

## **ALCONPAT Internacional**

### **Membros Fundadores:**

Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**  
Antonio Carmona Filho - **Brasil**  
Dante Domene – **Argentina**  
Manuel Fernández Cánovas – **España**  
José Calavera Ruiz – **España**  
Paulo Helene, **Brasil**

### **Junta Directiva Internacional:**

#### **Presidente de Honor**

Carmen Andrade Perdrix, **España**

#### **Presidente**

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

#### **Diretor General**

Pedro Castro Borges, **México**

#### **Secretario Ejecutivo**

César Juárez Alvarado, **México**

#### **Vice-presidente Técnico**

Pedro Garcés Terradillos, **España**

#### **Vice-presidente Administrativo**

Luis Álvarez Valencia, **Guatemala**

#### **Tesoureiro**

Jose Manuel Mendoza Rangel, **México**

#### **Gestores**

Enrique Cervera Aguilar, **México**  
Paulo Helene, **Brasil**

## **Revista ALCONPAT**

### **Editor em Chefe:**

Dr. Pedro Castro Borges  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del  
Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida  
(CINVESTAV IPN – Mérida)  
Mérida, Yucatán, **México**

### **Co-Editor em Chefe (2022-2023):**

Dra. Edna Possan  
Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná, Curitiba, **Brasil**

### **Editor Ejecutivo:**

Dr. José Manuel Mendoza Rangel  
Universidad Autónoma de Nuevo León,  
Facultad de Ingeniería Civil  
Monterrey, Nuevo León, **México**

### **Editores Asociados:**

Dr. Manuel Fernández Cánovas  
Universidad Politécnica de Madrid.  
Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.  
Buenos Aires, **Argentina**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del  
Instituto Politécnico Nacional (Unidad Saltillo)  
Saltillo, Coahuila, **México**.

Dra. Oladis Troconis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión

Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco

Universidade Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de

Monterrey, Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Filippo Ubertini

Universidad de Perugia,

Perugia, **Italia**

Dr. Ravindra Gettu

Instituto Indio de Tecnología de Madrás,

Chennai, **India**



## CONTENIDO

Página

### REVISÃO

**Machado, E. L., Pasdiora, L., Santos, A. P. L., Santos Filho, M. L.:** Identificação de critérios para avaliação de edificações escolares. 143 - 161

**Moreno, A., Ponce P., Múzquiz, E., Avalos, F.:** Resíduos de mármore em materiais de construção: uma revisão do uso do pó de mármore em argamassas, concreto e tijolos. 162 - 183

### PESQUISA BÁSICA

**Ferreira, F. G. S., Dias, L. V., Soares, S. M., Castro, A. L.:** Influência da cura térmica nas propriedades física e mecânica de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro. 184 - 199

**Silva, R. R. C., Bertoldo, C.:** Simulação de manifestações patológicas em parede diafragma através de propagação de ondas ultrassônicas. 200 - 209

**Cattelan, R., Cielo, L., Santos Lübeck, A., Neto, A. B. S.:** Análise da influência da variação da excentricidade de cordoalhas engraxadas no comportamento estrutural de lajes lisas protendidas. 210 - 226

**Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Chávez, H., Navarrete, M., Arreola, M., Borrego, J., Equihua, L., Núñez, E., Miranda, O.:** Modificações do envelope de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos. 227 - 247

### PESQUISA APLICADA

**Ramos, A. L., Bauer, E.:** Estudo da ação de agentes de degradação de fachadas associados à temperatura e a chuva dirigida em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. 248 - 262

### CASO DE ESTUDO

**Hernández Oroza, A., Berreo Alayo, E., Expósito Mendez, R.:** Avaliação não destrutiva do estado de conservação das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração. 263 - 278

**Coni, G., Tafuri, A., Costa, A., Sakuma, G.:** Degradação do concreto através da formação de ácido sulfúrico biogênico em uma Estação Elevatória de Esgoto (EEE). 279 - 295

**Hernández Oroza, A., Diomedes Almeida, A., Romeo Sáez, A., Cuétara Pérez, P. R.:** Diagnóstico e proposta de solução para as lesões presentes na laje do Convento de Santa Clara de Asís. 296 - 310

**REVISTA DA ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE CONTROLE DE QUALIDADE, PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE CONSTRUÇÃO**

<http://www.revistaalconpat.org>

É motivo de satisfação e alegria para a equipe da Revista ALCONPAT ver publicado o segundo número do nosso décimo segundo ano.

O objetivo da Revista ALCONPAT (RA) é a publicação de produção citável (pesquisa básica ou aplicada e resenhas), pesquisa documental e estudos de caso, relacionados aos temas de nossa associação, ou seja, controle de qualidade, patologia e recuperação do construções.

Esta edição V12 N2 começa com um trabalho do **Brasil**, onde E. L. Machado e colegas identificam quais critérios devem ser considerados na avaliação de edifícios escolares, por meio de revisão sistemática da literatura, consulta de regulamentos e diretrizes governamentais e consultas a especialistas. A pesquisa foi realizada em 3 etapas: 1) revisão sistemática da literatura e 2) revisão das normas e diretrizes nacionais para identificação dos critérios e 3) ponderação dos critérios, por meio da aplicação do método Delphi. Foram identificados 70 critérios de avaliação, que foram agrupados em 11 categorias e ponderados por especialistas consultores. A identificação de critérios, conforme apresentada nesta pesquisa, visa contribuir para o desenvolvimento de técnicas e métodos de avaliação, para posteriormente redigir um padrão de desempenho para edifícios escolares.

No segundo trabalho, do **México**, A. Moreno e colegas revisam os trabalhos realizados utilizando pó de mármore como substituto de cimento, areia ou agregado miúdo em concreto, argamassa e tijolos. Pesquisas realizadas em várias partes do mundo com diferentes procedimentos experimentais foram revisadas. Conclui-se que o pó de mármore pode ser utilizado como substituto parcial do cimento ou agregado miúdo (até 15%, dependendo do material a ser substituído), sem afetar a resistência à compressão das amostras ou peças, e independentemente da forma. Portanto, o pó de mármore não só ajuda a reduzir a poluição que gera, mas também a sua utilização como areia e pó, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

O terceiro artigo desta edição é do **Brasil**, onde F. G. S. Ferreira e colegas avaliam o impacto da cura térmica e o uso de empacotamento de partículas em compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho (UHPC), com e sem pó de vidro. Para isso, os corpos de prova foram moldados com 0% e 50% de pó de vidro (substituição volumétrica do cimento), além de duas misturas obtidas através do empacotamento de partículas. As amostras foram submetidas à cura térmica e cura úmida para comparar os efeitos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção por capilaridade. Os resultados indicaram que a cura térmica proporciona um ganho de resistência inicial. A aplicação do empacotamento de partículas nas doses de mistura resultou em uma melhora significativa nas propriedades das amostras

e o pó de vidro mostrou-se um substituto viável para o cimento.

No quarto artigo do **Brasil**, R. R. C. Silva e C. Bertoldo simulam manifestações patológicas em paredes diafragma através de concretos feitos com diferentes adições de polímero sintético, propondo obter modelos de previsão de resistência e rigidez através da propagação de ondas de ultrassom. Foram realizados ensaios de compressão para determinação da resistência e rigidez, bem como ensaios de ultrassom pelo método direto e indireto em concretos produzidos com diferentes concentrações de polímero sintético. Os resultados obtidos indicaram uma diminuição nas propriedades mecânicas e acústicas do concreto com o aumento da concentração de polímero sintético em sua preparação. Os modelos gerados pelo teste ultrassônico foram estatisticamente significantes, com nível de confiança de 95%, e as correlações estabelecidas em particular podem ser utilizadas na detecção de manifestações patológicas in loco.

O quinto artigo, de R. Cattelan e colaboradores, vem do **Brasil** e avalia a influência das variações de excentricidade de cabos em modelos com lajes planas pós-tensionadas. O correto posicionamento dos cabos na montagem de lajes lisas protendidas é fundamental para que o sistema estrutural alcance desempenho e segurança adequados. Foram analisados quatro modelos arquitetônicos diferentes com modificação da altura dos cabos em diferentes pontos e quantidade. Foram avaliadas as tensões de pré-compressão, tensões extremas na parte superior e inferior, deslocamentos verticais, balanceamento de carga e quantidade de aço passivo nas lajes. Para a análise foi utilizado o software ADAPT Floor Pro. O projeto segue as recomendações da NBR 6118:2014 e ACI 318:2019. Para os modelos avaliados, verificou-se que a variação na excentricidade vertical dos cabos na base da laje reduz ainda mais os valores das tensões aplicadas, em comparação com a variação no topo.

O sexto artigo desta edição é escrito por Elia Alonso e colegas do **México**, no qual analisaram as modificações apresentadas por diferentes estabilizantes (cal, cimento, fibra de nopal, líticos fluviais, líticos vulcânicos, sulfato de sódio e gesso) em propriedades e envelope. Falha de um solo argiloso remodelado natural de Santiago Undameo, em Michoacán, México. Granulometria, hidrometria, testes de índice, compressão simples e teste de Proctor foram realizados no solo argiloso; A variação nas propriedades de índice e envelope de falha foi determinada para as misturas estabilizadas. As adições propostas melhoram o comportamento de solos altamente plásticos, reduzindo deformações volumétricas e aumentando sua resistência mecânica normal, resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito interno. A pesquisa contribui favoravelmente para a restauração de construções de terra do patrimônio histórico, obras civis, patologias em edifícios e tecnologias de construção. A pesquisa foi realizada em um laboratório sob normas internacionais.

No sétimo artigo, do **Brasil**, Ana Lin Ramos e Elton Bauer estudam as condições de exposição a agentes degradantes em edificações localizadas em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Conhecer a ação do intemperismo é essencial para entender a degradação das fachadas. Para isso, foram selecionadas oito cidades: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos e Belém. Um modelo de construção de simulação higrotérmica foi definido



para avaliar radiação total, amplitude térmica, choque térmico, índice de intensidade de temperatura e chuva direcionada. Como resultado, as zonas de condição crítica são identificadas, fornecendo classificações de exposição. Para os agentes de temperatura e chuva direcionada, as áreas mais expostas são Goiânia e Belém. As zonas de exposição mais amenas são Belém para agente de temperatura e Niterói para chuva direcionada.

O oitavo trabalho é um estudo de caso de **Cuba**, onde Alberto Hernández Oroza e colegas fazem uma avaliação através de classificação visual e ensaios não destrutivos, o estado de conservação de 32 vigas de madeira para reutilização no projeto de restauração do edifício Narciso López do Centro Histórico de Havana. Para isso, foram feitas medições do teor de umidade, penetrômetro, estimativa do módulo de elasticidade e tensão de ruptura por velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados mostraram que 66% das vigas foram afetadas por apodrecimento, desfibramento e fissuração. Os ensaios realizados nas vigas deterioradas permitiram determinar que, para uma fiabilidade de 95%, das restantes 21 vigas foi possível reaproveitar 17 delas com uma densidade média de 0,4 g/cm<sup>3</sup>.

O nono trabalho deste número vem do **Brasil**. Neste estudo de caso, G. Coni e colegas apresentam o estudo realizado em uma estação de bombeamento de águas residuais após a observação de degradação severa. O ataque de ácido sulfúrico biogênico em sistemas de esgoto é amplamente estudado na literatura, entretanto, dados sobre situações reais de construção ainda são bastante limitados. Análises de concentração de H<sub>2</sub>S no ar, profundidade de carbonatação, ensaio de resistência à compressão, petrografia, MEV/EDS, DRX e determinações químicas foram realizadas em testemunhos de concreto extraídos acima do nível do efluente. Os produtos identificados na superfície foram gipsita, jarosita, hidróxido ferroso, cloreto ferroso e possivelmente hisingerita. Os resultados demonstram a presença na superfície tanto de produtos de dissolução de pasta de cimento quanto de barras de aço de 16 mm localizadas na região atacada.

O artigo que fecha a edição é de Alberto Hernández Oroza de **Cuba** e colegas, que diagnosticam e propõem uma solução para as lesões presentes nos pisos de madeira do Convento de Santa Clara. Para tanto, foram aplicados ensaios não destrutivos de resistografia e penetrômetro, estudos biológicos sobre a madeira e técnicas geomáticas para análise de deformação e dimensionamento das vigas. Os resultados do diagnóstico mostraram que 65% da laje composta por 98 vigas está acometida por podridões e organismos xilófagos. Estudos de densidade por comparação com valores de referência mostraram perda na dureza da madeira. Os resultados concluem que a restauração implica a necessidade de substituição de 17 vigas, e o reforço dos pés direitos e secções de vigas deslizantes.

É importante mencionar que os ONCyTS do Brasil e do México mantiveram a Revista Alconpat em seus índices de Revistas Científicas de Qualidade. Em particular, no México, a Revista Alconpat se consolidou em nível internacional e o Sistema Nacional de Pesquisadores (SNI) já a considera como um produto válido para a promoção e permanência de seus membros. Esta foi uma grande conquista, fruto do esforço de todos, autores, revisores e comissão editorial. Da mesma forma, é importante mencionar que a Revista Alconpat já

pertence ao Diretório de Periódicos de Acesso Aberto (DOAJ), o que é um passo definitivo para a aplicação de novos índices. A Alconpat também está fazendo um investimento financeiro significativo para que todos os seus números sejam marcados em XML-Jats para que possa ser avaliado em índices de maior prestígio. Parabéns e nosso agradecimento a todos.

Temos certeza de que os artigos deste número serão uma referência importante para os leitores envolvidos com questões de avaliação e caracterização de materiais, elementos e estruturas. Agradecemos aos autores participantes deste número pela disposição e esforço em apresentar artigos de qualidade e cumprir os prazos estabelecidos.

Em nome do Conselho Editorial

Pedro Castro Borges

Editor in Chief

## Identificação de critérios para avaliação de edificações escolares

E. L. Machado<sup>1\*</sup>, L. Pasdiora<sup>2</sup>, A. P. L. Santos<sup>3</sup>, M. L. Santos Filho<sup>4</sup>

\* Autor de Contato: [eduarda.lauck@gmail.com](mailto:eduarda.lauck@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.532>

Recepção: 25/03/2021 | Aceitação: 12/02/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

O objetivo desta pesquisa é identificar quais critérios devem ser considerados na avaliação de edifícios escolares, por meio de uma revisão sistemática da literatura, consulta a normas e diretrizes governamentais e consultas a especialistas. A pesquisa foi realizada em 3 etapas: 1) revisão sistemática da literatura, 2) revisão de normas e diretrizes nacionais, para identificação dos critérios e 3) ponderação dos critérios, por meio da aplicação do método Delphi. Foram identificados 70 critérios de avaliação, que foram agrupados em 11 categorias e ponderados por meio da consulta a especialistas. A identificação dos critérios conforme apresentado nesta pesquisa, visam contribuir para o desenvolvimento de técnicas e métodos de avaliação, para posteriormente compor uma norma de desempenho para edifícios escolares. **Palavras-chave:** infraestrutura escolar; desempenho de edifícios escolares; critérios de avaliação de edifícios escolares; revisão sistemática da literatura; delphi.

**Citar como:** Machado, E. L., Pasdiora, L., Santos, A. P. L., Santos Filho, M. L. (2022), "Identificação de critérios para avaliação de edificações escolares", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 143 – 161, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.532>

<sup>1</sup> Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o 1º autor contribuiu com as atividades de aplicação da técnica Delphi e discussão dos resultados, o 2º autor com a atividade de Revisão de Literatura, o 3º autor contribuiu com a ideia original e direcionamento da pesquisa e o 4º autor contribuiu com a seleção dos especialistas e revisão de normativas.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## Identification of criteria for evaluating school buildings

### ABSTRACT

The objective of this research is to identify which criteria should be considered in the evaluation of school buildings, through a systematic review of the literature, consultation of government norms and guidelines and consultations with experts. The research was carried out in 3 stages: 1) systematic review of the literature and 2) review of national standards and guidelines to identify criteria and 3) weighting of criteria, through the application of the Delphi method. 70 evaluation criteria were identified, which were grouped into 11 categories and weighted through consultation with experts. The identification of criteria as presented in this research, aims to contribute to the development of techniques and evaluation methods, to later compose a performance standard for school buildings.

**Keywords:** school infrastructure; performance of school buildings; school building evaluation criteria; systematic literature review; delphi.

## Identificación de criterios para la evaluación de edificios escolares

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación es identificar qué criterios se deben considerar en la evaluación de edificios escolares, a través de una revisión sistemática de la literatura, consulta de normas y directrices gubernamentales y consultas a expertos. La investigación se llevó a cabo en 3 etapas: 1) revisión sistemática de la literatura y 2) revisión de normas y directrices nacionales para identificar criterios y 3) ponderación de criterios, mediante la aplicación del método Delphi. Se identificaron 70 criterios de evaluación, los cuales fueron agrupados en 11 categorías y ponderados mediante consulta a expertos. La identificación de criterios, tal como se presenta en esta investigación, tiene como objetivo contribuir al desarrollo de técnicas y métodos de evaluación, para posteriormente, redactar una norma de desempeño para edificios escolares.

**Palabras clave:** infraestructura escolar; desempeño del edificio escolar; criterios de evaluación de edificios escolares; revisión sistemática de literatura; delphi.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

O ambiente escolar e os espaços internos desempenham um papel significativo na melhoria ou na obstrução dos processos de ensino e aprendizagem. Instalações escolares bem projetadas, mobiladas e conservadas adequadamente contribuem para um melhor desempenho acadêmico o que reflete positivamente no desenvolvimento dos alunos (Hassanain; Ali Iftikhar, 2015).

Conforme apontado por Cardoso (2017), os planejadores da infraestrutura escolar estão diante de um cenário em que há a necessidade de criar um espaço confortável e estimulante para as crianças, entretanto, não se pode pretender, considerando as limitações econômicas brasileiras, uma transformação desta realidade apenas com a construção de novas unidades, logo, é necessário definir estratégias para a adequação das edificações existentes.

Estudos nacionais e internacionais apontam muitas deficiências em relação a manutenção e conservação das edificações escolares (Norazman, Norsafiah, et al., 2019; Marques, De Brito, Correia, 2015; Mojela, Thwala; 2014; Mydin et al., 2014; Tan et al., 2014; Ali et al.; 2013; Shehab, Nouredine 2013; Soares Neto et al., 2013; Boothman, Higham, Horsfall, 2012; Asiya, 2012; Gomes e Regis; 2012)

Beauregard e Ayer (2018) destacam a importância de estabelecer um processo para priorizar as ordens de serviço de manutenção da instalação, buscando assim otimizar os recursos públicos. Sendo assim, a seleção dos critérios a serem avaliados torna-se o primeiro passo para se obter essa priorização das atividades de conservação das escolas.

A identificação de critérios para avaliação de edificações é um tema recorrente nos estudos de caso relacionados ao controle de qualidade, patologia e recuperação de edificações, como a pesquisa de Sotsek, Leitner e Santos (2019). Conforme apontado por Koleoso et al., (2013), medir o desempenho de uma edificação, é a maneira mais segura de melhorar o desenvolvimento econômico, físico e funcional de uma edificação, garantindo que seus objetivos sejam cumpridos. Neste sentido, este artigo tem como objetivo identificar quais critérios devem ser considerados na avaliação de edifícios escolares, por meio de uma revisão sistemática da literatura, consulta a normas nacionais e internacionais e consultas a especialistas, visando a conservação desses edifícios e garantir o desempenho adequado.

## 2. NORMAS E DIRETRIZES PARA AVALIAÇÃO DA INFRAESTRUTURA ESCOLAR NO BRASIL

No Brasil não se tem normas específicas para avaliação de uma infraestrutura escolar. Porém, existem normas para avaliação de edifícios em geral, que podem orientar a avaliação de uma edificação escolar. Essas normas são elaboradas pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/CB-002), que é responsável pela normalização do setor.

A principal norma de avaliação de edificações é a ABNT NBR 15575 (2013), “Desempenho de edificações habitacionais”, que estabelece os requisitos e critérios de desempenho que se aplicam às edificações habitacionais, buscando atender às exigências do usuário que são: segurança, habitabilidade e sustentabilidade.

Essa norma, entretanto, não se aplica a obras em andamento ou a edificações concluídas até a data da entrada em vigor, nem a obras de reformas, de “retrofit” e de edificações provisórias.

Além ABNT NBR 15575 (2013), outras normas que tratam o desempenho de edificações são a ABNT NBR 14037 (2014) “Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações – Requisito para elaboração e apresentação dos conteúdos”, a ABNT NBR 5674 (2012) “Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção”, e a



ABNT NBR 16280 (2015) “Reforma em edificações – Sistema de gestão de reformas – Requisitos”.

Recentemente, mais uma norma foi elaborada, a ABNT NBR 16747 (2020), “Inspeção predial – Diretrizes, conceitos, terminologia, requisitos e procedimento”, que fornece diretrizes, requisitos e procedimentos relativos à inspeção predial, visando uniformizar metodologia, estabelecendo métodos e etapas mínimas da atividade. A norma se aplicará às edificações de qualquer tipologia, públicas ou privadas, para avaliação global da edificação, fundamentalmente através de exames sensoriais por profissional habilitado.

A Prova Brasil e o Censo escolar têm sido os métodos utilizados para avaliar a infraestrutura de uma escola em termos de aprendizagem e desempenho.

A Prova Brasil é uma avaliação censitária, criada pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (INEP) em 2005, para avaliar a qualidade do ensino oferecido pelo sistema educacional público brasileiro; mediante testes padronizados nas áreas de Língua Portuguesa e Matemática, ela fornece dados para o Brasil, unidades da federação, municípios e escolas participantes. Além das provas, os estudantes também respondem a um questionário sobre aspectos relacionados à origem socioeconômica e cultural e sobre práticas escolares e de estudo. Diretores e professores também respondem a questionários envolvendo aspectos relacionados aos recursos escolares, organização e gestão da escola, clima acadêmico e práticas pedagógicas (Gomes e Regis, 2012).

Nesta prova são avaliados o estado de conservação dos itens e equipamentos do prédio (telhado, paredes, piso, entrada do prédio, pátio, corredores, salas de aula, portas, janelas, banheiros, cozinha e instalações hidráulicas e elétricas, mas, não avalia escadas, rampas e elevadores, entre outros...), a quantidade de salas de aula que atendem aos critérios de iluminação e ventilação adequados, aspectos relacionados a segurança das escolas e dos alunos, entre outros aspectos.

Já o Censo Escolar oferece diferentes informações sobre a realidade escolar, apresentando dados sobre escolas, turmas, matrícula e docentes. Embora estes dados sejam importantes, por si só não revelariam o estado de conservação das escolas, já que, as variáveis de infraestrutura disponíveis no Censo Escolar apenas indicam a presença ou ausência de determinados itens.

O Censo Escolar (INEP, 2019) é aplicado anualmente em todo o Brasil, coletando informações sobre diversos aspectos das escolas brasileiras, em especial as matrículas e infraestrutura. Todos os níveis de ensino são envolvidos: ensino infantil, ensino fundamental, ensino médio e Educação de Jovens e Adultos (EJA). Os dados de infraestrutura estão divididos em sete seções: alimentação; serviços; dependências; equipamentos; tecnologia; acessibilidade e outros.

### 3. MÉTODO

O desenvolvimento desta pesquisa foi realizado em três diferentes etapas, conforme apresentado na Figura 1.

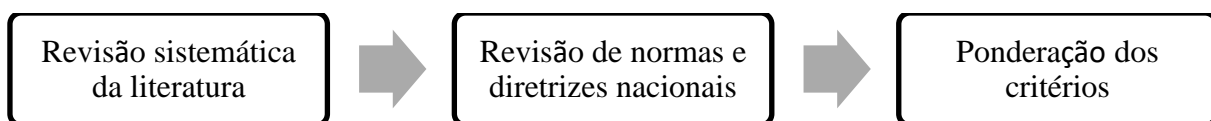


Figura 1 - Etapas da pesquisa. Fonte: Os autores.

#### 3.1 Etapa 1

Primeiramente, foi conduzida uma revisão sistemática de literatura (RSL) em artigos científicos, buscando identificar quais critérios para avaliação do desempenho de edificações escolares eram mais relevantes no meio acadêmico. Conforme a pesquisa de Sampaio (2007), foram definidas as seguintes partes para conduzir a revisão de literatura:

- 1) Definição da pergunta - quais critérios são utilizados para avaliar a performance de edificações educacionais?
- 2) Buscando referências – caracteriza-se pela definição de palavras chave e estratégias de busca, além da identificação das bases de dado a serem consultadas. O Quadro 01 mostra as estratégias de busca adotadas. A pesquisa foi feita em quatro diferentes bases de dados, e limitadas a resultados em inglês e português. Além disso, a busca foi restringida a localização no termo apenas no título, resumo e palavras-chave dos documentos.

Quadro 1. Termos de busca, fontes utilizadas e respectivos resultados. Fonte: Os autores.

Termo de busca	Fonte	Resultados
“Educational Building Performance”	Scopus	88
	Periódicos CAPES	23
	Scielo	21
	Science Direct	188

3) Revisando e selecionando os estudos - A partir dos resultados encontrados anteriormente, foram avaliados e eliminados os títulos dos documentos que não se encaixavam nos critérios definidos para condução da pesquisa. Foram então analisados os resumos dos artigos remanescentes e selecionados aqueles que tratavam de performance em edifícios educacionais. Em seguida foram excluídos os documentos repetidos, e o restante dos artigos foi lido na íntegra. A seleção final excluiu os documentos que não traziam critérios e parâmetros para análise da performance de edificações. Através do procedimento backward, no qual são consultadas as referências dos estudos selecionados anteriormente (DRESCH et al, 2015), mais um artigo foi adicionado à revisão.

Após a seleção dos estudos, foi feita uma análise buscando identificar quais os critérios abordados na pesquisa para avaliação do desempenho da edificação escolar. Os dados obtidos estão expostos na seção resultados

### 3.2 Etapa 2

Após a análise dos trabalhos acadêmicos consultados na RSL, foi constatado pelos autores que seria necessário fazer uma busca mais abrangente para identificar quais critérios deveriam ser utilizados para avaliação de edifícios escolares. Para complementar a pesquisa, foram consultados também:

- Normas nacionais;
- Diretrizes dos governos federal e estaduais;
- Instrumentos de avaliação das escolas brasileiras;

A apresentação e síntese dos resultados obtidos são abordadas também na seção de Resultados e Discussão.

### 3.3 Etapa 3

Para montar um framework de critérios mais consistente, foi aplicado também o método Delphi, em que foram selecionados especialistas que atuam ou atuaram como engenheiros em prefeituras são apresentados no Quadro 2. O objetivo desta etapa foi fazer com que os especialistas entrassem em um consenso sobre a importância dos critérios identificados anteriormente e atribuíssem notas aos critérios.

Quadro 2. Perfil dos especialistas que participaram da etapa Delphi. Fonte: Os autores.

Especialistas	Função	Tempo de atuação com desempenho de edificações escolares
A	Fiscal de obra	Menos de 1 ano
B	Fiscal de obras	Menos de 3 anos
C	Engenheira Civil	Menos de 3 anos
D	Secretário de Obras (Aposentado)	Mais de 3 anos
E	Engenheiro Civil I - Sec. de Educação	Menos de 1 ano
F	Supervisor de Infraestrutura	Mais que 08 anos

Para decidir se houve ou não consenso após cada rodada foi utilizada a equação (1). (WILSON; PAN; SCHUMSKY, 2012):

$$CVR = (NE - N/2)/(N/2) \quad (1)$$

onde:

CVR = Content Validity Ratio (razão de validade de conteúdo);

NE = número de especialistas que indicam que um parâmetro é essencial; e

N = número total de especialistas participantes da pesquisa.

Foi considerado que houve consenso quando o CVR resultou maior ou igual 0,29 e as rodadas do método são cessadas. A técnica foi aplicada através de questionários online, em três rodadas. Na primeira, os especialistas receberam um questionário com a lista de critérios obtidas na etapa anterior, e deveriam indicar a importância destes através de uma escala de 1 a 4 (onde 1 significa pouco importante e 4 muito importante). Esta escala foi adotada para evitar o termo neutro intermediário (3), da escala de cinco pontos, que em experiências anteriores, mostrou ser uma opção de indecisão em questionários. Caso julgassem que o critério não era relevante na avaliação, era possível marcar a opção N/A (não se aplica). Na segunda rodada, foram apresentadas as médias obtidas através do questionário anterior, e os especialistas foram convidados a reavaliar alguns critérios, cujo consenso não foi obtido na primeira rodada. Por fim, a terceira rodada apresentou os resultados obtidos na etapa anterior e, apenas para os critérios onde ainda não havia consenso, foi feita uma nova reavaliação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Etapa 1

Esta etapa do trabalho é baseada nos resultados da revisão de literatura sobre os critérios importantes para a avaliação de unidades escolares. Os trabalhos acadêmicos consultados, resultantes da revisão de literatura são relacionados no Quadro 3, segundo os critérios identificados.

Quadro 3. Artigos consultados na Revisão de Literatura. Fonte: Os autores

Referência	Crítérios
Michael, Heracleous (2017)	Níveis de iluminação, distribuição de luz, condições de conforto visual, necessidade do uso de iluminação artificial
Khalil et al. (2016)	Espaços, orientação de janelas, infraestrutura, acessos, áreas de circulação, ergonomia, sinalizações, saídas de emergência, probabilidade de contaminação dos usuários, áreas comuns, materiais, estabilidade estrutural, sistemas de informação na automação do edifício, serviços elétricos e hidráulicos, prevenção de incêndio, telhado, elevadores, conforto térmico, iluminação artificial e natural, descarte de lixo, ventilação, conforto acústico, limpeza
Driza, Park (2013)	Performance dos sistemas de água e elétrico
Khalil et al. (2012)	Acessibilidade nos edifícios, localização, percepção dos usuários acerca de problemas nas edificações
Mijakowski, Sowa (2017)	Ventilação, temperatura, umidade e concentração de CO <sub>2</sub> em ambientes internos
El Asmar et al. (2014)	Layout, mobiliário, conforto térmico, qualidade interna do ar, iluminação, conforto acústico, eficiência hidráulica, limpeza e manutenção
Zomorodian, Tahsildoost (2014)	Conforto térmico e visual
Bonomolo et al. (2017)	Iluminação natural
Pellegrino et al. (2015)	Orientação de janelas, obstruções externas, dimensões, área das janelas, profundidade das salas, cortinas e persianas, propriedades de refletância e vista externa.
Wang, Zamri (2013)	Conforto térmico, acústico, qualidade interna do ar, layout das salas, iluminação
Karima, Altan (2016)	sistemas de iluminação, aquecimento, ar condicionado, iluminação natural, sistemas de segurança
Ali et al. (2016)	Temperatura de superfícies, umidade relativa do ar, intensidade de luz, concentração interna de CO <sub>2</sub>
Khalil et al. (2011)	Conforto visual e térmico, ventilação
El Darwish, El-Gendy (2018)	Temperatura do ar, umidade relativa, temperatura radiante, velocidade do ar
Ropi, Tabassi (2014)	Análise da condição de banheiros, forros, portas, estruturas, paredes e telhados
Wong, Jan (2003)	Conforto térmico, espacial, visual, acústico, qualidade interna do ar e integridade da edificação



## 4.2 Etapa 2

Nesta etapa foram consultadas normas e diretrizes oficiais que pudessem auxiliar na elaboração de uma relação de critérios para avaliação de edificações escolares. No quadro 4 estão listadas as normas e diretrizes consultados.

Quadro 4. Normas e diretrizes consultados na identificação de critérios de avaliação de edifícios escolares. Fonte: Os autores.

Normas nacionais	Diretrizes do governo federal		Instrumentos de avaliação das escolas brasileiras
Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)	1	Manual de Orientações Técnicas - v.2: Elaboração de projetos de edificações escolares: educação infantil (MEC, 2017)	Censo Escolar (2019)
	2	Caderno de Requisitos e Critérios de Desempenho para Estabelecimentos de Ensino Público (MEC, 2014)	
	3	Manual técnico de arquitetura e engenharia de Orientação para elaboração de projetos de construção de Centros de educação o Infantil. (MEC, 2009)	
	4	Padrões mínimos de funcionamento da escola do ensino fundamental: manual de implantação. (MEC, 2006a)	Prova Brasil (2017)
	5	Parâmetros básicos de infraestrutura para instituições de educação infantil. Brasília. (MEC, 2006b)	
	6	Manual para Adequação de Prédios Escolares - Ministério da Educação MEC (2005)	

Todas estas normas, diretrizes e trabalhos acadêmicos, identificados nas Etapas 1 e 2 foram submetidos à análise de conteúdo e percebeu-se que não existe um padrão para organizar os critérios identificados. Desta forma, os autores elaboraram sua própria estruturada buscando organizá-los em grupos que têm relação entre si. Foram identificados 70 critérios, agrupados em 11 categorias, conforme apresentado no Quadro 5. Neste quadro também são apresentadas as normas da ABNT relacionadas aos critérios identificados na revisão sistemática da literatura.

