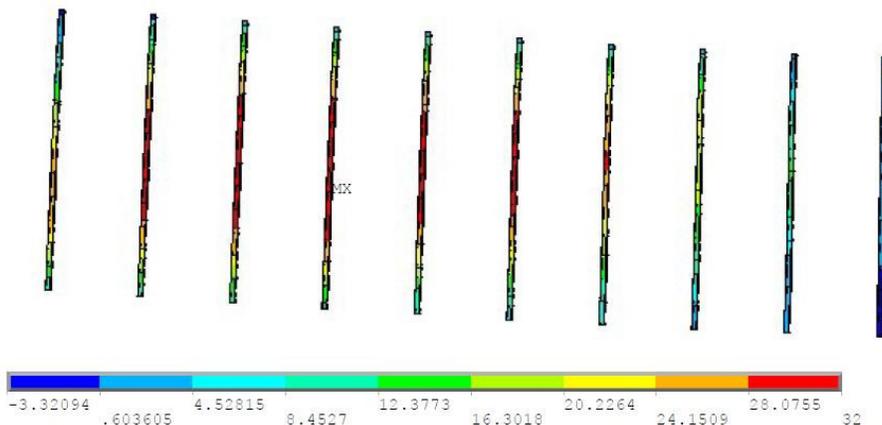


Figura 31 – Tensão nas armaduras transversais da viga ET4

(fonte: elaborada pelo autor)

Na figura 32, tem-se o diagrama de abertura de fissuras para a viga ET4. Ficando assim evidente no gráfico a ruptura por cisalhamento nos trechos centrais e superiores da viga mostrada.

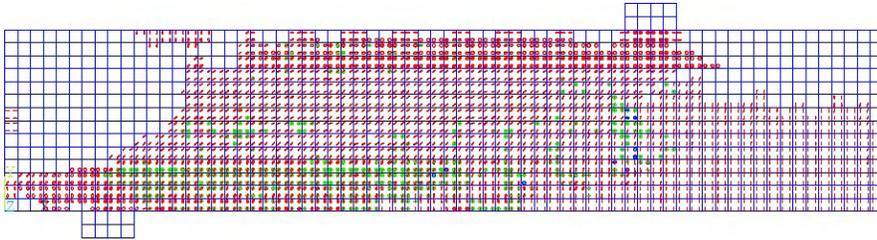
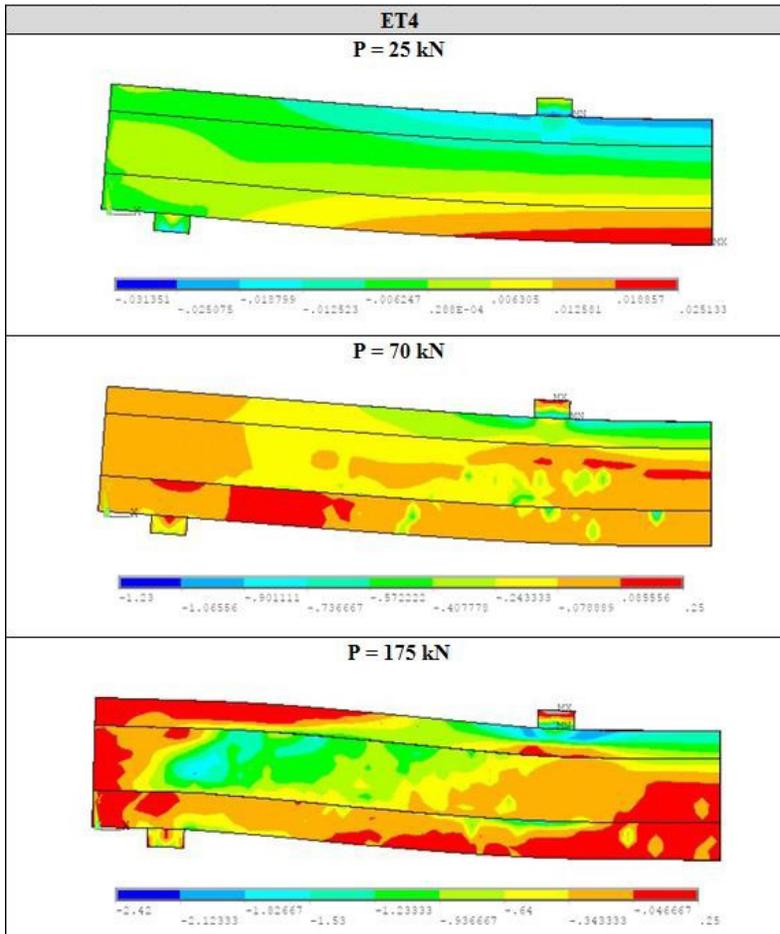


Figura 32 – Diagramas de fissuração da viga ET4  
(fonte: elaborada pelo autor)



Quadro 8 – Evolução da tensão  $\sigma_x$  no concreto para a viga ET4 (unidades em  $\text{kN}/\text{cm}^2$ )  
(fonte: elaborada pelo autor)

No quadro 8, foram apresentados os dados de tensão dos elementos de concreto da viga ET4. Neste quadro foram analisadas três etapas de carga, afim de ressaltar a evolução das tensões no concreto. Analisando os resultados apresentados, é possível observar o deslocamento da linha neutra a partir do incremento de carga na estrutura.

## ANÁLISE NUMÉRICA DE ATERRO TESTE SOBRE SOLO ARGILOSO MUITO MOLE REFORÇADO COM COLUNAS DE BRITA

Data de aceite: 01/08/2022

### Pedro Gomes dos Santos Pereira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, Brasil

### Bruno Teixeira Lima

Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Universidade Federal Fluminense  
Rio de Janeiro, Brasil

### Marcus Peigas Pacheco

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, Brasil

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta um estudo numérico do comportamento das colunas de brita instaladas em um aterro teste, localizado no bairro de Santa Cruz e sobre argila compressível muito mole. Devido ao avanço da tecnologia e o surgimento de softwares geotécnicos, leituras de instrumentação podem ser analisadas e comparadas com o método dos elementos finitos processados por esforços computacionais, gerando um enriquecimento do banco de dados e revisões acadêmicas relacionadas a estes. O objetivo do trabalho se concentra em uma análise numérica do estudo de caso onde são utilizados os dados da instrumentação realizada no aterro teste que são comparados com os resultados de deslocamento vertical e excesso de poropressão obtidos por dois programas de elementos finitos: Plaxis e RS2 (Rocscience). O modelo constitutivo utilizado para as análises numéricas foi o Mohr-Coulomb,

e este também foi comparado com os resultados obtidos em modelos do tipo Cam-Clay modelado por Lima (2012). A compatibilidade dos resultados apresentados pelos dois softwares de elementos finitos foi avaliada como satisfatória.

### NUMERICAL ANALYSIS OF TEST EMBANKMENT ON SOFT SOIL IMPROVED WITH STONE COLUMN

**ABSTRACT:** The present research aims to do a numerical study of the behavior of stone column installed in a test embankment, located at Santa Cruz and on very soft clay. The embankment was built on very soft and compressible clay. Nowadays, with the development of technology and the creation of softwares, data of instrumentation can be analyzed and compared with the finite element method processed by computational efforts, generating database enrichment and academic reviews. The objective of this research is focused on numerical analysis of the case study where the data of the instrumentation were measured. These data are compared with the results of vertical displacement and excess pore pressure obtained by two finite element programs: Plaxis and RS2 (Rocscience). The Mohr-Coulomb model was also compared to the results obtained by the Cam-Clay model made by Lima (2012). The compatibility of the results presented by both finite element softwares was evaluated as satisfactory.

## 1 | INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de *softwares* geotécnicos, as

modelagens computacionais por meio do método dos elementos finitos ganharam espaço e consequentemente puderam enriquecer as pesquisas e aperfeiçoar as estimativas relacionadas aos estudos geotécnicos. Questões anteriormente simplificadas pelos métodos analíticos e semi-empíricos puderam ser calculadas com maior precisão e de acordo com as particularidades e comportamento de cada obra, inclusive no uso de coluna de brita em solos compressíveis.

O presente trabalho é um estudo de uma área teste para pilha de estocagem de minério da obra da TKCSA (ThyssenKrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico), localizada no bairro de Santa Cruz, Rio de Janeiro, que foi instrumentada e monitorada a partir da instalação de colunas de brita. Os resultados da instrumentação da área teste foram comparados aos resultados de deslocamento vertical e excesso de poropressão obtidos na modelagem em Mohr-Coulomb pelos *softwares* de elementos finitos RS<sup>2</sup> e Plaxis. Além disso, estes valores também foram comparados com as análises realizadas por Lima (2012) no modelo tipo *Cam-Clay (soft soil creep)* para se verificar a compatibilidade dos resultados em diferentes modelos constitutivos.

## 2 | ESTUDO DE CASO

O estudo de caso do presente trabalho consiste em uma obra da TKCSA (ThyssenKrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico), localizada no bairro de Santa Cruz, região oeste do Rio de Janeiro, em que foi construído um pátio de minério de grandes dimensões para carga e descarga de minério. Parte da região receberia cargas relativas ao depósito de carvão e à pilha de minério de ferro, então, por razão da tensão vertical da pilha de minério ser mais de três vezes maior que a pilha de carvão mineral, foram adotadas diferentes soluções para elas.

Para a área destinada ao depósito de carvão mineral utilizaram-se drenos verticais e colunas de areia encamisadas, enquanto para a pilha de minério de ferro utilizou-se a solução de coluna de brita, devido às altas cargas previstas aliado ao curto espaço de tempo para conclusão da obra. A região em que foi adotada a solução de coluna de brita será a estudada neste trabalho. A Figura 1 indica a localização do empreendimento construído pela TKCSA.

A fim de se estudar os efeitos do acréscimo de carregamento no solo muito compressível, muito comum na região contemplada, foi construído um aterro teste instrumentado e monitorado na futura área de depósito de minério de ferro.

O solo local é composto por uma extensa camada de argila fluvial e marinha muito compressível, típica de regiões de baixada no estado do Rio de Janeiro, com espessuras que variam de 7,0 m a 15,0 m. O modelo da estratigrafia do terreno foi elaborado em conformidade com as sondagens de simples reconhecimento e ensaios de cone (CPT/CPTu) realizados previamente no local. Nestas investigações, além das camadas de argila

mole, foram observadas também camadas e lentes de areia de diversas espessuras ao longo da profundidade. Portanto, em grande parte da área do pátio de minério existem três camadas de argila entrepostas por camadas de areias de mesma classificação.



Figura 1. Localização via satélite da obra da TKCSA - pós construção (Google Maps).

Devido à dificuldade em trabalhar no terreno, um aterro de conquista com espessura de aproximadamente 2,6 m foi hidráulicamente instalado no local para o acesso dos equipamentos. Subjacente a este aterro, as colunas de brita utilizadas no pátio de minério de ferro foram construídas com espaçamentos variados de 1,75 m a 2,20 m, com comprimentos de 10 a 17 m (média de 12 m) e uso de malha quadrangular.

Na área teste o carregamento foi aplicado com trilhos de ferro que se encontravam sobrepostos a uma placa de concreto de dimensões 6,5 m x 6,5 m x 0,4 m, cobrindo um grupo 16 colunas localizadas no centro da área teste. A etapa de carregamento aplicada à este grupo de colunas consistia em fases de sobrecarga de 102,3 kPa a 182,3 kPa em diferentes intervalos de dias. A Quadro 1 apresenta a sequência evolutiva de carregamentos na área teste.

Nº	Descrição	Tensão vertical aplicada (kPa)	Duração (dias)
1	Carregamento 1	102,3	16
2	Adensamento 1	102,3	2
3	Carregamento 2	112,2	1
4	Adensamento 2	112,2	1
5	Carregamento 3	150,0	3
6	Adensamento 3	150,0	1
7	Carregamento 4	183,6	3
8	Adensamento 1	183,6	1
9	Descarregamento	126,0	4
10	Adensamento pós-descarregamento	126,0	16

Quadro 1. Sequência evolutiva de carregamento na área teste de minério (adaptado, Lima 2012).

O perfil adotado para estudo foi elaborado com base em ensaios CPTu realizados pouco antes da instalação da instrumentação. O nível d'água foi localizado 80 centímetros abaixo da cota do terreno. A Figura 2 indica a situação do perfil do terreno após a instalação do aterro de conquista e das colunas de brita no local.

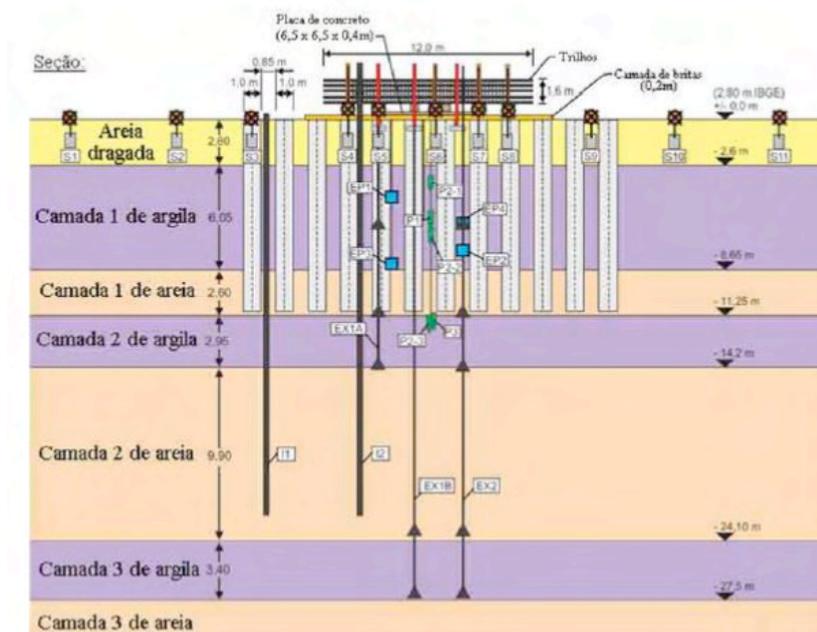


Figura 2. Perfil do terreno adotado após a instalação do aterro de conquista e das colunas de brita com as posições dos equipamentos de instrumentação instalados (Lima, 2012).