Quadro 5. Critérios, normas e diretrizes para avaliação de edifícios escolares. Fonte: Os autores.

Categoria	Nº	Critério	Norma NBR	Diretrizes do governo federal						Censo Escolar	Prova Brasil
				1	2	3	4	5	6		
Instalações	1	Coberturas	15575-5	x	x	x	x		x		x
	2	Paredes	15575-4	x	x	x	x	x	x		x
	3	Quadras Poliesportivas		x	x		x			x	x

	4	Playgrounds	16071-2	x			x				x	
	5	Portões, grades e muros		x	x	x	x					x
	6	Áreas não pavimentadas		x								
	7	Mobiliário	14006	x	x	x	x	x	x			
	8	Estruturas	6118	x	x	x	x		x			
	9	Estacionamento		x	x	x			x			
	10	Escadas	9077	x	x	x						
	11	Rampas	9050	x	x	x			x			
	12	Elevadores	13994			x			x			
Acabamentos	13	Pintura de paredes	13245	x	x	x	x	x	x			
	14	Revestimentos	16919	x	x	x	x	x	x			
	15	Pisos	15575-3	x	x	x	x	x	x			x
	16	Tomadas	14136	x	x	x	x		x			
	17	Metais	10283	x	x	x			x			
	18	Esquadrias (portas e janelas)	10821/10831	x	x	x	x	x	x			x
	19	Forro	14285/16382	x	x	x	x		x			
	20	Louças	15097	x	x	x			x			
Segurança contra o fogo	21	Extintores	12693	x		x			x			x
	22	Rotas de fuga	9077	x	x				x			
	23	Sinalização	13434	x	x	x			x			
Conforto térmico	24	Adequação de paredes	15220-2	x	x		x	x	x			
	25	Isolamento térmico da cobertura	15220-2	x	x	x		x	x			
	26	Aberturas para ventilação	15575-4	x	x	x	x	x	x			x
	27	Umidade nos ambientes		x	x	x		x				
Conforto acústico	28	Isolamento acústico de paredes	15575-4	x	x	x		x				
	29	Poluição sonora	10151	x	x	x		x				
Conforto visual	30	Iluminação natural	15215	x	x	x	x	x	x			x
	31	Iluminação artificial	5413	x	x	x	x	x	x			x
Infraestrutura	32	Instalações de água	5626	x	x	x	x	x	x	x	x	x

	33	Instalações de esgoto	8160	x	x	x	x	x	x	x		
	34	Sistema de águas pluviais	10844	x	x	x	x	x				
	35	Instalações elétricas	5410	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	36	Sistemas de telecomunicação	14691	x		x		x				
Sustentabilidade	37	Eficiência energética	ISO 50001		x	x		x				
	38	Sistemas de gestão ambiental	ISO 14001	x	x	x		x				
	39	Destinação de resíduos		x	x	x		x			x	
	40	Gestão de captação de chuvas	15527	x	x			x				
Habitabilidade	41	Altura do pé direito	15575	x	x	x	x		x			
	42	Estanqueidade à fontes de umidade	9575	x	x	x						
	43	Sinais de depredação										x
	44	Poluentes na atmosfera interna		x	x							
	45	Adequação à pessoas com mobilidade reduzida (PMR)	9050	x	x	x		x	x		x	
	46	Nível de limpeza dos ambientes		x	x	x		x	x			
	47	Estética da edificação		x				x	x			
	48	Localização da escola		x	x	x		x			x	
Segurança (da escola e do aluno)	49	Controle de entrada e saída de alunos										x
	50	Controle de entrada de pessoas estranhas na escola					x		x			x
	51	Vigilância para o período diurno					x					x
	52	Vigilância para o período noturno					x					x

	53	Vigilância para os finais de semana e feriados					x						x
	54	Esquema de policiamento para inibição de furtos, roubos e outras formas de violência											x
	55	Esquema de policiamento para inibição de tráfico de tóxicos/drogas dentro da escola											x
	56	Esquema de policiamento para inibição de tráfico de tóxicos/drogas nas imediações da escola											x
	57	Iluminação do lado de fora da escola											x
	58	Mecanismos de proteção para equipamentos mais caros					x		x				x
	59	Segurança nas suas imediações							x				x
Ambientes	60	Salas de aula		x	x	x	x	x	x				x
	61	Salas administrativas		x	x	x	x	x					
	62	Sala dos professores		x	x	x	x	x					
	63	Salas de informática		x	x	x	x						
	64	Laboratórios		x	x	x	x						
	65	Refeitório		x	x	x	x	x					
	66	DML		x	x	x	n						
	67	Cozinha		x	x	x	x	x					x
	68	Pátio		x	x	x	x	x			x		x
	69	Biblioteca		x	x	x	x						x
70	Banheiros		x	x	x	x	x	x				x	

É possível observar que a maioria dos critérios estão presentes em quase todos materiais consultados. Apenas os critérios relacionados à segurança da escola e do aluno são verificados



apenas na Avaliação do SAEB, pois estão relacionados mais ao funcionamento da escola que da edificação em si. Como se trata de segurança de uso e operação, que é um critério básico da norma de desempenho NBR 15575 (2015), estes critérios foram mantidos na avaliação.

### 4.3 Etapa 3

Com objetivo de determinar a importância de cada um dos critérios, o método Delphi foi aplicado à um grupo de especialistas. Os especialistas avaliaram, numa escala de 1 a 4, os critérios apresentados no Quadro 5. Foi estabelecido para esta pesquisa um máximo de três rodadas Delphi, havendo consenso ou não entre os especialistas, entretanto na terceira rodada obteve-se o consenso. No Quadro 6 são apresentados, os resultados da aplicação do Delphi, que consiste na média das notas atribuídas a cada critério, por cada avaliador.

Quadro 6. Ponderação dos critérios para avaliação de edifícios escolares. Fonte: Os autores.

<b>Categoria</b>	<b>Nº</b>	<b>Critério</b>	<b>Nota Delphi</b>
Instalações	1	Coberturas	4,0
	2	Paredes	3,2
	3	Quadras Poliesportivas	3,0
	4	Playgrounds	2,5
	5	Portões, grades e muros	3,2
	6	Áreas não pavimentadas	1,7
	7	Mobiliário	3,3
	8	Estruturas	3,7
	9	Estacionamento	1,0
	10	Escadas	3,0
	11	Rampas	3,5
	12	Elevadores	1,8
Acabamentos	13	Pintura de paredes	2,7
	14	Revestimentos	3,0
	15	Pisos	3,7
	16	Tomadas	3,7
	17	Metais	3,0
	18	Esquadrias (portas e janelas)	3,3
	19	Forro	3,3
	20	Louças	3,0
Segurança contra incêndio	21	Extintores	3,8
	22	Rotas de fuga	4,0
	23	Sinalização	4,0
Conforto térmico	24	Isolamento térmico de paredes	2,3
	25	Isolamento térmico de coberturas	3,3
	26	Aberturas para ventilação	4,0
	27	Umidade nos ambientes	3,3
	28	Isolamento acústico de paredes	2,8

Conforto acústico	29	Poluição sonora	3,3
Conforto visual	30	Iluminação natural	3,7
	31	Iluminação artificial	3,8
Infraestrutura	32	Instalações de água	3,2
	33	Instalações de esgoto	3,0
	34	Sistema de águas pluviais	2,8
	35	Instalações elétricas	3,8
	36	Sistemas de telecomunicação	2,8
Sustentabilidade	37	Eficiência energética	3,3
	38	Sistemas de gestão ambiental	2,7
	39	Destinação de resíduos	3,8
	40	Gestão de captação de chuvas	2,8
Habitabilidade	41	Altura do pé direito	3,3
	42	Estanqueidade à fontes de umidade	4,0
	43	Sinais de depredação	3,3
	44	Poluentes na atmosfera interna	2,7
	45	Adequação a pessoas com mobilidade reduzida (PMR)	3,8
	46	Nível de limpeza dos ambientes	3,7
	47	Estética da edificação	2,7
	48	Localização da escola	2,2
Segurança (da escola e do aluno)	49	Controle de entrada e saída de alunos	3,8
	50	Controle de entrada de pessoas estranhas na escola	4,0
	51	Vigilância para o período diurno	2,8
	52	Vigilância para o período noturno	3,7
	53	Vigilância para os finais de semana e feriados	3,3
	54	Esquema de policiamento para inibição de furtos, roubos e outras formas de violência	3,3
	55	Esquema de policiamento para inibição de tráfico de tóxicos/drogas dentro da escola	3,5
	56	Esquema de policiamento para inibição de tráfico de tóxicos/drogas nas imediações da escola	3,3
	57	Iluminação do lado de fora da escola	3,7
	58	Mecanismos de proteção para equipamentos mais caros	3,3
	59	Segurança nas suas imediações	3,3
Ambiente	60	Salas de aula	4,0
	61	Salas administrativas	3,0
	62	Sala dos professores	3,3
	63	Salas de informática	3,5
	64	Laboratórios	3,5
	65	Refeitório	4,0

66	DML – Depósito de material de limpeza	2,7
67	Cozinha	3,7
68	Pátio	3,2
69	Biblioteca	3,2
70	Banheiros	4,0

Avaliando as instalações escolares, os elementos dos edifícios identificados como importantes a partir da consulta a especialistas são: cobertura, estrutura, paredes, portões, grades e muros, mobiliário, quadras poliesportivas, escadas e rampas, todos com notas maiores que 3. Os demais critérios, citados na RSL e nas normas e diretrizes consultadas, não foram considerados pelos especialistas elementos importantes para avaliação do desempenho do edifício escolar.

Em relação à categoria de acabamentos, os critérios foram considerados importantes (revestimentos, pisos, tomadas, metais, esquadrias, forro e louças), apenas à pintura das paredes foi atribuída nota inferior a 3.

As categorias de “Conforto térmico, acústico e lumínico”, são de modo geral considerados critérios importantes na avaliação de desempenho do edifício, apesar dos critérios de isolamentos térmico e acústico das paredes receberem notas inferiores a 3.

A categoria “Segurança contra incêndio”, item indispensável no Sistema de prevenção e Combate a Incêndio e Pânico, tem unanimidade no quesito importância, na avaliação dos especialistas.

As instalações elétricas e hidros sanitárias são os critérios de destaque na categoria infraestrutura. Com relação às categorias de Sustentabilidade e Habitabilidade, destacam-se os critérios de “eficiência energética”, “destinação de resíduos”, “altura do pé direito”, “estanqueidade às fontes de umidade”, “sinais de predação”, “adequação a pessoas com mobilidade reduzida (PMR)” e “nível de limpeza dos ambientes”.

Em geral, os aspectos de segurança da instalação, patrimonial e física dos ocupantes, Categoria de “Segurança da escola e do aluno”, apesar de serem importante na avaliação dos especialistas, foi citado apenas na avaliação do SAEB. Entende-se que esse critério não está relacionado à estrutura edificação, mas ao seu funcionamento.

Para os ambientes mencionados nos estudos da RSL e nas normas e diretrizes foi atribuída uma categoria exclusiva, uma vez que não são critérios, mas são importantes o suficiente para compor a avaliação do edifício. O ambiente considerado menos importante é o DML. Este ambiente está relacionado a limpeza e higiene da escola, entretanto, é citado apenas em um instrumento de avaliação de escolas e para os especialistas, tem uma nota 2,7 na escala de 1 a 4.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que o edifício escolar constitui o principal ativo do processo de aprendizagem e é esperado que ofereça ambientes de qualidade e segurança aos usuários, esse artigo teve como objetivo identificar, por meio de uma revisão de literatura, diretrizes governamentais e consulta à especialistas, os critérios utilizados nas pesquisas para a avaliação do desempenho dos edifícios escolares.

Foram identificados 70 critérios, que foram agrupados em 11 categorias em função de suas correlações: instalações, acabamentos, segurança contra incêndio, conforto térmico, acústico e visual, infraestrutura, sustentabilidade, habitabilidade, segurança (da escola e do aluno) e ambientes.

Observou-se com a pesquisa que as normas e orientações brasileiras em relação ao desempenho e conservação de escolas estão muito defasadas, algumas normas possuem mais de 20 anos, o que aponta uma necessidade de revisão dessas orientações, visando garantir o desempenho dessas

edificações, evitando que defeitos e manifestações patológicas comprometam a infraestrutura escolar, principalmente agora com os reflexos da pandemia vivenciada nos dois últimos anos. Considerando ainda que no Brasil não se tem normas específicas para avaliação de edifícios escolares, a identificação e ponderação de critérios que permitam tal avaliação, como apresentado no estudo, é um primeiro passo e contribui para o desenvolvimento de técnicas e métodos de avaliação, que posteriormente podem compor uma norma de desempenho para edifícios escolares. Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se uma revisão de literatura para identificar métodos de avaliação para os critérios apresentados nesta pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ali, A. S., Keong, K. C., Zakaria, N., Zolkafli, U., Akashah, F. (2013). The effect of design on maintenance for school buildings in Penang, Malaysia. *Structural Survey*. <https://doi.org/10.1108/SS-10-2012-0030>
- Ali, A. S., Zanzinger, Z., Debose, D., Stephens, B. (2016). Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, 100, 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>
- Asiyai, R. I. (2012). Assessing school facilities in public secondary schools in Delta State, Nigeria. *African research review*, 6(2), 192-205. <https://doi.org/10.4314/afrev.v6i2.17>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. CB-002 - Comitê Brasileiro da Construção Civil. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/cb-02>>. Acessado em 20/05/2020.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). *NBR 10821. Esquadrias para edificações Parte 2: Esquadrias externas - Requisitos e classificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR 10831: Projeto e utilização de caixilhos para edificações de uso residencial e comercial – Janelas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989). *NBR 10844: Instalações prediais de águas pluviais – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 12693: Sistemas de proteção por extintores de incêndio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR 13245: Tintas para construção civil — Execução de pinturas em edificações não industriais — Preparação de superfície*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). *NBR 13434: Sinalização de segurança contra incêndio e pânico - Parte 2: Símbolos e suas formas, dimensões e cores*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 16919: Placas cerâmicas - Determinação do coeficiente de atrito*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 14037: Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações – Requisito para elaboração e apresentação dos conteúdos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). *NBR 16071-2: Playgrounds Parte 2: Requisitos de segurança*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15215-1: Iluminação natural - Parte 1: Conceitos básicos e definições*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). *NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro.



- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-2: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 2: Requisitos para os Sistemas Estruturais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-3: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-4: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 4: Requisitos para os Sistemas de Vedações Verticais internas e externas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). *NBR 15.575-5: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 5: Requisitos para os Sistemas de Coberturas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 16071-1: Playgrounds - Parte 1: Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 16280: Reforma em edificações – Sistema de gestão de reformas – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 16747: Inspeção predial – Diretrizes, conceitos, terminologia, requisitos e procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 5626: Instalação predial de água fria*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 5674: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1999). *NBR 8160: Sistemas prediais de esgoto sanitário - Projeto e execução*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1983). *NBR 8214: Assentamento de azulejos - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9077. Saídas de emergência em edifícios (em revisão)*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). *NBR 9575. Impermeabilização - Seleção e projeto*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR ISO 14001: Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso*. Rio de Janeiro.
- Beauregard, M. A., Ayer, S. K. (2018). Maintaining performance: Understanding the relationship between facility management and academic performance at K-12 schools in the State of Arizona. *Facilities*. Vol. 36 No. 11/12, pp. 618-634. <https://doi.org/10.1108/F-11-2017-0111>
- Bonomolo, M., Baglivo, C., Bianco, G., Congedo, P. M., Beccali, M. (2017). Cost optimal analysis of lighting retrofit scenarios in educational buildings in Italy. *Energy Procedia*, 126, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.137>
- Boothman, C., Higham, A., Horsfall, B. (2012). Attaining zero defects within building schools for the future: a realistic target or a Sisyphean task?. In *Proceedings 28th Annual ARCOM Conference* (3-5). Disponível em: [https://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2012-0991-1001\\_Boothman\\_Higham\\_Horsfall.pdf](https://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2012-0991-1001_Boothman_Higham_Horsfall.pdf)

- Cardoso, T. A. (2017). *Estruturação do processo decisório para reforma de edificações escolares públicas do ensino fundamental utilizando o método multicritério de apoio à decisão – construtivista (MCDA-C)*. 223f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil.
- Dresch, A., Lacerda, D. P., Júnior, J. A. V. A. (2015). *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Bookman Editora.
- Driza, P. J. N., Park, N. K. (2013). Actual energy and water performance in LEED-certified educational buildings. *Sustainability: The Journal of Record*, 6(4), 227-232. <https://doi.org/10.1089/SUS.2013.9850>
- El Asmar, M., Chokor, A., Srour, I. (2014). Are building occupants satisfied with indoor environmental quality of higher education facilities? *Energy procedia*, 50, 751-760. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.093>
- El-Darwish, I. I., El-Gendy, R. A. (2018). Post occupancy evaluation of thermal comfort in higher educational buildings in a hot arid climate. *Alexandria engineering journal*, 57(4), 3167-3177. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.11.008>
- Gomes, A., Regis, A. (2012). Desempenho e infraestrutura: mapeamento das escolas públicas da região metropolitana do Rio de Janeiro. In *Congresso Ibero-americano de Política e Administração da Educação* (Vol. 3). Disponível em: [https://www.anpae.org.br/iberoamericano2012/Trabalhos/AdaildaGomesDeOliveira\\_res\\_int\\_GT\\_1.pdf](https://www.anpae.org.br/iberoamericano2012/Trabalhos/AdaildaGomesDeOliveira_res_int_GT_1.pdf).
- Hassanain, M. A., Iftikhar, A. (2015). Framework model for post-occupancy evaluation of school facilities. *Structural Survey*. Vol. 33 No. 4/5, pp. 322-336. <https://doi.org/10.1108/SS-06-2015-0029>
- Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP). *Censo Escolar*. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/web/guest/censo-escolar>> Acessado em 26 nov. 2019.
- Karima, M., Altan, H. (2017). Interactive building environments: A case study university building in UAE. *Procedia Engineering*, 180, 1355-1362. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.298>
- Khalil, N., Husin, H. N., Nawawi, A. H. (2012). An analytical literature: Strategic improvement of sustainable building performance tool for Malaysia's Higher Institutions. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 36, 306-313. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.034>
- Khalil, N., Husin, H. N., Wahab, L. A., Kamal, K. S., Mahat, N. (2011). Performance Evaluation of Indoor Environment towards Sustainability for Higher Educational Buildings. *Online Submission*. US-China Education Review A 2 p188-195 2011. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=ED524814>
- Khalil, N., Kamaruzzaman, S. N., Baharum, M. R. (2016). Ranking the indicators of building performance and the users' risk via Analytical Hierarchy Process (AHP): Case of Malaysia. *Ecological Indicators*, 71, 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.032>
- Koleoso, H., Omirin, M., Adewunmi, Y., Babawale, G. (2013), "Applicability of existing performance evaluation tools and concepts to the Nigerian facilities management practice". *International Journal of Strategic Property Management*, 17(4), 361-376. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2013.861367>
- Marques, B. A., de Brito, J., Correia, J. R. (2015). Constructive characteristics and degradation condition of Liceu secondary schools in Portugal. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(7), 896-911. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.865814>
- Michael, A., Heracleous, C. (2017). Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus. *Energy and Buildings*, 140, 443-457. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.087>

- Mijakowski, M., Sowa, J. (2017). An attempt to improve indoor environment by installing humidity-sensitive air inlets in a naturally ventilated kindergarten building. *Building and Environment*, 111, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.013>
- Ministério da Educação (2014). *Diretrizes Técnicas para Apresentação de Projetos e Construção de Estabelecimentos de Ensino Público*. Caderno de Requisitos e Critérios de Desempenho para Estabelecimentos de Ensino Público, vol. 1. Programa PROINFÂNCIA.
- Ministério da Educação (2017). *Manual de Orientações Técnicas - v.2: Elaboração de projetos de edificações escolares: educação infantil*. Brasília.
- Ministério da Educação (2005). *Manual para Adequação de Prédios Escolares*. 5a Ed./Elaboração Carlos Alberto Araújo Guimarães, Cláudia Maria Videres Trajano, Erinaldo Vitório, Rodolfo Oliveira Costa, Willamy Mamede da Silva Dias – Brasília: Fundescola/DIPRO/FNDE/MEC.
- Ministério da Educação (2009). *Manual técnico de arquitetura e engenharia de Orientação para elaboração de projetos de construção de Centros de educação Infantil*. Elaboração Karen Gama Muller, Luiz Paulo Ferrero Filho, Débora Carvalho Diniz –Brasília.
- Ministério da Educação (2006a). *Padrões mínimos de funcionamento da escola do ensino fundamental: manual de implantação*. 2a impressão. Brasília.
- Ministério da Educação (2006b). *Parâmetros básicos de infra-estrutura para instituições de educação infantil*. Brasília.
- Mojela, W., Thwala, W. D. (2014). Maintenance of Public Schools Infrastructure in South Africa. In *Proceedings of the 17th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate* (pp. 1253-1261). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35548-6\\_127](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35548-6_127)
- Mydin, M. O., Salim, N. A., Tan, S. W., Tawil, N. M., Ulang, N. M. (2014). Assessment of significant causes to school building defects. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 3, p. 01002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20140301002>
- Norazman, N., Asma, N. S., Nashruddin, M., Irfan, A., Ani, C., Norhaslina, J. F., Muhamad, K. A. (2019). School Building Defects: Impacts Teaching and Learning Environment. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8, 22-29. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1005.0782S219>
- Pellegrino, A., Cammarano, S., Savio, V. (2015). Daylighting for Green schools: A resource for indoor quality and energy efficiency in educational environments. *Energy Procedia*, 78, 3162-3167. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.774>
- QEDU. (2018). *Infraestrutura: Dependências em escolas públicas de ensino fundamental regular*. Disponível em: <[https://www.qedu.org.br/brasil/censo-escolar?year=2018&dependence=0&localization=0&education\\_stage=0&item=>](https://www.qedu.org.br/brasil/censo-escolar?year=2018&dependence=0&localization=0&education_stage=0&item=>)> Acessado em: 06/05/2020.
- Ropi, R. M., Tabassi, A. A. (2014). Study on maintenance practices for school buildings in Terengganu and Kedah, Malaysia. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 10, p. 03003). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20141003003>
- Shehab, T., Nouredine, A. (2014). Prioritization Model for Rehabilitation of Public School Buildings in California. *International Journal of Construction Education and Research*, 10(1), 58-75. <https://doi.org/10.1080/15578771.2013.805344>
- Sistema de Avaliação da Educação Básica (2017). *Questionário da Escola*. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/web/guest/educacao-basica/saeb/instrumentos-de-avaliacao>>. Acesso em 20 abr. 2020
- Soares Neto, J. J., De Jesus, G. R., Karino, C. A., De Andrade, D. F. (2013). Uma escala para medir a infraestrutura escolar. *Estudos em Avaliação Educacional*, 24(54), 78-99. <https://doi.org/10.18222/eae245420131903>

- Sotsek, N. C., Leitner, D. S., Lacerda Santos, A. de P. (2018). Uma revisão sistemática dos critérios do Building Performance Evaluation (BPE). *Revista ALCONPAT*, 9(1), 1 - 14. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i1.260>
- Tan, S. W., Mydin, M. O., Sani, N. M., Sulieman, M. Z. (2014). Investigation into Common Decay of Educational Buildings in Malaysia. In *MATEC Web Of Conferences* (Vol. 10, p. 05001). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141005001>
- Wang, C. C., Zamri, M. A. (2013). Effect of IEQ on occupant satisfaction and study/work performance in a green educational building: a case study. In *ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability* (pp. 234-246). <https://doi.org/10.1061/9780784413135.022>
- Wilson, F. R., Pan, W., Sschumsky, D. A. (2012). Recalculation of the critical values for Lawshe's content validity ratio. *Measurement and Evaluation in Counseling and Development*.45(3), 197-210. <https://doi.org/10.1177/0748175612440286>
- Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M. (2017). Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics. *Energy and Buildings*, 134, 80-93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.018>

## Resíduos de mármore em materiais de construção: uma revisão do uso do pó de mármore em argamassas, concreto e tijolos

A. Moreno<sup>1\*</sup> , C. Ponce<sup>2</sup> , E. Múzquiz<sup>1</sup> , F. Avalos<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [nicolas.moreno@uadec.edu.mx](mailto:nicolas.moreno@uadec.edu.mx)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.522>

Recepção: 17/11/2020 | Aceitação: 19/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

O objetivo deste trabalho é fazer uma revisão dos trabalhos realizados utilizando pó de mármore em substituição ao cimento, areia ou agregado miúdo em concreto, argamassa e tijolos. Pesquisas realizadas em várias partes do mundo com diferentes procedimentos experimentais foram revisadas. Conclui-se que o pó de mármore pode ser utilizado como substituto parcial do cimento ou agregado miúdo (até 15%, dependendo do material a ser substituído), sem afetar a resistência à compressão das amostras ou peças independentemente de sua forma. Portanto, o pó de mármore não só ajuda a reduzir a poluição que gera, mas também reduz seu uso como areia e pó, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** pó de mármore; tijolo; argamassa; concreto; cimento.

**Citar como:** Moreno, A., Ponce P., Múzquiz, E., Avalos, F. (2022), “Resíduos de mármore em materiais de construção: uma revisão do uso do pó de mármore em argamassas, concreto e tijolos”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 162 – 183, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.522>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Químicas Unidad Saltillo, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza y José Cárdenas Valdés, C.P. 25280, Saltillo, México.

<sup>2</sup> Escuela de Arquitectura Unidad Torreón, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera Torreón - Matamoros km. 7.5. Ejido El Águila. Ciudad Universitaria. C.P. 27087. Torreón, Coahuila

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor Moreno, A. contribuiu com a conceituação da atividade, a pesquisa, a metodologia, a coleta de dados e a redação da minuta original em 50%. Autor Ponce, C. contribuiu com 40% para validação, redação, revisão e edição. O autor Múzquiz, E. contribuiu com 5% para validação, redação, revisão e edição. Autor Avalos, F., contribuiu com 5% para coleta de dados, redação, revisão e edição.

#### Licença Creative Commons

Os direitos autorais (2022) são de propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano de 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.



## **Marble residues in construction materials: a review of the use of marble dust in mortars, concrete and bricks**

### **ABSTRACT**

The objective of this work is to make a review of the results carried out using marble powder as a substitute for cement, sand, or fine aggregate in concrete, mortar, and bricks. Research carried out in various parts of the world with different experimental procedures was reviewed. It is concluded that marble powder can be used as a partial substitute for cement or fine aggregate (up to 15%, depending on the material to be replaced) without affecting the compressive strength of the samples or pieces regardless of their shape. Therefore, marble powder not only helps to reduce the pollution it generates but also to reduce its use as sand and powder, contributing to sustainable development.

**Keywords:** marble dust; brick; mortar; concrete; cement.

## **Resíduos de mármore em materiais para a construção: uma revisão do uso do pó de mármore em morteros, concretos e ladrillos**

### **RESUMEN**

Este artículo tiene como objetivo hacer una revisión de los trabajos realizados usando polvo de mármore como sustitución de cemento, arena o agregado fino en concreto, mortero y ladrillos. Se revisaron investigaciones realizadas en varias partes del mundo con procedimientos experimentales diferentes. Se concluye que el polvo de mármore se puede usar como sustituto parcial de cemento o agregado fino (hasta por un 15 %, dependiendo del material a sustituir), sin afectar la resistencia a compresión de las muestras o las piezas, y sin importar la forma. Por lo tanto, el polvo de mármore no solo ayuda a aminorar la contaminación que genera, sino que también a la reducción de uso como arena y polvillo, aportando al desarrollo sustentable.

**Palabras clave:** polvo de mármore; ladrillo; mortero; concreto; cemento

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.



## 1. INTRODUÇÃO

O mármore é uma rocha metamórfica composta por carbonatos. Em termos comerciais, a palavra mármore não tem um significado petrográfico, às vezes o termo é aplicado a rochas como tufos, serpentinas e granito, embora muitas vezes se refira a rochas calcárias como calcário recristalizado, dolomita, mármore, ônix e travertino (Coordinación General de Minería, 2014).

De acordo com dados do United States Geological Survey (USGS) em 2018, o México é um dos maiores produtores mundiais de vários minerais não metálicos. Em 2019, a Direção Geral de Minas (DGM) relatou um aumento de 4.663 milhões de pesos de 2017 a 2018 na produção nacional de minerais não metálicos, o que representa um aumento de 23,9% (Servicio Geológico Mexicano, 2019).

China, Índia e outros países, incluindo o México, são os principais produtores de rochas decorativas. Rocha decorativa inclui uma grande variedade de rochas, incluindo granito, calcário e mármore.

O processo de produção do mármore inicia-se com a extração da rocha por meios mecânicos (serras), gerando grandes blocos, que posteriormente serão divididos em tamanhos menores para comercialização. Este processo é conhecido como laminação.

O processo de laminação consiste no corte do bloco de rocha para obtenção de chapas de 2 a 3 cm de espessura, e é realizado com serras com incrustações de diamante, em seguida a chapa obtida é submetida a polimento para tornar as partes rugosas da rocha e polimento por meio de abrasivos e água. Finalizado o polimento, as chapas são submetidas a cortes para medi-la de acordo com a necessidade do cliente, da mesma forma, para atender as necessidades do cliente, o produto é submetido a um processo de biselamento, secagem ou enceramento, por fim, o acondicionamento e envio de o produto para sua comercialização nacional ou internacional (Coordinación General de Minería, 2014).

Uma tonelada de pedra mármore processada por cortes verticais e horizontais para produção de blocos e laminação produz entre 35% e 45% dos resíduos em lama de materiais não utilizados (Singh, et al., 2017).

Essa lama de resíduos, principalmente após a secagem, causa riscos ambientais, como a poluição por poeira, que ocupa terras agrícolas e outras áreas próximas, tornando-as inférteis. (Singh, et al., 2017). Em 2017, a produção mundial de mármore foi de 2.352.614 toneladas (Servicio Geológico Mexicano, 2019), portanto foram geradas 941.045 toneladas de resíduos, considerando 40% do produto processado.

Devido ao grande problema gerado pelo pó de mármore (proteção de resíduos, contaminação por óxido de cálcio (CaO), que é absorvido pelo solo, tornando-o infértil), pesquisas científicas vêm sendo realizadas para sua aplicação no setor da construção, seja como substituto do cimento em argamassa ou concreto ou também como blocos ou tijolos manufaturados aplicáveis a sistemas construtivos em várias partes do mundo.

Neste trabalho, é feita uma revisão dos trabalhos realizados utilizando pó de mármore como substituto do cimento, areia ou agregado miúdo em concreto, argamassa e tijolos, a fim de relatar as formas pelas quais ele pode substituir o cimento ou agregado miúdo na fabricação tijolos não estruturais, entre outras contribuições.

## 2. PÓ DE MÁRMORE COMO INSUMO NA CONSTRUÇÃO

Nesta seção, avalia-se o uso do pó de mármore como insumo na construção, é realizada uma revisão exaustiva dos artigos publicados, os resultados de cada estudo da aplicação do pó de mármore são apresentados de forma concisa e detalhada em: cimento, argamassa, concreto e tijolos.

### 2.1 Pó de mármore como substituto parcial do cimento.

O pó de mármore possui alto teor de Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que pode ser adicionado a argamassas e concretos à base de cimento Portland para aumentar a vida útil, funcionando como preenchedor de poros. (Singh, et al., 2017).

Outros autores, ao contrário, pensam que a substituição parcial do  $\text{CaCO}_3$  produz modificações químicas, que se traduzem em alterações nas propriedades mecânicas e físicas do cimento (Tobón & Kazes Gómez, 2008). Adições entre 3 e 5% de pó de mármore foram feitas às pastas de cimento Portland, e seu comportamento mecânico não mudou.

El-Sayed, Farag, Kandeel, Younes e Yousef (2016) substituíram 3, 4 e 5% do peso do cimento por pó de mármore, observando que, devido à alta presença de carbonato de cálcio, não afetou as propriedades do cimento. Com as pastas de cimento endurecidas, foram realizados ensaios de compressão nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias, observou-se que as resistências aumentaram proporcionalmente a idade de cura de 1 a 28 dias, conforme mostra a Figura 1.