### 3 | METODOLOGIA – PARÂMETROS GEOTECNICOS

Os parâmetros geotécnicos utilizados para a análise numérica desse trabalho tiveram como base resultados de ensaios de campo e de laboratório, além da calibração do modelo geotécnico apresentados nos trabalhos de Lima (2012) e Roza (2012), assim como valores usuais da literatura em alguns casos.

O valor de peso específico ( $\gamma$ ) da primeira camada de argila do modelo foi estimado com base em amostras indeformadas retiradas de campo, enquanto para as camadas de argila subsequentes foram utilizadas as amostras coletadas na área localizada fora do pátio que possui características semelhantes, devido à falta de informação na região do pátio de minério. Em razão do efeito do adensamento produzido pela instalação do aterro de conquista, foram realizadas por Roza (2012) diversas análises numéricas axissimétricas para estimar o valor final pós-aterro de conquista do peso específico das camadas de argila. Com relação à coluna de brita, aterro de conquista, camadas de areia e placa de

concreto foram utilizados valores usuais da literatura.

Os ângulos de atrito ( $\phi$ ) das camadas de argila foram determinados pelos ensaios laboratoriais CU nas mesmas condições que as amostras ditas anteriormente. Para a coluna de brita, o ângulo de atrito foi obtido a partir de análise paramétrica realizada por Roza (2012), que teve o intuito de se estimar o valor de projeto mais adequado para o caso estudado. Ademais, para os ângulos de atrito do aterro de conquista e as camadas de areia foram utilizados valores sugeridos por Terzaghi e Peck (1967) e Lambe e Whitman (1979).

Os demais parâmetros utilizados no modelo foram retirados do trabalho de Lima (2012) e Roza(2012) e estão presentes na Quadro 3. Devido às incertezas relacionadas aos parâmetros de permeabilidade ( $k$ ) e coeficiente de empuxo ( $K$ ), Roza (2012) também realizou uma análise paramétrica destes parâmetros.

Para a determinação do módulo de elasticidade das argilas Pereira (2018) utilizou a correlação do módulo oedométrico indicada Equação 1.

$$E_{oed} = \frac{\sigma_{v' med} (1+e_0)}{0,435 C_r} \quad [1]$$

Em razão da variação dos valores de módulos de elasticidade durante o adensamento e da variação do fator de concentração (FC) do solo (2 a 5) indicada no trabalho de Lima (2012), Pereira (2018) estabeleceu diferentes módulos de elasticidade oedométricos para as camadas de argila. O módulo de elasticidade inicial não levou em conta o carregamento aplicado nem o fator de concentração do solo. O módulo de elasticidade mínimo utilizou o carregamento mínimo aplicado (102,3 kPa) e o FC=5, por representar a situação de menor absorção de carga pelo solo. Para o módulo de elasticidade máximo, o carregamento aplicado foi o máximo (183,6 kPa) e o valor de FC=2 por indicar a situação em que o solo absorve mais carga. As camadas 2 e 3 de argila, possuem o módulo de elasticidade do solo no estado inicial por se apresentarem fora da região de influência do carregamento aplicado. A Quadro 2 apresenta o módulo de elasticidade utilizado para os diversos materiais representados no modelo.

	$E_{oed}$ (kPa)		
	inicial	Mín (FC=5)	Máx (FC=2)
Aterro de conquista	2000	-	-
Coluna de brita	80000	-	-
Camada de argila 1	190	440	900
Camada de argila 2	460	1020	1490
Camada de argila 3	1060	1800	2300
Camada de areia 1	30000	-	-
Camada de areia 2	30000	-	-
Camada de areia 3	250000	-	-

Quadro 2 – Parâmetros de módulo de elasticidade oedométrico utilizados no modelo de pátio de minério.

O valor de módulo de elasticidade para as colunas de brita foi baseado na média dos valores presentes na bibliografia referente ao assunto. Para as areias foram estabelecidos valores com base no trabalho de Lambe e Whitman (1979).

A Quadro 3 apresenta os parâmetros utilizados no modelo do pátio de minério estudado.

	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$k_v$ (m/dia)	$k_h$ (m/dia)	$C_c$	K
Aterro de conquista	18	30	0,86	0,86	-	1,25
Coluna de brita	20	40	27000	27000	-	1,25
Camada de argila 1	13,4	25	$7,9 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-5}$	1,92	1,25
Camada de argila 2	16	25	$7,8 \times 10^{-5}$	$7,9 \times 10^{-5}$	1,07	0,6
Camada de argila 3	15,6	25	$14,0 \times 10^{-5}$	$7,0 \times 10^{-5}$	1,00	0,6
Camada de areia 1	18	30	0,86	0,86	-	1,25
Camada de areia 2	18	30	0,86	0,86	-	0,5
Camada de areia 3	18	30	0,86	0,86	-	0,5

Quadro 3 – Parâmetros utilizados no modelo de pátio de minério.

## 4 | RESULTADOS

Para computar os resultados das análises numéricas foram marcados nós de deslocamentos e pontos de tensão nas posições da instrumentação de campo, desta forma foi possível realizar uma comparação entre as leituras da instrumentação e a análise plana de deformação. Nas medições dos deslocamentos verticais, as placas de recalque foram instaladas a 0,5 metros abaixo da superfície. Quanto ao excesso de poropressão, os piezômetros se encontravam na profundidade de 4 metros, 6 metros e 7 metros representados com P2-1, P1 e P2-2 na Figura 2.

A ruptura da Área Teste pode ser observada a partir do do 21º dia, aproximadamente, segundo critério de Leoueil (2001). Para Leroueil (2001) o fator de segurança de estabilidade sobre argila mole possui uma relação com o índice de deslocamento horizontal da camada compressível no pé do talude que não pode passar de 10 mm/dia, caso aconteça, isto pode representar uma possível ruptura do solo. Maiores detalhes podem ser vistos no trabalho de Pereira (2018). Com isso, as análises numéricas após esta data apresentam valor qualitativo, pois não é possível simular o efeito pós-ruptura nos *softwares* utilizados. Para que tal fosse analisado seriam necessárias análises mais sofisticadas, porém estas não estão nos objetivos desta pesquisa.

### 4.1 Deslocamentos verticais

A Figura 3 ilustra os deslocamentos verticais no modelo de deformação plana associados aos diferentes módulos de elasticidade propostos por Pereira (2018), e

comparados com os resultados das placas de recalque (S5 e S7), localizadas bem abaixo do meio da placa de concreto.

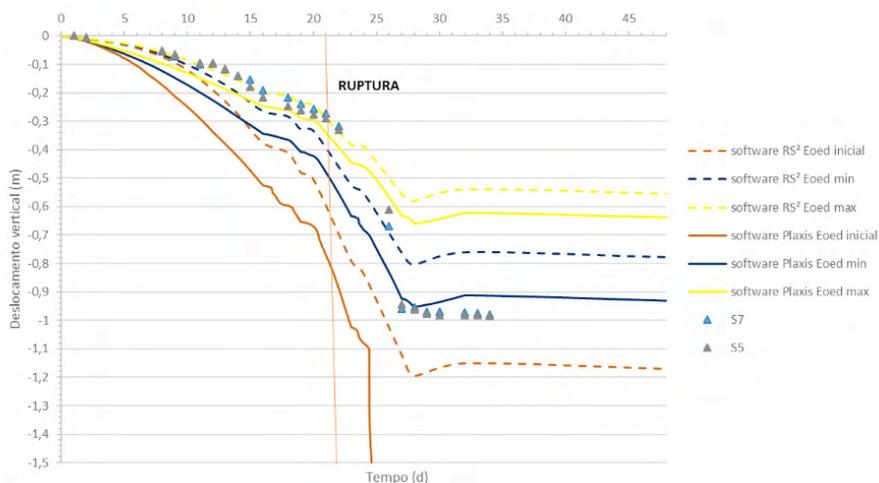


Figura 3. Deslocamentos verticais para diferentes módulos de elasticidade propostos (Pereira, 2018).

É possível observar a diferença nos resultados com diferentes módulos de elasticidade nos dois *softwares*, onde a maior adequação dos deslocamentos verticais medidos foi o da modelagem utilizando módulos de elasticidade máximos ( $E_{oed-max}$ ). Este portanto foi o modelo adotado no prosseguimento das análises presentes neste trabalho. É interessante perceber que até o 21º dia, as análises para módulo de elasticidade máximo apresentam valores muito semelhantes às leituras das placas de recalque.

A partir do trabalho de Lima (2012) foi possível analisar os resultados do modelo *Cam-Clay* para a seção de coluna de brita construída na Área Teste. Os valores estimados também foram referentes às placas de recalque S5 e S7 localizadas no centro do modelo.

Na Figura 4 pode ser visto que os deslocamentos verticais em função do tempo no modelo *Cam-Clay* foram próximos aos encontrados no modelo Mohr-Coulomb para os valores de  $E_{oed-max}$  e aos medidos em campo.

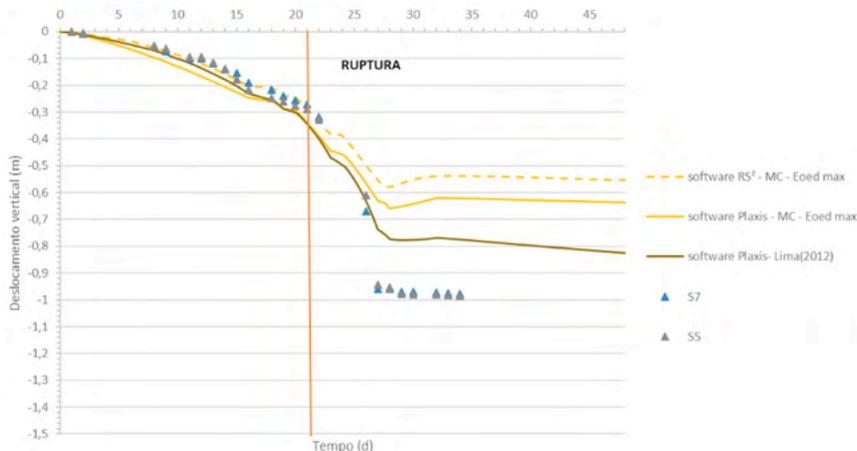


Figura 4. Deslocamentos verticais para módulo de elasticidade máximo em Mohr-Coulomb e *Cam-Clay* (Pereira, 2018).

## 4.2 Excesso de poropressão

A Figura 5 ilustra os excessos de poropressão no modelo de deformação plana para módulo de elasticidade máximo em diferentes profundidades (4m, 6m, 7m) relativas ao piezômetros. Estes piezômetros se encontram localizados abaixo do meio da placa de concreto.

Os pontos das análises numéricas selecionados para a análise de excesso de poropressão foram localizados exatamente no ponto médio entre as colunas de brita, admitindo-se que as colunas de brita foram instaladas perfeitamente verticais, sem variação de espaçamento e diâmetro. Contudo, no campo, esta situação pode não ocorrer. Além disto a instalação do piezômetro pode ter ocorrido em uma posição ligeiramente diferente da prevista, podendo assim não ter sido instalado exatamente no ponto selecionado na modelagem. Quanto mais perto o piezômetro estiver localizado das colunas de brita, maior será a dissipação e conseqüentemente menor o valor medido de excesso de poropressão. Em contrapartida, segundo Wong (2009), o modelo Mohr-Coulomb tende a não reproduzir muito bem o comportamento de poropressão, gerando possivelmente valores abaixo dos medidos em campo. Com isso, é necessário que se fique atento aos diferentes resultados do modelo.

No intuito de verificar a validade dos resultados reproduzidos pelos modelos a Figura 6 compara os resultados da análise numérica realizada por Lima (2012), no modelo Cam-Clay, com as curvas da instrumentação e as análises realizadas com o modelo Mohr-Coulomb, todas na profundidade de 6 metros. A partir do gráfico, é possível constatar que os valores de excesso de poropressão medidos foram realmente menores que os esperados, como dito anteriormente. O modelo Cam-Clay utilizado por Lima (2012) tende a reproduzir

níveis maiores de poropressão que o modelo Mohr-Coulomb.

Ambos modelos utilizados conseguiram reproduzir o comportamento das leituras de campo, mas devido à deficiência do modelo Mohr-Coulomb em calcular o efeito da poropressão (Wong, 2009) e às dúvidas quanto a localização do piezômetro é necessário cautela com a magnitude da poropressão apresentada.

Possivelmente, a localização do piezômetro não foi perfeitamente respeitada, situando-se mais próximo da coluna e apresentando valores de poropressão menores. Por esta razão estes valores coincidiram em grande parte com os valores indicados pelo modelo Mohr-Coulomb.

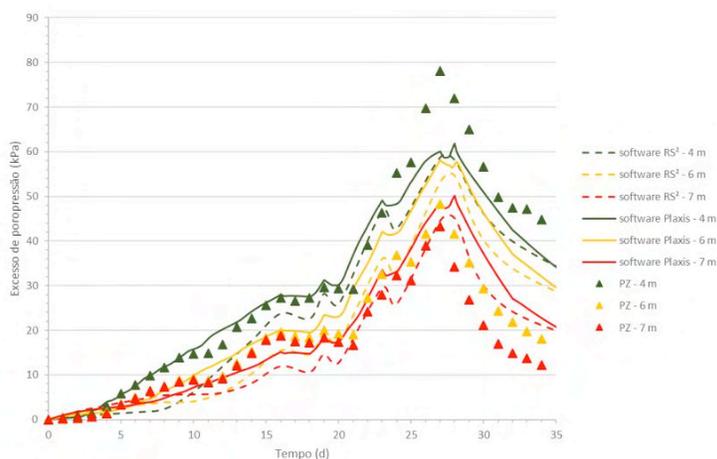


Figura 5. Excesso de poropressão em relação ao tempo nas profundidade de 4m, 6m e 7m (Pereira, 2018).