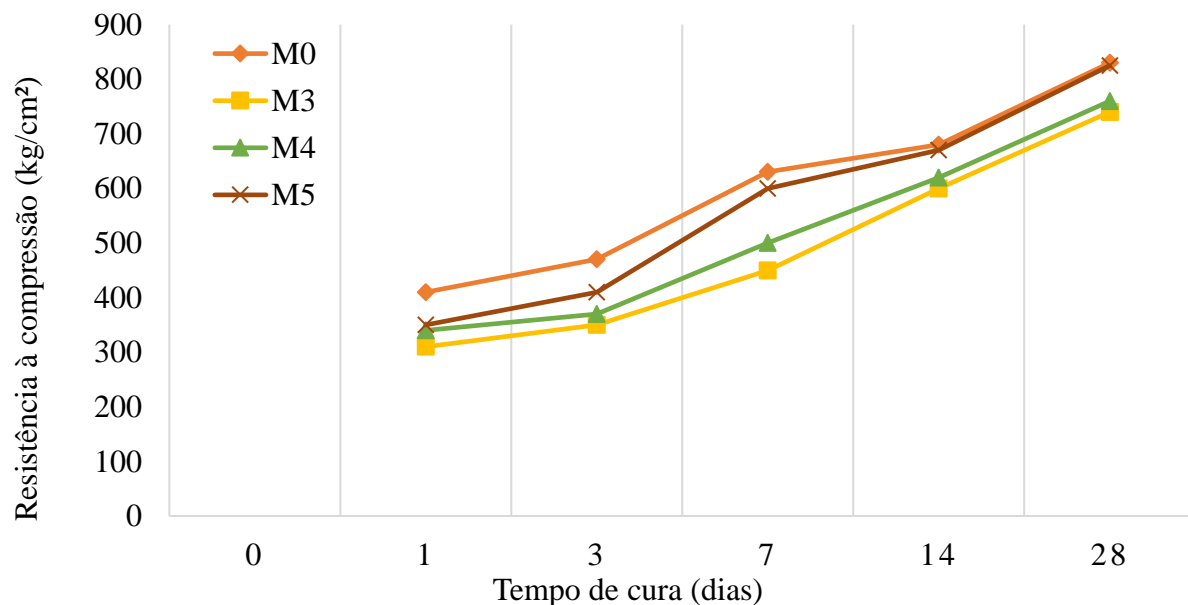


Figura 1. Resistência à compressão de pastas de cimento Portland endurecidas incorporando 3% (M3), 4% (M4) e 5% (M5) de resíduo de pó de mármore versus tempo de cura (El-Sayed, et al., 2016)

Foi demonstrado que o corpo de prova com 5% (M5) de pó de mármore, após 28 dias de cura, obteve a mesma resistência à compressão que a amostra controle de cimento Portland comum sem adições.

As demais amostras com 3 e 4% de substituição de cimento por pó de mármore apresentam menor resistência à compressão em relação a M5 e M0.

Com isso, a utilização do pó de mármore na indústria cimenteira torna-se viável devido aos benefícios econômicos e ecológicos que o aproveitamento do resíduo representa.

Singh, et al., (2017), menciona que o pó de mármore possui alto teor de Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e isso ajuda a aumentar a vida útil das pastas e concretos à base de cimento, enquanto Tobón & Kazes Gómez, (2008) mencionam o oposto. El-Sayed, Farag, Kandeel, Younes e Yousef (2016) mostram que a substituição do cimento por pó de mármore em pequenas quantidades não afeta a resistência à compressão.

Esses trabalhos mostram que a resistência à compressão dos corpos de prova não é afetada quando

no máximo 5% de pó de mármore substituiu o cimento. Observa-se nos gráficos dos resultados dos ensaios que o aumento da resistência é semelhante nos corpos de prova que possuem pó de mármore e nos que não possuem.

## 2.2 Pó de mármore e sua aplicação em argamassas.

As argamassas à base de cimento Portland são um dos materiais compósitos mais utilizados na construção civil, sendo o cimento o material de construção que mais gera poluição de CO<sub>2</sub> ao meio ambiente em seu processo de fabricação. Por isso, pesquisadores realizaram estudos experimentais substituindo parcialmente o cimento por pó de mármore para reduzir o uso de clínquer.

Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) substituíram 10% do cimento por pó de mármore de uma amostra de referência e em uma segunda opção substituíram 10% do agregado miúdo da argamassa (areia), conforme apresentado na Tabela 1. Foram moldadas 3 barras de 40 x 40 x 160 mm de cada mistura, das quais foram obtidos cubos de 40 mm de lado, para realizar ensaios de compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias de cura.

Tabela 1. Traços de argamassa (Corinaldesi, et al., 2010)

2. Mistura	Ref	10% Cimento	10% Areia
A/C	0.61	0.68	0.59
Água (kg/m <sup>3</sup> )	275	276	266
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	450	405	450
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	1350	1350	1215
Pó de mármore (kg/m <sup>3</sup> )	0	45	135

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2, observa-se que a mistura com substituição de 10% de cimento por pó de mármore apresentou redução na resistência à compressão. No entanto, o pó de mármore utilizado em substituição a 10% de areia, obteve maior resistência do que a mistura com substituição do pó de mármore por cimento.

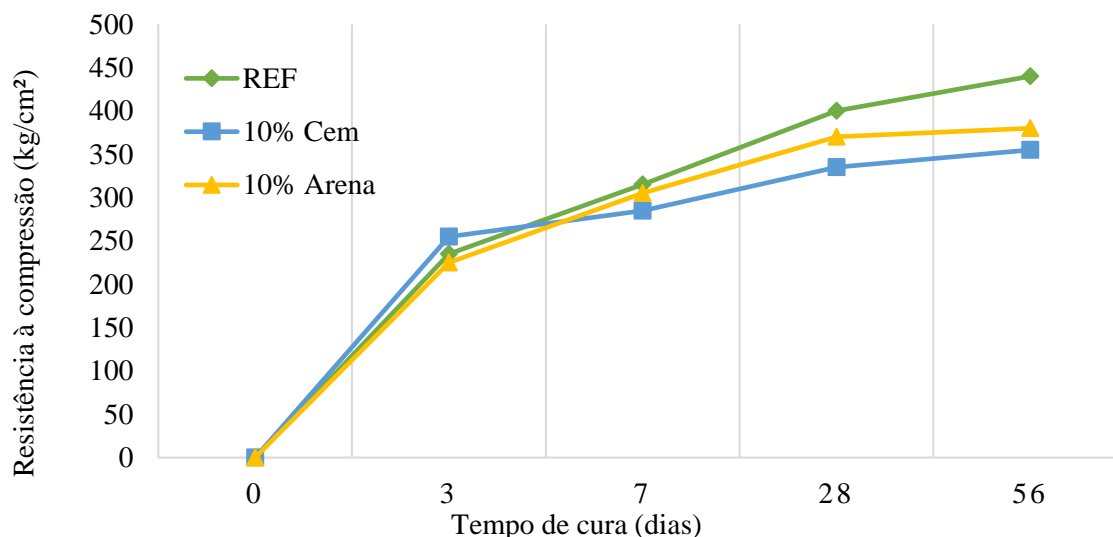


Figura 2. Resistência à compressão versus tempo de cura para argamassas com substituição parcial do pó de mármore por cimento e areia. (Corinaldesi, et al., 2010)

Li G. L. et al (2019), propõem a substituição por pó de mármore em duas opções para argamassa à base de cimento. A primeira proposta é a substituição parcial do cimento na mistura, sem alterar a relação água-cimento (a/c), e uma segunda em que é substituída uma parte do cimento e da água

necessária para a fabricação da argamassa, alterando a relação a/c.

Primeiramente, para cada mistura de argamassa, o volume de pasta (volume de água, cimento, expresso em porcentagem do volume de argamassa) mais o volume de pó de mármore (expresso em porcentagem do volume de argamassa) foi fixado em 60%.

O pó de mármore foi ajustado para 0, 5, 10, 15 e 20% e o respectivo volume de pasta foi ajustado para 60, 55, 50, 45 e 40%, para adicionar cada uma das misturas aos 60% previamente ajustados. O volume do agregado miúdo foi fixado em 40% do volume total da argamassa (Figura 3). Para a segunda proposta, o pó de mármore substituiu 0, 5, 10, 15 e 20% do volume do cimento, que foi fixado em 100, 95, 90, 85 e 80%.

É importante ressaltar que o volume da água na mistura permanece constante (Figura 4). Com cada uma das misturas foram fabricados 3 cubos de 100 mm de cada lado, após 28 dias de cura, foram realizados os ensaios de resistência à compressão.

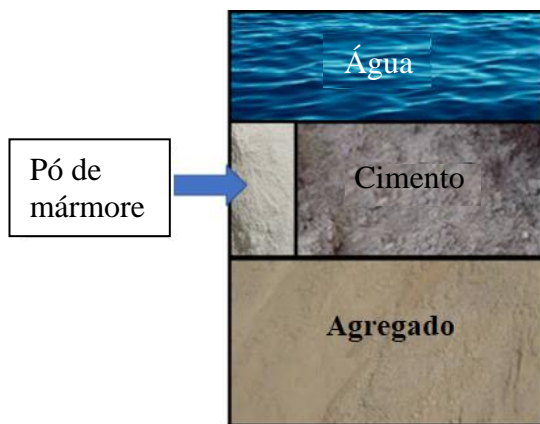


Figura 3. Método de substituição de cimento (Li, et al., 2019)

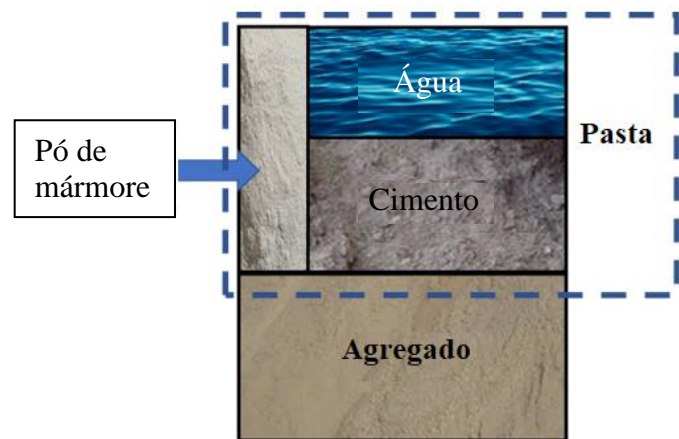


Figura 4. Método de substituição da pasta (Li, et al., 2019)

Os ensaios mostraram que na argamassa com substituição de pasta (cimento e água) com relação a/c de 0,40 e aumentando o volume do pó de mármore de 0% para 20%, a resistência do cubo aumentou de 607,75 para 730,12 kg/cm<sup>2</sup>, na relação a/c de 0,55, a resistência à compressão aumentou de 402,79 para 543,51 kg/cm<sup>2</sup>.

Nas misturas de argamassa onde o cimento foi substituído apenas parcialmente por pó de mármore de 0 a 5% e com relação a/c de 0,40, a resistência do cubo aumentou de 607,75 para 610,81 kg/cm<sup>2</sup>, e o volume de pó aumentou. de 0% para 20% apresentou uma diminuição da resistência à compressão de 607,5 para 488,44 kg/cm<sup>2</sup>.

No mesmo caso, mas com relação a/c de 0,55, e substituindo 0 a 10% do cimento por pó de mármore, a resistência aumentou de 402,79 para 411,97 kg/cm<sup>2</sup>, e com a substituição de 0% para 20% o cubo a resistência diminuiu de 402,79 para 344,66 kg/cm<sup>2</sup>.

No trabalho realizado por Yamanel et al. (2019) fizeram argamassas substituindo 0, 5, 10, 15 e 20% do cimento por pó de mármore, e fabricaram prismas de 40 x 40 x 160 mm, curados por 28 dias, antes de realizar os ensaios mecânicos e de durabilidade as amostras (Tabela 2).

Tabela 2. Traços de argamassa. (Yamanel, et al., 2019)

Amostra	Cimento g	Pó de mármore g	Areia g	Água g
M-0	450,0	0,0	1350,00	225
M-5	427,5	22,5	1350,00	225
M-10	405,0	45,0	1350,00	225
M-15	382,5	67,5	1350,00	225
M-20	360,0	90,0	1350,00	225

Após 28 dias de cura, a resistência à compressão das misturas afetadas a 5, 10, 15 e 20% é inferior à da mistura sem substituição de cimento.

Após 90 dias de cura, a mistura com substituição de 5% do pó de mármore pelo cimento aumentou a resistência à compressão, ainda mais do que a mistura sem pó de mármore (Figura 5).

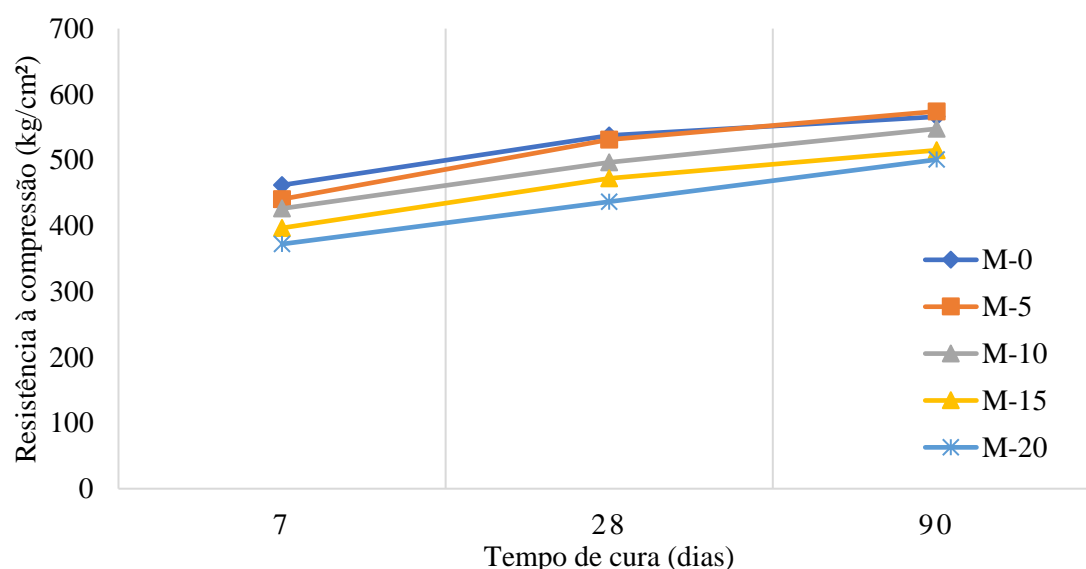


Figura 5. Resistência à compressão de argamassas (Yamanel, et al., 2019)

Toubal Seghir, N., et al. (2019), fabricaram argamassas com proporções de 3:1 areia-cimento, e substituídas em teores de 0%, 5%, 10% e 15% do peso de cimento na argamassa, por pó de mármore. Foi mantida uma relação água/cimento de 0,5 (constante). Os ensaios de resistência à compressão foram feitos com cubos de 50 mm das argamassas, e foram ensaiados aos 3, 7, 28 e 65 dias. As amostras foram curadas ao ar livre, este estudo ofereceu os seguintes resultados: Todas as amostras com até 15% de substituição obtiveram uma resistência à compressão menor que a amostra sem pó de mármore, essa diminuição é atribuída à falta de cura, o que causou vazios e microfissuras dentro das amostras, bem como uma redução na densidade das amostras.

Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) mostram que a substituição do cimento por pó de mármore afeta a resistência à compressão e quando o pó de mármore é substituído por areia não é afetado. Li G. L. et al (2019), mostram que o aumento na substituição do pó de mármore por cimento diminui a resistência à compressão e quando a substituição é menor, a resistência é mantida ou aumentada. Toubal Seghir, N., et al. (2019) mostra que para se ter bons resultados em resistência à compressão é necessário que haja boa cura dos corpos de prova.

Quando o pó de mármore é substituído pelo cimento nas argamassas, na maioria dos casos há diminuição da resistência à compressão, principalmente nas relações água/cimento inferiores a 0,5.

Quando a relação água/cimento aumenta, a resistência à compressão das amostras também aumenta. Outro fator importante na resistência das amostras é a cura, menciona-se que quando as amostras não são curadas, a resistência em idades precoces é baixa.

### 2.3 Concreto com pó de mármore.

#### 2.3.1 Pó de mármore como substituto parcial do agregado miúdo no concreto.

A aplicação do pó de mármore em concreto também tem sido buscada, seja como substituto parcial do cimento ou como agregado miúdo, sem comprometer a resistência à compressão.

Em 2010, Santos, Villegas e Betancourt propuseram a substituição parcial do agregado miúdo pelo concreto e o uso do pó de mármore.

A proposta que fizeram foi a substituição parcial da areia pelo pó de mármore em faixas de 10 em 10, de 0 a 80%, mantendo fixa a relação a/c, peso de cimento e agregado graúdo, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Dosagens de concreto (Santos, et al., 2012)

Material		Controle	M10	M20	M30	M40	M50	M60	M70	M80
Areia	kg/m <sup>3</sup>	793	714	634	555	476	397	317	238	159
Pó de mármore	kg/m <sup>3</sup>	0	79	159	238	317	397	476	555	634
Cascalho	kg/m <sup>3</sup>	1044	1044	1044	1044	1044	1044	1044	1044	1044
Água	kg/m <sup>3</sup>	228	325	325	325	325	325	325	325	325
Cimento	kg/m <sup>3</sup>	325	325	325	325	325	325	325	325	325
a/c	kg/m <sup>3</sup>	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

A partir dos ensaios de resistência à compressão aplicados às dosagens anteriores aos 7 e 28 dias de cura, obtiveram-se os seguintes resultados, que são mostrados na Figura 6.

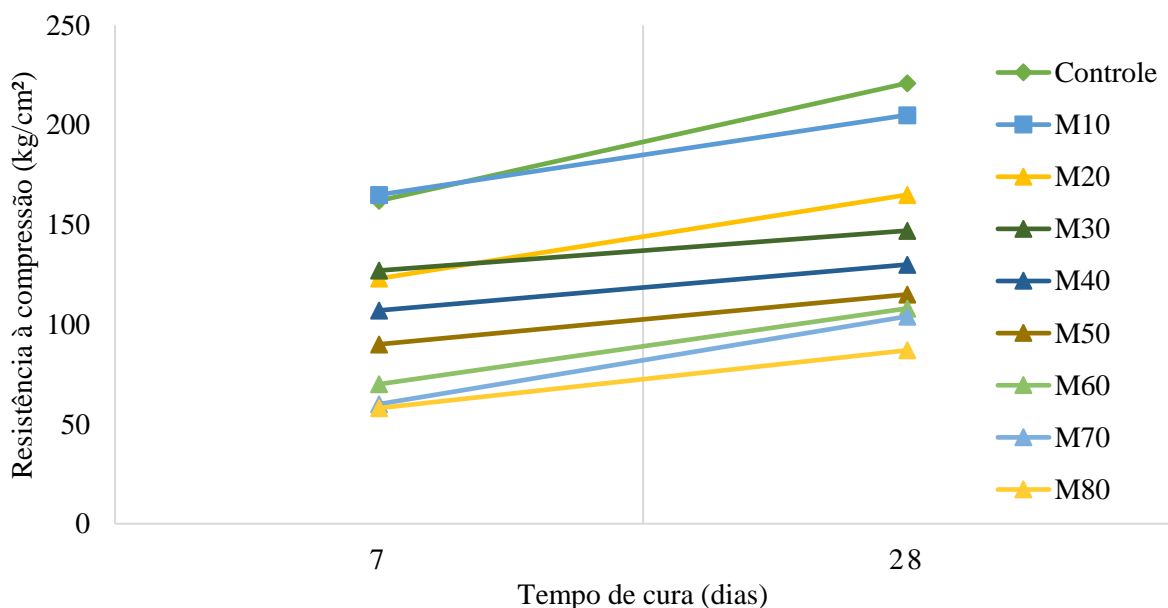


Figura 6. Resultados da resistência à compressão do concreto com pó de mármore. (Santos, et al., 2012)

Pode-se verificar que à medida que aumenta o percentual de substituição da areia pelo pó de mármore, a resistência à compressão diminui. Essa perda de resistência é semelhante ao percentual de pó de mármore, ou seja, a dosagem M40 tem 40% menos resistência à compressão em relação



ao controle (Santos, et al., 2012).

Hebnoub, H., et al. (2011) pó de mármore parcialmente substituído nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100% para agregado miúdo; corpos de prova de concreto foram moldados e curados e ensaiados de acordo com as normas da União Europeia (UE). As amostras foram ensaiadas nas idades de 2, 14, 28 e 90 dias de cura, para determinar sua resistência à compressão. Os resultados encontrados pelos autores refletiram que a resistência à compressão nas taxas de substituição de 25, 50 e 75% ofereceram maior resistência do que a amostra controle; a substituição de 100% nas idades de 14 e 28 dias apresentou resistência menor que a amostra sem pó de mármore, mas aos 90 dias a resistência praticamente se igualou à da amostra original.

Rahangdale, S. & Qureshi, S. (2018) realizaram um estudo comparando as propriedades de um concreto tradicional com um feito com materiais complementares (cinzas volantes para o cimento; pó de pedra e mármore em substituição parcial do agregado miúdo).

Foram moldadas 14 amostras, nas 3 primeiras amostras (1, 2 e 3) 35% do cimento foi substituído por cinza volante e o agregado miúdo foi substituído em 30% por pó de pedra e mármore, em quantidades de 20% - 10%, 15% - 15% e 10% - 20% respectivamente; as resistências à compressão foram inferiores às registradas pela amostra de concreto controle (35,58 N/mm<sup>2</sup>), variando aos 28 dias as resistências de 28,05, 28,87 e 30,35 N/mm<sup>2</sup>.

Nas amostras 4, 5 e 6 a quantidade de cinzas volantes foi mantida, mas as quantidades de pó de pedra e mármore foram aumentadas para 40% da seguinte forma: 30-10%, 20-20%, 10-30%, obtendo-se as seguintes resistências aos 28 dias: 27,25, 25,65 e 26,65 N/mm<sup>2</sup>. A partir destes resultados, pode-se observar que se mantém o decréscimo apresentado na resistência à compressão das séries 1, 2 e 3.

Nas amostras 7, 8 e 9, a cinza volante foi reduzida para 25%, e retorna para 30% de substituição em agregados miúdos na mesma quantidade das amostras 1, 2 e 3; as resistências registradas foram 29,75, 32,04 e 35,45 N/mm<sup>2</sup>, sendo estas superiores às anteriores, mas ainda abaixo da amostra original.

Nas 3 amostras seguintes (10, 11 e 12) a cinza volante é mantida em 25% e a porcentagem de substituição do agregado miúdo muda para 40% como nas amostras 4, 5 e 6, os resultados obtidos foram 30,29, 31,54 e 29,87 N/mm<sup>2</sup>, e mais uma vez observa-se que as resistências à compressão diminuem.

Na amostra 13, a cinza volante foi considerada na porcentagem de 22,5%, e no agregado miúdo de 30% (10% pedra mármore e 20% pó de mármore). Aos 28 dias, a resistência à compressão registrada foi de 35,49 N/mm<sup>2</sup>, que é a maior das amostras analisadas, praticamente igual à resistência à compressão da amostra controle.

Na última amostra (14) a cinza volante substituiu 20% do cimento, e no agregado miúdo de 30% (10% pedra mármore e 20% pó de mármore) aos 28 dias a resistência registrada foi de 38,87 N/mm<sup>2</sup>, aumentando a resistência à compressão em 0,75%, sendo praticamente a mesma resistência da amostra de referência.

Dessa forma, com as dosagens da amostra 14, minimiza-se o uso de cimento, portanto, os autores recomendam o uso de materiais complementares para solucionar problemas ambientais e avançar na sustentabilidade do desenvolvimento da construção civil.

Verma, M., Kaushal, N. & Sharma, A. (2019) substituíram o agregado miúdo nas proporções de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% para fabricação de concreto e os ensaios de compressão foram realizados aos 7 e 28 dias de idade. Os resultados obtidos na amostra sem modificação foram 19,10 e 24,73 N/mm<sup>2</sup> aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Na amostra de 5% observa-se um aumento de 20,36 e 27,40 N/mm<sup>2</sup> em 7 e 28 dias respectivamente, da mesma forma na amostra de 10% houve novamente um aumento de resistência de 20,51 e 29,92 N/mm<sup>2</sup> em 7 e 28 dias respectivamente.

Das amostras com 15% a 30%, as resistências à compressão apresentaram uma diminuição em

relação à amostra original com decréscimos aos 7 dias de 15,85 para 12,14 N/mm<sup>2</sup> e aos 28 dias de 24,44 para 18,07 N/mm<sup>2</sup>, assim determina-se que a substituição parcial do agregado miúdo por até 10% de pó de mármore gera maior resistência à compressão.

Em Gizé, Egito, Mostafa Shaaban (2020) realizou um estudo onde substituiu, em concreto projetado, porcentagens de 5, 10, 15, 20, 25 e até 30% parcialmente de areia por pó de mármore. Aos sete dias de idade, as amostras ensaiadas para resistência à compressão com a substituição parcial de 5% obtiveram valor inferior à amostra sem pó de mármore.

As amostras a partir de 10% apresentaram um aumento na resistência à compressão, aos 28 dias de idade (de 5% para 30%), isso devido à finura do pó de mármore que exerce efeito de preenchimento no concreto. Determina-se também que a adesão do concreto projetado aumenta proporcionalmente à maior substituição do pó de mármore por areia.

Ince, C., et al. (2020) utilizaram pó de mármore em concreto pozolânico; o concreto foi preparado com sílica ativa 20% substituindo cimento e pó de mármore em proporções de substituição de agregado miúdo de 10% e 20%, foram moldados corpos de prova de 15 cm de diâmetro com 30 cm de altura. O estudo durou 1 ano e todas as amostras foram curadas sob água. Os resultados de resistência à compressão mostram que a substituição de 20% de sílica ativa aumentou a resistência à compressão a longo prazo, esse aumento na resistência é atribuído à atividade pozolânica da sílica ativa. Em relação à substituição do pó de mármore no agregado miúdo, a substituição de 20% mostra uma ligeira diminuição da resistência à compressão do que a apresentada pela substituição de 10%, em relação à amostra controle sem substituição. Ambas as amostras de 10% e 20% mostram um aumento na resistência à compressão.

Santos, Villegas e Betancourt (2010) e Rahangdale, S. & Qureshi, S. (2018) verificaram que quanto maior a quantidade de pó de mármore, menor a resistência à compressão. Hebnoub, H., et al. (2011) e Verma, M., Kaushal, N. & Sharma, A. (2019) mostram que o pó de mármore pode ser substituído em maior quantidade sem afetar a resistência. Ince, C., et al. (2020) mostram nos resultados que a substituição do pó de mármore em até 20% no concreto pozolânico pode ter um aumento na resistência à compressão.

Segundo os autores desta seção, menciona-se que a substituição do pó de mármore por agregado miúdo até 10% não afeta a resistência à compressão, pois não aumenta ou diminui quando aumenta a substituição do pó de mármore por agregado miúdo. Se a resistência diminuir consideravelmente, pode ser atribuído ao fato de que até 10% do pó de mármore ajuda a preencher os poros que o agregado miúdo não consegue fazer, e quando é superior a 10%, falta o agregado que ajuda a dar resistência ao concreto.

### 2.3.2 Pó de mármore como substituto parcial do cimento no concreto.

Também foram realizados ensaios em concreto de alto desempenho, em um estudo realizado por Talah, Kharchi e Chaid (2015), foram preparadas duas misturas de estudo, a primeira como concreto de referência (RC) e uma segunda mistura de concreto de alto desempenho com pó de mármore (HPCMP) ao qual 15% do cimento foi substituído por pó de mármore. As dosagens utilizadas são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4. Traços e propriedades do concreto. (Talah, et al., 2015)

Mistura	Relação a/c	Cimento kg/m <sup>3</sup>	Pó de mármore kg/m <sup>3</sup>	Água kg/m <sup>3</sup>	Areia kg/m <sup>3</sup>	Cascalho 3/8 kg/m <sup>3</sup>	Cascalho 8/16 kg/m <sup>3</sup>
RC	0.5	400	0	200	788	163	886
HPCMP	0.5	340	60	200	788	163	886

A resistência à compressão de cada mistura foi avaliada em corpos de prova de 160 x 320 mm, aos 7, 28, 90, 180 e 365 dias de idade. Todas as amostras foram compactadas em mesa vibratória, após a desmoldagem, as amostras foram divididas em dois grupos iguais e curadas nas seguintes condições: na primeira condição de cura, as amostras ficaram submersas em água até a idade do ensaio, enquanto, na segunda condição de cura, foram imersos em água agressiva (5%  $\text{CaCl}_2$ ) até a idade de ensaio.

A Figura 7 mostra os resultados da resistência à compressão das misturas, de acordo com a condição de cura e a idade do concreto.

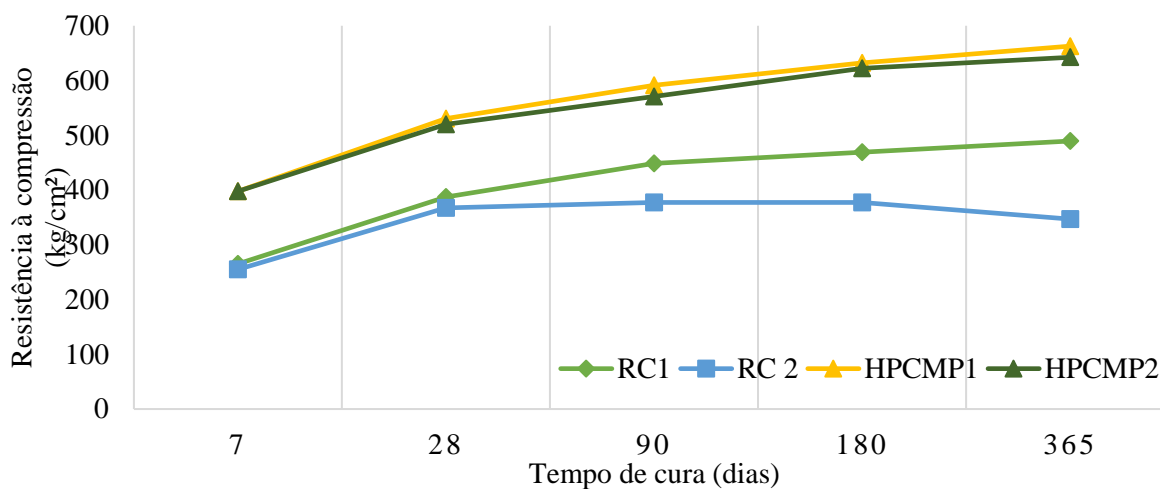


Figura 7. Evolução da resistência à compressão em diferentes idades (Talah, et al., 2015)

O resultado indica que houve um ganho sistemático de resistência à compressão com o teor de pó de mármore. Observou-se que a relação entre a resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à cura com água e aqueles curados em condições agressivas do concreto de referência desviou-se em até 29%. No entanto, esta proporção para concreto contendo pó de mármore está dentro da faixa de 3%, dependendo principalmente do teor de pó de mármore e da idade do ensaio. Isso implica que os concretos de referência são mais sensíveis aos meios agressivos do que o concreto com pó de mármore. (Talah, et al., 2015).

Em 2017 Singh, Srivastava e Bhunia, realizam ensaios em concreto substituindo 0, 10, 15, 20 e 25% do cimento por pó de mármore, além de experimentar 3 relações a/c 0,35, 0,4 e 0,45. A dosagem dos concretos é mostrada na Tabela 5.

Ghorbani, S., et al. (2018) substituiu proporcionalmente o cimento Portland tipo II por 0%, 5%, 10% e 20% de pó de mármore, pó de granito ou uma combinação de ambos. As amostras foram curadas e analisadas aos 7 e 28 dias de idade. Nas amostras de pó de mármore e pó de granito como substituto parcial do cimento, a resistência à compressão não foi afetada significativamente, tanto em 7 dias quanto em 28 dias. Nas amostras onde apenas pó de mármore foi substituído, as amostras com 5 a 15% de substituição apresentaram melhora na resistência à compressão, mas não a substituição de 20%, que apresentou diminuição na resistência à compressão de 0,94 e 0,96 vezes tanto no pó de mármore quanto no granito misturas de poeira; nas amostras em que o pó de granito foi substituído pelo cimento, a amostra a 10% ofereceu maior resistência entre as faixas de 1,14 e 1,09 vezes a da amostra sem substituição. Os autores determinaram que o aumento da resistência à compressão apresentado neste estudo se deve à melhora da densidade das amostras devido ao preenchimento de seus poros. Finalmente, à medida que a idade de cura aumenta, a perda de resistência à compressão diminui.

Mostafa Shaaban (2020) substituiu parcialmente o cimento por pó de mármore na mistura para fabricação de concreto projetado, nas proporções de 5, 10, 15, 20, 25, até 30%. Os resultados obtidos relataram que o uso de pó de mármore em qualquer uma das proporções de substituição apresentou diminuição da resistência à compressão; nas amostras de 5% de substituição nas primeiras idades (7 dias) apresentaram uma diminuição da resistência à compressão de 5,4% em relação à amostra original, e aos 28 dias, uma diminuição que chegou a 23,4% nas amostras com 30% de substituição de pó de mármore.

Babouri, L., et al. (2020) utilizaram pó de mármore como substituto parcial do cimento Portland comum na fabricação de concreto; as porcentagens de substituição utilizadas foram de 5%, 10%, 15% e 20%, e os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 2, 7, 14 e 28 dias de cura.

As amostras com 5%, 10% e 15% apresentaram resultados de resistência à compressão inferiores à amostra original sem pó de mármore, porém a amostra com 5% de pó de mármore, do dia 2 ao 28 do último ensaio apresentou um aumento na resistência, esse aumento na resistência à compressão é atribuído ao fato de que o pó de mármore reduz a porosidade, o que se reflete em uma amostra com menos vazios e, portanto, mais resistente.

Tabela 5. Proporções da mistura de concreto (Singh, Srivastava y Bhunia, 2017)

Relação a/c	Traço	Cimento kg/m <sup>3</sup>	Pó de mármore %	Pó de mármore kg/m <sup>3</sup>	Agregado graúdo kg/m <sup>3</sup>	Agregado miúdo kg/m <sup>3</sup>	Água kg/m <sup>3</sup>
0,35	Controle	422	0	0	1278	689	148
	M10	379,8	10	42,2	1278	689	148
	M15	358,7	15	63,3	1278	689	148
	M20	337,6	20	84,4	1278	689	148
	M25	316,5	25	105,5	1278	689	148
0,40	Controle	394	0	0	1257,2	707,2	158
	M10	354,6	10	39,4	1257,2	707,2	158
	M15	334,9	15	59,1	1257,2	707,2	158
	M20	315,2	20	78,8	1257,2	707,2	158
	M25	295,5	25	98,5	1257,2	707,2	158
0,45	Controle	351	0	0	1183	858	158
	M10	315,9	10	35,1	1183	858	158
	M15	298,35	15	52,65	1183	858	158
	M20	280,8	20	70,2	1183	858	158
	M25	263,25	25	87,75	1183	858	158

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mostram um aumento de resistência nas misturas com 10% e 15% de substituição por pó de mármore. Esse aumento pode ser atribuído ao fato de que o pó de mármore ajuda a formar misturas mais densas sem tanta porosidade. Os traços com percentuais de substituição de 20 e 25% apresentam diminuição da resistência à compressão, possivelmente devido à falta de material cimentício no concreto.

As amostras com relação a/c de 0,35 apresentaram aumento da resistência na amostra com 15% de substituição (Figura 8). Da mesma forma, na mesma porcentagem de substituição, mas na relação a/c de 0,40, também há aumento da resistência à compressão (Figura 9).

Para a relação a/c de 0,45, a resistência à compressão diminuiu, em comparação com as relações a/c de 0,35 e 0,40 (Figura 10).

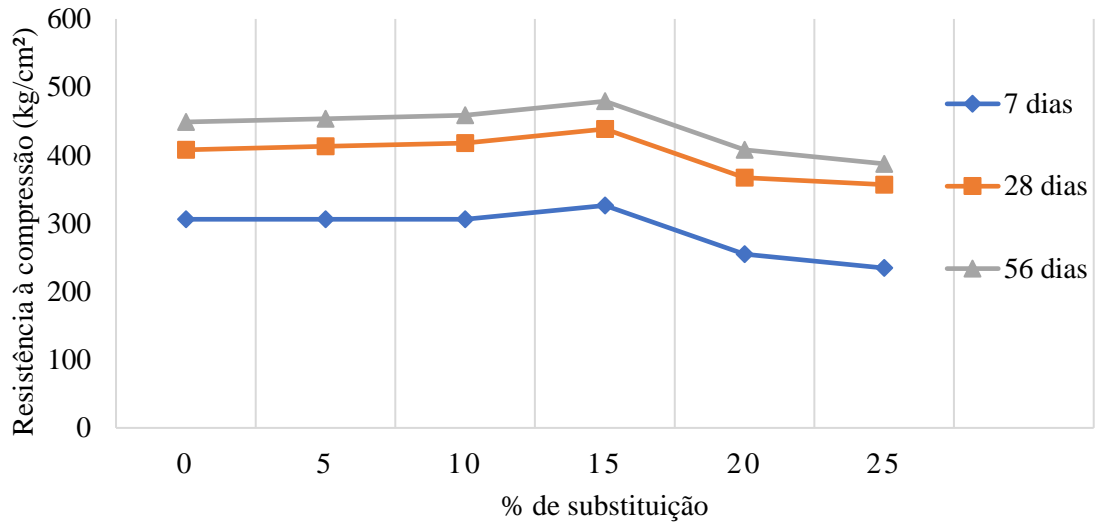


Figura 8. Resistência à compressão das amostras de concreto em relação a/c 0,35.

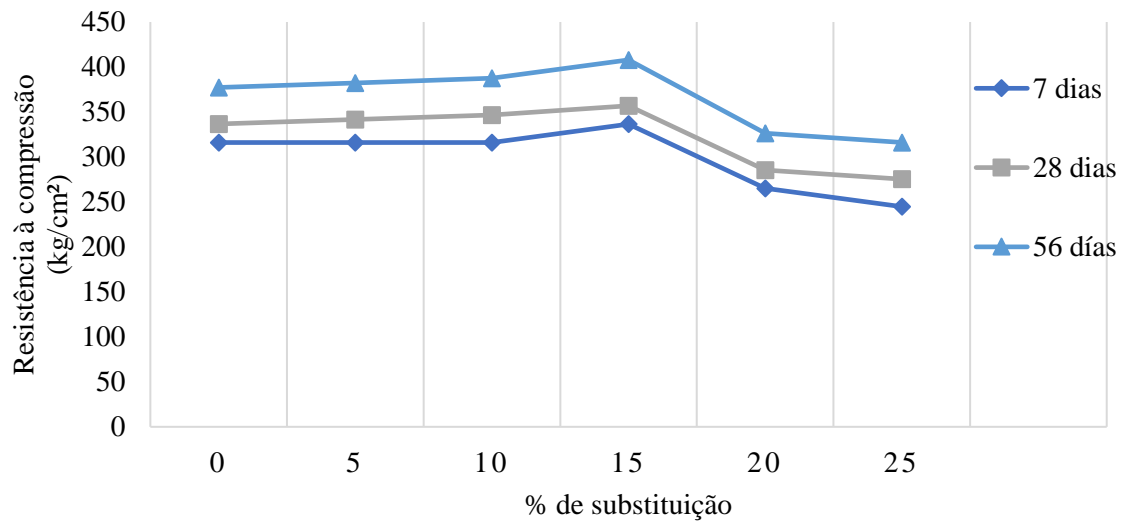


Figura 9. Resistência à compressão das amostras de concreto em relação a/c 0,40.

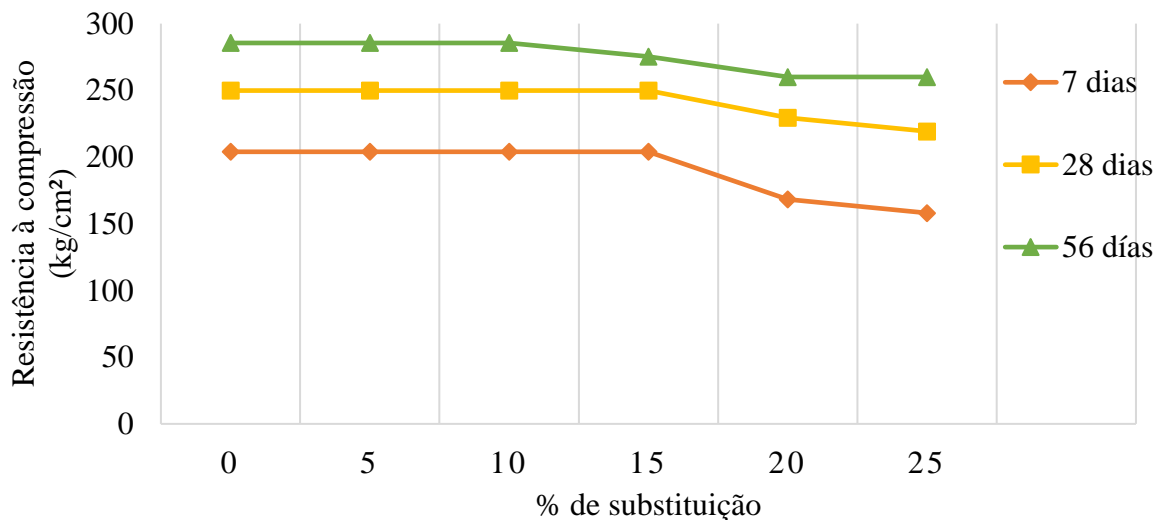


Figura 10. Resistência à compressão das amostras de concreto em relação a/c 0,45

Em outra pesquisa, experimentou-se a substituição de cimento por resíduos de mármore em 0, 5, 10 e 20%, e determinou-se que o uso de pó de mármore em concreto na faixa de 10-15% aumenta a resistência à compressão. (Khodabakhshian, et al., 2018).

Wang, Y., et al. (2022) fabricaram concreto substituindo o cimento por pó de mármore nas proporções de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, em amostras de cubos de 150 mm, realizando ensaios de resistência à compressão em 3, 7, 14 e 28 dias de idade, obtendo os seguintes resultados: a amostra controle apresentou resistências de 23,8, 29,8, 33,1 e 35,0 MPa aos 3, 7, 14 e 28 dias respectivamente, as amostras de 5% aos 3 dias obtiveram uma resistência à compressão menor que a amostra original, a amostra com 10% de pó de mármore de 3 a 14 dias, da mesma forma que a de 5%, teve uma resistência menor, mas aos 28 dias foi de 35,4 MPa, aumentando 1,14% em relação à amostra original. As demais substituições (15%, 20% e 25%) apresentaram resistência à compressão até 21,14% (28 dias) menor que a amostra sem pó de mármore.

Talah, Kharchi e Chaid (2015) constataram que o pó de mármore pode ser substituído pelo cimento e ter ganho de resistência à compressão se houver uma vibração para retirar o ar na fabricação das amostras. Ghorbani, S., et al. (2018), Mostafa Shaaban (2020), Babouri, L., et al. (2020), (Khodabakhshian, et al., 2018), e Wang, Y., et al. (2022), verificaram que a faixa de substituição do pó de mármore por cimento, para que a resistência à compressão não seja afetada, é de 0 a 10%. A partir desta seção pode-se concluir que até 10% do pó de mármore pode ser substituído por cimento para que a resistência à compressão do concreto não seja afetada. De acordo com os resultados dos ensaios, a resistência à compressão é afetada quando a substituição do pó de mármore é superior a 10%.

#### 2.4 Pó de mármore, concreto, argamassa e superplastificantes.

Aditivos redutores de água (plastificantes) e redutores de água de alto rendimento (superplastificantes) contribuem para o aumento da durabilidade e proporcionam uma redução na quantidade de água em pelo menos 5%, diminuindo a relação a/c, e os superplastificantes, em pelo menos 12 % e até 40%.

Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) em uma amostra de referência, substituíram 10% de cimento por pó de mármore e em uma segunda opção substituíram 10% de areia; além disso, foi adicionado um aditivo superplastificante de base acrílica na proporção de 0,5% do peso do cimento, conforme apresentado na Tabela 6.

Três cubos obtidos a partir de barras de 40 x 40 x 160 mm de cada traço foram fabricados para realizar ensaios de compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias de cura.

Tabela 6. Traços de argamassa com superplastificante.

Mistura	Ref	10% Cimento	10% Areia
A/C	0,48	0,49	0,53
Água (kg/m <sup>3</sup> )	220	200	240
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	450	405	450
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	1350	1350	1215
Pó de mármore (kg/m <sup>3</sup> )	0	45	135
Aditivo superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	2,25	2,02	2,25

As duas amostras relataram maior resistência à compressão em idades precoces. Aos 28 dias de idade, a amostra de referência obteve maior resistência, porém, o uso do plastificante proporcionou um aumento na resistência à compressão em relação ao estudo realizado sem aditivo. (Figuras 2 e 11).



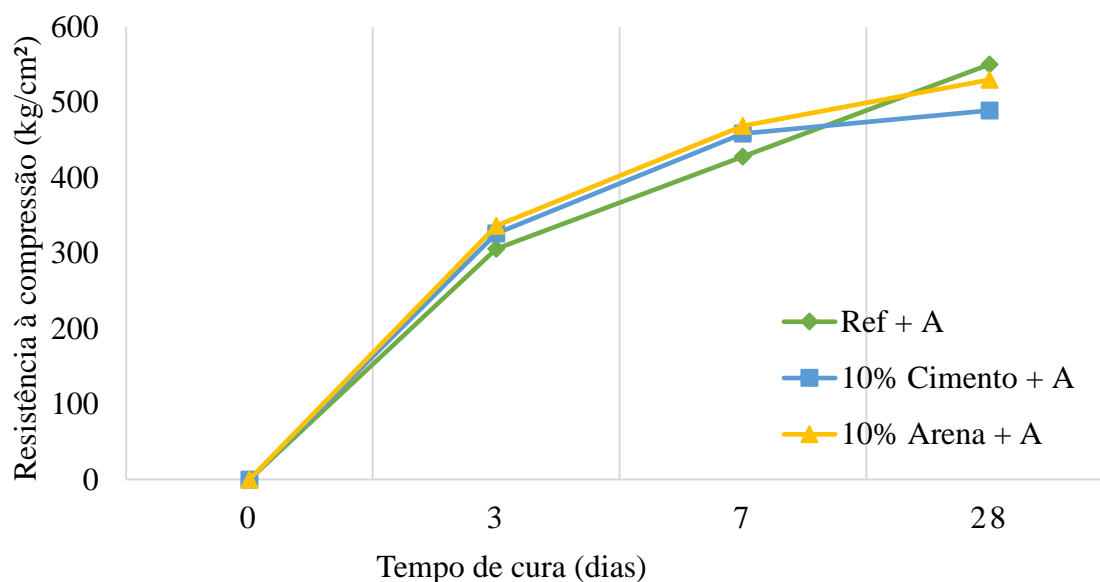


Figura 11. Resistência à compressão com relação ao tempo de cura em argamassas com aditivo superplastificante.

Em suma, quando um superplastificante é usado no concreto, obtém-se um aumento na resistência à compressão. Pode-se dizer que o pó de mármore pode ser substituído por cimento em quantidade superior a 10% e para compensar a resistência, é aplicado um superplastificante.

## 2.5 Estudos experimentais prévios para fazer tijolos com pó de mármore.

Santos, Villegas e Betancourt (2012) realizaram um estudo propondo uma série de dosagens com base no pó de mármore, a quantidade de cimento nas amostras variou e a quantidade de água não se alterou (Tabela 7).

Tabela 7. Resultados de tijolos à base de pó de mármore. (Santos, et al., 2012)

Amostra No.	Cimento %	Água (c+RM) %	Resistência (kg/cm <sup>2</sup> )	Absorção %
1	8	15	45.83	17
2	11	15	81.56	16
3	14	15	82.76	18

Foram confeccionados corpos de prova de 15 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, além de cubos de 5 cm. Eles concluíram que a forma dos tijolos não afetou os resultados.

Os resultados mostram que há uma influência importante na resistência com o aumento de 8 para 11% do cimento, mas em um percentual maior que 11% não há aumento da resistência.

Os resultados mostram que a absorção não mudou dependendo da quantidade de cimento.

Morales-Olán, et al.(2015) propõem a fabricação de um bloco com seção de 14 x 20 x 40 cm, feito com pó de mármore, adição de tepezil, cimento e água. A dosagem é apresentada na Tabela 8. As misturas foram compactadas por meio de vibração e prensagem e submetidas a um processo de secagem ao sol por 48 horas.

Tabela 8. Traço em porcentagem de materiais nas misturas avaliadas.  
(Morales-Olán , et al., 2015)

<b>Material</b>	<b>M1 %</b>	<b>M2 %</b>
Resíduo de Mármore	55	35
Adição de Tepezil	31	51
Cimento	6	6
Água	8	8

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água mostram que: a amostra 1 absorve menos água que a amostra 2, em termos de ensaios de resistência à compressão, eles relatam um melhor desempenho da amostra 1 em relação à amostra 2, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9. Percentual de absorção de água e resistência à compressão das amostras.  
(Morales-Olán , et al., 2015)

<b>Amostra No.</b>	<b>Absorção de água %</b>	<b>Resistência (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
1	19,43 ± 5,55	38,40 ± 1,84
2	23,91 ± 0,25	21,46 ± 3,25

Com os resultados apresentados, a amostra 1 atende as características necessárias indicadas na NMX-C-441-ONNCCE-2013 para funcionar como material de construção para uso não estrutural. Outro estudo realizado para a fabricação de tijolos com pó de mármore foi realizado por Nevárez e Rangel (2014). A Tabela 10 mostra a dosagem utilizada para fazer os tijolos de referência, curados da forma tradicional e saturados com água. As Tabelas 11 e 12 relatam os resultados dos ensaios de compressão do tijolo, com duas opções para a quantidade de cimento, 12 e 15%. Uma pré-carga de 100 kg/cm<sup>2</sup> foi aplicada a todas as amostras durante o processo de preenchimento do molde por um minuto, mas o autor não explica o processo de pré-carga em seu documento.

Tabela 10. Dosagens submetidas ao ensaio de resistência à compressão.  
(Nevarez & Rangel, 2014)

<b>Material</b>	<b>12% de mistura de cimento</b>	<b>15% de mistura de cimento</b>
Pó de mármore	10 kg	10 kg
Cimento	1,2 kg	1,5 kg
Areia	2 kg	2 kg
Água	2 l	2 l

Tabela 11. Resultado de resistência à compressão de amostras de tijolos em 7, 14 ou 28 dias de cura de 15% de cimento (Nevarez &amp; Rangel, 2014)

Amostra No.	7 dias de cura (kg/cm <sup>2</sup> )	14 dias de cura (kg/cm <sup>2</sup> )	28 dias de cura (kg/cm <sup>2</sup> )
1	122,70	89,12	89,99
2	138,50	testemunho	testemunho
3	140,70	119,29	testemunho
4	136,60	86,05	87,47
5	144,30	testemunho	88,00
6	129,90	86,46	88,96
7	109,70	88,00	87,88
8	149,90	86,79	88,57
9	130,90	86,61	86,20
10	100,40	87,79	86,16

Tabela 12. Resultados da resistência à compressão com 12% de cimento. (Nevarez &amp; Rangel, 2014)

No. Dias	Resistência à compressão (kg/cm <sup>2</sup> )
7 dias	107,00
14 dias	107,15
28 dias	95,55

Para o caso de 12% de cimento nas amostras, conclui-se que a maior resistência à compressão ocorre nas idades precoces, ou seja, aos 7 dias, enquanto para as idades de 14 e 28 dias a resistência diminui em comparação com 7 dias, mas a magnitude se mantém entre 14 e 28 dias. Para o caso de 15% de cimento, a resistência à compressão diminui em comparação com as amostras de 12% na idade de 7 dias, mas nas idades de 14 e 28 dias aumenta, o que indica que para a quantidade de cimento em pequenas percentagens a resistência aumenta em idade precoce e porcentagens mais altas aumentam a resistência em idades avançadas.

Betancourt et al (2015) confeccionaram um tijolo com Cimento Portland Compósito tipo I, água potável, areia de rio e pó de mármore, a fim de observar o comportamento de diferentes proporções e formas das amostras, cubos de 5 x 5 x 5 cm, corpos de prova de 7,5 de diâmetro e 15 cm de altura e pastilhas de 5 x 10 cm; os resultados dos ensaios de compressão são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente.

Tabela 13. Resistência à compressão em cubos de 5 x 5 x 5 cm feitos com base de pó de mármore. (Betancourt Chávez, et al., 2015)

Mistura #	Cimento %	Cal %	Água %	Resistência à compressão kg/cm <sup>2</sup>
1	25	0	20	76,60
2	22,5	2,5	20	60,00
3	20	5	20	52

Tabela 14. Resistência à compressão, em elementos cilíndricos de 7,5 x 15 cm feitos com base em pó de mármore. (Betancourt Chávez, et al., 2015)

Mistura #	Cimento %	Cal %	Água %	Resistência à compressão. kg/cm <sup>2</sup>
1	25	0	20	67.90
2	22.5	2.5	20	56.24
3	20	5	20	48.00

Tabela 15. Resistência à compressão de pastilhas de 5 x 10 cm com material base de pó de mármore e areia, prensadas a 70 kg/cm<sup>2</sup>. (Betancourt Chávez, et al., 2015)

Amostra	Cimento %	Areia %	Água %	Resistência à compressão kg/cm <sup>2</sup>
1	8	0	20	28
2	10	20	20	76
3	10	30	20	90

As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam os resultados de resistência à compressão de cubos, cilindros e pastilhas feitos com pó de mármore em seu maior percentual. As tabelas mostram apenas os percentuais de cimento, areia e água e o percentual que falta para chegar a 100% em cada peça é o que corresponde ao pó de mármore.

Os elementos com maior quantidade de cimento apresentaram melhores resultados de compressão. A forma do elemento não influencia significativamente os resultados. Em relação aos resultados da Tabela 15, observa-se que, ao adicionar areia e comprimir a amostra, a resistência à compressão aumenta (Betancourt Chávez, et al., 2015).

Para as dosagens anteriores, considerou-se que, a partir do peso do pó de mármore a ser utilizado, foram utilizadas as porcentagens de cimento, cal, areia e água conforme indicado nas tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 16. Dosagem de tijolo de mármore com areia de rio (AR). (Moreno Juárez, et al., 2020)

Material	Quantidade
Pó de mármore	15 kg
Cimento	2,25 kg
Areia de Rio	3 kg
Água	7 l

Na primeira mistura é adicionada areia de rio, na segunda mistura areia de rio é substituída 100% por areia de calcário triturada (AT), a terceira mistura areia de rio é substituída 100% por areia de sílica (S), a seguinte mistura com 66% de sílica areia e o restante do agregado com areia de rio (SR), na última mistura com 66% de areia de rio e o restante com areia de sílica (RS). Os resultados da compressão aos 28 dias de cura, de acordo com cada mistura, são apresentados na Figura 12.

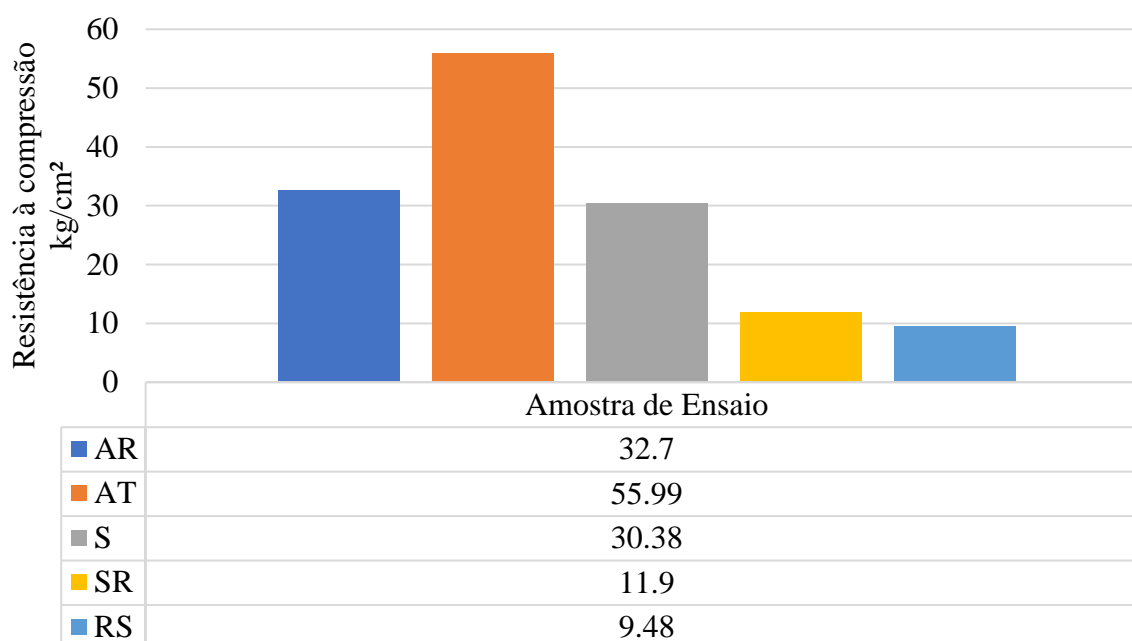


Figura 12. Resistência à compressão dos corpos de prova. (Moreno Juárez, et al., 2020).

Com os resultados apresentados, a mistura AT apresentou melhor comportamento de compressão (Figura 12), mas não possui resistência suficiente para funcionar como tijolo estrutural segundo a norma NMX-C-404-ONNCCE-2012.

No Paquistão, Khan, et al (2021) analisaram o comportamento do tijolo de barro com a substituição parcial do pó de mármore em percentuais de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Três diferentes fábricas de tijolos da região participaram do estudo; os resultados obtidos foram semelhantes em cada uma das empresas participantes. Foram realizados ensaios de eflorescência, condutividade térmica, resistência à compressão, porosidade, absorção e densidade.

A densidade dos tijolos na amostra original sem pó de mármore foi de 1,55 g/cm<sup>3</sup>, e diminuiu à medida que a porcentagem de substituição aumentou até atingir 30% com densidade de 1,27 g/cm<sup>3</sup>. As amostras não apresentaram eflorescência. A porosidade das amostras também aumentou de acordo com o percentual de substituição do pó de mármore, de 12,6% para 52,71%, isso devido à liberação de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), além de Óxido de Cálcio (CaO), sendo expansível na amostra, portanto, também se reflete um aumento na absorção de amostras de 18% para 36%. Dado o aumento da porosidade nos tijolos, a resistência à compressão também é bastante afetada, diminuindo a resistência à compressão de 18,06 MPa para 4,83 MPa. Khan et al (2021) comentam que as normas turcas e europeias indicam que um tijolo de barro deve ter uma resistência mínima de 7 MPa, para que uma substituição de até 20% de pó de mármore por barro atenda às normas de resistência. Devido ao aumento da porosidade dos tijolos, a condutividade térmica diminuiu de 0,99 para 0,86 W/mK, e conclui-se que com este resultado as peças funcionariam como isolante térmicas.

Santos, Villegas, Betancourt (2012) e Khan et al (2021) encontraram bons resultados na resistência à compressão de tijolos em baixos níveis de substituição do pó de mármore e em percentuais maiores a resistência diminui, Morales-Olán, et al (2015) mostram resultados onde o pó de mármore é combinado com a adição de Tepezil e mostra-se que quanto maior a substituição do pó de mármore, maior a resistência. Nevárez e Rangel (2014) apresentam altas resistências à compressão em seus tijolos desde que haja uma pré-carga na fabricação dos tijolos, Betancourt et al (2015) constataram que a resistência à compressão das amostras é proporcional à quantidade de cimento, que ou seja, quanto maior o cimento, maior a resistência. Moreno et al (2020) em suas

pesquisas utilizaram diferentes tipos de areia, resultando na areia calcária com melhor desempenho. Como conclusão desta seção, determina-se que os tijolos de pó de mármore podem ser usados como elementos não estruturais e como isolantes térmicos.

### 3. CONCLUSÕES

Como conclusão desta revisão, pode-se citar que o pó de mármore pode ser utilizado na construção civil tanto para substituir o cimento, para substituir o agregado miúdo ou para fazer tijolos não estruturais. É um tema com muito potencial onde bons resultados podem ser obtidos se a investigação for aprofundada.

Mostra-se que o pó de mármore como substituto parcial do cimento em proporções de até 10 a 15% mantém ou oferece um aumento na resistência à compressão na fabricação de argamassa, concreto e tijolo.

A adição de superplastificantes mostrou aumento da resistência à compressão nas misturas convencionais de concreto e a substituição parcial do pó de mármore por cimento não afeta a resistência à compressão nesta condição.

O pó de mármore como principal agente de fabricação de tijolos, complementado com areia e cimento, são viáveis para uso não estrutural na construção de alvenarias em residências.

Por outro lado, a redução da quantidade de cimento utilizada nos projetos de concreto e argamassa reduz os custos, pois a diferença de valor comercial em relação ao pó de mármore é maior no cimento. Isso implica que o uso de pó de mármore na fabricação de tijolos diminui o custo das peças.

A energia necessária na produção de cimento é de cerca de 1,18 GJ/ton. Portanto, se uma substituição de 15% do cimento for substituída por pó de mármore, reduz o consumo de energia em quase 1,05%.

Com a redução do teor de cimento, a pegada de carbono apresentaria uma redução, pelo que a sua utilização teria um impacto positivo no ambiente.

Para a fabricação de tijolos, observa-se que, se for utilizada uma compactação do material no processo de fabricação, consegue-se uma maior resistência à compressão, conclui-se também que utilizar areia de britagem ao invés de areia de rio auxilia na resistência das peças.

No caso do concreto, foi comprovado que a perda de resistência é proporcional ao aumento da substituição do pó de mármore. Foi demonstrado que o percentual máximo de substituição do pó de mármore por cimento é de 10% para que a resistência não seja afetada.

Para a aplicação do pó de mármore em argamassas, conclui-se que é semelhante à aplicação do pó de mármore em concreto ou tijolo, ou seja, que a resistência à compressão com baixos percentuais de pó de mármore não é afetada.

Com base no exposto, é possível continuar estudando a aplicação do pó de mármore na fabricação de argamassa, concreto e tijolo. Na fabricação de tijolos, só é necessário encontrar a dosagem adequada para que as peças possam ser utilizadas como estruturais, para isso é necessário continuar estudando este tema e encontrar a dosagem e agregados adequados.

### 4. REFERÊNCIAS

Khodabakhshian, A., de Brito, J., Ghalehnovi, M., Shamsabadi, E. A. (2018), *Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder*. Construction and Building Materials, Volume 169, Pages 237-251, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.192>

Talah, A., Kharchi, F., Chaid, R. (2015), *Influence of Marble Powder on High Performance Concrete Behavior*, Procedia Engineering, Volume 114, Pages 685-690,



<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.010>

Betancourt Chávez, J. R., Lizárraga Mendiola, L. G., Narayanasamy, R., Olguín Coca, F. J., Sáenz López, A. (2015), *Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 9(3), 1-12, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193943013004>

Coordinación General de Minería (2014). *Perfil del Mercado del Mármol*. Ciudad de México: Dirección General del Desarrollo Minero.

Ferraz, D. F. (2016), *Aditivos reductores de agua para concreto premezclado*. Construcción y Tecnología en Concreto. <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/mayo2016/experto.pdf>

Ghorbani, S., Tahi, I., Tavakkolizadeh, M., Davodi, A., de Brito, J. (2018), *Improving corrosion resistance of Steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement*, Construction and Building Materials, Vol. 185 Pages: 110-119, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.066>

El-Sayed, H. A., Farag, A. B., Kandeel, A. M., Younes, A. A., Yousef, M. M. (2018), *Characteristics of the marble processing powder waste at Shaq El-Thoaban industrial area, Egypt, and its suitability for cement manufacture*, HBRC Journal, 14:2, 171-179, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2016.06.002>

Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E. (2011), *Use of waste marble aggregates in concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 3, Pages: 1167-1171, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>

Ince, C., Hamza, A., Derogar, S., Ball, R. (2020), *Utilization of waste marble dust for improved durability and cost efficiency of pozzolanic concrete*, Journal of Cleaner Production, vol. 270, 122-213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122213>

Khan, Z., Gul, A., Ali Shah, S. A., Qazi, S., Wahab, N., Badshah, E., Naqash, T., Shahzada, K. (2021). *Utilization of Marble Wastes in Clay Bricks: A Step towards Lightweight Energy Efficient Construction Materials*. Civil Engineering Journal, Vol. 7, No. 09, September, 2021, Pages 1488-1500, <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091738>

Li, L. G., Huang, Z. H., Tan, Y. P., Kwan, A. K. H., Chen, H. Y. (2019), *Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar*, Journal of Cleaner Production, Volume 210, Pages 55-65, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.332>.

Singh, M., Srivastava, A., Bhunia, D. (2017), *An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry*, Construction and Building Materials, Volume 134, Pages 471-488, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155>.

Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., Bhunia, D. (2017), *A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete*, Journal of Building Engineering, Volume 13, Pages 87-95, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2017.07.009>.

Morales-Olán, G., et. al. (2015), *Desarrollo de un bloque de construcción a base de desecho de corte generado por la industria marmolera*. Revista Congreso Nacional de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable, pp. 80-83.

Moreno Juárez, A. N., Ponce Palafox, C., López Montelongo, A. M., Cárdenas Díaz, O. E. (2020), *Aplicación del polvo de mármol para fabricar ladrillo estructural con dimensiones tradicionales en la Comarca Lagunera utilizados en muros de vivienda*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 14(1),1-10. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193962633006>

Nevarez, C., Rangel, L. (2014), *Estudio experimental realizado para elaborar ladrillos con residuos de mármol (polvo)*. Tesis Licenciatura, Gómez Palacio, Dgo.: Universidad Juárez de Estado de Durango UJED.