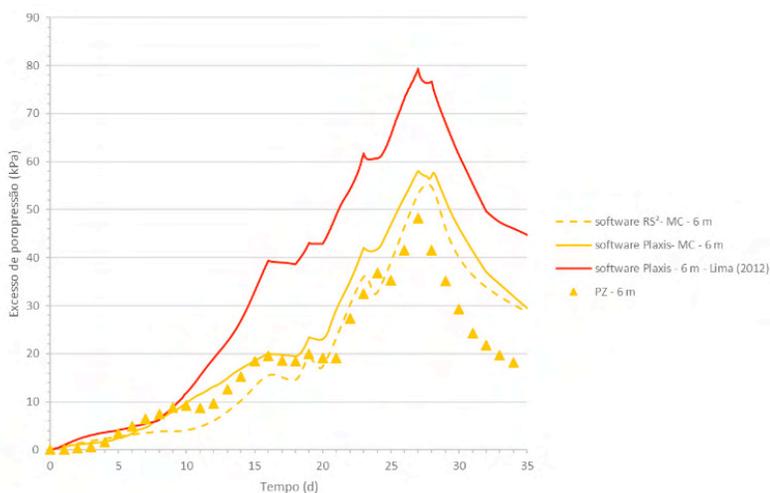


Figura 6. Excesso de poropressão para a profundidade de 6 metros para diferentes modelos (Pereira, 2018).

### 4.3 Plastificação das colunas

Na Figura 7 observa-se que houve a quase completa plastificação das colunas de brita abaixo da placa de concreto. Isso se dá devido ao efeito de arqueamento de tensões, que ocorre não somente no topo das colunas mas bem como ao longo de sua profundidade (Lima, 2012). A maior absorção de carga das colunas em relação ao solo impediu a plastificação da camada de argila.

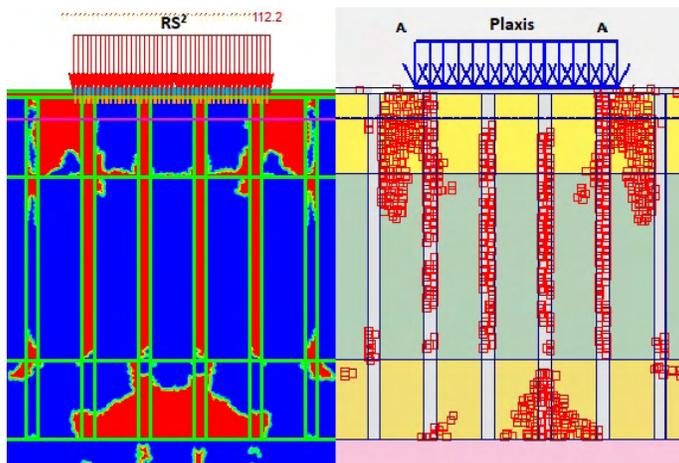


Figura 7. Plastificação das colunas de brita e no solo pelos *softwares* Plaxis e RS<sup>2</sup> (adaptado, Pereira, 2018).

Pode se atentar também ao formato perfeito da cunha de ruptura marcando a movimentação da massa de ruptura durante o processo de carregamento, assim como perceber que os dois resultados apresentam plastificação nos mesmos pontos, assegurando a compatibilidade de funcionamento dos dois modelos criados. As colunas plastificadas são representadas no 20º dia, data mais próxima da suposta ruptura na sequência evolutiva apresentada na Quadro 1.

## 5 I CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo foi reproduzir os resultados de uma análise numérica de um aterro teste sobre coluna de britas localizado em área de argila muito compressível. O perfil foi modelado em dois *softwares* de elementos finitos (Plaxis e RS<sup>2</sup>) no modelo constitutivo Mohr-Coulomb, com o objetivo de comparar os resultados entre si e com os dados da instrumentação do aterro. Ademais, a partir da análise em *soft soil creep Cam-Clay* de Lima (2012) foi possível contrapor os valores estimados com as análises numéricas anteriormente citadas.

Os deslocamentos verticais apresentaram boa compatibilidade entre os *softwares* e

proximidade com as leituras das placas de recalque, indicando razoabilidade na magnitude dos valores estimados para módulo de elasticidade máximo. É importante frisar que o uso do módulo de elasticidade inicial (E) gera resultados de recalques muito superiores aos observados. Portanto, valores maiores de E baseados no acréscimo de carregamento e no fator de concentração de tensões devem ser levados em conta. Os resultados derivados do modelo Cam-Clay em Lima (2012) também apresentaram proximidade satisfatória com as análises supracitadas.

O comportamento das poropressões da instrumentação conseguiu ser bem reproduzido nas análises numéricas com ambos modelos, com a magnitude da poropressão no modelo Mohr-Coulomb sendo inferior, conforme esperado.

A plastificação das colunas foi praticamente a mesma no RS<sup>2</sup> e no Plaxis. A absorção de maior parte da carga pelas colunas de brita representam um alívio nas camadas de solo e, conseqüentemente, uma menor plastificação das argilas. Por esta razão, o modelo Mohr-Coulomb, que tem dificuldades em reproduzir o comportamento de argilas muito compressíveis, representou satisfatoriamente o caso estudado.

## REFERÊNCIAS

Lambe, T.W. e Whitman, R.V. (1979) "Soil Mechanics" 2nd Edition, Wiley, New York, 553 p.

Leroueil, S. (2001). "Natural slopes and cuts (39th Rankine Lecture)". *Géotechnique*, 51(3), p. 197-243.

Lima, B. T. (2012). "Estudo do uso de colunas de brita em solos argilosos muito moles." Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Pereira, P. G. S. (2018) "Análise numérica de coluna de brita em aterro teste.", Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Roza, F.C. (2012) "Comportamento de Obras sobre Solos Moles com Colunas de Brita para Armazenamento de Minério de Ferro.", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Terzaghi, K. e Peck, R. (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice." John Wiley & Sons, New York.

Wong, K. S. (2009) A NZGS 1-day "Short Course on Design and Analysis of Deep Excavation." Auckland.

## ANÁLISE ESTRUTURAL ELÁSTICA LINEAR DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO POR DIFERENTES MODELOS DE CÁLCULO: UM ESTUDO DE CASO

Data de aceite: 01/08/2022

Data de submissão: 29/06/2022

### Ray Calazans dos Santos Silva

Departamento de Engenharia de Estruturas –  
EESC/USP  
São Carlos – SP  
<http://lattes.cnpq.br/5372629655559184>

### Luan Reginato

Departamento de Engenharia de Estruturas –  
EESC/USP  
São Carlos – SP  
<http://lattes.cnpq.br/2208311458254148>

### José Anchieta Damasceno Fernandes Neto

Departamento de Engenharia de Estruturas –  
EESC/USP  
São Carlos – SP  
<http://lattes.cnpq.br/0963488049079438>

**RESUMO:** A análise estrutural é uma das etapas mais importantes de um projeto estrutural, nela são identificados os esforços e deslocamentos de uma estrutura. Dentre os modelos lineares elásticos de análise estrutural utilizados no meio técnico, temos: viga contínua, pórtico por pavimentos isolados, pórtico plano e pórtico espacial. Sabe-se que o modelo de pórtico espacial é o mais preciso que dispomos atualmente. Por isso, este trabalho avalia a influência que a metodologia de cálculo empregada exerce sobre os valores dos momentos fletores em vigas de concreto armado. Para isso, uma edificação padrão foi analisada pelos quatro modelos estudados, e os esforços

obtidos por cada um deles foi comparado com o modelo mais realista, o de pórtico espacial. Afim de verificar a importância da consideração de esforços horizontais na formulação dos modelos, o edifício analisado teve seu número de pavimentos variado de onze até três. Os modelos de viga contínua e pórtico plano foram modelados com o auxílio do software livre FTOOL v.3.01, já os modelos de pavimentos isolados e pórtico espacial foram modelados no software comercial EBERICK v.8. As recomendações normativas brasileira foram atendidas. Os resultados obtidos para os modelos de viga contínua, pavimentos isolados e pórtico plano mostram grande discrepância em relação ao pórtico espacial. Quando a altura da edificação é diminuída, as discrepâncias reduzem, mas não atingem um nível satisfatório. Com isso, é possível concluir que, as simplificações adotadas por cada modelo conduzem a resultados não condizentes com a realidade na maioria dos casos. Portanto, tais modelos devem ser usados com cautela.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise estrutural, viga contínua, pórtico plano, pavimentos isolados, pórtico espacial.

### LINEAR ELASTIC STRUCTURAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BY DIFFERENT CALCULATION MODELS: A CASE STUDY

**ABSTRACT:** A structural analysis is one of the most important stages of a structural design, as the movements and displacements of a structure are identified. Among the linear elastic structural analysis models used in the technical area, we have: continuous beam, isolated floor,

plane frame and space frame. It is known That is the most accurate space frame model that exists currently. Therefore, this work evaluated the influence of the calculation methodology employed on the bending moment values in reinforced concrete beams. For this, a standard building was analyzed by the four models studied, and the efforts obtained by each one of them were compared with the most realistic model, the space frame model. In order to verify the importance of the consideration of horizontal efforts in the formulation of the models, the analyzed building had its number of floors varied from eleven to three. The continuous beam and plane frame models were modeled with the help of free software FTOOL v.3.01, while the isolated floor and space frame models were modeled in the commercial software EBERICK v.8. Brazilian normative recommendations were met. The results obtained for the continuous beam models, isolated floor and plane frame show great discrepancy in relation to the space frame. When the height of the building is decreased, as reduces discrepancies, but does not reach a satisfactory level. With this, it can be concluded that as simplifications adopted for each model led to results not consistent with reality in most cases. Therefore, these models should be used with caution.

**KEYWORDS:** Structural analysis, Continuous beam model, Isolated floor, Plane frame, Space frame.

## 1 | INTRODUÇÃO

A análise estrutural é a etapa do projeto estrutural em que se busca relacionar as ações externas atuantes com as respostas do corpo, tais como: deslocamentos, esforços internos e tensões. Um modelo estrutural busca simular a estrutura física matematicamente, afim de se obter respostas que expressem o comportamento o mais próximo possível da realidade. O engenheiro tem a responsabilidade de conceber esse modelo, considerando as ações externas estabelecidas a partir de normas e com as aproximações pertinentes, para que após a determinação de seu comportamento realize-se a análise crítica (SORIANO, 2006).

Nos últimos anos é possível perceber a evolução nos *softwares* de cálculo estrutural, tanto na velocidade de processamento quanto na implantação de modelos estruturais mais realistas. Projetos que antes eram realizados por grupos de engenheiros, meses de trabalho manual com auxílio de ábacos e régua de cálculo, hoje são realizadas em poucos dias com o uso de um computador e um número menor de engenheiros, um grande ganho de produtividade. Entretanto, o uso desses programas de cálculo estrutural se tornou comum por usuários não capacitadas, que confundem o papel do software, que é de auxiliar o engenheiro e não de substituí-lo (KIMURA, 2007).

Como destacado no trabalho de FONTES (2005), os conceitos relacionados à análise estrutural têm assumido maior importância no crescente mercado de programas comerciais. O negligenciamento desse conhecimento prévio pode acarretar em erros grotescos, que em algum momento pode levar a estrutura à ruína, como no caso do edifício Real Class, em Belém-PA, que deixou três mortes. Segundo RIBEIRO & OLIVEIRA (2018),

um dos motivos do acidente foi a não consideração dos esforços horizontais do vento no modelo estrutural empregado pelo calculista, que utilizou um software comercial.

É sabido que os softwares de cálculo estrutural são de elevado custo. Muitas das vezes o engenheiro não possui o capital ou não acha necessário o investimento. Como alternativa, surgem os modelos de cálculo que permitem o cálculo manual, automatizado (planilhas eletrônicas) e com auxílio de softwares de análise estrutural com versões livres, tal como o FTOOL v.3.01. O FTOOL é um software de análise estrutural de estruturas reticuladas no plano bastante difundido no meio acadêmico devido a sua simplicidade de utilização, com interface gráfica bastante intuitiva e resultados precisos.

Os modelos de cálculo antigos como o de viga contínua, pavimentos isolados e pórtico plano já foram usados por muito tempo e possuem validade para determinados casos, mesmo com suas hipóteses simplificadoras. Por isso, no presente trabalho, serão realizadas e comparadas análises elásticas lineares dos momentos fletores de vigas através de quatro modelos de cálculo que são ou já foram bastante utilizados, sendo eles: viga contínua, pavimentos isolados, pórticos planos e pórtico espacial. Primeiramente será tomado como base um edifício residencial de 11 pavimentos e depois serão reduzidos o número de pavimentos afim de verificar a concordância dos modelos para edificações baixas. Os cálculos serão realizados manualmente e com auxílio dos *softwares* FTOOL v.3.01 e comparados com o software comercial EBERICK v.8.

Os modelos de viga contínua e pavimentos isolados não consideram esforços horizontais em suas formulações. Neste trabalho esses modelos serão utilizados para analisar a influência que os esforços horizontais têm nos esforços internos, especificamente nos momentos fletores, com o intuito de mostrar o risco que se assume ao utilizar tais modelos, ficando restritos para análises bem específicas.

Assim, a fim de validar o cálculo manual destes modelos usados há muitos anos e levando em consideração o aporte financeiro necessário para dispor de softwares de cálculo, este trabalho foi executado de maneira a dar suporte a todos os engenheiros.