Babouri, L., Biskri, Y., Khadraoui, F., El Mendili, Y. (2020), *Mechanical performance and*

- corrosion resistance of reinforced concrete with marble waste*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1838952>
- Rahangdale, S., Qureshi, S. (2019), *Study of Compressive Strength of Cement Concrete with Stone and Marble Dust*, International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN: 2319-7064, Vol. 8, No. 1, January 2019, <https://www.ijsr.net/archive/v8i1/ART20194592.pdf>
- Sánchez Pérez, C. J., Castillejo Cans, M. A. (2018), Caracterización geomecánica de rocas dimensionables: casos faja dolomítica y esquistos verdes, yacimiento de canteras tacarigua, C.A. Jornadas de Investigación. Encuentro Académico Industrial. Facultad de ingeniería UCV (JIFI2018). <http://www.ing.ucv.ve/jifi2018/documentos/cienciatierra/CT-017.pdf>
- Santos, A., Villegas, N., Betancourt, J. (2012), *Residuo de mármol como insumo en la construcción civil: diagnóstico de la Comarca Lagunera*. Revista de la construcción, 11(2), 17-26. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000200003>
- Shaaban, M. (2020), *The Effects of Marble Dust on the Rheological and Mechanical Properties of Shotcrete*, Engineering, Tehcnology & Applied Science Research, Vol. 10, No. 5, pp. 6334-6348. [https://pdfs.semanticscholar.org/3c8f/4b16c8512037e6c97aed1b14d29efb89646d.pdf?\\_ga=2.66500078.1376494727.1650224112-2140534152.1650224112](https://pdfs.semanticscholar.org/3c8f/4b16c8512037e6c97aed1b14d29efb89646d.pdf?_ga=2.66500078.1376494727.1650224112-2140534152.1650224112)
- Servicio Geológico Mexicano (2019). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2018. Ciudad de México: Secretaría de Economía. PUBLICACIÓN NO. 48. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/683099/Anuario\\_2018\\_Edicion\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/683099/Anuario_2018_Edicion_2019.pdf)
- Tobón, J., Gomez, R. (2008). Desempeño del cemento pórtland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza. Dyna. vol.75 no.156 Medellín Sep./Dic. 2008. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532008000300017](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532008000300017)
- Toubal Seghir, N., Mellas, M., Sadowski, Ł., Krolicka, A., Žak, A., Ostrowski, K. (2019), *The Utilization of Waste Marble Dust as a Cement Replacement in Air-Cured Mortar*. Sustainability, 11 (8), 22-15. <https://doi.org/10.3390/su11082215>
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., Naik, T. R. (2010), *Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete*, Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 1, Pages 113-117, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013>.
- Verma, M., Kaushal, N., Assistant, A. (2019). *Waste marble Powder/Dust*.
- Wang, Y., Xiao, J., Zhang, J., Duan, Z. (2022), *Mechanical Behavior of Concrete Prepared with Waste Marble Powder*. Sustainability 14, 41-70. <https://doi.org/10.3390/su14074170>
- Yamanel, K., Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İsmail İsa, Karahan, O., Duran, C. (2019), *Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar*. Revista de la Construcción. 18(2), 290–300. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.290>

## Influência da cura térmica nas propriedades física e mecânica de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro

F. G. S. Ferreira<sup>1\*</sup> , L. V. Dias<sup>1</sup> , S. M. Soares<sup>2</sup> , A. L. Castro<sup>3</sup> 

\* Autor de contato: [fgiannotti@ufscar.br](mailto:fgiannotti@ufscar.br)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.546>

Recepção: 13/07/2021 | Aceitação: 28/02/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

Este trabalho visa avaliar o impacto da cura térmica e do uso de empacotamento de partículas em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho (CCUAD), com e sem pó de vidro. Para tanto, foram moldados corpos de prova com 0% e 50% de pó de vidro (substituição volumétrica ao cimento), além de dois traços obtidos através do empacotamento de partículas. As amostras foram submetidas a cura térmica e a cura úmida para comparação dos efeitos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. Os resultados indicaram que a cura térmica proporciona ganho inicial de resistência, a aplicação do empacotamento de partículas na dosagem das misturas resultou em uma significativa melhoria nas propriedades das amostras e o pó de vidro se mostrou um substituto viável para o cimento.

**Palavras-chave:** compositos cimenticios; cura térmica; empacotamento de particulas; pó de vidro

**Citar como:** Ferreira, F. G. S., Dias, L. V., Soares, S. M., Castro, A. L. (2022), "*Influência da cura térmica nas propriedades física e mecânica de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 184 – 199, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.546>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Caraguatuba, Brasil.

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor L. V. Dias contribuiu com as atividades de conceituação, desenvolvimento, resultados e discussão, redação e preparação do texto original (30%); S. M. Soares contribuiu com as atividades de conceituação, desenvolvimento, resultados e discussão (30%); F. G. S. Ferreira contribuiu com a conceituação, supervisão, discussão dos resultados, redação e revisão (20%) e A. L. Castro contribuiu com a conceituação, supervisão, discussão dos resultados, redação e revisão (20%).

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## **Influence of thermal curing in the physical and mechanical properties of ultra-high-performance concrete with glass powder**

### **ABSTRACT**

This paper aims to evaluate the impact of thermal curing and the use of particle packing in ultra-high-performance concrete (UHPC) using glass powder as a partial substitution of Portland cement. For this, specimens with 0% and 50% of glass powder (volumetric substitution to cement) were produced, as well as two mixes obtained by particle packing. The samples were submitted to thermal and standard curing to compare the effects. The samples were tested for compression resistance and capillary water absorption. The results indicate that thermal curing provides a high gain of resistance in early ages, the application of particle packing in the mix design resulted in a significant improvement in the concrete properties and the glass powder presented as a viable substitute for cement.

**Keywords:** cementitious composite; thermal curing; particle packing; glass powder

## **Influencia del curado térmico en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón de ultra alto desempeño con polvo de vidrio**

### **RESUMEN**

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto del curado térmico y el uso de empaquetamiento de partículas en compuestos cementosos de ultra alto desempeño (UHPC), con y sin polvo de vidrio. Para ello, los cuerpos de prueba fueron moldeados con 0% y 50% de polvo de vidrio (reemplazo volumétrico al cemento), además de dos mezclas obtenidas a través del empaquetamiento de partículas. Las muestras fueron sometidas a curado térmico y curado húmedo para comparar los efectos. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y absorción por capilaridad. Los resultados indicaron que el curado térmico proporciona ganancia de la resistencia inicial, la aplicación del empaquetamiento de partículas en las dosis de mezcla resultó en una mejora significativa en las propiedades de las muestras y el polvo de vidrio demostró ser un sustituto viable del cemento.

**Palabras clave:** compuestos cementosos; curado térmico; empaquetamiento de partículas; polvo de vidrio

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310. As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

Visando atender à crescente demanda das últimas décadas por estruturas mais duráveis e com resistência mecânica mais elevada surgiram os compósitos cimentícios de ultra alto desempenho (CCUAD). As primeiras referências ao termo são atribuídas a de Larrard e Sedran, no ano de 1994 (Shi *et al.*, 2015), para se referir a um compósito de elevada resistência mecânica (superior a 150 MPa) e alta durabilidade (Alkaysi *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2019). Para atingir estas características são necessários um elevado consumo de cimento (da ordem de 1000 kg/m<sup>3</sup>), uma baixa relação água/cimento (a/c) (entre 0,14 e 0,20), permitindo redução da porosidade, e o uso de aditivo superplastificante para conferir trabalhabilidade adequada ao material (Ganesh e Murthy, 2019). A inclusão de sílica ativa também gera alterações na trabalhabilidade, além de aumentar a resistência final devido ao melhor preenchimento dos vazios e às reações pozolânicas geradas (Abbas *et al.*, 2015).

A aplicação de modelos de empacotamento de partículas é necessária para a determinação da composição de misturas especiais, como o CCUAD, uma vez que permitem a melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade do compósito cimentício, por meio do aumento da densidade da matriz (Castro e Ferreira, 2016). O conceito de empacotamento contribui também para o aumento da densidade com a remoção do agregado graúdo (Zhang *et al.*, 2019). Além disso, ao se remover o agregado graúdo, os vazios internos são reduzidos, diminui-se a zona de transição e gera-se uma distribuição mais homogênea das tensões nos grãos (Tutikian *et al.*, 2011).

As primeiras referências publicadas sobre o empacotamento de partículas remontam a 1892 e são atribuídas a Féret (Castro e Pandolfelli, 2009). Em 1930 Furnas desenvolveu um dos primeiros modelos de empacotamento, baseado em uma abordagem discreta. Posteriormente, foi desenvolvido por Andreasen um modelo baseado em distribuições contínuas. Por fim, Funk e Dinger (1994) analisaram ambos os modelos e verificaram que eles se aproximavam de uma mesma solução. Desta maneira, os autores aperfeiçoaram seu modelo, conhecido como modelo de Alfred, obtendo uma análise tida como a que gera os melhores resultados (Lopes, 2019).

O procedimento de cura adotado também influencia no desenvolvimento da resistência mecânica em materiais à base de cimento como o CCUAD. A utilização de cura térmica, com temperatura entre 90°C e 400°C, pode maximizar a resistência mecânica do compósito cimentício devido à aceleração das reações pozolânicas, que melhoram a microestrutura da matriz (Ganesh e Murthy, 2019).

O principal efeito da cura térmica em concretos está ligado ao aumento da densidade gerado pela maior quantidade de C-S-H que é produzida (Bahedh e Jaafar, 2018). Tal processo propicia um aumento significativo da resistência dos concretos nas primeiras idades, quando realizado em temperaturas de 90°C e ambientes de alta umidade (Heinz *et al.*, 2012). No entanto, de acordo com Terzian (2005), concretos submetidos a procedimentos de cura térmica, em temperaturas superiores a 70°C, podem apresentar reduções da ordem de 10% a 20% na sua resistência final.

A incorporação de adições minerais pode auxiliar na obtenção de um melhor empacotamento das partículas e também contribuir na redução do impacto ambiental. É sabido que o processo de fabricação do cimento gera grande impacto ambiental, sendo liberada cerca de 0,8 tonelada de CO<sub>2</sub> para produzir uma tonelada de cimento (Mehta e Ashish, 2020). Desta maneira, o alto consumo de cimento necessário para produção do CCUAD gera um impacto ambiental extremamente significativo. Logo, buscar um substituto viável para o cimento que não gere prejuízos significativos às propriedades do compósito é interessante. O pó de vidro apresenta características que o tornam um substituto possível ao cimento, uma vez que apresenta significativa atividade pozolânica devido seu alto teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) e sua estrutura amorfa, além de ser abundante: em 2005 os EUA geraram 12,8 milhões de toneladas de resíduo, das quais apenas 2,75 milhões foram recicladas (Schwarz *et al.*, 2008); em 2007 a União Europeia gerou cerca de 25,8 Mt de



resíduo de vidro (Abdollahnejad *et al.*, 2017); e em 2008 o Brasil consumiu 5,5 kg/hab. de embalagens de vidro, dos quais 80% não foram reciclados (IPEA, 2012). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da cura térmica sobre as propriedades físicas e mecânicas de CCUAD com e sem a inclusão de pó de vidro.

## 2. PROCEDIMENTO

### 2.1 Materiais utilizados

Nesta pesquisa foram utilizados como aglomerantes o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), a sílica ativa, e o pó de vidro obtido a partir da moagem de garrafas da cor âmbar, que foi posteriormente peneirado na peneira de malha #200 (partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ ). Como agregado miúdo foi utilizada areia natural quartzosa. Além disso, utilizou-se sílica moída (SM200) como fíler, aditivo superplastificante à base de policarboxilato para conferir a trabalhabilidade adequada devido à baixa relação água/aglomerante considerada e aditivo redutor de retração a fim de evitar a fissuração da matriz. As características dos materiais granulares constituintes, considerados na produção dos CCUAD, são apresentadas nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1. Características físicas e mecânicas do cimento (CPV ARI)

Parâmetro	Método	Valor obtido	Valor de referência NBR 16697 (ABNT, 2018)
Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,16 g/cm <sup>3</sup>	-
Início de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	135 min	$\geq 60$ min
Fim de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	210 min	$\leq 600$ min
Água para pasta de consistência normal	NBR 16606 (ABNT, 2018)	30,0%	-
% retida na peneira 75 $\mu\text{m}$	NBR 16372 (ABNT, 2015)	0,1%	$\leq 6,0\%$
Superfície específica - Blaine	NBR 16372 (ABNT, 2015)	665,0 m <sup>2</sup> /kg	-
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)	1 dia	$\geq 14,0$ MPa
		3 dias	$\geq 20,0$ MPa
		7 dias	$\geq 34,0$ MPa
		28 dias	-



Tabela 2. Características físicas da sílica ativa, pó de vidro e fíler

Parâmetro	Sílica ativa		Pó de vidro		Fíler	
	Valor obtido	Valor de referência da NBR 13956-1	Valor obtido	Valor de referência	Valor obtido	Valor de referência
Massa específica	2,25 g/cm <sup>3</sup>	-	2,55 g/cm <sup>3</sup>	-	2,70 g/cm <sup>3</sup>	-
Umidade		≤ 3.0%	-	-	-	-
% retida na peneira 45µm	Máx. 10.0%	≤ 10.0%	-	-	-	-
Superfície específica - Blaine	247,0 m <sup>2</sup> /kg	-	393,0 m <sup>2</sup> /kg	-	234,0 m <sup>2</sup> /kg	-
Índice de atividade pozolânica	Mín. 105.0%	≥ 105.0%	6,4 MPa*	6,0 MPa**	-	-

\* Método de ensaio de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015).

\*\* Valor de referência da NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 3. Características químicas dos materiais granulares constituintes do CCUAD.

Componente	Materiais (valores em % de massa)			
	Cimento	Sílica Ativa	Pó de Vidro	Agregado miúdo
Perda ao fogo (PF)	4,05 (≤ 6,50)*	3,60(≤ 6,00)**	0,58	0,58
Óxido de cálcio(CaO)	61,40	<0,20	9,10	0,071
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,31	<0,20	3,70	3,40
Anidro silícico (SiO <sub>2</sub> )	23,00	94,10	74,00	94,00
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	2,97 (≤4,5)*	-	-	-
Óxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,49	<0,50	0,42	0,67
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,96	1,28	0,56	1,20
Óxido fosfórico (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,52	-	-	-
Óxido de estrôncio (SrO)	0,27	<0,20	0,039	-
Íon Cloro (Cl <sup>-</sup> )	0,12	-	-	-
Dióxido de tório (ThO <sub>2</sub> )	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Uraninita (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	-	<0,20	-	0,35
Óxido de Cromo(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	-	-	0,049
Óxido de Magnésio (MgO)	-	-	0,74	-
Óxido de rubídio (Rb <sub>2</sub> O)	-	-	0,016	-
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	-	-	11,00	0,37

\* Valores de referência da NBR 16697 (ABNT, 2018).

\*\* Valores de referência da NBR 13956-1 (ABNT, 2012).

Tabela 4. Características físicas do agregado miúdo.

Parâmetro	Método	Valor obtido
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)	0,64%
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)	2,56 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária seca e solta	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1475,78 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária compactada	NBR 16972 (ABNT, 2021)	1617,83 kg/m <sup>3</sup>
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2006)	Solução mais clara que a padrão
Material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	NBR 16973 (ABNT, 2021)	1,66%

Na Figura 1 está apresentada a distribuição granulométrica do cimento, sílica ativa, pó de vidro, agregado miúdo (areia quartzosa) e fíler (SM200). Observa-se um  $d_{50}$  de 0,8µm para sílica ativa, de 7µm para o cimento, de 15µm para o pó de vidro, de 32µm para o fíler, e de 270µm para o agregado miúdo.

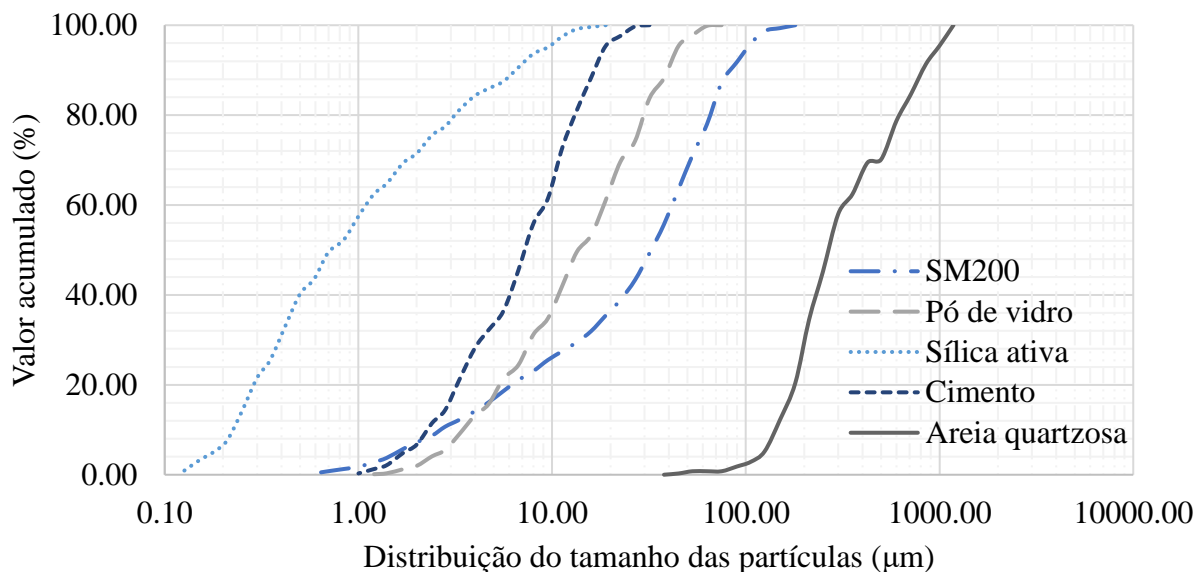


Figura 1. Distribuição granulométrica dos materiais granulares constituintes do CCUAD.

## 2.2 Metodologia

Para a produção de todas as misturas de CCUAD foi adotada uma relação água/aglomerante fixa de 0,18. Inicialmente foram produzidos dois traços, sendo um de referência (REF), com 0% de pó de vidro, e outro com 50% de pó de vidro (VD50) em substituição volumétrica ao cimento; em ambos os traços foi considerada a incorporação de sílica ativa, no teor de 8% em relação à massa de cimento do traço de referência. Na sequência, o traço VD50 foi otimizado com base no conceito de empacotamento de partículas, aplicando-se o modelo de Alfred (Equação 1).

$$CPFT = \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde: CPFT é a porcentagem acumulada de partículas de partículas de diâmetro inferior a  $D_p$ ,  $D_p$  é o diâmetro da partícula,  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula na distribuição,  $D_S$  é o diâmetro da menor partícula na distribuição, e  $q$  é uma constante, designada por módulo de distribuição granulométrica.

O valor do coeficiente de distribuição empregado na otimização do traço VD50 foi determinado considerando a distribuição granulométrica discreta e as proporções dos materiais constituintes do traço. Assim, foi obtida a curva de distribuição granulométrica experimental da mistura e, aplicando-se o modelo de Alfred, obteve-se a curva teórica. Por meio de um processo iterativo para ajustar a curva teórica à curva experimental, buscando obter o máximo coeficiente de correlação entre elas, foi determinado o valor do coeficiente de distribuição ( $q = 0,17$ ;  $R^2 = 0,9913$ ).

A composição da mistura otimizada foi determinada por meio de um processo de otimização matemática, que utilizou como dados de entrada a distribuição granulométrica discreta dos materiais constituintes da mistura e o coeficiente de distribuição determinado para o VD50. De maneira iterativa, o programa calcula o diâmetro da menor e da maior partículas presentes na mistura, fornecendo a curva de distribuição granulométrica teórica do modelo de empacotamento adotado (modelo de Alfred). Simultaneamente, o teor de cada material constituinte é ajustado a fim de obter o máximo coeficiente de correlação entre as curvas teórica e experimental. Ao final do processo, a composição da mistura otimizada é dada em termos de porcentagem, em massa, de cada material granular constituinte.

Assim, com o auxílio de um editor de planilhas, utilizando a ferramenta *solver*, foi determinada a proporção ótima dos materiais constituintes da mistura otimizada, identificada como VD50E. Como pode ser observado na Figura 2, a faixa granulométrica entre a areia e o pó de vidro não é preenchida por nenhuma partícula dos materiais granulares constituintes iniciais. Por esta razão, a fim de aumentar a eficiência do empacotamento do traço selecionado, foi incluído o fíler (SM200) à lista de materiais constituintes da mistura (Figura 3), gerando um segundo traço otimizado com base no conceito de empacotamento de partículas (VD50SM), aplicando-se o modelo de Alfred e o valor do coeficiente de distribuição determinado.

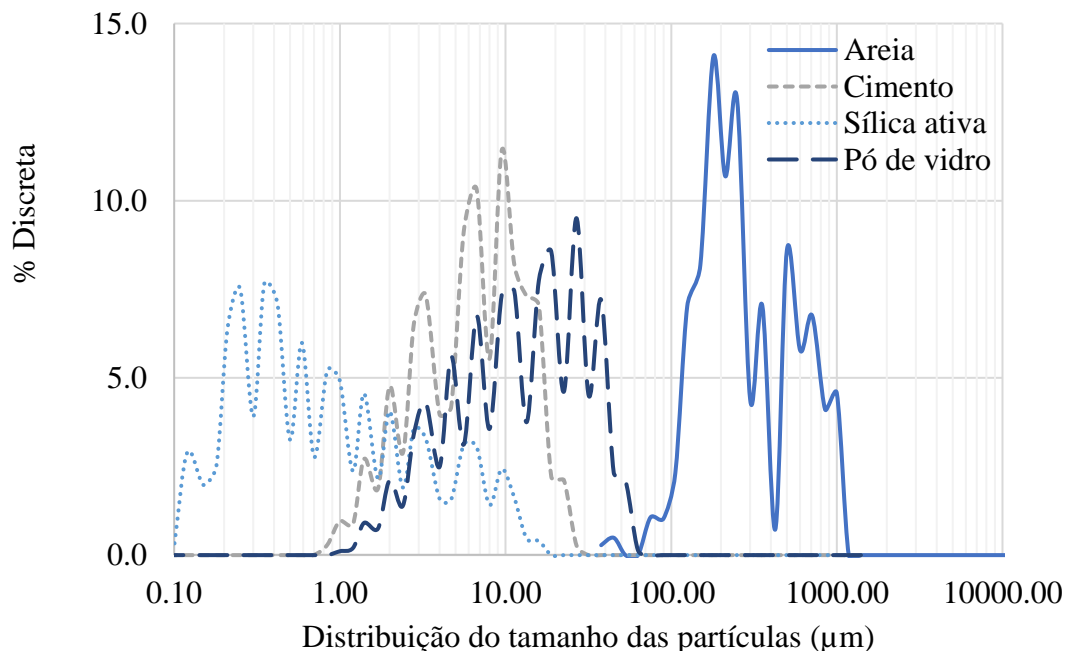


Figura 2. Distribuição granulométrica discreta dos materiais sem SM200.

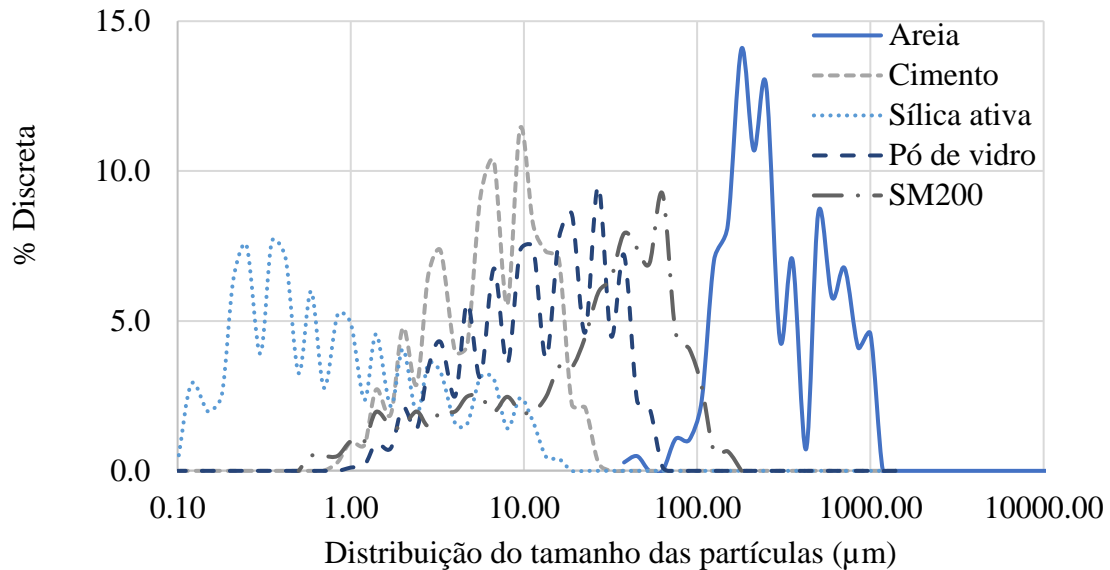


Figura 3. Distribuição granulométrica discreta dos materiais com SM200.

Na Tabela 5 estão apresentados o traço unitário (em massa), o índice de consistência e o consumo de cimento para os traços estudados. A consistência foi medida seguindo a NBR 13276 (ABNT, 2016). Ressalta-se que o teor de aditivo superplastificante foi determinado a fim de se obter uma consistência de  $(380 \pm 10)$  mm (consistência fluida) para os traços REF e VD50, sendo mantido o mesmo teor de superplastificante na produção dos traços otimizados, visando a redução de variáveis no processo. O teor de aditivo redutor de retração foi adotado com base nas recomendações do fabricante. A compatibilidade entre os aglomerantes e os aditivos foi verificada por meio do ensaio de miniabatimento (Kantro, 1980).

Tabela 5. Traço unitário, índice de consistência e consumo de cimento dos CCUAD produzidos.

Traço	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Fíler	Água	SP*	RR**	Consistência (mm)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
REF	1,00	0,08	0,00	1,07	0,00	0,18	0,02	0,01	380	1.000
VD50	1,00	0,16	0,81	2,15	0,00	0,18	0,04	0,02	385	500
VD50E	1,00	0,43	0,46	2,11	0,00	0,18	0,04	0,02	345	510
VD50SM	1,00	0,29	0,40	2,01	0,30	0,18	0,04	0,02	323	514

\*Aditivo superplastificante.

\*\*Aditivo redutor de retração.

Foram, então, moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 50 mm x100mm, adensados manualmente, seguindo um procedimento de mistura dos materiais desenvolvido durante a pesquisa e adequado para cada um dos diferentes traços (Figura 4). Na produção do traço VD50SM, o pó de vidro e o fíler foram pesados separadamente e, então, acondicionados na mesma embalagem e homogeneizados por cerca de 2 minutos antes de serem adicionados à mistura.

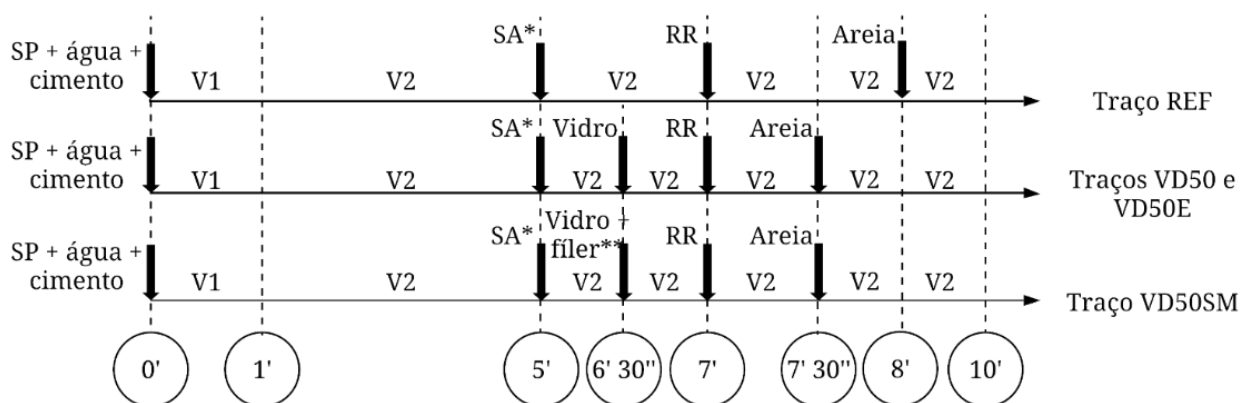


Figura 4. Procedimento de mistura dos traços, em que V1 e V2 representam, respectivamente, as velocidades baixa e alta da argamassadeira.

Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em câmara climatizada, onde permaneceram por um período de aproximadamente 48 horas, até a desmoldagem. Os corpos de prova foram então submetidos aos seus respectivos procedimentos de cura. Para a realização da cura térmica (CT) as amostras foram colocadas em um recipiente apropriado e cheio de água, de modo a garantir que todos os corpos de prova estivessem totalmente submersos. Este recipiente foi colocado em uma estufa não ventilada, que foi aquecida até  $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$  por duas horas, correspondendo a uma taxa de aquecimento de aproximadamente  $35^\circ\text{C/h}$ . Após este período de aquecimento, as amostras permaneceram na estufa por 24 horas, quando foram retiradas e levadas para uma sala climatizada, ficando neste ambiente por um período de 24 horas. Por fim, os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água saturada de cal até as idades de ensaio. Outro grupo de corpos de prova foi submetido à cura imersa (CI) em água saturada de cal.

Verificou-se, então, a resistência mecânica dos corpos de prova por meio do ensaio de compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 7, 28 e 180 dias, sendo considerados 8 corpos de prova por traço (4 para CT e 4 para CI). Além disso, foi avaliada a absorção de água por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012), aos 28 dias de idade, considerando 6 corpos de prova por traço (3 para CT e 3 para CI). Os resultados obtidos foram analisados utilizando a Análise de Variância (ANOVA) e nos casos em que  $F > F_{\text{crítico}}$ , indicando que existem diferenças estatísticas no grupo, foi utilizado o teste de Tukey para verificar quais amostras eram diferentes do restante do grupo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Resistência à compressão

Na Figura 5 são apresentados, graficamente, os resultados de resistência à compressão para os traços estudados. Os valores correspondem à média dos quatro valores individuais obtidos a partir dos corpos de prova ensaiados nas idades de interesse, ou seja, aos 7, 28 e 180 dias.

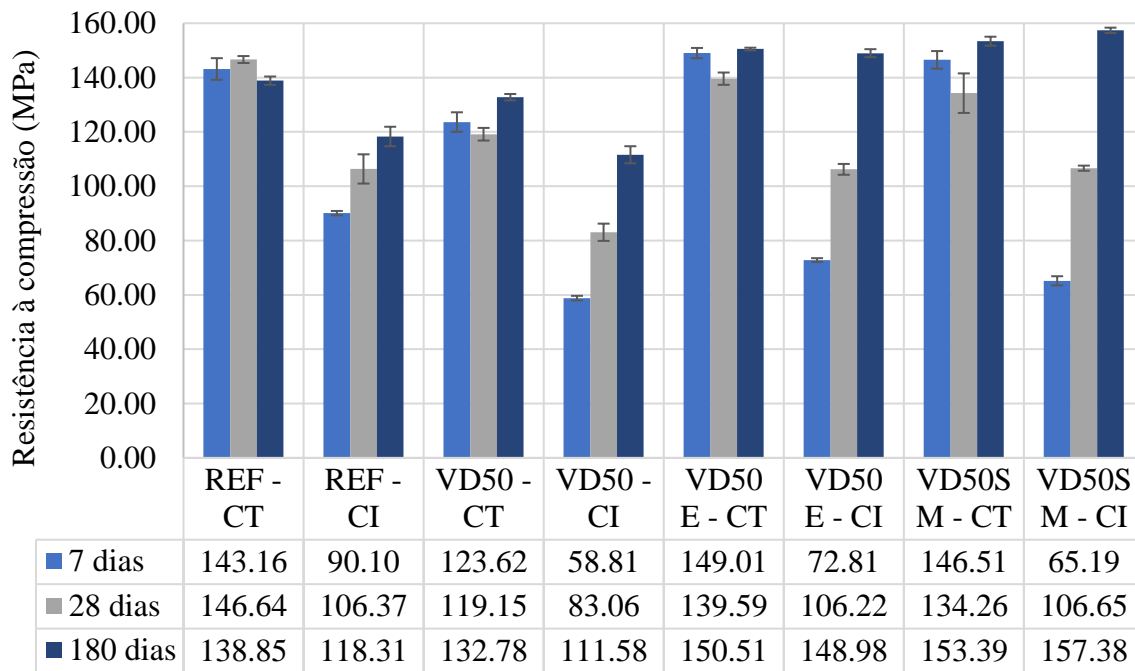


Figura 5. Resistência à compressão dos CCUAD produzidos.