## 2 | MODELOS DE CÁLCULO

### 2.1 Viga Contínua

O modelo de viga contínua é adequado para análise de carregamentos essencialmente verticais. A viga é considerada como uma barra geral simplesmente apoiada em pontos que representam o pilar. As forças são aplicadas em seu plano. Os momentos fletores e os esforços cortantes são os esforços predominantes. A torção não é considerada, já que atua em um plano perpendicular ao da viga. Os esforços normais são geralmente desprezados (FONTES, 2005).

No modelo clássico de viga contínua os elementos estruturais (vigas, pilares e lajes) são tratados de formas isoladas, seguindo o seguinte raciocínio: a laje é carregada e suas

reações carregam as vigas, que por seguinte descarregam nos pilares. Os apoios são todos considerados simples, ou seja, sem a transferência de momentos. Como é visto na Figura 1, é um modelo bastante simples e fácil de perceber o caminho que as cargas percorrem, porém no modelo real a estrutura é monolítica e seus elementos não podem ser separados, pois cada um exerce influência no outro. Portanto, tendo em vista as limitações e simplificações adotadas, este modelo deve ser utilizado com algumas ressalvas.

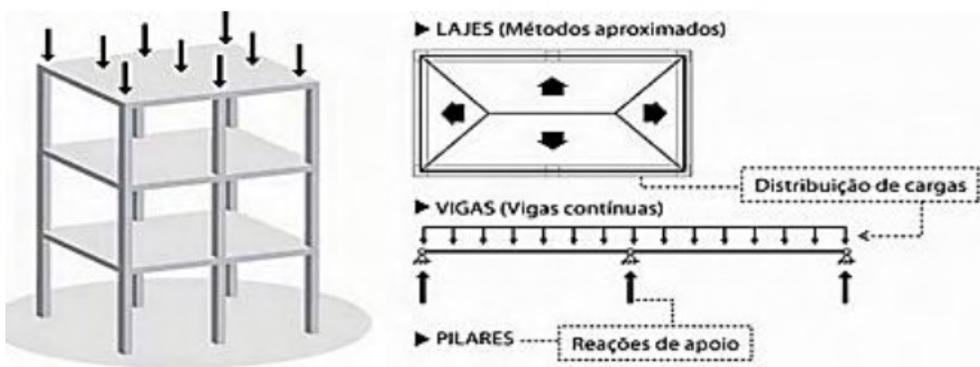


Figura 1 – Procedimento de cálculo para vigas contínuas (KIMURA (2007))

O modelo clássico de viga contínua considera a viga simplesmente apoiada nos pilares sem a consideração da solidariedade ou transmissão de momentos entre esses elementos. No entanto, isso não acontece na realidade e só pode ser utilizado para certos apoios. Por isso, a NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 14.6.6.1, diz que o modelo clássico de viga contínua pode ser utilizado para o estudo das cargas verticais, observando-se a necessidade das seguintes correções adicionais:

- não podem ser considerados momentos positivos menores que os que se obteriam se houvesse engastamento perfeito da viga nos apoios internos;
- quando a viga for solidária com o pilar intermediário e a largura do apoio, medida na direção do eixo da viga, for maior que a quarta parte da altura do pilar, não pode ser considerado o momento negativo de valor absoluto menor do que o de engastamento perfeito nesse apoio;
- Quando não for realizado o cálculo exato da influência da solidariedade dos pilares com a viga, deve ser considerado, nos apoios extremos, momento fletor igual ao momento de engastamento perfeito multiplicado pelos coeficientes estabelecidos na Tabela 1, e conforme esquema da figura 2:

Viga	Tramo superior do pilar	Tramo Inferior do pilar
$\frac{r_{sup}}{r_{inf} + r_{sup} + r_{vig}}$	$\frac{r_{sup}}{r_{inf} + r_{sup} + r_{vig}}$	$\frac{r_{inf}}{r_{inf} + r_{sup} + r_{vig}}$

Tabela 1- Coeficientes para solidarização.

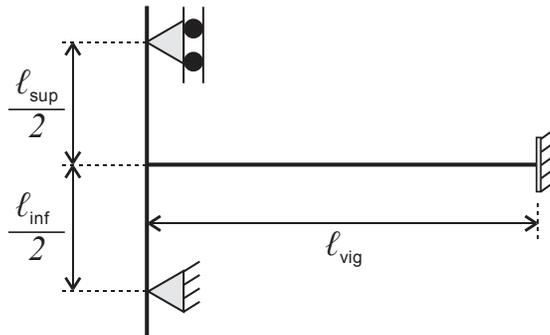


Figura 2- Esquema estrutural aproximação em apoios extremos

Sendo:

$$r_i = \frac{I_i}{L_i} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $r_i$  é a rigidez do elemento  $i$  no nó considerado;  $I_i$  é o momento de inércia do elemento;  $L_i$  é o vão do elemento no tramo.

Esse modelo de análise estrutural só leva em conta as cargas verticais, não considerando os efeitos provocados por carregamentos horizontais, como o vento, desaprumo, empuxo e etc. Na realização de projetos de engenharia não é recomendado o uso isolado deste modelo, servindo apenas para a validação de alguns resultados (KIMURA, 2007).

## 2.2 Pórticos Planos

Os pórticos planos são formados por elementos lineares contidos num mesmo plano, sendo estes elementos: as vigas, os pilares e possíveis tirantes. No plano do pórtico, atuam as forças e os deslocamentos, já no plano normal atuam os momentos fletores (FONTES, 2005). Os momentos de torção não são considerados, já que atuam no plano da seção transversal dos elementos. O esquema estrutural é mostrado na figura 3.

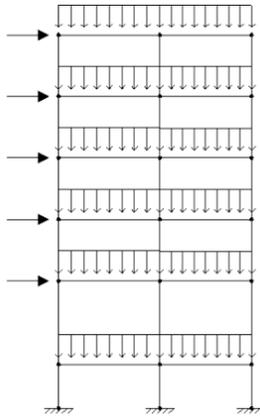


Figura 3- Pórtico plano.

Com o modelo de pórticos planos é possível fazer análises tanto para ações verticais, quanto para ações horizontais, neste modelo é possível prever a ação do vento e desaprumo nas estruturas e também a consideração da rigidez das ligações viga-pilar.

### 2.3 Pavimentos Isolados

O modelo de pórtico por pavimentos isolados considera de forma mais precisa em relação ao de viga contínua as respostas às ações verticais nos edifícios, pois leva em consideração a transmissão dos esforços entre os pilares e a viga que constituem o pórtico, representando de forma mais realista a estrutura. Os esforços que são analisados neste modelo são os momentos fletores, esforço cortante e esforço normal (FONTES, 2005).

Este modelo trata o edifício como se fosse formado por pórticos planos isolados em cada pavimento, iniciando da cobertura até o pavimento térreo, os pórticos são calculados separadamente, onde os esforços de reação do pórtico superior são transmitidos para o pórtico inferior. Para isso os pilares inferiores são considerados engastados e os pilares superiores responsáveis por receber os esforços do pavimento acima, são considerados com a extremidade livre, como pode ser visto na Figura 4.

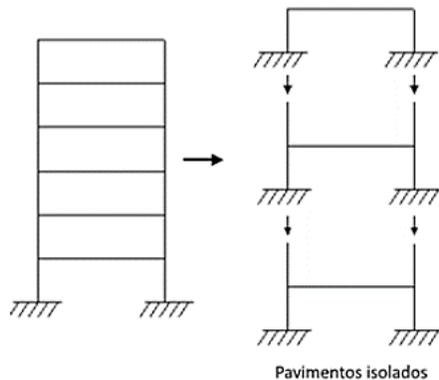


Figura 4- Modelo de Pavimentos Isolados (MANUAL EBERICK (2019))

Devido a sua simplificação na implementação computacional e na análise de resultados, esse modelo foi utilizado por muito tempo nos programas de cálculo, porém deve ser levado em conta que seus resultados diferem do modelo de pórtico plano completo, pois não consideram os esforços horizontais. O pórtico de pavimentos isolados é válido somente para edifícios que não tenham predominância de esforços de torção e ações horizontais. Por estes e outros motivos, esse modelo não é recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

## 2.4 Pórtico Espacial

O modelo de pórtico espacial possibilita uma análise tridimensional, onde nessa análise é possível receber ações em quaisquer direções e obter os esforços e deslocamentos no espaço (Figura 5). A interação entre os elementos de lajes, pilares e vigas são levadas em conta, gerando um modelo mais completo e que representa de uma forma mais fidedigna o modelo real. Com essas melhorias em relação ao pórtico plano, é possível levar em consideração a ação de forma simultânea dos esforços horizontais e verticais nos elementos, até em edifícios com assimetria.

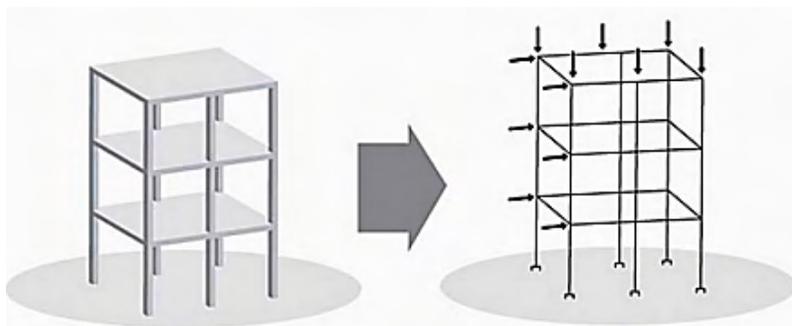


Figura 5- Pórtico Espacial (KIMURA (2007))

Os pórticos espaciais, assim como os pórticos planos, são formados por elementos lineares com ligações rígidas, semi-rígidas ou flexíveis. Uma melhor modelagem é alcançada com a inserção de trechos rígidos nas ligações entre as barras (CORRÊA, 1991).

Com os ganhos de precisão que advieram com esse modelo, também surgiram maiores complexidade nos cálculos, já que no modelo espacial existem 6 graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações, que permitem a obtenção dos esforços normais, cisalhamento, momento fletor e momento torsor. Tendo em vista a inviabilidade do cálculo manual, o pórtico espacial só é possível graças aos avanços computacionais, que permitiram a implantação de grandes cálculos matriciais.

Ressalta-se que quando se dispõe de ferramenta computacional para a análise, o modelo de pórtico espacial deve ser empregado pelo projetista, pois avalia o comportamento da estrutura de forma mais realista. Devido a sua precisão e ganho de produtividade este modelo é o mais utilizado atualmente nos escritórios de cálculo (KIMURA, 2007).

### 3 | EDIFÍCIO

Para a realização do estudo é utilizado o projeto estrutural de um edifício residencial em concreto armado de 11 pavimentos, adaptado de ARAÚJO (2010), sendo composto por um térreo, nove pavimentos-tipo e a cobertura. O pavimento-tipo é mostrado na planta baixa (Figura 6).

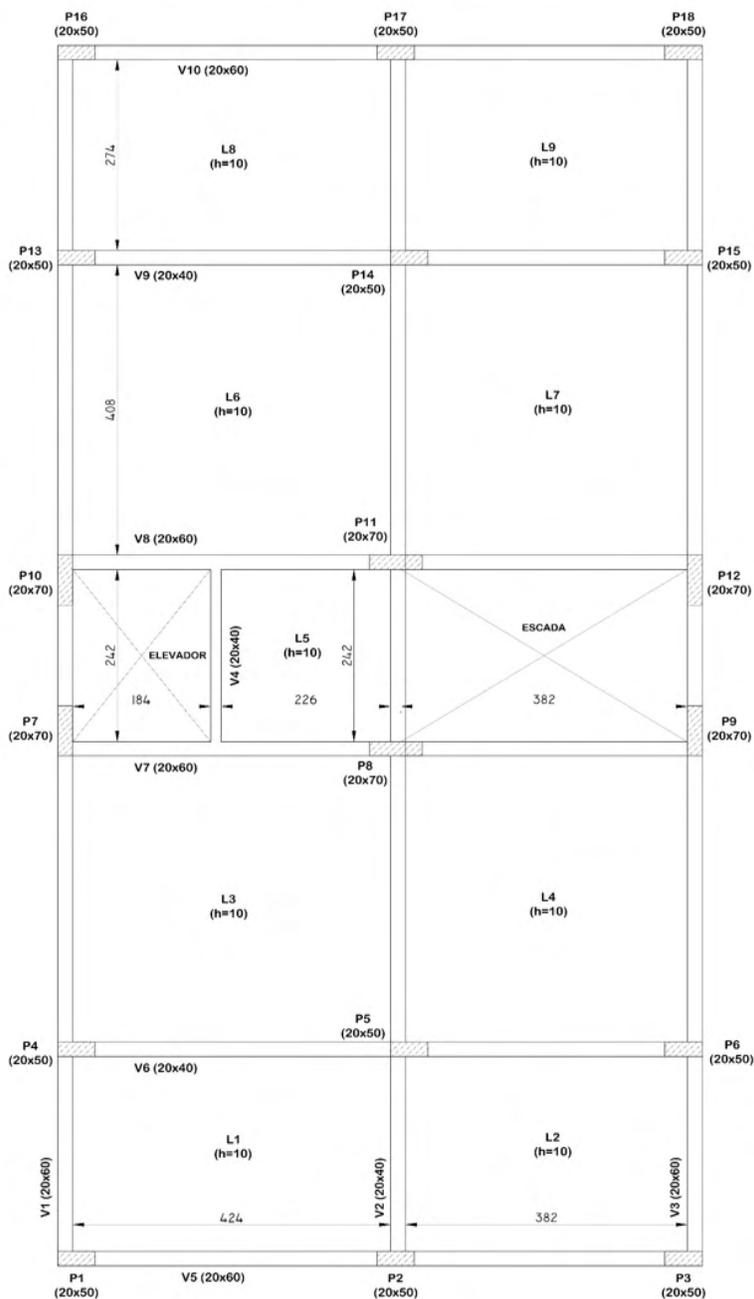


Figura 6- Planta baixa

### 3.1 Material

No trabalho é utilizado um concreto com  $f_{ck} = 35$  MPa, confeccionado com um

agregado graúdo de granito. Na determinação do módulo de elasticidade do material foram seguidas as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e os parâmetros utilizados podem ser vistos na tabela 2.

$f_{ck}$ (MPa)	35
$\alpha_E$	1
$\alpha_i$	0,8875
$E_{ci}$ (MPa)	33130
$E_{cs}$ (MPa)	29400

Tabela 2 - Propriedades do concreto.

## 3.2 Ações na Estrutura

### 3.2.1 Ações Horizontais

As ações horizontais que atuam nesta estrutura são provenientes do vento e do desaprumo. O cálculo desses esforços é feito segundo as prescrições da NBR 6123 (ABNT, 1988) e da NBR 6118 (ABNT, 2014). O edifício é considerado de seção constante e o vento de baixa turbulência. Salienta-se que nas análises onde varia-se o número de pavimentos, os coeficientes de arrasto são recalculados, assim como para cada direção de ação do vento.

A força de arrasto do vento é dada por:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $C_a$  é o coeficiente de arrasto, que é determinado de acordo com a Tabela 10 da NBR 6123 (ABNT, 1988);  $A$  é a área de influência do pavimento, obtida pelo produto da altura de piso a piso com a largura do edifício perpendicular à ação do vento.;  $q$  é a pressão dinâmica do vento dado pela Equação 3.

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $V_k$  é a velocidade característica do vento dada por:

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad (\text{Equação 4})$$

Os valores de  $V_0$  e dos coeficientes assumidos são mostrados na Tabela 3.

Descrição		Valor adotado
$V_0$	Velocidade básica do vento: Adotado para a cidade de Aracaju/ SE com valor determinado através do mapa de isopletras.	30 m/s
$S_1$	Fator topográfico: Adotado um terreno situado em um local plano.	1,0
$S_2$	Fator que leva em consideração a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura da incidência do vento: Para a rugosidade foi adotado a categoria IV (Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados), para as dimensões da edificação foi adotado Classe A quando a máxima dimensão da edificação for menor que 20 m e Classe B quando for maior, e a altura de incidência do vento é analisado em cada altura do pavimento (z).	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Classe A: } 0,86 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,120} \\ \text{Classe B: } 0,833 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,125} \end{array} \right.$
$S_3$	Fator que leva em consideração o uso da edificação e sua vida útil: o valor adotado foi para edificações para hotéis e residências	1,0

Tabela 3- Valores adotados segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988) para o cálculo da velocidade do vento.

Ainda segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), devem ser considerados os esforços causados pelo desaprumo, tais esforços podem ser mensurados por ações laterais equivalentes, de acordo com a Equação 5.

$$D = P_{ki} \cdot \theta_a \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,  $D$  é a força lateral equivalente ao desaprumo,  $P_{ki}$  é o valor característico da carga total de cada pavimento e  $\theta_a$  o ângulo de desaprumo.

O ângulo de desaprumo deve ser calculado para cada direção, em função do número  $n$  de prumadas de pilares, da altura total do edifício  $H$  e do ângulo  $\theta_1$ , através das Equações 6 e 7.

$$\frac{1}{300} \leq \theta_1 = \frac{1}{100 \cdot \sqrt{H}} \leq \frac{1}{200} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\theta_a = \theta_1 \sqrt{\frac{1+1/n}{2}} \quad (\text{Equação 7})$$

A NBR 6118 (ABNT, 2014) permite considerar somente o vento atuante se o desaprumo for equivalente a menos que 30% do mesmo. Como neste trabalho o desaprumo não supera os 30% do vento em nenhuma das direções, serão consideradas apenas ações horizontais devido ao vento.

### 3.2.2 Ações Verticais

As ações verticais são obtidas como recomenda a NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 6120 (ABNT, 1980). Na determinação do carregamento advindo das lajes é adotado o método das charneiras plásticas.

Os carregamentos atuantes na viga V5 são mostrados na Tabela 4.

Viga V5=V10					
Trecho	Lajes	Peso Próprio	Parede	Escada	Total (kN/m)
1	3,55	3	4,1	0	10,65
2	3,35	3	4,1	0	10,45

Tabela 4 - Carregamento da Viga V5

## 4 | RESULTADOS

Os resultados analisados em todos os modelos são os obtidos para o pavimento térreo. Essa escolha se deu após uma análise de todas as combinações de ações no modelo de pórtico espacial, onde é visto que as maiores magnitudes de momentos fletores para elementos lineares encontram-se nesse pavimento.

As combinações das ações utilizadas para os modelos seguiram as prescrições normativas, onde foram determinadas as combinações críticas para cada modelo. Para os modelos de viga contínua e pavimentos isolados foi utilizado de  $1,4G+1,4Q$ . Já para os modelos de pórtico plano e pórtico espacial, os quais preveem as ações horizontais, foi de  $1,4G+1,4V+0,7Q$ . Onde G representa as cargas permanentes, Q as cargas de sobrecargas e V a ação do vento.

Nos resultados também são estudados até que ponto o número de pavimentos influencia na precisão entre os modelos. Para isso, o edifício em estudo teve seu número de pavimentos analisados variando de onze até três.

Devido à grande quantidade de vigas estudadas, são mostrados nos resultados somente a viga V5 (simétrica a V10), pois apresenta comportamento similar aos demais.

### 4.1 Resultados para o edifício com 11 pavimentos

A Figura 7 mostra os resultados dos momentos fletores na viga V5 obtidos pelos diferentes modelos de cálculo. Neste gráfico consta apenas a viga V5.

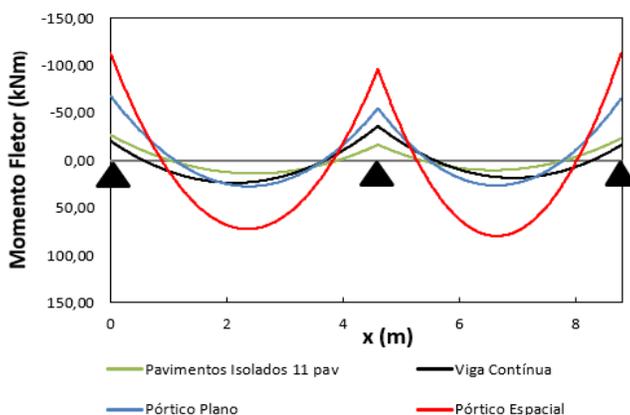


Figura 7- Diagramas de momento fletor da viga V5 para 11 pavimentos.

Os valores dos momentos obtidos pelos modelos estudados são bastante discrepantes em relação ao do pórtico espacial, chegando em até 87% de diferença quando calculado por pavimentos isolados. O modelo de pórtico plano é o que mais se aproxima com uma diferença de até 62%, porém ainda é insatisfatório. Por fim, no modelo de viga contínua as diferenças chegam em até 85%.

Os fatores que influenciam esses resultados serão discutidos no próximo tópico, quando os esforços horizontais serão reduzidos gradualmente com a diminuição da altura da edificação. Com isso, os esforços verticais se tornam preponderantes em todos os modelos. Assim, outros parâmetros podem ser discutidos.

## 4.2 Resultados variando-se o número de pavimentos do edifício

Após realizar sucessivas análises em que o número de pavimentos do edifício padrão variou de 11 a 3, foram determinadas envoltórias de momento fletor para cada um dos modelos. Os gráficos foram obtidos por meio de interpolações polinomiais, em que os nós de interpolação são os valores dos momentos nos apoios e meio do vão.

### 4.2.1 Modelo de Viga Contínua x Pórtico Espacial

No modelo de viga contínua percebe-se que quanto menor o número de pavimentos, mais próximo os resultados obtidos ficam dos encontrados através do pórtico espacial, conforme figura 8. Os momentos positivos no meio do vão chegam a atingir valores satisfatórios para o edifício com três pavimentos, enquanto os negativos chegam a ficar muito próximos, mas não suficientemente.

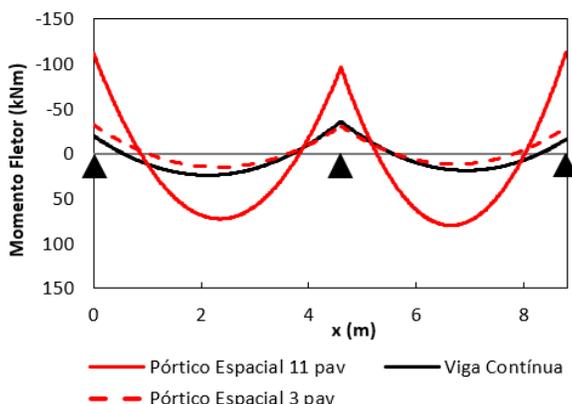


Figura 8-Diagrama de momento fletor da viga V5: viga contínua x pórtico espacial

Destaca-se que os esforços obtidos por meio do modelo de viga contínua não dependem da altura da edificação, permanecendo inalterados com a variação da quantidade

de pavimentos. A divergência entre as respostas dos modelos deve-se, principalmente, pela não consideração dos esforços horizontais na formulação do modelo viga contínua. Percebe-se que quando estes esforços têm sua importância reduzida (edificações baixas), as respostas tendem a ficar próximas. Um outro fator, não menos importante, é que no modelo de viga contínua não se considera a rigidez de forma exata nas ligações viga-pilar, prejudicando na análise dos momentos negativos.

#### 4.2.2 Modelo de Pavimentos Isolados x Pórtico Espacial

Os diagramas de momento fletor obtidos para os modelos de pavimentos isolados e pórtico espacial são mostrados na Figura 9. Neste gráfico é possível notar a proximidade entre os diagramas dos dois modelos para o edifício de três pavimentos. Novamente isso acontece porque o efeito da ação do vento é menor em edificações baixas e o modelo de pavimentos isolados não considera essa ação em sua formulação, fazendo com que em edificações maiores a diferença entre os modelos seja gritante.

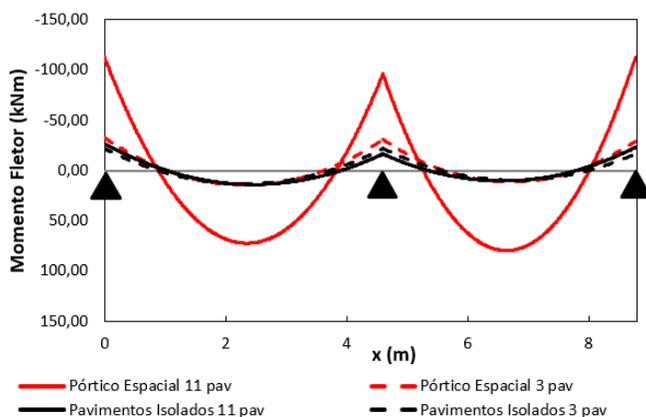


Figura 9-Diagrama de momento fletor da viga V5: pavimentos isolados x pórtico espacial

Há uma leve melhora no desempenho deste modelo em relação ao de viga contínua. Pois, além dos momentos positivos serem satisfatórios, os momentos negativos estão muito próximos (menos que 4%) em relação ao modelo padrão para três pavimentos. Isso ocorre devido a consideração da rigidez da ligação viga-pilar neste modelo.

#### 4.2.3 Modelo de Pavimentos Isolados x Pórtico Espacial

Ao compararmos o modelo de pórtico plano com o pórtico espacial, observa-se comportamento similar aos demais casos, ou seja, quando é diminuída a quantidade de pavimentos, os resultados se aproximam. Nos edifícios de poucos pavimentos estudados, o pórtico plano teve bons resultados, isso é: momentos fletores positivos e negativos muito

próximos do modelo padrão de análise, como mostra a Figura 10.

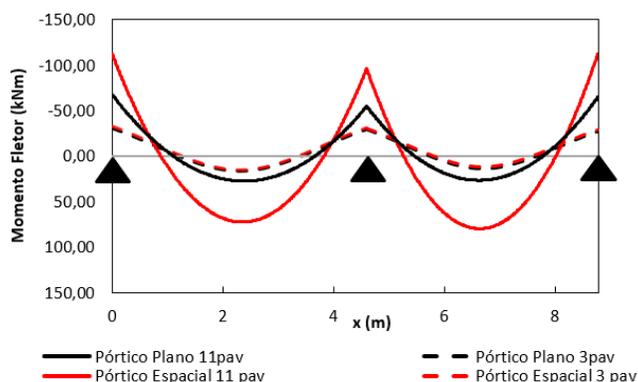


Figura 10-Diagrama de momento fletor: pórtico plano x pórtico espacial

O modelo de pórtico plano é o que apresenta os resultados mais próximos ao modelo pórtico espacial, porém ainda insatisfatórios quando aplicado em edificações altas. Em sua formulação é considerada a ação de esforços horizontais e a rigidez das ligações viga-pilar. Entretanto, por ser formulado no plano, não leva em consideração a interação entre pórticos de planos concorrentes, pois é sabido que há uma interação entre os momentos fletores e torsores nos nós compartilhados por esses pórticos, acarretando uma condição de equilíbrio nodal complexa e de difícil modelagem matemática através apenas de pórticos planos.

## 5 | CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a analisar a influência que o modelo de cálculo empregado exerce sobre os resultados de momentos fletores em vigas de concreto armado de um edifício. Em todos os modelos foram seguidas as recomendações normativas pertinentes. O modelo de viga contínua apresentou os piores resultados, seguido dos modelos de pavimentos isolados e pórticos planos, nessa mesma ordem de precisão.

Ao variar o número de pavimentos, era esperado que os modelos de cálculo fossem se tornando apropriados, ou seja, tivessem esforços maiores ou muito próximos do pórtico espacial, configurando uma condição a favor da segurança. No entanto, novamente observou-se o mesmo desempenho contra a segurança entre os modelos.

Nos edifícios mais baixos foi constatado que os momentos fletores positivos atingem resultados satisfatórios em todos os modelos estudados. Enquanto que para os momentos negativos o mesmo não acontece, justamente pelo fato de ocorrerem no nó de ligação viga-pilar, onde há uma condição sofisticada de equilíbrio.