Comparando os diferentes tipos de cura, aos 7 dias de idade, é possível observar que as amostras submetidas à CT atingiram valores de resistência cerca de 2 vezes maiores que as amostras submetidas à CI, com exceção do traço REF, que teve uma resistência cerca de 1,6 vezes maior. Tal ganho de resistência pode ser atribuído principalmente à aceleração das reações de hidratação do cimento e das reações pozolânicas das adições minerais incorporadas, devido à exposição à temperatura de  $(90\pm 5)^{\circ}\text{C}$  praticada na cura térmica. No entanto, este ganho não é tão expressivo nas idades mais avançadas (aos 180 dias) a relação CT/CI variou entre 0,97 e 1,17, o que pode ser explicado pelo fato de a cura térmica apenas antecipar a resistência final do compósito, tendo pouco impacto na resistência em idades posteriores, principalmente nos traços otimizados por meio do empacotamento de partículas. Comportamento semelhante foi observado por outros autores que avaliaram o desempenho de misturas de CCUAD sob diferentes condições de cura. Heinz *et al.* (2012) analisaram o desempenho mecânico de CCUAD por meio de corpos de prova cúbicos, submetidos à cura térmica, obtendo valores de resistência de 232,5 MPa, enquanto um valor de 136,3 MPa foi obtido aos 7 dias de idade quando realizada cura imersa (1,76 vezes maior); já aos 28 dias foram obtidas resistências de 232,8 MPa (CT) e 216,1 MPa (CI) (1,08 vezes maior). Sokolovicz (2020) investigou o comportamento de CCUAD submetidos à cura térmica e obtidos pelo empacotamento de partículas, obtendo resistências 1,25 vezes maior aos 7 dias e 1,13 aos 28 dias, quando comparado com as amostras submetidas à cura imersa.

Na Figura 5 é possível observar ainda que houve uma perda de resistência entre 7 e 28 dias nas amostras submetidas à CT. No entanto, tal perda não é significativa de acordo com a análise estatística ANOVA e o teste de Tukey. Melo (2000) atribuiu essa perda de resistência às modificações geradas na microestrutura do concreto devido ao processo acelerado da hidratação do cimento. É possível observar, ainda, uma recuperação da resistência nas idades mais avançadas (180 dias), podendo ser atribuída à atividade pozolânica da sílica ativa. Além disso, como verificado por Du e Tam (2015), as reações pozolânicas do pó de vidro são mais lentas, quando comparadas ao processo de hidratação do cimento, fato que pode ter contribuído também para posterior recuperação da resistência das amostras com incorporação deste material fino.

Nas amostras otimizadas por meio do empacotamento de partículas, inicialmente não ocorreu um



ganho de resistência significativo em relação às misturas dosadas tradicionalmente. Aos 7 dias de idade, as resistências das amostras dos traços VD50E e VD50SM são inferiores às de referência, no entanto são estatisticamente iguais à resistência do traço VD50. Tal fato pode ser explicado devido ao menor consumo de cimento dos traços VD50, VD50E e VD50SM em relação à mistura de REF, prejudicando o desempenho mecânico dessas misturas nas idades iniciais. Nas idades mais avançadas observa-se um ganho significativo de resistência das amostras otimizadas. Lopes (2019) também observou ganhos de resistência significativos após 28 dias de idade em concretos otimizados por meio do empacotamento de partículas e os atribuiu ao fortalecimento das zonas de transição pelas adições minerais. Tal justificativa também pode ser aplicável neste caso, uma vez que houve alto consumo de sílica ativa nos traços otimizados. Sokolovicz (2020) avaliou o comportamento mecânico de CCUAD empacotados e submetidos à cura úmida, obtendo resistências de 115,30 MPa, 138,60 MPa e 158,9 MPa, aos 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Observa-se, neste caso, um desenvolvimento mais uniforme da resistência ao longo do tempo, que pode ser explicado pelo fato de as amostras apresentarem menor consumo de sílica ativa e por não terem a incorporação de pó de vidro, que possui atividade pozolânica mais lenta, como citado anteriormente. Observa-se ainda que a resistência final obtida pelo autor é próxima da obtida neste trabalho.

Destaca-se que o desenvolvimento da resistência à compressão dos CCUAD estudados ocorre em função da hidratação do cimento e da reação pozolânica da sílica ativa e do pó de vidro. Dependendo do tipo e teor de adição mineral utilizada e do regime de cura adotado, um ganho significativo de resistência pode ocorrer em idades superiores a 28 dias (como pode ser observado na Figura 5 para a resistência aos 180 dias), fato que deve ser levado em consideração no projeto de estruturas de concreto.

### 3.2 Absorção de água

Na Figura 6 estão apresentados, graficamente, os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade obtidos para os traços produzidos. Os valores correspondem à média dos três valores individuais obtidos a partir dos corpos de prova ensaiados na idade de 28 dias.

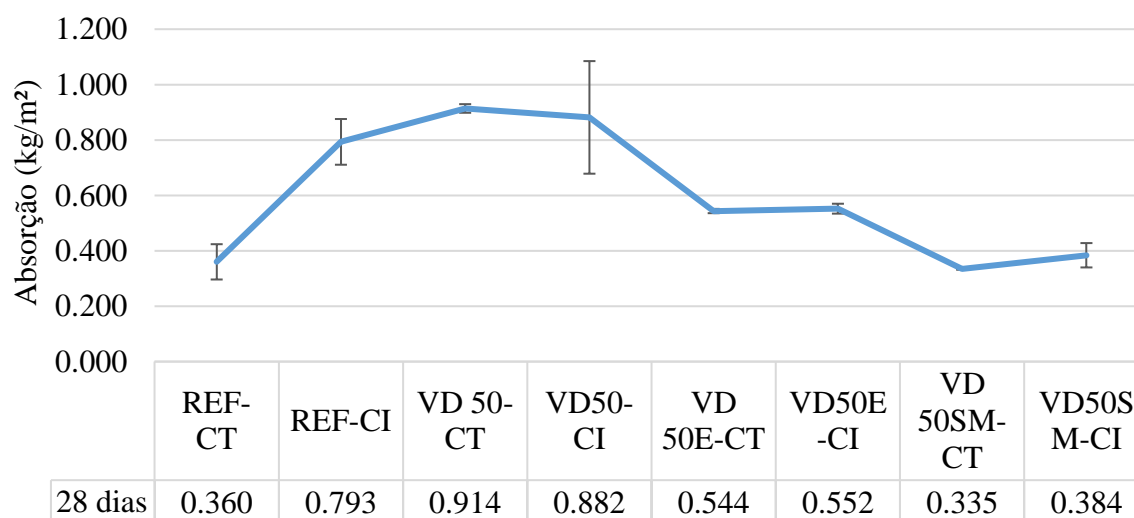


Figura 6. Absorção de água por capilaridade dos CCUAD produzidos.

A partir da Figura 6, é possível observar que os menores teores de absorção de água por capilaridade foram obtidos nas amostras otimizadas por meio do empacotamento de partículas, considerando a utilização de SM200 (VD50SM). Tal fato pode ser explicado pelo efeito fíler

proporcionado pelo material, possibilitando a obtenção de uma microestrutura mais densa e homogênea, além de gerar uma estrutura de poros desconexos, reduzindo a absorção de água pelo material (Tam *et al*, 2012). Além disso, observa-se que as amostras otimizadas (VD50E e VD50SM), no geral, absorveram menos água que aquelas dosadas tradicionalmente, o que pode ser explicado tanto pelo melhor preenchimento dos vazios proporcionado pelo empacotamento de partículas quanto pelo alto consumo de sílica ativa que, além do efeito fíler, proporciona uma quantidade adicional de C-S-H gerada pela reação pozolânica, bloqueando os poros presentes no material (Tam *et al*, 2012). Tal efeito também explica a razão pela qual, no geral, as amostras submetidas à CT apresentaram menor absorção de água que aquelas submetidas à CI, uma vez que este procedimento de cura aumenta a quantidade de C-S-H nas primeiras idades devido a aceleração das reações de hidratação do cimento.

Cabe destacar a grande dispersão de resultados observada para alguns CCUAD estudados, como é o caso do REF-CI e VD50-CI. Como os valores de absorção de água por capilaridade obtidos para essas misturas são muito baixos (0,793 kg/m<sup>2</sup> para REF-IC e 0,882 kg/m<sup>2</sup> para VD50-CI), uma pequena diferença entre os valores obtidos para os corpos de prova das amostras pode resultar em um desvio padrão considerável, como observado no presente estudo, correspondendo a coeficientes de variação de 10,4% e 26,0%, respectivamente).

Assim, com base nos resultados obtidos, verificou-se que o procedimento de ensaio prescrito na NBR 9779 (ABNT, 2012) para determinação da absorção de água por capilaridade em argamassa e concreto endurecidos não se mostrou adequado para aplicação em CCUAD, uma vez que devido à baixa quantidade de poros presente na microestrutura do concreto, os corpos de prova não apresentavam diferenças significativas de massa após longos períodos na estufa ou após longos períodos de exposição à água.

### 3.3 Análise estatística

Nas Tabelas 6 a 9, apresentadas a seguir, são apresentados os resultados das análises estatísticas realizadas para os resultados de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade dos CCUAD produzidos. Destaca-se que o *Sim* e o *Não* indicam se existe ou não diferença significativa.

Tabela 6. Resistência mecânica aos 7 dias - diferença significativa ( $F = 68,87$  e  $F_{obtido} = 2,42$ ).

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
REF - CI		Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
VD50 - CT			Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
VD50 - CI				Sim	Não	Sim	Não
VD50E - CT					Sim	Não	Sim
VD50E - CI						Sim	Não
VD50SM - CT							Sim

De acordo com a Tabela 6 é possível observar que houve diferença significativa nos valores de resistência à compressão (aos 7 dias de idade) das amostras submetidas à CT, em comparação às amostras após CI. A incorporação do pó de vidro proporcionou uma diminuição significativa da resistência mecânica dos CCUAD.

Tabela 7. Resistência mecânica aos 28 dias - diferença significativa ( $F = 9,07$  e  $F_{obtido} = 2,42$ ).

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
REF - CI		Não	Não	Sim	Não	Não	Não
VD50 - CT			Sim	Não	Não	Não	Não
VD50 - CI				Sim	Não	Sim	Não
VD50E - CT					Sim	Não	Não
VD50E - CI						Não	Não
VD 50SM - CT							Não

Aos 28 dias de idade (Tabela 7), é possível observar que as misturas VD50-CT, VD50SM-CT e VD50SM-CI não apresentaram diferenças significativas em relação à maioria dos CCUAD estudados. Para a mistura VD50SM, com a incorporação de sílica ativa, pó de vidro e filer, o procedimento de cura empregado (CT ou CI) não implicou em diferenças significativas em termos de resistência mecânica. As amostras com incorporação do pó de vidro e submetidas à CT não apresentaram diferenças significativas em relação à amostra de referência após CT (REF-CT).

Tabela 8. Resistência mecânica aos 180 dias - diferença significativa ( $F = 19,84$  e  $F_{obtido} = 2,42$ ).

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
REF - CI		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
VD50 - CT			Sim	Não	Não	Sim	Sim
VD50 - CI				Sim	Sim	Sim	Sim
VD50E - CT					Não	Não	Não
VD50E - CI						Não	Não
VD50SM - CT							Não

De acordo com a Tabela 8 é possível observar que houve diferença significativa nos valores de resistência à compressão (aos 180 dias de idade) das amostras submetidas à CT, em comparação às amostras após CI nas misturas REF e VD50. Nas demais, o tipo de cura não interferiu de maneira significativa na resistência. Nas amostras submetidas à CT, a incorporação de pó de vidro não proporcionou diferença significativa na resistência à compressão dos CCUAD.

Tabela 9. Absorção de água aos 28 dias - diferença significativa.

	REF - CI	VD50 - CT	VD50 - CI	VD50E - CT	VD50E - CI	VD50SM - CT	VD50SM - CI
REF - CT	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
REF - CI		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
VD50 - CT			Não	Sim	Sim	Sim	Sim
VD50 - CI				Sim	Sim	Sim	Sim
VD50E - CT					Não	Não	Não
VD50E - CI						Não	Não
VD50SM - CT							Não

De acordo com a Tabela 9 é possível observar que não houve diferença significativa nos valores de absorção de água das amostras submetidas à CT, em comparação às amostras após CI, exceto na amostra sem pó de vidro (REF). A incorporação de pó de vidro não proporcionou diferença significativa na absorção de água dos CCUAD submetidos à CT (exceto a mistura VD50). Já as misturas em que buscou-se um melhor empacotamento (VD50E e VD50SM), a diminuição nos valores de absorção de água por capilaridade foi significativa, quando comparada à mistura VD50, independente do tipo de cura adotado.

#### 4. CONCLUSÕES

Diante dos dados obtidos conclui-se que:

1. O procedimento de cura térmica adotado é viável e apresenta benefícios principalmente para o aumento da resistência do concreto, tanto em idades iniciais, quanto nas idades mais avançadas, especialmente se aplicado em compósitos cimentícios com incorporação do pó de vidro.
2. O modelo de empacotamento de partículas utilizado na otimização das misturas mostrou eficaz tanto em aumentar a resistência do concreto, quanto em reduzir sua absorção de água, sendo seu efeito significativo nas idades mais avançadas.
3. O uso da sílica moída (SM200) não gerou ganhos significativos de resistência. No entanto, observou-se uma redução na absorção de água, o que torna válida sua utilização.
4. A incorporação de teores elevados de pó de vidro (50%) tende a ocasionar uma diminuição da resistência mecânica dos CCUAD em 35%, 22% e 5% em relação ao compósito de referência nas idades de 7, 28 e 180 dias, respectivamente, indicando a aplicabilidade do pó de vidro como substituto parcial para o cimento.
5. O ensaio de absorção de água por capilaridade pelo método de ensaio prescrito na NBR 9779 (ABNT, 2012) não é indicado para avaliar o desempenho do CCUAD, recomendando-se a elaboração de outro procedimento que seja apropriado para compósitos de baixa porosidade e/ou permeabilidade.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro na realização desta pesquisa e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), pelo auxílio nos ensaios de caracterização dos aglomerantes.

#### 6. REFERENCIAS

- Abbas, S., Soliman, A. M., Nehdi, M. L. (2015), *Exploring mechanical and durability properties of ultra-high-performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages*. Construction and Building Materials. 75: 429–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>
- Abdollahnejad, Z., Kheradmand, M., Pacheco-Torgal, F. (2017), *Short-Term Compressive Strength of Fly Ash and Waste Glass Alkali-Activated Cement-Based Binder Mortars with Two Biopolymers*. Journal of Materials in Civil Engineering. 29(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001920](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001920)
- Alkaysi, M., El-Tawil, S., Liu, Z., Hansen, W. (2016), *Effects of silica powder and cement type on durability of ultra-high-performance concrete (UHPC)*. Cement and Concrete Composites. 66: 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.005>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão*

*de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5751 Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 9779: Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (n°200)*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.

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

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). *NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro.

Bahedh, M. A., Jaafar, M. S. (2018), *Ultra High-Performance Concrete Utilizing Fly Ash as Cement Replacement under Autoclaving Technique*. Case Studies in Construction Materials. 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00202>

Castro, A., Ferreira, F. (2016), *Effect of particle packing in the durability of high performance concretes*. Revista Ingeniería de Construcción. 31(2):91 – 104. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200003>

Castro, A. L., Pandolfelli, V. C. (2009), *Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil*. Cerâmica. 55:18-32. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>

De Larrard, F., Sedran, T. (1994), *Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model*. Cement and Concrete Research. 24(6):997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)

Melo, A. B. (2020), *“Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland”*, Tese (Doutorado),



Universidade de São Paulo, p. 296.

Du, H., Tan, K. H. (2014). *Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars*. Construction and Building Materials. 66: 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.092>

Funk, J. E.; Dinger, D. R. (1994), *Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing*. New York: Springer Science Business Media.

Ganesh, P., Murthy, A. R. (2019), *Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material*. Construction and Building Materials. 197:667-680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.240>

Heinz, D., Urbonas, L., Gerlicher, T. (2012), “*Effect of Heat Treatment Method on the Properties of UHPC*” in: M. Schimdt, E. Fehling, C. Glotzbach, S. Fröhlich, S. Piotrowski (Eds.), *Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*, HiperMat, Kassel, HE, (Germany), pp. 283-290.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). (2012), “*Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos*”. Disponível em: <[https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)>. Acesso em: 27 de março de 2020.

Kantro, D. (1980), *Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test*. Cement, Concrete and Aggregates. 2(0):95-102. <https://doi.org/10.1520/CCA10190J>.

Lopes, H. M. T. (2019), “*Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland*”, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, p. 172.

Mehta, A., Ashish, D. K. (2020), *Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review*. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100888>

Schwarz, N., Cam, H., Neithalath, N. (2008), *Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash*. Cement & Concrete Composites. 30: 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>

Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z. (2015), *A review on ultra-high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design*. Construction and Building Materials. 101:741-751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>

Sokolovicz, B. C. (2020), “*Avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais*”, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Maria, p. 358.

Tam, C. M., Tam, V. W. Y., Ng, K. M. (2012). *Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong*. Construction and Building Materials. 26:79-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006>

Terzian, P. (2005), *Concreto pré-fabricado*. In: Isaia G. C. “*Concreto Ensino Pesquisas e Realizações*”, São Paulo, IBRACON, v.2.

Tutikian B., F., Isaia, G. C., Helene, P. (2011), *Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho*. In: Isaia, G. C. “*Concreto: Ciência e Tecnologia*”, São Paulo, IBRACON.

Wang, X., Yu, R., Song, Q., Shui, Z., Liu, Z., Wu, S., Hou, D. (2019), *Optimized design of ultra-high-performance concrete (UHPC) with a high wet packing density*. Cement and Concrete Research . 126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>

Zhang, H., Ji, T., Lin, X. (2019), *Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions*. Construction and Building Materials. 211: 688-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274>



## Simulação de manifestações patológicas em parede diafragma através de propagação de ondas ultrassônicas

R. R. C. Silva<sup>1\*</sup> , C. Bertoldo<sup>2</sup> 

\* Autor de Contato: [rodrigorogerioudorador@gmail.com](mailto:rodrigorogerioudorador@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>

Recepção: 01/11/2021 | Aceitação: 19/02/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

O objetivo dessa pesquisa foi simular manifestações patológicas em parede diafragma através de concretos produzidos com diferentes adições de polímero sintético, propondo obter modelos de predição de resistência e rigidez através de propagação de onda de ultrassom. Foram realizados ensaios de compressão para determinação da resistência e rigidez, assim como ensaios de ultrassom pelo método direto e indireto em concretos produzidos com diferentes concentrações de polímero sintético. Os resultados obtidos indicaram queda nas propriedades mecânicas e acústicas do concreto com o aumento da concentração de polímero sintético em sua confecção. Os modelos gerados pelo ensaio ultrassônico foram estatisticamente significativos, ao nível de confiança em 95%, podendo, as correlações estabelecidas em concreto, serem utilizadas na detecção de manifestações patológicas in loco.

**Palavras-chave:** parede diafragma; propagação de ondas ultrassônicas; resistência e rigidez.

**Citar como:** Silva, R. R. C., Bertoldo, C. (2022), "*Simulação de manifestações patológicas em parede diafragma através de propagação de ondas ultrassônicas*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 200 – 209, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>

<sup>1</sup> Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, Silva, R. R. C., contribuiu com a aquisição de financiamento atividade, metodologia, investigação, preparação do programa experimental das amostras, redação de rascunho e original, Pedrosa, C. B. contribuiu com a conceituação, metodologia, supervisão e análise de dados.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## Simulation of pathological manifestations in diaphragm wall through ultrasonic wave propagation

### ABSTRACT

This research aimed to simulate pathological manifestations in diaphragm wall using concrete produced with different additions of synthetic polymer, in order to obtain models of strength and stiffness prediction through ultrasound wave propagation. Compression tests were performed to determine strength and stiffness, as well as ultrasound tests by direct and indirect method on concrete produced with different concentrations of synthetic polymer. The results suggested a decrease in the mechanical and acoustic properties of concrete with the increase in the concentration of synthetic polymer. The models generated by the ultrasonic test were statistically significant, at 95% confidence level, and the correlations established in concrete can be applied in the detection of pathological manifestations in loco.

**Keywords:** diaphragm wall; ultrasonic wave propagation; strength and stiffness.

## Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue simular manifestaciones patológicas en muros pantalla a través de hormigones elaborados con diferentes adiciones de polímero sintético, proponiendo obtener modelos de predicción de resistencia y rigidez a través de la propagación de ondas de ultrasónica. Se realizaron ensayos de compresión para determinar resistencia y rigidez, así como ensayos de ultrasonido por el método directo e indirecto sobre hormigones producidos con diferentes concentraciones de polímero sintético. Los resultados obtenidos indicaron una disminución de las propiedades mecánicas y acústicas del hormigón con el aumento de la concentración de polímero sintético en su confección. Los modelos generados por la prueba ultrasónica fueron estadísticamente significativos, con un nivel de confianza del 95%, y las correlaciones establecidas en concreto pueden ser utilizadas en la detección de manifestaciones patológicas in loco.

**Palabras clave:** muros pantalla; propagación de pulso ultrasónico; fuerza y rigidez.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o grande crescimento das construções civis nas últimas décadas, vem se estudando maneiras de facilitar a execução de grandes obras que encontram dificuldades devido à instabilidade dos solos em que estão situadas. Segundo Hachich et al. (2019) uma das alternativas para auxiliar na escavação dos solos, é a utilização de sistema de contenção com parede diafragma, que consiste em trincheiras abertas no terreno preenchidas com concreto armado, mantidas estáveis através do sintético da utilização de fluidos poliméricos ou lama bentonítica.

A utilização de polímero sintético em escavações, apresenta grandes vantagens em relação às formas tradicionais de estabilização dos solos, como por exemplo na utilização da bentonita. Segundo Mota (2010), podemos citar como vantagem o aspecto econômico, a utilização dos polímeros apesar de apresentarem um custo mais elevado, na aquisição por metros cúbicos, em comparação com a aquisição da lama bentonítica, seu uso em termos de quantidade é menor, ou seja, utiliza-se menos para se obter rendimentos melhores do que as formas tradicionais. De acordo com Mota (2010), podemos citar o fator ambiental em questão, o emprego de polímeros como estabilizantes em escavações não gera bioacumulações para o meio ambiente devido a alguns fatores como, alta solubilidade, sensibilidade química e ações de raios ultravioletas que acabam fragmentando suas cadeias poliméricas e não gerando acúmulos (Mota 2010).

Estudos realizados por Mota (2010) constataram que o polímero sintético altamente concentrado, pode ser utilizado especificamente para interagir quimicamente com todos os tipos de solo, como base de sua estabilização. A sua estrutura molecular permite-lhe ser completamente solúvel na água, sem alterar a sua função primária de ligação química ativa na estabilização das partículas de solo.

A utilização deste polímero durante as escavações deve seguir as recomendações da ABNT-NBR 6122 (2019), com concreto de densidade entre 2,1 á 2,8 g/cm<sup>3</sup> e consumo mínimo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup>, e fluido estabilizante como polímero com pH da água entre 9 e 12, densidade 1,005 g/cm<sup>3</sup> a 1,10 g/cm<sup>3</sup> e teor de areia até 4,5%. Segundo Djelal et al. (2020) uma das patologias decorrentes da parede diafragma está relacionada a mistura do fluido polímero durante a concretagem, aumentando a infiltração das águas subterrâneas do maciço de solo após a execução dos painéis, comprometendo a capacidade do concreto de receber esforços.

Uma das dificuldades é o controle das paredes diafragma *in loco*, para verificar se a qualidade do concreto não foi comprometida através da mistura com o polímero sintético. Segundo Silva (2020) um dos ensaios utilizados que não causam danos ao sistema de contenção de concreto, são os não destrutivos, como o ensaio de ultrassom. Estudos realizados por Savaliya et al. (2014), através de ensaio de ultrassom em estruturas de concreto, demonstram que o método é preciso para a detecção de patologias, com sensibilidade para detectar os defeitos e permitir melhor localização do mesmo após ter sido detectado.

Tendo em vista o que foi apresentado, nesse projeto foi empregado ensaios não-destrutivos de propagação de ondas ultrassônicas, de forma direta e indireta, simulando inspeção *in loco*, com o intuito de verificar sua sensibilidade na previsão das propriedades mecânicas (resistência e rigidez) e física (absorção de água) de concretos confeccionados com diferentes concentrações de polímero sintético.

Diante dos aspectos mencionados, o objetivo da presente pesquisa foi simular manifestações patológicas em parede diafragma com diferentes adições de polímero sintético junto ao concreto, propondo modelos de predição de resistência e rigidez obtidos em ensaios de propagação de ondas de ultrassom, para avaliação deste sistema de contenção *in loco*.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a pesquisa foram confeccionados concretos com proporções de cimento tipo CPII-F com especificações segundo ABNT-NBR 11578 (1997), areia média e brita 01 (1:1,8:2,5), sendo o cimento medido em massa, os agregados em volume e relação água-cimento de 0,6, conforme especificado o traço para estruturas de concreto do tipo parede diafragma (ABNT- NBR 6122, 2019). Considerando o traço padrão foi adicionado, em relação à massa de cimento, diferentes porcentagens de polímero sintético 0%, 20%, 40% e 60%, do tipo aniônico granulado, e alto peso molecular > 21 milhões e de cadeias longas utilizado para floculação (Figura 1a). A caracterização dos agregados foi realizada segundo as recomendações das normas para agregado miúdo NBR (NM 248, 2003; NM 52, 2009; NM 45, 2006) e agregado graúdo NBR (NM 248, 2003, NM 53, 2003, NM 45, 2006). As amostras foram submetidas aos 28 dias, ao ensaio de absorção por imersão, conforme especificações da ABNT-NBR 9778 (2015).

De acordo com a Tabela 1 a caracterização dos agregados, encontra-se dentro dos limites de aceitabilidade, de acordo à ABNT - NBR 7211 (2009).

Tabela 1. Resultados da caracterização física dos agregados miúdos e graúdos.

Agregado	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura
Granito	2650	1500	25	6,75
Areia	2590	1310	4,8	1,89

A adição do polímero sintético apresentou comportamento similar gerado pela adição de água ao concreto, quando avaliamos a trabalhabilidade (valores de Slump Test) e a densidade, ou seja, o aumento das adições de polímero ocasionou aumento na trabalhabilidade e redução na densidade (Tabela 2).

Tabela 2. Valores de *Slump Test* e de densidade média dos concretos produzidos com diferentes adições de polímero sintético.

Adições	Slump Test (mm)	Densidade média (kg.m <sup>-3</sup> )
0%	180	2223
20%	210	2097
40%	250	1934
60%	260	1900

Após os ensaios de slump test, para cada traço foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento) e 1 corpo de prova prismático (400 x 400 x 300 mm<sup>3</sup>) simulando parte de uma parede diafragma após a execução, totalizando 48 corpos de prova cilíndricos e 4 prismáticos. As amostras cilíndricas foram ensaiadas por ultrassom, aos 28 dias, pelo método direto de propagação de ondas (Figura 1b) e as prismáticas pelo método indireto (Figura 1c), representando a avaliação de inspeção *in loco*.

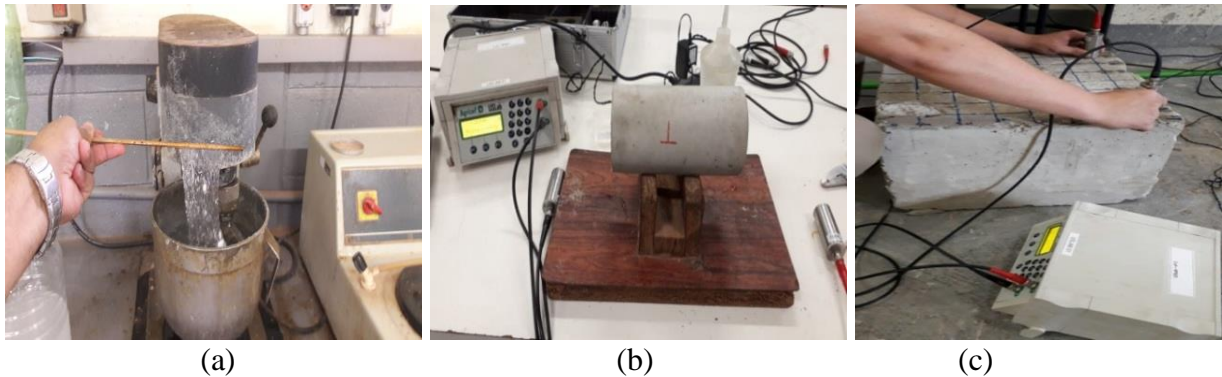


Figura 1. (a) Polímero sintético, (b) amostras cilíndricas submetidas ao ensaio direto de ultrassom (c) amostras prismáticas submetidas ao ensaio indireto de ultrassom. Fonte: autores (2021).

Para os ensaios foram utilizados equipamento de ultrassom (USLAB, Agricef, Brasil) e transdutores longitudinais de faces planas de 45 KHz de frequência. De posse dos tempos de propagação das ondas ( $t$ ) de ultrassom foi possível calcular, para cada distância entre transdutores ( $L$ ), a velocidade direta de propagação das ondas de ultrassom ( $V_D$ ), através da equação proposta pela ABNT NBR 8802 (2019), conforme equação (1).

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Após 28 dias, também foi determinada a massa de cada corpo de prova através de balança de precisão, e com auxílio de paquímetro digital foi obtida suas dimensões para cálculo do volume e posteriormente da densidade. Da posse da velocidade direta e da densidade do concreto ( $\rho$ ) foi determinado o coeficiente de rigidez (2).

$$C_{LL} = \rho \cdot V_D^2 \quad (2)$$

As amostras prismáticas, que representam a avaliação da viabilidade de inspeção de uma parede diafragma após a instalação utilizando o método indireto de propagação de ondas, foram ensaiadas seguindo metodologia de cálculo proposto pela norma ABNT-NBR 8802 (2019). A norma brasileira propõe uma forma de cálculo da velocidade de propagação ultrassônica pelo modo de transmissão indireta ( $V_I$ ), cujo procedimento consiste em calcular a velocidade por meio de um gráfico de tempo de propagação versus distância entre transdutores Figura (2).

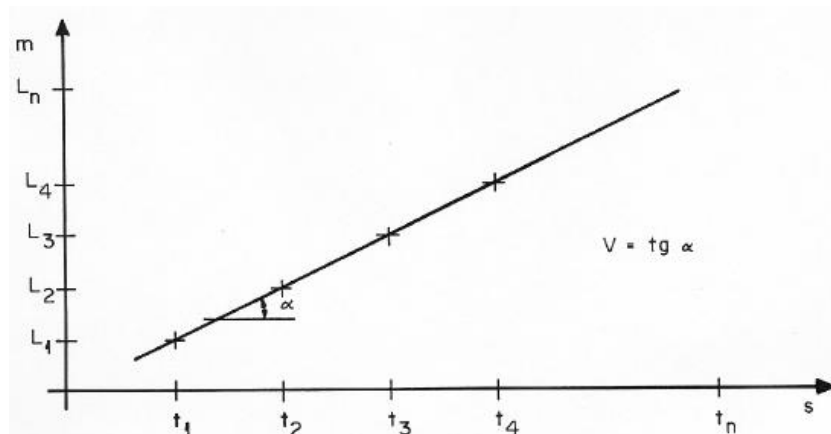


Figura 2. Determinação da velocidade de propagação de ondas de ultrassom pelo método indireto. Fonte: ABNT-NBR 8802 (2019).



Os corpos de provas foram então submetidos à ensaio de compressão instrumentada em máquina de ensaio (EMIC) para determinação da resistência ( $f_c$  - ABNT-NBR 5739, 2018) e do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$  - ABNT-NBR 8522, 2017). Os resultados dos ensaios foram utilizados na geração de modelos de predição das propriedades mecânicas a partir das velocidades de propagação de ondas de ultrassom.

De posse dos resultados de  $f_c$  e  $E_{ci}$  e dos parâmetros de propagação de ondas de ultrassom velocidade ( $V_D$ ), ( $V_I$ ) e ( $C_{LL}$ ), foram analisadas regressões para verificar a existência de modelos estatisticamente significativos entre as propriedades mecânicas e as propriedades acústicas, obtidas por meio dos ensaios de propagação de ondas de ultrassom.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades mecânicas ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ) e acústicas ( $C_{LL}$ ,  $V_D$  e  $V_I$ ) do concreto também reduziram a medida que as adições de polímeros aumentaram, fato ocasionado pelo aumento da porosidade (quantidade de vazios) do concreto, a tabela (3), informa os ensaios realizados nas 12 amostras de concreto para cada traço realizado.