Os modelos de viga contínua e pavimentos isolados ficaram muito distantes do modelo pórtico espacial na maioria das análises, evidenciando que a não consideração de esforços horizontais oferece um risco a integridade estrutural, pois na maioria dos casos subestimaram os momentos positivos e em todos os casos subestimaram os momentos negativos. Por fim, alerta-se que esses modelos não devem ser os únicos utilizados em projetos estruturais, necessitando de um modelo complementar para análise de esforços horizontais.

Desta forma, conclui-se que o conhecimento dos modelos de cálculo mais simples é imprescindível para a formação do engenheiro, pois com estas metodologias é possível compreender de forma simplificada o comportamento de uma estrutura. Contudo, seu uso deve ser feito de forma cuidadosa, sendo válido para uma estimativa da ordem de grandeza dos esforços, mas com aplicação direta muito restrita em projetos estruturais.

## REFERÊNCIAS

ALTOQI TECNOLOGIA EM INFORMÁTICA LTDA. **Manual do Eberick** - Suporte online. Florianópolis, SC, 2019. Disponível em: <http://faq.altoqi.com.br/category/3/eberick.html>> Acessado dia 01/05/2019.

ARAÚJO, José Milton de. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**. 2º ed. 2º Reimpressão. Rio Grande do Sul: Dunas, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6120**- Cargas para o cálculo de estruturas de edificação. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6123**- Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6118**- Projeto de estruturas de concreto- Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

CORRÊA, Márcio Roberto Silva. **Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios**. 342 p. Tese Doutorado- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1991.

FONTES, F. F.. **Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR 6118:2003**. 120p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.

KIMURA, A.. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais**. v.1, 1º ed. São Paulo: Pini, 2007.

OLIVEIRA, D. R. C. D.; RIBEIRO, R. J. D. C. **The Collapse of Real Class building**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, Volume 11, nº 2, p. 357-388. 2018.

SORIANO, H. L.; LIMA, S. S.. **Análise de estruturas – Método das forças e método dos deslocamentos**. 2º ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2006.

## GERENCIAMENTO, CONTROLE E APLICAÇÃO DO MÉTODO - *LEAN CONSTRUCTION* NA CONSTRUÇÃO CIVIL

*Data de aceite: 01/08/2022*

**Diego Ramos de Melo**

Gerenciamento de Obras, Tecnologia e  
Qualidade da Construção  
Instituto de Pós-Graduação - IPOG  
Cuiabá, MT

**RESUMO:** O Presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da “Lean Construction”, seus princípios, aplicações e efeitos, efetuando sua implantação em processos na construção civil. A Lean Construction em sua origem percebe-se que para sua eficiência para utilização no Brasil devem acontecer adaptações para ser utilizada. A indústria da construção civil é um setor que apresenta um baixo nível de produtividade e altos níveis de desperdícios, tanto com materiais e mão de obra. Através dos prejuízos gerados, torna-se cada vez mais importante a aplicação de um gerenciamento e controle de produção. A medida que as empresas se tornam cada vez mais competitivas, a busca pela sobrevivência das empresas vem crescendo aceleradamente, e com isso a busca de alternativas inteligentes para solucionar o problema, pensando na qualidade, produção e acima de tudo reduzindo os custos. A “Lean Construction”, traduzindo, é popularmente conhecida como construção enxuta, é uma filosofia de gestão de produção, baseada no Sistema Toyota de Produção. A construção enxuta foi denominada por Koskela (1992) e visa eliminar desperdícios, simplificar processos, agregar valor ao produto atendendo

as necessidades do cliente e reduzir prazos. A “Lean Construction” propõe uma mudança conceitual do paradigma do processo tradicional de produção, trazendo inovação e melhorias em todos os seus processos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lean Construction. Construção Enxuta. Gerenciamento. Controle de Produção.

**ABSTRACT:** The present work has as main objective the study of "Lean Construction", its principles, applications and effects, carrying out its implementation in processes in civil construction. Lean Construction in its origin can be seen that for its efficiency for use in Brazil, adaptations must be made to be used. The construction industry is a sector that has a low level of productivity and high levels of waste, both with materials and labor. Through the losses generated, it becomes increasingly important to apply production management and control. As companies become increasingly competitive, the search for survival of companies has been growing rapidly, and with that the search for intelligent alternatives to solve the problem, thinking about quality, production and above all reducing costs. The “Lean Construction”, translating, is popularly known as lean construction, is a philosophy of production management, based on the Toyota Production System. Lean construction was called by Koskela (1992) and aims to eliminate waste, simplify processes, add value to the product meeting customer needs and reduce deadlines. “Lean Construction” proposes a conceptual change in the paradigm of the traditional production process, bringing innovation and improvements

in all its processes.

**KEYWORDS:** Lean Construction. Management. Production control.

## 1 | INTRODUÇÃO

A Construção enxuta foi originalmente proposta em 1990 por Womack e Jones (WOMACK; JONES, 1992). O conceito de construção enxuta surgiu em 1992 (Lauri Koskela), quando nasceram seus onze princípios para aplicação da produção enxuta na construção civil. Womack e Jones (1996) apresentaram a evolução dos conceitos desta produção nos cinco princípios da Mentalidade Enxuta. Heineck et al. (2009) os reduziram a três: ciclo, fluxo e coordenação. O primeiro conduz a uma redução do tamanho do lote mediante a transformação das atividades a executar em ciclos repetitivos, o segundo se reflete em operações que não param e tenham uma sequência mais contínua possível e o terceiro foca na viabilização dos conceitos *Lean* pela coordenação das atividades.

O Sistema *Lean Construction* é uma metodologia baseada no sistema de produção de manufatura japonês, que visa a redução de desperdícios de prazo e recursos. Sua filosofia está voltada principalmente para o planejamento e controle da produção. Seus princípios adaptados à construção civil foram apresentados por Lauri Koskela (relatório técnico de 1992) – (JUNQUEIRA, 2006).

Segundo Lauri Koskela, o que define *Lean Construction*: “denominada como nova filosofia de gestão de produção, originada do Sistema Toyota de Produção – STP e adaptada para a construção civil”. Esse sistema de produção aumentou a competitividade com a identificação e eliminação de perdas. Perdas não se resumem apenas a produtos defeituosos gerados no Sistema de Produção em Massa (Fordismo ou Ford T. oposto ao método Toyota de produção), mas também perdas de recursos, mão de obra, “perda de tempo” e equipamentos em atividades que não agregam valor. Koskela, em 1992, publicou um trabalho acadêmico chamado “Application of the new production philosophy in the construction industry” (Aplicação da nova filosofia de produção na indústria da construção), no qual a mesma avaliou a aplicabilidade do sistema de produção da indústria automobilística na indústria da construção civil e assim originou a “Construção enxuta”. Quando se refere ao subsetor de edificações surgem diversos problemas, provenientes do alto índice de concentração de empresas neste setor e dificuldades complexas no seu gerenciamento. As mesmas se diferem de outros subsetores pela quantidade e diversidade de mão de obra (predominantemente não qualificada, justificada pela cultura Brasileira), insumos sem destinos e atividades produtivas em larga escala. Hoje, o gerenciamento de obras no Brasil é feito de forma improvisada, intuitiva (segundo instintos pessoais) e reativa (segue como base, modelos já visualizados anteriormente) resultando em baixa produtividade, falta de qualidade nos processos, elevados custos de produção, altos índices de desperdício, além de insatisfação dos clientes e/ou proprietários. Para isso, diversas

empresas do ramo da construção civil no Brasil têm buscado a melhoria contínua com implementações de Sistemas de Qualidade – SGQ, ISO9001, PBQP-H. Porém, grande parte dos processos, não são seguidos da forma correta, pois grande parte das empresas, não utilizam a tecnologia a favor do sistema da qualidade, deixando assim, um vácuo entre – Treinamento x Execução x Controle.

Isatto e Formoso (1998) declaram que a diferença entre o ambiente da construção e o originado no Sistema Toyota de Produção é usualmente considerado como uma importante restrição para aplicar a nova filosofia de produção na construção. Porém, esses autores esclarecem que a aplicação da nova filosofia de produção não implica em uma cópia integral ou parcial de habilidades e métodos do STP sem uma consideração crítica de fatores estruturais e ambientais da indústria.

Da mesma forma, Kurek (2005) afirma que a adaptação e a aplicação dos conceitos e princípios da produção enxuta, na construção, é um desafio, principalmente, porque esse processo representa a construção de uma teoria para o gerenciamento da construção.

Para Alarcón (1997), a indústria da construção é diferente da manufatura, onde o ritmo de produção é fundamentalmente regido de informações e fluxos de recursos. Isto se deve a sua grande variedade de área de trabalho e o intenso uso de mão-de-obra e equipamentos não estacionários. Segundo o mesmo autor, a organização, o planejamento, a alocação e o controle destes recursos são o que realmente determina a produtividade que pode ser alcançada. O modelo conceitual usado para analisar a construção que é de conversão de entradas em saídas do sistema e ignora importantes aspectos dos fluxos de informação e recursos.

## 2 | METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada entre o período de Maio a Julho de 2016, com ajuda de revisões bibliográficas de pesquisadores da área de Construção enxuta. Com objetivo de apresentar as diversas formas da apresentação do Gerenciamento, controle e aplicação do sistema *Lean Construction* – Construção enxuta.

Como definido por Gil (2008:50) a pesquisa bibliográfica “é desenvolvida a partir de materiais já publicados, constituído de livros e artigos científicos”. Partindo da definição deste autor a pesquisa foi dividida em quatro etapas. A primeira etapa foi pautada na seleção de fontes utilizando como critério de participação os diversos materiais que fornecessem dados vinculados ao objetivo deste artigo. A segunda etapa foi caracterizada pela coleta de dados através da leitura exploratória dos estudos selecionados na primeira etapa e posterior leitura seletiva para identificar os textos que realmente tinham conexão com o estudo em andamento. A terceira etapa consiste na análise e interpretação dos resultados. Nesta etapa são realizadas as leituras analíticas para ordenar as fontes de forma a possibilitar a extração das respostas. A etapa final consiste na discussão dos resultados apresentando

as semelhanças e contrapontos dos autores selecionados.

### **3 | O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO. COMO FERRAMENTA DE IMPLANTAÇÃO DA CONSTRUÇÃO ENXUTA**

Os princípios da Construção Enxuta deverão ser introduzidos nas empresas, através de técnicas, ferramentas, planejamento, controle e um dos pontos mais importante o Gerenciamento da aplicação do sistema, acima de tudo, voltado para o avanço tecnológico.

Nos últimos anos, alguns importantes avanços no planejamento e controle da produção (PCP), em empresas de construção, têm sido apresentados pela bibliografia da área, principalmente através da aplicação do método Last Planner de controle de produção.

Conforme Ballard (2000), através deste método consegue-se criar uma janela de confiabilidade para o sistema de produção, que facilita a aprendizagem e contribui para estabilizar o sistema de produção.

Este método foi proposto inicialmente por Ballard e Howell (1996) nos EUA, tendo sido ampliado e refinado em inúmeros estudos de caso. Apesar do seu sucesso, existe a necessidade de mais estudos, que permitam o seu desenvolvimento de forma integrada a outros sistemas de controle da empresa.

Assim, pode-se melhorar a compreensão dos requisitos necessários para a sua implementação bem-sucedida e, conseqüentemente, para o aperfeiçoamento do método (BULHÕES et al., 2003).

Neste sentido, o NORIE/UFRGS propôs um modelo para o planejamento e controle da produção, em empresas de pequeno porte, que contém os principais elementos do método Last Planner (FORMOSO et al., 1999).

Os elementos principais do Last Planner são o plano operacional, elaborado de acordo com a sistemática da Shielding Production (produção protegida) (BALLARD e HOWELL, 1997) e o Lookahead Planning (olhar a produção à frente) (BALLARD, 1997).

Bernardes (2001) apresenta uma proposta de planejamento e controle da produção, também baseado no método Last Planner. Esse é dividido em três níveis de planejamento, com diferentes horizontes de tempo: o planejamento de curto prazo, tratado como operacional; o planejamento de médio prazo, tratado como tático e o planejamento de longo prazo, tratado como estratégico.

Bertelsen e Koskela (2004) afirmam que em um tipo único de produção se torna necessário integrar os processos de concepção e produção. O produto único torna, nas fases posteriores do processo, o fluxo de informação tão importante quanto o fluxo de materiais e equipamentos, o que aumenta consideravelmente a complexidade do projeto.

A indústria da construção depende, em grande parte, da aplicação de um sistema informal de comportamentos e gestão para funcionar adequadamente. Como causa raiz dos problemas está a disparidade das características dos sistemas formais e informais em

relação às necessidades reais. O sistema formal (contratos, planos etc.) não reconhece a incerteza da interdependência das operações dos processos de construção. O sistema informal de gestão está orientado a manejar a incerteza e a interdependência, mas produz um clima de crise endêmica, que se torna perpetuante (KOSKELA, 2000).

A *Lean Construction* é a abordagem *Lean* no setor da construção e tem evoluído com identidade própria, seguindo um caminho particular e de entendimento diferenciado, mas com o sentido de tal como se verificou em outras indústrias com as ideias *Lean*, de obter melhoria da produtividade e bons resultados, isto é, valor para o cliente e, ao mesmo tempo, lucro para a empresa (PENEIROL, 2007). Traduzido para a construção civil, o modelo gerencial utilizado na manufatura traz agora respostas para um mercado diferenciado. E, apesar das diferenças, a conversão da *Lean Production* ou Produção Enxuta em *Lean Construction* ou Construção Enxuta gera enormes ganhos a esse setor (SOUZA; BRANDSTETTER; AMARAL, 2010). Para Isatto et al. (2000), a diferença básica entre a filosofia gerencial tradicional e a *Lean Production* é essencialmente conceitual. A mudança mais importante é a introdução de uma nova forma de entender os processos.