Tabela 3. Valores mínimos, máximos e médios de resistência ( $f_c$ ), elasticidade ( $E_{ci}$ ), Coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ ) velocidade direta ( $V_D$ ) e indireta ( $V_I$ ) para os traços produzidos com diferentes adições de polímero.

Adição	$f_c$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	$C_{LL}$ (GPa)	$V_D$ (m.s <sup>-1</sup> )	$V_I$ (m.s <sup>-1</sup> )
	Min. Max. Média	Min. Max. Média	Min. Max. Média	Min. Max. Média	Min. Max. Média
0%	16,9 20,5 17,41	19,58 27,80 23,28	27,23 34,38 30,16	3485 3885 3680	2437 2855 2639
20%	8,32 9,6 8,80	11,44 16,13 13,10	19,87 22,42 21,26	3095 3230 3185	2421 2628 2520
40%	5,53 6,78 6,17	5,80 9,85 7,48	9,81 17,29 13,14	2386 2788 2615	1886 2518 2127
60%	4,13 4,96 4,60	2,03 3,13 2,95	7,88 15,69 12,83	2040 2858 2528	804 1085 935

Para evitar a dispersão utilizou-se as médias dos resultados dos parâmetros de resistência, rigidez e acústicos para as análises estatísticas. Os modelos de regressão lineares avaliados via análise de variância (ANOVA), foram estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% com (P-valor < 0,05), sendo que os melhores modelos de previsão das propriedades de resistência ( $f_c$ ) e de rigidez ( $E_{ci}$ ) do concreto foram obtidos a partir do coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ ) (Tabela 4).

Os modelos encontrados seguem dentro das faixas de coeficientes de determinação encontrados na literatura entre ensaios mecânicos e propagação de ondas. Para a predição de  $f_c$  os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) nos estudos realizados por Mohamad *et al.*, (2016), Silva *et al.* (2020), variaram entre 60 e 98% e, para  $E_{ci}$  entre 50 e 96%, (Giacon *et al.*, 2010; Mohamed *et al.*, 2016 e Silva *et al.*, 2020). Correlações entre os parâmetros de rigidez ( $C_{LL}$ ) e as propriedades mecânicas de resistência ( $f_c$ ) e de módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) obtidos em ensaios de ultrassom e de compressão, respectivamente, foram encontrados por Giaccon *et al.*, 2010 e Silva (2020), com modelos lineares e valores de  $R^2$  na faixa de 85% a 97% para  $E_{ci}$  e de 79% a 95% para  $f_c$ .

Valores de erro absoluto da resistência e do módulo de elasticidade do concreto variam de 25% a 50% quando baseados em modelos com parâmetros de propagação de ondas (Bungey e Millard;



2006). Nessa pesquisa os erros absolutos encontrados (9,70% a 20% - Tabela 4), estão abaixo dos encontrados na literatura, indicando que os modelos de predição da resistência e da rigidez são válidos na avaliação da qualidade de concretos utilizados em paredes diagrama, utilizando parâmetros de acústicos de propagação de ondas.

Tabela 4. Modelos de correlação entre parâmetros de velocidade direta ( $V_D$ ), velocidade indireta ( $V_I$ ) e coeficiente de rigidez ( $C_{LL}$ ) com a resistência a compressão ( $f_c$ ) e o Módulo de Elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ).

Parâmetro	Modelo	P-Valor	R <sup>2</sup> (%)	Erro de estimativa	Erro absoluto* (%)
$f_c \times V_D$	$f_c = -20,34 + 0,0098 \cdot V_D$	0,03	92,81	1,70	18,40
$f_c \times V_I$	$f_c = -5,25 + 0,0068 \cdot V_I$	0,04	81,65	1,87	20,30
$f_c \times C_{LL}$	$f_c = -3,96 + 0,68 \cdot C_{LL}$	0,025	97,46	1,57	9,70
$E_{ci} \times V_D$	$E_{ci} = -35,13 + 0,015 \cdot V_D$	0,01	96,91	1,83	18,90
$E_{ci} \times V_I$	$E_{ci} = -11,68 + 0,012 \cdot V_I$	0,04	89,00	1,90	20,60
$E_{ci} \times C_{LL}$	$E_{ci} = -8,56 + 1,05 \cdot C_{LL}$	0,020	97,97	2,14	12,37

\*relação entre o erro estimado e o valor médio.

Na Tabela 5, são apresentados os resultados obtidos de absorção por imersão e a velocidade longitudinal das amostras ensaiadas após a saturação. Através dos resultados obtidos, nota-se que a adição de polímero sintético aumentou a absorção de água (Tabela 5), deixando maiores quantidades de vazios (poros) após o processo de secagem. Isso ocorre devido a liberação da água de cura interna, que leva ao desinchamento das partículas de polímero, ocasionando mudanças na estrutura porosa dos materiais cimentícios (Araújo e May, 2019).

Tabela 5. Valores de absorção por imersão e velocidade direta média ( $V_D$ ), para os traços produzidos com diferentes adições de polímero sintético.

Amostra	Absorção (%)	$V_D$ (m.s <sup>-1</sup> )
0%	12,0	3087
20%	12,4	2777
40%	17,3	2291
60%	18,4	1846

Devido a alteração na quantidade absorvida de água, nota-se alterações nas propriedades acústicas (Tabelas 3 e 5), observa-se que as velocidades de propagação do som diminuem conforme se aumenta a quantidade de polímero utilizado, os poros vazios existentes no concreto seco representam um fator significativo na transmissão das ondas sonoras, uma vez que a velocidade de pulso ultrassônico é menor no ar do que no sólido (Godinho, *et al.*, 2020), com isso, é explicado o fato do polímero aumentar a quantidade de poros, reduzindo a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nos corpos de prova.

A regressão entre a velocidade de ultrassom e a absorção apresentou modelo com R<sup>2</sup> de 92% (Figura 3) e P-Valor de 0,04, menor que 0,05, demonstrando existir uma relação estatisticamente significativa entre os parâmetros, com nível de confiança de 95,0%, obtidos pela análise estatística ANOVA. Os resultados obtidos indicam que a técnica de propagação de ondas é sensível ao aumento do ter de água dentro das amostras de concreto, ocasionado pelo aumento da porosidade

após a secagem do polímero sintético dentro da matriz cimentícia, diminuindo sua velocidade de ultrassom. Dessa maneira, o concreto terá um aumento de vazios (poros) e está sujeito a maiores absorções de água e menores densidade e propriedades mecânicas. A água atua como o principal transportador do meio erosivo nos concretos, portanto o seu desempenho, enquanto barreira para diminuição do transporte de agentes potencialmente causadores de corrosão das armaduras, está relacionado com a sua porosidade (Dudhal, 2016; Liu *et al.*, 2020; Matiko, 2000).

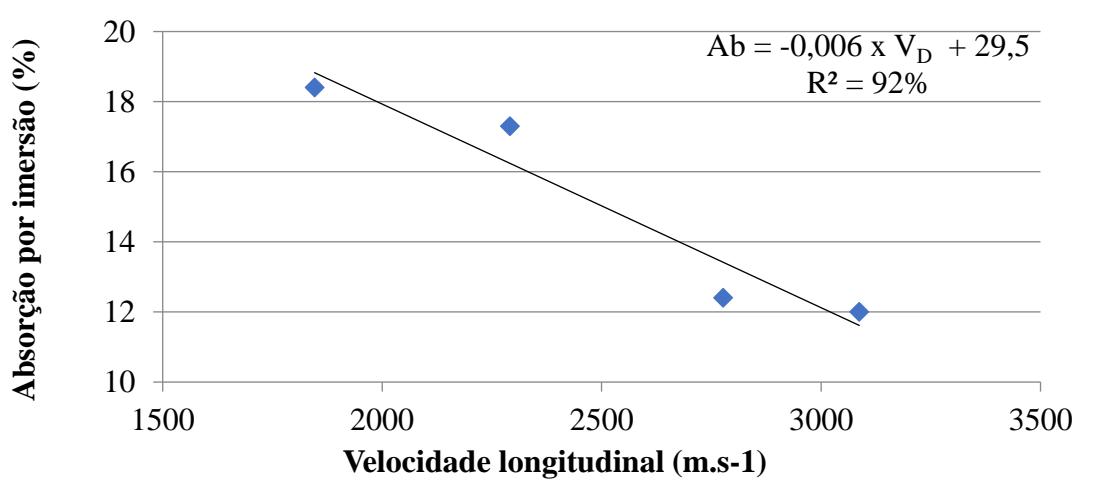


Figura 3. Modelo de regressão entre absorção por imersão e velocidade longitudinal.  
Fonte: Autores (2021).

O polímero se agrega e forma um filme na superfície das partículas de cimento durante o progresso da hidratação, evitando contato adicional entre cimento e água, aumentando a porosidade da matriz cimentícia afetando, assim, a resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos aditivado com polímero (Liu *et al.*, 2020).

A presente pesquisa corrobora com os dados encontrados na literatura, os valores apresentados na Tabela 3, demonstram que ocorreu uma redução de 26% para os valores médios de  $f_c$  e de 13% para os valores médios de  $E_{ci}$ , após um aumento da absorção em 18% para as amostras de concreto com adição de 60% de polímero sintético, em relação às amostras sem adição, conforme especificado (Tabela 5).

Os modelos obtidos podem ser utilizados como solução de ensaio não destrutivo para estimar propriedades mecânicas e físicas, como absorção de água, em amostras e estruturas de parede diafragma, verificando a infiltração das águas subterrâneas do maciço de solo após a execução dos painéis, fato que poderá comprometer a capacidade do concreto de receber esforços.

#### 4. CONCLUSÕES

O aumento nas concentrações de polímero sintético, utilizados nos diferentes traços de concreto aumentou a sua trabalhabilidade, reduzindo sua densidade e suas propriedades mecânicas ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ) e acústicas do material ( $V_D$ ,  $V_I$  e  $C_{LL}$ ).

Os modelos de predição das propriedades mecânicas por meio de velocidades de ultrassom foram estatisticamente significativos, apresentando coeficientes de determinação superiores a 80% e erros inferiores aos encontrados em literatura.

Desta forma, fica demonstrada a sensibilidade do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas de forma direta ou indireta, quando aplicadas nos concretos com propriedades físicas e mecânicas semelhantes aos utilizados nesta pesquisa, podendo, as correlações aqui estabelecidas em amostras de concreto, serem utilizadas no auxílio da detecção de manifestações patológicas in loco.

Além disso, nota-se que o aumento do teor de polímero sintético na confecção do concreto interfere diretamente na quantidade de absorção de água e, conseqüentemente, nas propriedades acústicas do material.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) de São Paulo pelo financiamento dos diversos projetos do grupo de pesquisa, que viabilizou as instalações e infraestrutura utilizadas nesta pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). *NBR 11578: Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *NBR NM 45: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro. 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 52: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR NM 67: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018) *NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). *NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). *NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica*. Rio de Janeiro.
- Araújo, C. M. M, May, C. A. (2019). *Durabilidade de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nano partículas de sílica*. Monografia de projeto final em engenharia civil; Brasília; p. 124.
- Bungey J., Millard, S. (2006). *Testing of concrete in structures*. 3 ed. London: Blackie Academic e Professional.
- Djelal, C., Vanhove, Y., Azzi, A., Madec, O. (2020). *Recommendation for concrete mix design to prevent bleed channels on diaphragm walls*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, p.1-13.
- Giacon Jr, M., Goncalves, R., Soriano, J., Amalfi, G. (2010). *Caracterização do concreto utilizando ultrassom*. In: XXVIII CONAENDI - Congresso de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, Santos - SP. Anais CONAENDI 2010. v. 1. p. 1-9.

- Godinho, J. P., Junior, T. F. S; Medeiros, M. H. F; Silva, M. S. A. (2020). *Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete*: 13. ed. Curitiba: Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.
- Hachich, W. et al. (2019). *Fundações: Teoria e Prática*. 2ª ed. São Paulo, Pini.
- Liu, B., Shi, J., Sun, M., He, Z., Xu, H., Tan, J. (2020). *Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent*. Journal of Building Engineering, v. 31, p. 101337. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101337>.
- Matiko, N. N. S. (2000). *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos*. FAPESP.
- Mohammed, T. U., Rahman, M. N. (2016). *Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete*. Construction and Building Materials, v. 125, p. 832-841. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102>.
- Savaliya, K. D., Thaker, K. K., Dave, U. V. (2014). *Comparison between Different Methods of Ultrasonic Pulse Velocity Tests on Concrete*. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), (March), p. 41–44.
- Silva, R. R. C. (2020). *Propagação de ondas de ultrassom em sistemas de contenção par obras de terra*. Tese de Doutorado. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas. p.113.
- Silva, R. R. C., Gonçalves, R., Bertoldo, C. P. (2020). *Classification and inspection of reinforced concrete elements for use in retaining walls using ultrasound tests*. Construction and Building Materials, v. 262, p. 120010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120010>.
- Hirde, S. K., Dudhal, Omprakash S. (2016). *Review on polymer modified concrete and its application to concrete structures*. International Journal of Engineering Research, ISSN, v. 3. P.766-769. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i3/053>.

## Análise da influência da variação da excentricidade de cordoalhas engraxadas no comportamento estrutural de lajes lisas protendidas

R. Cattelan<sup>1\*</sup> , L. Cielo<sup>1</sup> , A. Lübeck<sup>1</sup> , A. B. S. Santos Neto<sup>1</sup>

\* Autor de Contato: [rogerio@ufsm.br](mailto:rogerio@ufsm.br)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.570>

Recepção: 11/11/2021 | Aceitação: 26/02/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

Neste estudo, avaliou-se a influência de variações de excentricidade dos cabos em lajes lisas protendidas. O correto posicionamento das cordoalhas na montagem de lajes lisas protendidas é imprescindível para que o sistema estrutural alcance desempenho e segurança adequados. Analisou-se quatro modelos diferentes com modificação da altura dos cabos em diferentes pontos e quantidades. Foram avaliadas tensões de pré-compressão, tensões nas faces inferior e superior, flechas, balanceamentos de cargas e armaduras passivas. Utilizou-se o programa ADAPT Floor Pro para as análises, sendo o dimensionamento regido pela NBR 6118:2014 e recomendações do ACI 318:2019. Constatou-se que a variação na excentricidade vertical das cordoalhas na face inferior da laje, reduzem mais os valores das tensões, em comparação com a variação na face superior.

**Palavras-chave:** concreto protendido; protensão não aderente; excentricidade de cordoalhas.

**Citar como:** Cattelan, R., Cielo, L., Santos Lübeck, A., Neto, A. B. S. (2022), "*Análise da influência da variação da excentricidade de cordoalhas engraxadas no comportamento estrutural de lajes lisas protendidas*", Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 210 – 226, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.570>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima nº 1000 Cidade Universitária Bairro - Camobi, Santa Maria - RS, 97105-900, Brazil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, todos os autores contribuíram igualmente na concepção e definição do programa experimental. O autor Cielo contribuiu com o desenvolvimento do modelo (100%), análise e discussão dos resultados (25%) e redação do trabalho (100%). O autor Lima contribuiu com a orientação do trabalho (50%), análise e discussão dos resultados (25%) e revisão do manuscrito (34%). O autor Santos Neto contribuiu com a orientação do trabalho (50%), análise e discussão dos resultados (25%) e revisão do manuscrito (33%). O autor Lübeck análise e discussão dos resultados (25%) e revisão do manuscrito (33%)..

#### Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## **Analysis of the influence of variation of eccentricity of unbonded tendons on the structural behavior of post-tensioned flat slabs**

### **ABSTRACT**

In this study, the influence of cable eccentricity variations in models with prestressed flat slabs was evaluated. The correct positioning of the strands in the assembly of flat slabs in prestressed concrete is essential for the structural system to achieve adequate performance and safety. Four different architectural models were analyzed with modification of the height of the cables at different points and quantity. Pre-compression stresses, extreme stresses on the bottom and top faces, vertical displacements, load balancing and passive reinforcement ratios of the slabs were evaluated. The ADAPT Floor Pro program was used for the analyses, the design being governed by NBR 6118:2014 and recommendations from ACI 318:2019. For the models evaluated, it was found that the variation in the vertical eccentricity of the strands on the lower face of the slab further reduces the values of applied stresses, compared to the variation on the upper face.

**Keywords:** prestressed concrete, non-adherent prestressing, strands eccentricity.

## **Análisis de la influencia de la variación de excentricidad de tendones no-adherentes en el comportamiento estructural de losas planas postensadas**

### **RESUMEN**

En este estudio se evaluó la influencia de las variaciones de excentricidad de los cables en modelos con losas planas postensadas. El correcto posicionamiento de los tendones en el montaje de losas planas postensadas es fundamental para que el sistema estructural logre un adecuado rendimiento y seguridad. Se analizaron cuatro modelos arquitectónicos diferentes con modificación de la altura de los cables en diferentes puntos y cantidad. Se evaluaron tensiones de pre compresión, tensiones extremas en el tope y base, desplazamientos verticales, balanceo de carga y cantidad de acero pasivo de las losas. Para el análisis se utilizó el software ADAPT Floor Pro. El proyecto sigue las recomendaciones de la NBR 6118:2014 y ACI 318:2019. Para los modelos evaluados, se encontró que la variación en la excentricidad vertical de los tendones en la base de la losa reduce aún más los valores de las tensiones aplicadas, en comparación con la variación en el tope.

**Palabras clave:** hormigón postensado; postensión no-adherente; excentricidad de los tendones.

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.



## 1. INTRODUÇÃO

O uso da protensão com cordoalhas não aderentes em edifícios é muito utilizada em países economicamente desenvolvidos como Estados Unidos e Austrália. Pode-se citar também regiões do Oriente Médio, Sudeste Asiático e Reino Unido e alguns países da América do Sul, em virtude do excelente desempenho estrutural e das vantagens econômicas (Aalami, 2000; Santos, 2017; Silva et al., 2018).

A implementação deste sistema de protensão somente foi incluída na norma do American Concrete Institute (ACI) 318 em 1963, após a realização de diversas obras pelo mundo (Aalami, 2000; Kang and Bondy, 2008). No Brasil, o uso de lajes lisas com protensão não aderente teve início apenas no ano de 1997 (Carvalho, 2017). Projetos arquitetônicos que propõem grandes vãos livres, com reduzido número de pilares e vigas, principalmente em edifícios e residências de alto padrão, impulsionou o uso de lajes com protensão não aderente no país (Santos, 2017; Almeida, 2001; Loureiro, 2006). Pode-se citar também o desenvolvimento de aços de alta resistência, juntamente com a evolução de softwares de dimensionamento, além da praticidade executiva do sistema, como fatores decisivos para o avanço na aplicação efetiva da protensão na construção civil (Carvalho, 2017; Loureiro, 2006).

Além do benefício financeiro, a protensão traz melhorias no desempenho no Estado Limite de Serviço (ELS) e na segurança das estruturas de concreto, com destaque para a durabilidade, pois a ausência ou redução da fissuração garante maior proteção das armaduras, inibindo o fenômeno da corrosão (NBR 6118, 2014; Cholfe and Bonilha, 2018; Silva, 2003).

Nas lajes lisas com protensão não aderente as cordoalhas são, na maioria das vezes, com traçados em formato parabólico, resultando assim em excentricidades em relação ao centro laje, que permitem aumentar a eficiência das forças aplicadas pelos cabos, aumentando também a capacidade de balanceamento das cargas (Pfeil, 1984; Vicente and Albino, 1994). O conceito de carga balanceada, tem como princípio básico propiciar que as cargas verticais equivalentes da protensão equilibrem uma fração das cargas permanentes atuantes, ficando a estrutura, para esse nível de carregamento, submetida somente a tensões de compressão (Silveira, 2002; Aalami, 1990; Aalami and Bommer, 1999).

Este fator traz a necessidade de montagem das cordoalhas o mais próximo possível das posições verticais indicadas no projeto, pois um posicionamento vertical equivocado pode ocasionar o surgimento de manifestações patológicas, flechas diferentes das previstas em projeto ou, até mesmo, em casos mais extremos, o colapso da estrutura (Silva et al., 2018; Aalami and Bommer, 1999; Romanichen and Souza, 2019).

Para manter as cordoalhas na posição vertical especificada em projeto, são utilizados espaçadores de apoio pontuais. Estes espaçadores quando industrializados, são em modelos plásticos ou de aço, com controle rigoroso no processo de produção da altura. Contudo, excepcionalmente, a produção destes espaçadores é feita em obra, com a dobra de barras de aço, não apresentando na maioria das vezes o adequado controle da produção e, por consequência, uma variabilidade nas suas alturas (Loureiro, 2006; Aalami, 2014). Além disso, outras situações como a falta de atenção no manuseio com a armadura, associada com os danos causados nas operações de concretagem, podem causar a quebra ou deslocamento desses espaçadores (Figura 1).

Ainda, mesmo havendo o controle e o cuidado com relação aos aspectos citados anteriormente, há também o próprio erro humano no posicionamento destes espaçadores durante a etapa de montagem das cordoalhas. Circunstâncias como essas podem produzir um posicionamento vertical das cordoalhas, com uma altura e excentricidade diferentes do valor especificado pelo projetista.

Os problemas provenientes do mau posicionamento das cordoalhas podem ser relacionados com o surgimento de situações, tais como: fissuração da laje, deslocamentos verticais excessivos, tensões atuantes diferentes das calculadas em projeto superando os limites de tração ou compressão do

concreto no elemento estrutural. Pode-se ainda citar o deslocamento do concreto em função de menores cobrimentos e a aceleração no processo de corrosão do aço em virtude de falta de cobrimento (Souza, 2018; Xin and Xianyan, 2012).

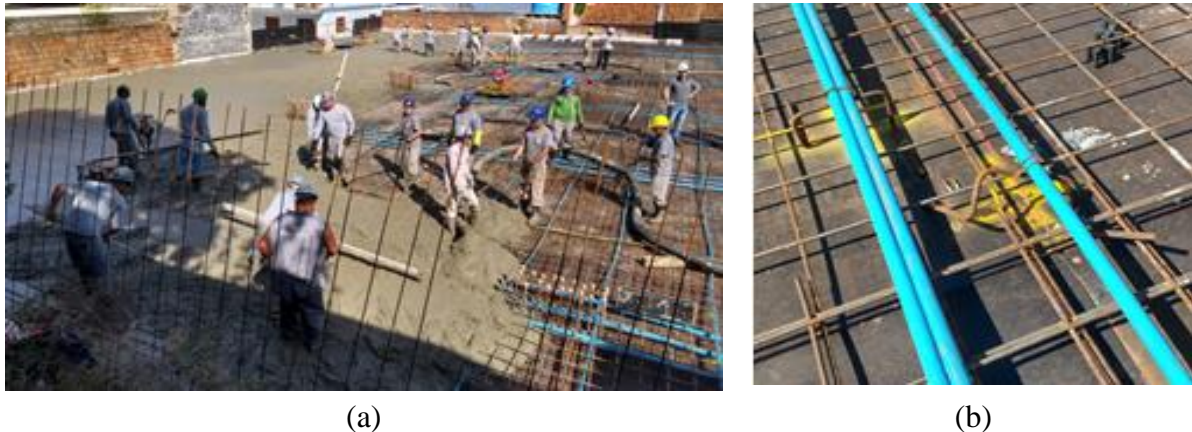


Figura 1. Operação de concretagem: (a) Manuseio da mão de obra em contato com a armadura. (b) Espaçador danificado e mal posicionado.

Respeitar o correto posicionamento vertical das cordoalhas especificado em projeto, durante a etapa de montagem, é o principal fator influente para o desempenho do sistema (Carvalho, 2017; Souza Junior and Oliveira, 2016; Caro et al., 2013).

Cauduro (2002) recomenda que desvios verticais na posição das cordoalhas sejam tolerados até  $\pm 5$  mm, em lajes que não ultrapassem a espessura de 200 mm e tolerância máxima de  $\pm 10$  mm, em lajes com espessura entre 200 mm e 600 mm. Além disso, o autor também indica que os pontos altos e baixos são as posições mais críticas e que a posição horizontal das cordoalhas não é crucial, porém deve-se evitar oscilações excessivas. No entanto, valores aceitáveis de desvios absolutos que independem da geometria da estrutura e esforços envolvidos podem resultar em insegurança na avaliação estrutural. As variações de excentricidade dos cabos de protensão podem ser mais ou menos influentes a depender da espessura da laje, ou seja, o erro relativo de excentricidade, vão entre apoios e carregamento aplicado.

Neste estudo é avaliada a influência de variações de excentricidade dos cabos em lajes lisas protendidas. Foram desenvolvidos modelos variando-se as espessuras e vãos das lajes, além do erro relativo de excentricidade do cabo. O dimensionamento das lajes lisas protendidas seguiu as especificações da ABNT NBR 6118:2014 e algumas recomendações do ACI 318:2019.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Geometria das Lajes e Traçado dos Cabos

Os modelos estruturais testados são compostos por um pavimento de laje, apoiada diretamente nos pilares, sem a existência de vigas, como apresentado na Figura 2. Os vãos entre pilares são todos iguais em cada modelo e variaram de 7,0 a 10,0 m, resultando em quatro modelos estruturais, com vãos de 7,0 m x 7,0 m até 10,0 x 10,0 m, variando de metro em metro, sendo os modelos nomeados de M7, M8, M9 e M10.

Os modelos estruturais apresentam espessuras de lajes diferentes, definidas aproximadamente pela relação  $L/42$  (ACI 318, 2019), onde  $L$  é o vão da laje. Na Tabela 1 são apresentados os modelos estruturais, com suas nomenclaturas, vãos entre pilares e as espessuras para cada uma das lajes.

O traçado dos cabos de protensão seguiu a premissa de dispor as faixas de cordoalhas concentradas na maior dimensão da laje (direção  $x$ ) e, cordoalhas distribuídas na direção perpendicular (direção

y), Figura 3.

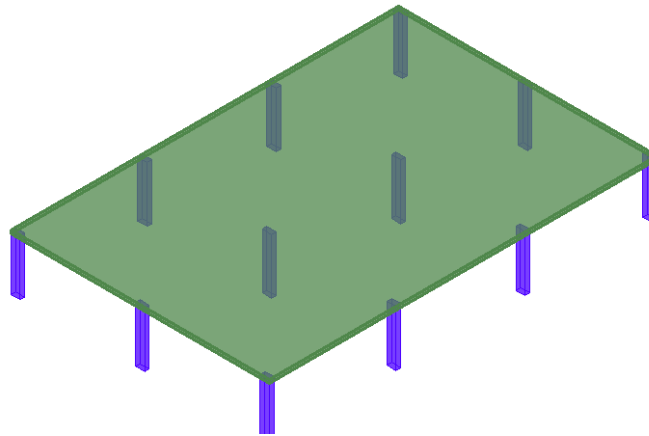


Figura 2. Modelo estrutural do pavimento para as análises.

Tabela 1. Nomenclatura e dimensões dos modelos estruturais.

	Nomenclatura	Vãos entre pilares	Espessura da laje
Modelo	M7	7,0 m x 7,0 m	170 mm
	M8	8,0 m x 8,0 m	190 mm
	M9	9,0 m x 9,0 m	210 mm
	M10	10,0 m x 10,0 m	240 mm

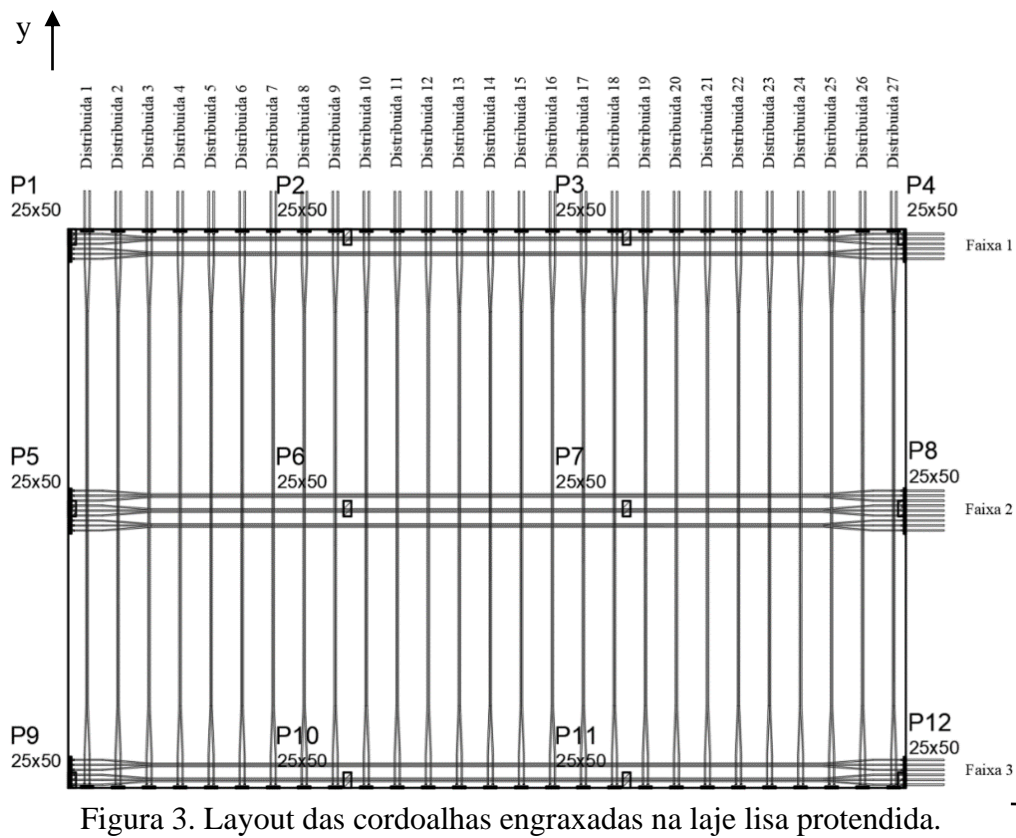


Figura 3. Layout das cordoalhas engraxadas na laje lisa protendida.

Analisou-se, exclusivamente, a faixa central de cordoalhas da direção x, em virtude de ser esta a faixa que concentra os maiores carregamentos e, assim, é mais influenciada pelas variações de excentricidade aplicadas em cada modelo proposto.

As variações das excentricidades foram testadas sobre os pilares (topo) e no centro dos vãos (base), de maneira isolada e também combinada, conforme o esquema da Figura 4. No primeiro caso foram reduzidas as excentricidades das cordoalhas unicamente na face superior da laje (topo), nas regiões dos pilares P6 e P7. Posteriormente, diminuiu-se a excentricidade exclusivamente nas regiões entre os apoios, na face inferior da laje (base). No terceiro caso realizou-se a análise com variações em conjunto, denominada como combinação crítica, reduzindo as excentricidades das cordoalhas simultaneamente nas regiões entre os apoios e também no topo dos pilares P6 e P7.

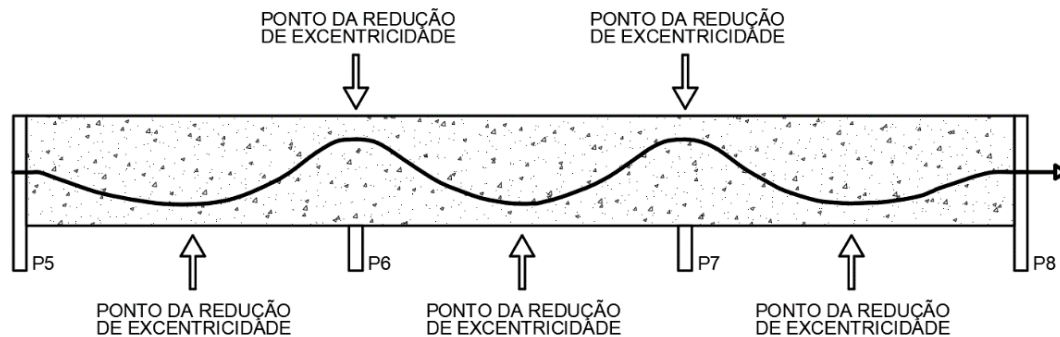


Figura 4. Pontos de redução da excentricidade para as lajes.

Para cada um dos quatro modelos (Tabela 1) foram desenvolvidas quatro hipóteses de variações de excentricidades, com valores de 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm. Esses valores foram adotados no estudo em virtude de que geralmente nos projetos os pontos de apoios verticais são apresentados nesta formatação, visando viabilizar a conferência in loco. Além disso, os estudos apresentados em (Cauduro, 2002) mostram valores limites de 5 mm e 10 mm de redução nas excentricidades das cordoalhas das lajes, para espessuras de lajes iguais ou maiores que as definidas neste estudo. Na Tabela 2 são apresentadas as hipóteses de variações, com suas nomenclaturas e as respectivas reduções das excentricidades.

Tabela 2. Hipóteses das variações de excentricidades.