#### 4 | A APLICAÇÃO DOS 11 (ONZES) PRINCÍPIOS DA “LEAN CONSTRUCTION”

Quando se refere a “*Lean Construction*”, nota-se que a proposta de valor é a mudança conceitual do paradigma do processo de produção tradicional (já evidenciado como ineficiente) com a aplicação de onze princípios interativos entre si apresentados por Lauri Koskela (1992):

1. Reduzir a parcela de atividade que não agrega valor- (por exemplo, excesso de funcionários apenas em um setor ao invés de priorizar uma divisão eficaz que englobe todas as áreas de uma construção);
- Projeto – em organizações hierárquicas, quando uma tarefa é dividida em duas e executadas por diferentes especialistas. Atividades que não adicionam valor aumentam: inspeção, movimento e espera.
  - Desconhecimento – ocorre principalmente na esfera administrativa de produção, quando muitos processos não são desenvolvidos de maneira organizada e de acordo com as necessidades do canteiro.
  - Natureza da produção – é natural que, quando o trabalho em processo tem de ser movido de uma conversão para a próxima, ocorram atividades que não agregam valor, como defeitos e acidentes.

Isatto et al. (2000) salientam que o princípio da eliminação de atividades de fluxo não deve ser levado ao extremo. Existem atividades que não agregam valor ao cliente final, mas são essenciais à eficiência global dos processos, por exemplo, controle dimensional, treinamento de mão-de-obra e instalação de dispositivos de segurança.

2. Aumentar o valor do produto através da consideração das necessidades do cliente

(Entendendo que o cliente paga um valor “x” de acordo com as suas necessidades e sua satisfação);

- De acordo com Koskela (1992), o valor é gerado por meio do cumprimento dos requisitos do cliente, não como um mérito inerente de conversão. Para cada atividade existem dois tipos de clientes, o cliente interno, que será o responsável pela próxima atividade, e o cliente final.
- O conceito de valor está diretamente vinculado à satisfação do cliente, não sendo inerente à execução de um processo. Devem ser identificados claramente os requisitos dos clientes internos e externos e essa informação deve ser considerada no projeto do produto e na gestão da produção (FORMOSO, 2002).
- Para Bernardes (2001), a busca desses requisitos, em um momento que possibilite a sua consideração no planejamento da produção, evita o retrabalho e pode dar a noção para o cliente de que a empresa é organizada e que se preocupa com o prazo de entrega da obra.

### 3. Reduzir a variabilidade (variações e/ou mudanças);

- Existem duas razões para reduzir a variabilidade: inicialmente, do ponto de vista do cliente, um produto uniforme é mais bem aceito; em segundo lugar, variabilidade, especialmente de duração de atividade, aumenta o volume de atividades que não agregam valor (KOSKELA, 1992).
- Esse Autor também considera que a padronização de atividades e a implementação de procedimentos-padrão são, muitas vezes, o meio para reduzir a variabilidade nos processos de conversão e processos de fluxo.
- Bernardes (2001) observa que o processo de planejamento e controle da produção facilita a implantação deste princípio, quando se busca a proteção da produção mediante a consideração de tarefas passíveis de serem executadas.

### 4. Reduzir o tempo de ciclos;

- Para Koskela (1992), um fluxo de produção pode ser caracterizado pelo tempo de ciclo, que se refere ao tempo requerido para um material atravessar o fluxo. O tempo de ciclo pode ser definido como a somatória dos tempos necessários para processamento, inspeção, espera e movimentação.
- Conforme esse Autor, a melhoria básica racional na nova filosofia de produção é comprimir o tempo de ciclo, que força a redução de inspeção, de movimento e de tempo de espera. Segundo Isatto et al. (2000), a redução do tempo de ciclo é um princípio que tem origem na filosofia just-in-time e envolve a eliminação de atividades de fluxo que fazem parte do ciclo de produção, além de mudanças nas relações de precedência entre atividades, eliminando interdependências das mesmas, de forma que possam ser executadas em paralelo.

### 5. Simplificar os processos através da redução do número de passos ou partes;

- Segundo Koskela (1992), a simplificação pode ser entendida como a redução do número de componentes do produto ou do número de passos no fluxo de material ou informação. A simplificação pode ser realizada, eliminando atividades que não agregam valor ao processo de produção, pela reconfiguração de partes ou passos que adicionam valor, ou por mudanças organizacionais.
- Isatto et al. (2000) identificam algumas formas para atingir a simplificação, como a utilização de elementos pré-fabricados, uso de equipes polivalentes e o planejamento eficaz do processo de produção, buscando eliminar interdependências e agregar pequenas tarefas em atividades maiores.
- Bernardes (2001) aponta que outra forma de se garantir a implementação deste princípio é por meio do planejamento e controle da produção, na medida em que se consegue estabelecer, durante a etapa de preparação do processo de planejamento, o desenvolvimento da produção em zonas de trabalho similares.

#### 6. Aumentar a flexibilidade de saída;

- De acordo com Koskela (1992), uma das maneiras para se atingir este princípio são projetos de produtos ou componentes modulares combinados com outros princípios, especialmente redução do tempo de ciclo e transparência.
- Para Isatto et al. (2000), a aplicação deste princípio pode ser por meio da redução do tamanho dos lotes, do uso da mão-de-obra polivalente, da customização do produto o mais tarde possível, e dos processos produtivos que permitam a flexibilidade do produto sem grandes ônus para a produção.
- Romanel (2009) considera que este princípio pode parecer contraditório ao da simplificação. Contudo, a flexibilidade deve ocorrer simultaneamente à simplificação, bem como com os demais princípios, especialmente a redução do tempo de ciclo e a transparência.

#### 7. Aumentar a transparência do processo;

- A falha de transparência no processo aumenta a possibilidade e reduz a visibilidade de erros, e diminui a motivação por melhorias. O processo diretamente visível pode ser atingido mediante os meios organizacionais ou físicos e exposição pública de informações (KOSKELA, 1992).
- Da mesma forma, Isatto et al. (2000) observam que o aumento da transparência de processos tende a tornar os erros mais fáceis de serem identificados no sistema de produção, ao mesmo tempo que aumenta o acesso às informações necessárias à execução dos serviços.

#### 8. Focar o controle no processo global (utilizando o método “partes” somadas para um “todo” produtivo);

- Há pelo menos dois pré-requisitos para focar controle no processo global. Primeiro, o processo completo tem de ser mensurado e, em segundo lugar, é preciso um responsável pelo controle de todo o processo (KOSKELA, 1992).

- Para esse Autor, o controle de fluxo segmentado ocorre por duas causas: o fluxo atravessa diferentes unidades em uma hierarquia ou cruza a organização. Para fluxos Inter organizacionais, a cooperação de longo prazo com fornecedores e a construção de equipes tem de ser introduzidas com a meta de obter benefícios mútuos de um fluxo total otimizado.

#### 9. Estabelecer melhorias contínuas no processo;

- Para Koskela (1992), o esforço para redução do desperdício e aumento de valor do produto é uma atividade interativa, que deve ocorrer continuamente. Esse Autor sugere alguns métodos para institucionalização da melhoria contínua: medir e monitorar melhorias, definir metas de superação, atribuir responsabilidade da melhoria a todos os trabalhadores, usar procedimentos padrões e conectar melhoria ao controle. A meta é eliminar a raiz dos problemas em vez de enfrentar seus efeitos.
- Bernardes (2001) afirma que a melhoria contínua pode ser implementada no planejamento e controle da produção à medida que são analisadas as decisões tomadas para correção de desvios oriundos da coleta de dados do plano de curto prazo.

#### 10. Introduzir melhoria dos fluxos com a melhoria de conversões;

- De acordo com Koskela (1992), para qualquer processo produtivo, os aspectos de fluxo e de conversão têm um potencial diferente para melhoria: quanto maior a complexidade do processo de produção, maior é o impacto da melhoria de fluxo, também para os maiores desperdícios inerentes ao processo produtivo, maiores são os benefícios na melhoria de fluxo em comparação à melhoria na conversão.
- A melhoria de fluxo pode ser iniciada com menores investimentos, mas usualmente requer um tempo maior que uma melhoria na conversão. A questão é que a melhoria de fluxo e a melhoria de conversão estão intimamente ligadas (KOSKELA, 1992).
- Por outro lado, Isatto et al. (2000) observam que as melhorias no processamento são mais vantajosas quando existem perdas inerentes à tecnologia que está sendo utilizada, assim seus efeitos serão mais imediatos.
- Bernardes (2001) recomenda que este princípio deve ser observado durante a etapa de projeto, bem como ao longo da formulação da estratégia de ataque à obra.

#### 11. Fazer “benchmarking” (processo utilizado no EUA que utiliza a comparação de produtos, serviços, práticas empresariais e é um importante instrumento de gestão de pessoas)

- Segundo Isatto et al. (2000), consiste em um processo de aprendizado a partir de práticas adotadas em empresas líderes num determinado segmento ou

aspecto específico da produção. Koskela (1992) acredita que com frequência benchmarking é um estímulo importante para atingir avanços em melhoria mediante a reconfiguração de processos.

- Carvalho (2008) esclarece que esse não é um método aleatório de cópia de informação, mas sim um processo estruturado etapa a etapa, com o objetivo de avaliar os métodos de trabalho no mercado. Ainda segundo esse Autor, os resultados desse processo permitem às empresas comparar seus produtos, serviços e métodos de trabalho aos de organizações representantes das melhores práticas.
- Para Guillou, Santos e Serra (2010), esses princípios são o fundamento teórico da filosofia e devem transformar-se em diretrizes práticas que serão utilizadas pela empresa no canteiro de obras.
- Lorenzon (2008) considera que vários desses princípios são muito próximos e se interdependem como explicados a seguir:

Os princípios “reduzir as atividades que não agregam valor”, “reduzir o tempo de ciclo” e “simplificar pela minimização do número de passos e partes” buscam identificar, reduzir ou eliminar as atividades denominadas de desperdícios. Aspectos de qualidade podem ser contemplados no princípio “reduzir a variabilidade”. O gerenciamento de prazo pode ser considerado no princípio “reduzir o tempo de ciclo”. As necessidades do cliente encontram-se atendidas em “melhorar o valor do produto através da consideração sistemática dos requisitos do cliente” e “melhorar a flexibilidade do produto”.

## 5 | APLICAÇÃO DO *LEAN CONSTRUCTION* NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Um dos maiores problemas encontrados atualmente de gestão e planejamento da construção civil em centros urbanos no Brasil é um relativo atraso tecnológico, quando comparado a outros países, o desperdício, de materiais, mão-de-obra e a baixa produtividade, são fatores que ocorrem devido às dificuldades de contratação de mão-de-obra qualificada, planejamentos inadequados, inspeção e controle das atividades desenvolvidas dentro do canteiro, ou até mesmo a soma de mais de um desses problemas.

Como possível solução do problema de baixa produtividade, estaria ligada ao gerenciamento da obra, essa atividade pretende igualar a produção em cada fase do processo, como ocorria nas indústrias.

Porém devido à falta de conhecimentos bibliográficos sobre o assunto e as dificuldades de implantação devido ao tempo de adaptação, realizações de treinamentos e altos investimentos iniciais, são fatores que acabam desestimulando a sua implantação.

No Brasil, diversos núcleos, institutos e universidades vêm se destacando no estudo e desenvolvimento de métodos de aplicação da *Lean Construction* como uma forma de consolidação do novo paradigma.

Com a mudança de conceitos a produção na construção civil, mudou a velha forma

de ver a produção e passou a visualizar sob o prisma de novo modelo da construção enxuta. Isatto (2000) justifica que o modelo de conversão não é errado, mas apresenta-se ineficiente frente a gama de complexidade dos sistemas produtivos e dos novos conceitos de eficiência e eficácia atualmente considerados.

Conceitos apenas não promovem mudanças se não tiverem métodos e técnicas para que seja possível operacional, transformar em ações aquilo que é pretendido pelas definições teóricas. Sendo assim a fixação das bases teóricas que deve orientar a produção deve acontecer e estar muito bem definida e organizada. Recursos práticos em uma obra viabilizam alinhar o sistema produtivo com o modelo desejado.

A estratégia da organização lida com as definições conceituais e define o modelo bem como, as diretrizes a serem seguidas. O nível tático deve assimilar esses conceitos trabalhando entre o campo teórico e o operacional, possibilitando condições para que a produção aconteça de acordo com o sistema proposto.

Devem-se operacional os conceitos de forma a torná-los aplicáveis. Isto é, as mudanças são necessárias operar a produção sob a ótica da construção enxuta. Essas devem ser relativas ao assunto no processo de solução de problemas e tomada de decisões abrangendo assim atitudes gerenciais.

Na construção enxuta um processo é constituído de sub processos que consiste em um fluxo de materiais, desde a matéria prima até o produto final de acordo com a filosofia gerencial proposta por Koskela.

Estes processos são constituídos por atividades de transporte, espera, processamento ou conversão e inspeção. Dessas atividades, somente o processamento agrega valor ao produto final, por esta razão, as outras atividades são denominadas atividades de fluxo.

Algumas dessas atividades como, controle dimensional, treinamento da mão-de-obra e instalação de dispositivos de segurança não agregam valor ao cliente, mas são essenciais a eficiência global dos processos.

Segundo FORMOSO [2000], estima-se que dois terços (67%) do tempo gasto por trabalhadores em um canteiro de obras são em atividades que não agregam valor.

Segundo SHINGO [1996], produção é um fluxo de material e/ou de informação desde a matéria prima até o produto final. Neste fluxo o material é processado (conversão), é inspecionado, está parado ou está em movimento.

Estas atividades são diferentes. O processamento representa a conversão da produção, a inspeção, o movimento e o armazenamento representando aspecto de fluxo de produção.

Uma característica importante da *Lean Construction* é a geração de valor que estar diretamente vinculada à satisfação do cliente, tanto internos como externos.

## 6 | CONCLUSÃO

As pesquisas realizadas criaram, um conjunto de ações explanados de maneira simples e objetiva, que visam auxiliar profissionais ligados à construção civil pensar e agir sob a ótica desse novo paradigma de gerenciamento, bem como desenvolver um planejamento orientado.

A Construção Enxuta não implanta novas tecnologias no canteiro de obras, ao invés disso, ela sugere ideias e soluções alternativas para a melhoria dos processos construtivos através da racionalização dos processos e otimização dos fluxos existentes entre diversas atividades necessárias à execução da obra.

O ramo da construção civil está ficando mais competitivo com o passar dos anos, e incumbe a cada empresa a utilização de estratégias para ter sucesso nesta disputa pelo mercado. As ferramentas da construção enxuta auxiliam as construtoras para que tenham um maior controle na produção e na gestão de suprimentos, procurando evitar retrabalhos e desperdícios que são comuns nesse importante seguimento.

A complexidade de aplicação de ferramentas e técnicas *Lean* em um setor pouco qualificado como a construção civil só obterá êxito se for feito de maneira gradual e simplificada. Isto porque, em uma vertente temos a comunidade científica à frente do pensamento. Em outra, no entanto, temos um agrupamento de trabalhadores formado por: diretores engenheiros projetistas, gerentes de obras, técnicos de planejamento, mestre de obras, encarregados, pedreiros, carpinteiros, serventes, inseridos na rotina das obras, em sua grande parte governados por antigos conceitos. Em ambas vertentes, ainda existem extremos, ou seja, pessoas ligadas a conceitos ainda em formação, muitas vezes ainda tratados com ensaios teóricos, e outros operando através de técnicas ultrapassadas, executadas por conceitos obsoletos, mas que funcionam. Precisamos estabelecer um elo de troca entre essas pessoas para que se possa, dessa maneira, levar a mudança de paradigma de gestão do setor da construção civil.

A aplicação dos princípios da construção enxuta propostos por Lauri Koskela proporcionou melhorias perceptíveis no sistema de produção da obra em estudo. A introdução das ferramentas através das metodologias adotadas neste estudo e das boas práticas dos mesmos é uma maneira de introduzir os elementos fundamentais dessa nova filosofia de produção.

Assim sendo, essa filosofia pode ser destacada como uma das melhores soluções para o sistema de gerenciamento da construção. As práticas de gestão fundamentadas nos princípios e métodos da construção enxuta são totalmente viáveis a qualquer tipo de empreendimento na Construção Civil, que busca aperfeiçoar todo o processo de produção, desde a concepção do projeto até a conclusão da obra.

Como a Construção Enxuta não se baseia em implantação de novas tecnologias, ela indica ideias e soluções alternativas para a melhoria dos processos construtivos através da

racionalização das atividades e otimização dos fluxos existentes, necessárias à execução da obra. Embora pareça ser um processo de fácil implementação, na aplicação dessa metodologia precisa-se de muita dedicação, empenho e organização, para que seus resultados sejam alcançados com sucesso, pois se trata de uma mudança não somente administrativa, mas cultural.

Pouco adianta investir apenas nos processos de produção na Construção Civil, deve-se investir também no sistema de gestão, através da utilização de um novo modelo de gestão baseado em aspectos organizacionais modernos e numa logística eficiente onde se procure aperfeiçoar os fluxos físicos e das informações, levando em consideração as atividades essenciais para o seu desenvolvimento. As evidências coletadas de melhorias no processo de produção são analisadas abrangendo cada um dos onze princípios da *Lean Construction*.

Conclui-se, ainda, que é um grande desafio a utilização da nova filosofia de produção. Nesse sentido, é preciso fazer uma mudança de paradigma atual da construção, baseado nos princípios da produção no antigo modelo de conversões, que quando comparados as novas filosofias de produção emergentes, como a Construção Enxuta, apresentam-se ineficientes e incapazes de gerar melhorias nos fluxos. Um fator relevante, para a implantação das diretrizes propostas, depende tanto de características comportamentais e organizacionais das empresas, quanto de características conjuntas da obra. Aspectos como o comprometimento da alta gerência, a priorização das necessidades da obra e o treinamento dos funcionários, revelam-se essenciais ao sucesso na implantação dos princípios da Construção Enxuta.

## REFERÊNCIAS

ALARCÓN, L. (Ed.). **Herramientas para identificar e reduzir perdas em projetos de construcción.** *Revista de Ingeniería de Construcción*, n. 15, p. 37-45, enero/julio. 1997

BALLARD, G. **The last planner system of productions control.** 2000. (Thesis) - Dpt. Of Civil Engineering, University of Birmingham, Birmingham, U.K., June, 2000.

BALLARD, G; HOWELL, G. **Shielding Production: Na essential step in production control.** **Technical Report No. 97-1**, Construction Engineering and Management Program, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 1996.

BERNARDES, M. M. S. **Planejamento e controle da produção para empresas da construção civil.** Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

BERTELSEN, Sven; KOSKELA, Lauri. **Construction beyond lean: a new understanding of construction management.** In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 12, 2004, Dinamarca. Proceedings. Dinamarca, 2004.

- BERTELSEN, Sven; KOSKELA, Lauri. **Managing the three aspects of production in construction**. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 10, 2002, Brasil. Proceedings. Brasil, 2002.
- BULHÕES, I.R.; AKKARI A.; SOUSA, M. G. L. de, FORMOSO, C. T. **Informatização do planejamento e controle de produção**. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO DA QUALIDADE E ORGANIZAÇÃO TRABALHO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO-SIBRAGEC, 2003, 3, São Carlos . Anais..., São Carlos –SP, 2003.
- CARVALHO, Bruno Soares de. **Proposta de uma ferramenta de análise e avaliação das construtoras em relação ao uso da Construção Enxuta**. 2008. 141f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- FORMOSO, C. T. et al. **As perdas na construção civil: conceitos, classificações e seu papel na melhoria do setor**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2000.
- GHINATO, P. (2000) - **Elementos fundamentais do Sistema Toyota de Produção**. In: **Produção e Competitividade: Aplicações e Inovações**. Ed.: Almeida & Souza, Editora Universitária da UFPE, Recife.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisas**. 4ª. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GUILLOU, Felipe A.; SANTOS, Adriana O.; SERRA, Sheila M. B. **Avaliação da Utilização dos princípios da Construção Enxuta: caso de duas construtoras de médio porte**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13, 2010, Canela – RS. Anais... Canela, 2010.
- HOWELL, G.; KOSKELA, L. **Reforming project management: the rule of lean construction**. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, O., 2000, Brighton, UK. Brighton, 2000.
- HEINECK, L.F.M., MACHADO R. L. **A Geração de cartões de produção na programação enxuta de curto prazo e obra**. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO DA QUALIDADE E ORGANIZAÇÃO TRABALHO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – SIBRAGEC, 2, 2001, Fortaleza. Anais...Fortaleza, 2001.
- ISATTO, E. L. et al. **Lean construction: diretrizes e ferramentas para o controle de perdas na construção civil**. SEBRAE. Porto Alegre. 2000.
- JUNQUEIRA, L. E. L. **Aplicação da lean construction para redução dos custos de produção da casa 1.0**. Universidade de São Paulo. 2006.
- LORENZON, Itamar Aparecido. **A medição de desempenho na construção enxuta: estudos de caso**. 2008. 219f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- KOSKELA, L. **Application of the New Production Philosophy to Construction**. Technical Report, Filand, CIFE, 1992.

KOSKELA, L. **An exploration towards a production theory and its application to construction.** Espoo: VTT. Building Technology, 2000.

KUREK, J. **Introdução dos princípios da filosofia de construção enxuta no processo de produção em uma construtora em Passo Fundo-RS.** Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 2005.

KOSKELA, L. (1999) - **We need a theory of construction.** Berkeley-Stanford CE&M Workshop. Defining a Research Agenda for AEC.

PENEIROL, Nelson Luís Sampaio. **Lean Construction em Portugal: caso de estudo de implementação de sistema de controlo da produção Last Planner.** 2007. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

ROMANEL, Fabiano Barreto. **Jogo “Desafiando a Produção”: uma estratégia para a disseminação dos conceitos da Construção Enxuta entre operários da construção civil.** 2009. 154f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SOUZA, Leiliane Santana; BRANDSTETTER, Maria Carolina Gomes de Oliveira, AMARAL, Tatiana Gondim. **A Lean Construction no cenário da construção civil da cidade de Goiânia.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13, 2010, Canela, Anais... Canela, 2010.

SHINGO, S. (1996) - **O Sistema Toyota de Produção doponto de vista da engenharia de produção;** 2ª edição - Porto Alegre: Bookman.

TAKAMATSU, Renata Toyoda. **Gerenciamento de projeto, materiais e mão-de-obra na construção civil.** Barretos: Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, 2007.

WOMACK, J.P.; JONES, D.R. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas: Elimine o desperdício e crie riquezas.** Rio de Janeiro: Campus, 1998.

WOMACK, K. P.; JONES, D.T; ROOS, D. **A Máquina que Mudou o Mundo.** Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1992.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**ARMANDO DIAS DUARTE** - Possui graduação em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Pernambuco (2016), com um período de três meses, através de um intercâmbio realizado na cidade de Hof – Alemanha, desenvolvendo trabalhos de gestão de resíduos sólidos, em conjunto com a Educação Ambiental. Em 2018 concluiu o mestrado acadêmico em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco com ênfase em tecnologia ambiental. Atualmente (2019) realiza o doutorado na área de otimização em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pernambuco. Tem experiência nas áreas da Educação Ambiental, Análise de Ciclo de Vida, Gestão Ambiental, Recursos Hídricos e Sustentabilidade. Atua com consultorias empresariais e acadêmicas.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Acidez 1, 2, 5, 6, 7, 8, 33

Agregado miúdo 36, 45, 46, 47, 97, 105, 107, 112

Álcali-ativado 103, 109, 110, 111

Análise por elementos finitos 165, 186

ANSYS 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 177, 178, 180, 184, 185, 186

Argamassa 65, 88, 94, 97, 102, 103, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112

Asphalt mastic 49, 50, 51, 55, 61, 62

Asphalt mixture 49, 50, 51, 52, 53, 60

### B

Benefícios 10, 11, 37, 93, 94, 163, 248

Binder 49, 50, 51, 52, 53, 55, 57, 58, 59, 60, 76, 103, 104, 112

### C

Cerâmica vermelha 65, 75, 103, 104, 105, 111, 112

Characterization 53, 54, 76, 77, 79, 81, 83, 85, 89

Civil construction 2, 77, 79, 80, 86, 87, 103, 104, 155, 156, 241

Coco 36, 37, 38, 39, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48

Concreto 28, 36, 38, 39, 45, 46, 47, 65, 76, 88, 89, 90, 91, 92, 96, 97, 98, 101, 102, 104, 113, 121, 126, 131, 137, 159, 162, 163, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 190, 195, 207, 208, 210, 211, 213, 216, 218, 220, 221, 223, 225, 232, 233, 234, 239, 240

Construção civil 1, 7, 8, 37, 47, 63, 65, 75, 89, 103, 104, 105, 111, 137, 155, 163, 165, 241, 242, 243, 245, 249, 251, 252, 253, 254

Contaminação 2, 6, 10, 24, 25, 26, 32, 34, 152

### D

Danos 10, 13, 15, 18, 24, 125, 130, 134, 136, 137

Densidade 17, 115, 117, 121, 128, 138, 139, 140, 152

### E

Enchente 125, 127, 128, 129, 131, 133, 134, 135

Estrada 10, 21, 135

## **F**

Filler 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 62, 84, 93, 95

## **G**

Gerenciamento de riscos 125

## **H**

Hidráulica 113, 124

Hidrologia 23, 113

## **I**

Impactos 1, 3, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 37, 104, 125, 127, 130, 135, 138, 140

Impressão 3D 63, 65, 66, 68, 74

Inundação 113, 130, 135

## **J**

Jazigos 25, 27, 28, 29

## **L**

Litoral 6, 138, 153

## **M**

Manufatura aditiva 63

Massa cerâmica 63, 73

Matriz 10, 11, 12, 13, 22, 24, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 65, 97, 159

Meio ambiente 2, 11, 14, 19, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 103, 137, 139, 152, 153, 163

## **N**

New materials 77

## **P**

Patologia da construção 125

Pavimento intertravado 90, 91, 92, 96, 102

Piscinão 113

Poluição 2, 6, 14, 22, 24, 25, 26, 28, 32, 34, 37, 145

População 10, 13, 14, 15, 17, 21, 25, 26, 33, 35, 118, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 134, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 150, 152, 153

Precipitação 1, 2, 3, 4, 116, 129

Pressão 24, 27, 32, 68, 138, 152, 234

Processing 77, 78, 79, 80, 88, 89

## **R**

RCC 63, 65

Resíduo de construção civil 63

Resistência à compressão 36, 39, 46, 47, 63, 65, 69, 70, 71, 90, 92, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 161

Riscos 15, 17, 24, 25, 30, 32, 33, 125, 127, 128, 136

## **S**

Saúde 5, 8, 17, 24, 25, 26, 29, 30, 34

Sílica ativa 90, 93, 95, 96, 97, 99, 101

Slate waste 77, 80, 82, 83, 84, 87, 89

Soluções construtivas 63, 155

Sustentabilidade 102, 103, 137, 152, 163, 255

## **T**

Taipa de pilão 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164

## **V**

Variáveis 10, 12, 48, 165, 166, 169, 172, 174

Vigas em concreto armado 165, 168, 174

# ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e  
tecnológicas e aspectos ambientais 2

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 



  
Atena  
Editora

Ano 2022

# ENGENHARIA CIVIL:

Demandas sustentáveis e  
tecnológicas e aspectos ambientais 2

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 



  
Atena  
Editora

Ano 2022