Hipótese	Nomenclatura	Redução de excentricidade
Referência	H0	0
Hipótese 1	H5	5
Hipótese 2	H10	10
Hipótese 3	H15	15
Hipótese 4	H20	20

Nas análises, o vão entre o P5 e P6 foi nomeado como “primeiro”, o vão entre o P6 e P7 recebeu a denominação “central” e, por fim, o vão entre o P7 e P8, recebeu a denominação de “último”, conforme o esquema da Figura 5.

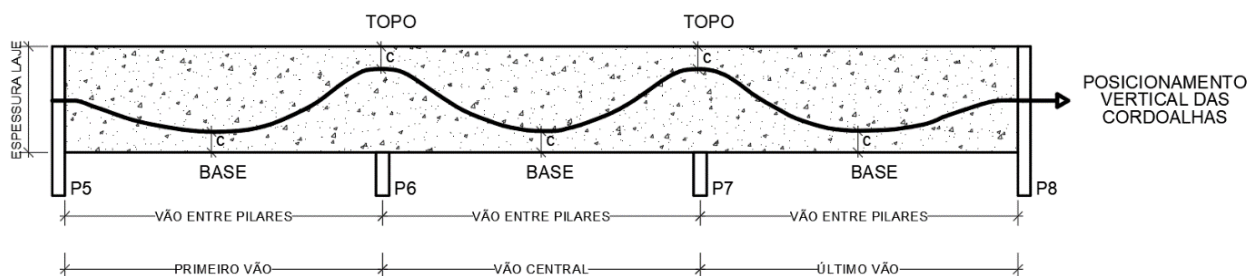


Figura 5. Posicionamento vertical das cordoalhas na laje.



## 2.2 Materiais e Parâmetros Normativos

Foi considerado um carregamento variável (sobrecarga) com o valor mínimo recomendado na (NBR 6120, 2019) para salas de uso geral de edificações comerciais, igual a 2,5 kN/m<sup>2</sup>. Adotou-se também um carregamento permanente de revestimento de valor igual a 1,0 kN/m<sup>2</sup>. Além desses dois carregamentos, foi aplicado o peso próprio calculado em função da espessura da laje, em cada caso.

Adotou-se o valor de 2,5 cm para o cobrimento das armaduras passivas e 3,0 cm para o cobrimento das armaduras ativas. Nas modelagens adotou-se concreto classe C35, com  $f_{ck}$  de 35,0 MPa e módulo de elasticidade (E) de 39,7 GPa.

As cordoalhas utilizadas foram do tipo CP 190 RB ( $f_{ptk} = 1900$  MPa), com diâmetro nominal de 12,7 mm e área de aço nominal 100,9 mm<sup>2</sup>.

Nas análises dos modelos das lajes seguiram-se inicialmente três parâmetros fundamentais normatizados: tensão de pré-compressão mínima, tensão normal limite de tração e deslocamentos verticais máximos. Após estes critérios alcançados ajustou-se as demais considerações, como balanceamento de cargas e deslocamentos finais. Após realizadas estas primeiras análises, as lajes foram dimensionadas para o Estado-limite de Serviço (ELS) e Estado-limite Último (ELU).

A tensão de pré-compressão, em qualquer ponto da laje, teve respeitado o valor mínimo de 1,0 MPa, (ACI 318, 2019; NBR 6118, 2014). Nos modelos, no processo de pré-dimensionamento, em que a pré-compressão de 1,0 MPa não foi suficiente para atender o limite da máxima tensão normal de tração no concreto ou deslocamentos, a quantidade de cordoalhas foi aumentada, até que este parâmetro fosse alcançado.

Adotou-se, quando possível, para o parâmetro de balanceamento de cargas, resultados entre 60% a 80% da carga permanente, valores estes usuais para lajes de edifícios residenciais, comerciais e garagens, (Loureiro, 2006).

Definiu-se para o dimensionamento a utilização da protensão limitada, (NBR 6118, 2014). Ainda, conforme a referida norma, nos projetos com laje lisa protendida, basta ser atendido o ELS-F (Estado Limite de Serviço de Formação de Fissuras), para a combinação frequente das ações, em qualquer das classes de agressividade ambiental. O valor limite de tensão normal de compressão no concreto no ato da protensão, foi limitado em 15,75 MPa e no estado limite de formação de fissuras (ELS-F) de 21,0 MPa, (ACI 318, 2019).

A norma (NBR 6118, 2014) limita os deslocamentos verticais, para a aceitabilidade sensorial, de vigas e lajes, na relação  $L/250$  (sendo L o vão livre entre pilares). Este valor foi tomado como limite para os modelos antes da inserção de variações nas excentricidades das cordoalhas.

As armaduras passivas positivas e negativas foram calculadas para os diferentes modelos, conforme os critérios apresentados em (NBR 6118, 2014). A Tabela 3 resume os parâmetros utilizados na verificação das lajes.

Após a inserção das variações de excentricidades, foram feitas as análises para confirmar quais modelos mantiveram-se atendendo a estes limites e, assim, calcular as armaduras passivas e definir a posição e o valor máximo de variação admissível da excentricidade das cordoalhas.

## 2.3 Análises de Dimensionamento

O dimensionamento das lajes foi realizado com o auxílio do programa Adapt Floor 2017 PRO. Este programa é específico para análise e dimensionamento de concreto protendido e discretiza a laje em elementos finitos de placa, verificando os efeitos da protensão de acordo com a geometria e força das cordoalhas, em cada elemento.

O programa permite a geração automática da malha de elementos finitos, cabendo ao usuário a definição do tamanho dos elementos desta malha. Neste trabalho foram testados dois tamanhos de dimensão máxima dos elementos. Como não foram encontradas diferenças significativas nos resultados, definiu-se utilizar para as análises uma dimensão máxima para os elementos de 500 mm

de malha. A Figura 6 mostra a malha de elementos finitos para o Modelo M8.

Tabela 3. Critérios analisados com os limites e respectivas fontes indicadas.

<b>Critério analisado</b>	<b>Límite</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte</b>
Tensão de pré-compressão	Mínimo	1,0	MPa	NBR 6118, 2014 e ACI 318, 2019
Tensão de tração nas faces inferior e superior	Máximo	3,38	MPa	NBR 6118, 2014
Tensão de compressão máxima para o Ato da Protensão	Máximo	15,0	MPa	ACI 318, 2019
Tensão de compressão máxima para o ELS-F	Máximo	21,0	MPa	ACI 318, 2019
Balanceamento de cargas	Recomendação	60 a 80	%	Loureiro, 2006 e Hanai, 2005
Deslocamentos verticais diferidos	Máximo	L/250	-	NBR 6118, 2014

Para as análises dos modelos das lajes foram lançadas linhas de suporte no alinhamento dos pilares. Essas linhas permitem ao programa definir “*design sections*”, no qual são apresentados ao usuário os valores médios das tensões na laje. Logo, essas tensões são analisadas a partir de regiões tributárias que compilam os resultados das áreas definidas pelas linhas de suporte.

A quantidade de cordoalhas, para a faixa central dimensionada, para os Modelos M7, M8, M9 e M10 foram de 10, 17, 25 e 33 unidades, respectivamente.

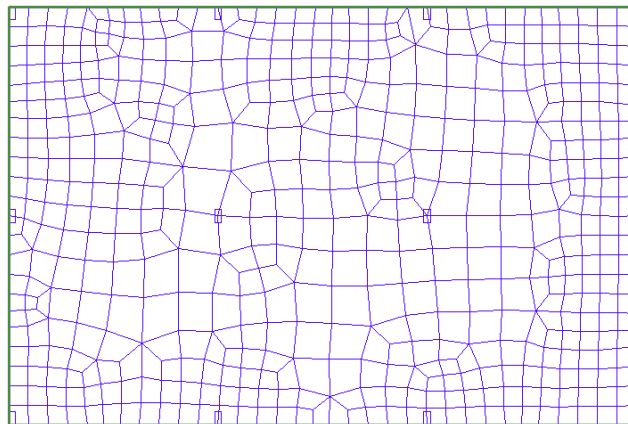


Figura 6. Malha de elementos finitos da laje.

Na Figura 7 são apresentadas as tensões normais na direção “x” para as faces superior e inferior da laje, para a combinação frequente, do Modelo M8.

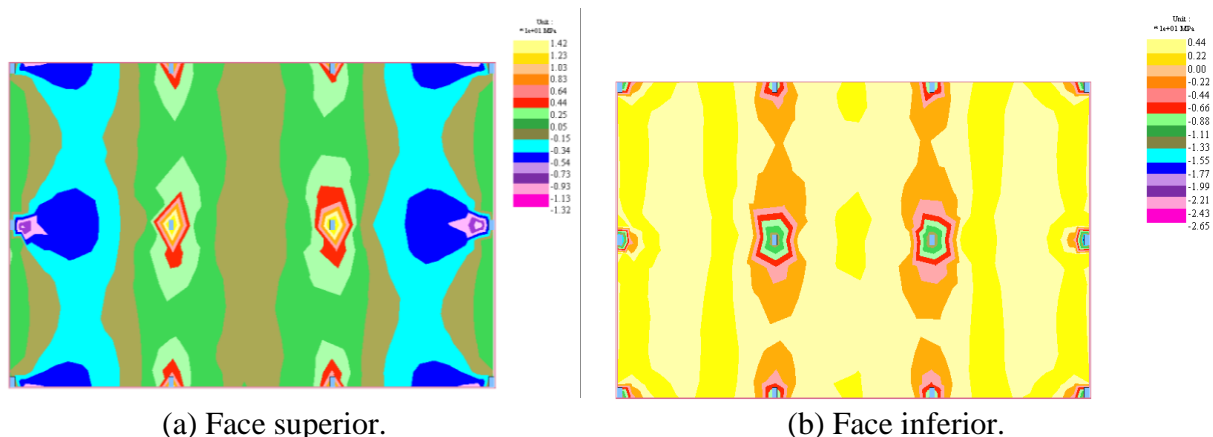
### 3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Tensões de pré-compressão

A Tabela 4 apresenta os resultados para os valores das tensões normais de pré-compressão nas lajes. As tensões normais de pré-compressão não variam em função da modificação da posição vertical das cordoalhas e sim em virtude da quantidade de cordoalhas e intensidade da força aplicada pelas mesmas. Uma densidade maior de cordoalhas, necessária para equilibrar os modelos



com vãos maiores, resultou em valores de tensão de pré-compressão também maiores. Para o modelo M7 as tensões variaram entre 1,0 e 1,11 MPa, entre vãos. Enquanto para o modelo M10 variaram entre 1,43 e 1,60 MPa, entre vãos.



(a) Face superior. (b) Face inferior.  
 Figura 7. Tensões normais (direção x), para combinação frequente, da laje modelo M8, em MPa.

Tabela 4. Verificação das tensões de pré-compressão nas lajes (valores em MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Central	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
	Último	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
	Central	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
	Último	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
	Central	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
	Último	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
	Central	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
	Último	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

### 3.2 Tensões normais máximas na laje

As tensões normais de tração na face inferior da laje (Tabela 5), para os quatro modelos, mesmo com as mudanças no posicionamento vertical das excentricidades das cordoalhas, atenderam o valor limite máximo de 3,38 MPa no ELS-F, conforme estabelecido na (NBR 6118, 2014). Nos modelos de referência, no trecho do vão central, foram encontradas tensões de compressão na

face inferior da laje, devido a maior força de protensão neste trecho em relação ao primeiro e último vãos.

Ao modificar as excentricidades das cordoalhas, exclusivamente no topo dos pilares, as tensões sofrem menores variações quando comparadas com as reduções das tensões provocadas nos modelos com variações de excentricidades na base. As reduções das excentricidades, na combinação crítica, são mais desfavoráveis. Mesmo assim, em todas as hipóteses as tensões normais de tração na face inferior da laje mantiveram-se atendendo o limite de 3,38 MPa, (NBR 6118, 2014). As análises das tensões na face superior encontram-se resumidas na Tabela 6. Em amarelo foram destacadas as tensões que ultrapassaram o limite normativo. A variação de excentricidade no topo dos pilares, nas hipóteses H5 foram as únicas que apresentaram resultados de tensões normais de tração na face superior atendendo o limite normativo de 3,38 MPa, (NBR 6118, 2014). A redução de excentricidade na face inferior da laje gera maiores tensões normais de tração na face superior do elemento, na região do apoio (pilares), em comparação à variação da excentricidade na face superior. Os modelos M7 e M9, foram os únicos que na hipótese H5 de modificação dos valores de excentricidades do caso “Base”, tiveram seus valores de tensões normais de tração menores que 3,38 MPa.

Tabela 5. Verificação da análise das tensões normais na face inferior nas lajes (valores em MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,37	2,39	2,42	2,45	2,47	2,45	2,54	2,63	2,72	2,48	2,60	2,71	2,83
	Central	-0,15	-0,12	0,00	0,05	0,12	-0,10	0,00	0,02	0,05	-0,03	0,09	0,22	0,36
	Último	2,52	2,55	2,58	2,60	2,63	2,61	2,69	2,78	2,86	2,63	2,75	2,86	2,97
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,52	2,55	2,71	2,74	2,77	2,66	2,76	2,87	2,98	2,68	2,83	2,97	3,12
	Central	-0,62	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,3	-0,2	0,01
	Último	2,48	2,51	2,54	2,57	2,61	2,58	2,69	2,79	2,9	2,62	2,75	2,89	3,03
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,64	2,65	2,71	2,74	2,77	2,66	2,76	2,87	2,98	2,68	2,83	2,97	3,12
	Central	-1,49	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,3	-1,2	-1,1	-1	-1,2	-1	-0,8	-0,6
	Último	2,63	2,66	2,72	2,74	2,78	2,67	2,79	2,9	3,01	2,71	2,82	3,01	3,16
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	Primeiro	2,70	2,73	2,77	2,80	2,83	2,81	2,91	3,01	3,12	2,84	2,97	3,10	3,24
	Central	-1,41	-1,33	-1,24	-1,15	-1,07	-1,34	-1,27	-1,20	-1,13	-1,26	-1,10	-0,93	-0,77
	Último	2,69	2,73	2,76	2,79	2,82	2,80	2,90	3,01	3,11	2,83	2,97	3,10	3,24

Tabela 6. Verificação da análise das tensões na face superior nas lajes (valores em MPa).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,04	3,12	3,21	3,29	3,37	3,15	3,25	3,36	3,46	3,23	3,42	3,61	3,80
	P6	3,26	3,33	3,41	3,48	3,56	3,36	3,45	3,55	3,65	3,43	3,61	3,78	3,96
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,28	3,38	3,47	3,56	3,65	3,40	3,52	3,65	3,77	3,50	3,71	3,93	4,14
	P6	3,08	3,18	3,28	3,37	3,47	3,21	3,33	3,46	3,58	3,30	3,53	3,75	3,97
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,09	3,19	3,29	3,40	3,51	3,24	3,34	3,42	3,55	3,26	3,49	3,72	3,95
	P6	3,13	3,22	3,31	3,45	3,53	3,29	3,42	3,56	3,57	3,39	3,64	3,88	4,12
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20	H5	H10	H15	H20
Vão entre pilares	P5	3,28	3,37	3,47	3,56	3,66	3,40	3,52	3,65	3,77	3,50	3,71	3,93	4,15
	P6	3,23	3,32	3,42	3,52	3,65	3,33	3,47	3,65	3,77	3,45	3,67	3,88	4,11

Além disso, na combinação crítica, em nenhuma das variações de excentricidades, as tensões normais de tração obtidas foram menores que o limite normativo estabelecido de 3,38 MPa, para o ELS na combinação frequente, (NBR 6118, 2014).

### 3.3 Deslocamentos verticais

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos para os deslocamentos verticais diferidos das lajes. Os modelos M7 e M8 apresentaram para todas as hipóteses e casos de variações, valores de deslocamentos verticais atendendo os limites de 28,0 mm e 32,0 mm, respectivamente. O modelo M9, apenas no vão central, obteve valores menores que 36,0 mm de deslocamentos verticais. Por fim, o modelo M10, teve seus valores de deslocamentos verticais abaixo de 40,0 mm, limite normativo (NBR 6118, 2014), em todas as variações de excentricidades para o caso “Topo” de modificações nas alturas das cordoalhas.

Tabela 7. Análise dos deslocamentos verticais nas lajes (valores em mm).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Vão entre pilares	Primeiro	18,5	18,8	19,0	19,2	19,4	19,1	19,6	20,1	20,7	19,3	20,0	20,8	21,5
	Central	5,4	5,8	6,3	6,6	7,0	5,7	6,0	6,3	6,6	6,1	6,9	7,5	8,2
	Último	19,1	19,3	19,4	19,6	19,8	19,6	20,1	20,6	21,1	19,8	20,4	21,1	21,8
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Vão entre pilares	Primeiro	24,2	24,4	24,7	24,9	25,2	24,9	25,6	26,3	27,0	25,1	26,1	27,2	28,0
	Central	4,8	5,1	5,5	6,5	7,1	5,3	5,6	6,1	7,1	5,8	6,7	7,7	8,7
	Último	23,9	24,2	24,6	24,8	25,1	24,7	25,5	26,3	30,0	25,0	26,1	27,1	28,1
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Vão entre pilares	Primeiro	35,7	35,9	36,5	36,8	37,1	36,1	36,7	37,0	37,9	36,3	36,8	37,9	39,2
	Central	5,0	5,8	6,6	7,4	8,1	6,5	7,1	7,6	8,3	7,3	8,4	9,7	10,9
	Último	35,6	35,9	36,2	36,7	37,0	36,0	36,3	36,8	37,6	36,1	36,5	37,7	39,0
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0	H5	H1 0	H1 5	H2 0
Vão entre pilares	Primeiro	35,4	35,7	36,4	38,0	39,0	36,3	37,2	38,1	40,1	36,9	39,3	41,6	42,5
	Central	2,7	3,3	5,0	8,9	10,1	3,3	5,9	9,0	10,3	4,0	6,6	9,9	12,0
	Último	34,8	35,2	35,9	37,4	38,3	35,8	36,7	37,6	39,6	36,1	38,9	40,0	42,1

Para melhor compreensão dos efeitos da alteração da excentricidade dos cabos no comportamento à flexão da laje, foi desenvolvido o gráfico da Figura 8. Neste gráfico no eixo das ordenadas, a relação  $f/L$  representa, na forma de denominador de fração, a flecha equivalente, por exemplo  $L/430$ , onde o valor  $L/250$  é a flecha limite. No eixo das abscissas estão colocadas as excentricidades relativas, ou seja, o valor do deslocamento dado ao cabo (excentricidade), em relação à espessura da laje. A excentricidade relativa (ou variação da excentricidade relativa) pode ser mais ou menos influente para os diferentes casos. Observando o alinhamento dos pontos, percebe-se que para todos os modelos de lajes a hipótese crítica conduz a maiores variações de deslocamentos. As linhas

tracejadas foram inseridas para demonstrar os casos testados, M7 a M10.

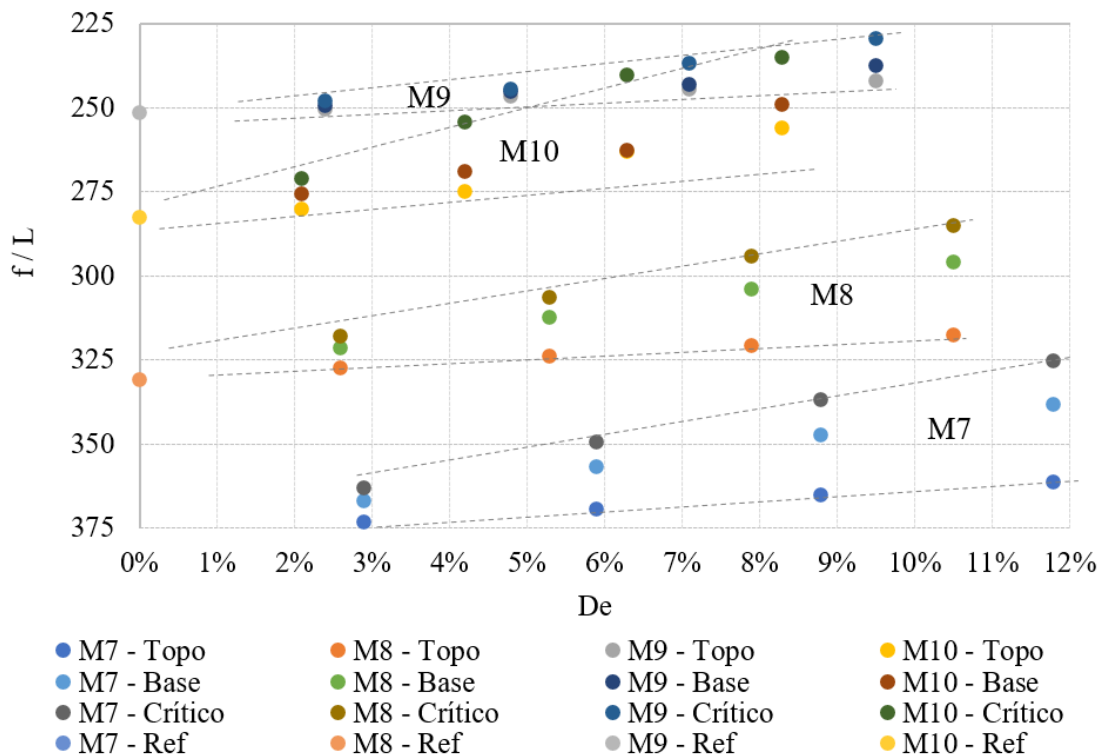


Figura 8. Deslocamentos relativos para os diferentes modelos de lajes.

Para os casos M9 e M10, a posição da excentricidade, topo, base ou crítica, foi menos influente do que para os casos M7 e M8. A amplitude de variação das flechas aumentou quando se aumentou a excentricidade relativa. Para o caso M9 – Crítico, o aumento da excentricidade relativa de 2,4% para 9,5% resultou em um acréscimo de flecha de  $L/248$  para  $L/230$ . Já para o caso M7 – Crítico, um aumento da excentricidade relativa de 2,9% para 11,8%, resultou em um aumento da flecha de  $L/363$  para  $L/325$ .

### 3.4 Balanceamento de cargas

Os valores de balanceamentos de cargas aumentam a partir da inserção de cordoalhas impostas para atender os limites de tensões normais de tração nas faces inferior, superior e pré-compressão da laje. A Tabela 8 mostra o resumo dos valores de balanceamentos de cargas para todos os conjuntos avaliados.

Somente o modelo M7 foi o que atendeu as recomendações de (Loureiro, 2006; Aalami, 2014), para valores de balanceamento de cargas, entre 60% e 80%. Nos demais modelos, o balanceamento variou entre 59 e 95% das cargas permanentes.

Tabela 8. Análise do balanceamento de cargas para as lajes (valores em %).

Modelo		M7												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	73	73	72	72	71	73	72	72	71	72	71	70	69
	Central	74	72	71	69	68	72	71	69	68	71	68	64	61
	Último	80	79	79	78	77	79	78	77	75	78	76	74	72
Modelo		M8												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	82	81	80	79	78	81	80	78	77	80	78	75	73
	Central	92	89	87	84	82	89	87	84	82	87	82	77	72
	Último	87	87	86	85	84	86	84	83	81	85	82	80	78
Modelo		M9												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	88	87	86	85	83	60	59	57	56	60	57	54	52
	Central	94	92	90	88	85	61	60	58	57	60	56	53	50
	Último	87	86	85	84	83	59	58	57	56	58	56	54	52
Modelo		M10												
Caso		Referência	Topo				Base				Crítico			
Hipótese			0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
Vão entre pilares	Primeiro	97	96	95	94	93	95	93	91	89	94	91	88	85
	Central	93	92	90	88	86	92	90	88	86	90	86	83	79
	Último	88	87	87	86	85	87	95	83	81	86	83	80	77

### 3.5 Armaduras passivas

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do cálculo das armaduras passivas positivas.

Tabela 9. Resultado armadura positiva das lajes.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo					
	Referência		H5 - Topo		H5 - Base	
	Vão primeiro e último	Vão central	Vão primeiro e último	Vão central	Vão primeiro e último	Vão central
	Área de aço (cm <sup>2</sup> /m)		Área de aço (cm <sup>2</sup> /m)		Área de aço (cm <sup>2</sup> /m)	
M7	2,54	2,11	2,54	2,11	2,64	2,22
M8	2,72	2,10	2,72	2,10		
M9	3,26	2,40	3,26	2,40		
M10	3,74	2,46	3,74	2,46		

Para as variações nas hipóteses H5 no caso “Topo”, as taxas de armaduras passivas positivas mantiveram-se iguais aos seus respectivos modelos de referência. As mudanças de taxas de



armaduras aconteceram nos mesmos modelos, mas em diferentes trechos. Na Tabela 10 são apresentados os cálculos das armaduras de combate à flexão negativa no caso H5.

Tabela 10. Armadura negativa das lajes.

Modelo de análise	Hipóteses e casos de cálculo		
	Referência	H5 - Topo	H5 - Base
	Área de aço (cm <sup>2</sup> /m)		
<b>M7</b>	7,4	7,4	7,7
<b>M8</b>	10,5	10,5	
<b>M9</b>	12,2	12,2	
<b>M10</b>	15,6	15,6	

A taxa de armadura passiva, de combate a flexão negativa, manteve-se a mesma, para os modelos hipótese de referência em comparação com os modelos na hipótese H5 de variação de excentricidade para o caso “Topo”. Isto porque, a redução de 5 mm na altura das excentricidades das cordoalhas, posicionadas no topo dos pilares, não apresentou novos esforços suficientes para aumentar a quantidade de aço neste caso.

A variação da excentricidade das cordoalhas na face inferior para o modelo M7, fez com que fosse necessário aumentar a taxa de armadura de combate à flexão negativa sobre os pilares, em relação ao modelo de referência, para a mesma distância entre pilares analisada.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a análise e o dimensionamento de quatro modelos de lajes lisas protendidas, com variação dos vãos e das excentricidades das cordoalhas, no intuito de simular possíveis erros de montagem no posicionamento dos espaçadores de apoio vertical. Foram analisadas nos diferentes modelos as tensões de pré-compressão, tensões normais nas faces inferior e superior da laje, balanceamentos de cargas e deslocamentos verticais. Também foram dimensionadas as armaduras passivas positivas e negativas.

Por meio da análise dos resultados é possível concluir que, a redução nas excentricidades das cordoalhas interferiu diretamente nos esforços das lajes lisas protendidas, principalmente causando reduções na parcela de tensões normais combatidas pela protensão. A diminuição da excentricidade das cordoalhas na face inferior da laje interfere negativamente em maior grau que a variação da excentricidade na face superior, afetando o controle das tensões normais na laje, assim como nos critérios de balanceamento de cargas e deslocamentos.

O Modelo M7 foi o único que obteve valores dos critérios analisados, atendendo os limites normativos, com variações das excentricidades na hipótese H5, para os casos “Topo” e “Base”, de posição da variação das alturas das cordoalhas.

Por outro lado, os Modelos M8, M9 e M10, apenas na variação para a hipótese H5, no caso “Topo”, apresentaram resultados das tensões normais de tração abaixo do limite de 3,38 MPa, estabelecido pela norma (NBR 6118, 2014).

O fator responsável pelas tensões de pré-compressão no elemento estrutural foi somente a quantidade de cordoalhas e a força aplicada nas mesmas, sem sofrer reduções nos valores em virtude da modificação vertical do posicionamento.

Os deslocamentos verticais nas lajes sofreram mudanças com a aplicação das variações nas excentricidades. Os modelos M7 e M8 foram os únicos que permaneceram abaixo dos limites normativos de  $L/250$  para todas as hipóteses de variações de excentricidades aplicadas.

O critério de balanceamento de cargas manteve-se atendendo aos limites recomendados apenas no

Modelo M7. Como são critérios complementares, não normatizados, podem ser aceitos nos dimensionamentos, mesmo com valores não recomendados.

As taxas de armaduras passivas positivas e negativas mantiveram-se iguais, unicamente, nos modelos de referência e na hipótese H5 de variação da excentricidade do caso “Topo”.

A máxima variação de excentricidade relativa para que os critérios analisados se mantivessem atendendo aos limites estabelecidos, é de 2,1% ao comparar a variação da excentricidade com a espessura de laje, no caso “Topo”, para atender os critérios.










Nas análises é possível afirmar que é admissível, para as lajes lisas protendidas com protensão não aderente, do tipo CP 190 RB  $\phi$  12,7 mm, com vãos entre pilares de 7,0 m a 10,0 m, uma tolerância máxima de 5 mm de redução no posicionamento vertical das cordoalhas na face superior. Esta análise é mais limitada, quando comparadas às tolerâncias encontradas na literatura.

## 5. REFERÊNCIAS

- Aalami, B. O. (1990), *Load Balancing: A Comprehensive Solution to Post - Tensioning*. ACI Structural Journal: 662-670.
- Aalami, B. O. (2014), “*Post-Tensioned Manual*”. California: ADAPT, v.1, p. 500.
- Aalami, B. O. (2000), *Structural Modeling of Post-Tensioned Members*. Journal of Structural Engineering. Vol. 126 N°. 2: 157-162.
- Aalami, B. O., Bommer, A. (1999), “*Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors*”. Post-Tensioning Institute (PTI), Farmington Hills, USA.
- Almeida, S. R. M. (2001), “*Contribuição ao projeto ótimo de cabos em vigas de concreto protendido*”. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.2058>.
- American Concrete Institute (2019). *ACI 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills, MI.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Caro, L. A., Vargas J. R. M., Ros, P. S. (2013), *Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens*. Engineering Structures. Vol. 48, p. 704-715. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.038>.
- Carvalho, R. C. (2017), “*Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento*”. Ed. Pini. São Paulo, Brasil, p. 448.
- Cauduro, E. L. (2002), “*Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas*”. São Paulo, Brasil.
- Cavaco, E. S., Bastos, A., Santos, F. A. (2017), “*Effects of corrosion on the behaviour of precast concrete floor systems*”. Journal Construction and Building Materials. N. 145: 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.044>.
- Cholfe, L., Bonilha, L. (2018), “*Concreto protendido: teoria e prática*”. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil, p. 360.
- Hanai, J. B. (2005), “*Fundamentos do Concreto Protendido*”. E-book. São Carlos.
- Kang, T., Bondy, K. B. (2008), *Recommendations for Design of Post-Tensioned Slab-Column Connections Subjected to Lateral Loading*. PTI Journal, Post Tensioning Institute. Vol. 6, nº 1.
- Loureiro, G. J. (2006), *Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, ed. 44.
- Pfeil, W. (1984), “*Concreto Protendido – Introdução*”. LTC. Rio de Janeiro.
- Romanichen, R. M., Souza, R. A. (2019), *Reinforced concrete corbels strengthened with external*

- prestressing*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. V. 12. N. 4, p. 812 – 831. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000400006>.
- Santos, J. S. D. (2017), “*Desconstruindo o Projeto Estrutural de Edifícios: Concreto Armado e Protendido*”. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos. p. 127.
- Silva, G., Prata, B., Albuquerque, A. (2018), *Análise da eficiência dos sistemas estruturais para edifícios em concreto*. Ambiente Construído. Vol. 18, n. 1, p. 313-325. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100223>.
- Silva, R.C. (2003), “*Vigas de concreto armado com telas soldadas: análise teórica e experimental da resistência à força cortante e do controle da fissuração*”. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 328.
- Silveira, M. C. A. (2002). “*Práticas de Projeto e Execução de Edificações Protendidas com Cordoalhas Engraxadas e Plastificadas*”. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte.
- Souza, F. A. (2018), “*Radier simples, armado e protendido – Teoria e Prática*”. Editora Catarse. São Paulo, Brasil, p. 312.
- Souza Junior, O. A., Oliveira, D. R. C. (2016), “*Influence of the tendon’s layout on the shearing resistance of prestressed concrete beams*”. Revista Ibracon de estruturas e materiais. Vol. 9, N. 5. p. 765 – 795. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000500008>.
- Vicente, C. M. D. S., Albino, J. P. D. C. (1994), “*Lajes em Concreto Armado e Protendido*”. Editora da Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, Brasil, p. 584.
- Xin, F., Xianyan, Z. (2012). “*Experimental research on crack width of retard bonded partially prestressed concrete beams*”. International Conference on Advances in Civil Infrastructure Engineering. Hunan.

## Modificações da envoltória de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos

A. Sánchez<sup>1</sup> , E. Alonso<sup>1,2\*</sup> , W. Martínez<sup>2</sup> , H. Chávez<sup>2</sup> , M. Navarrete<sup>2</sup> ,  
M. Arreola<sup>2</sup> , J. Borrego<sup>2</sup> , L. Equihua<sup>2</sup> , E. Núñez<sup>2</sup> , O. Miranda<sup>2</sup>

\*Autor de Contato: [elia.alonso@umich.mx](mailto:elia.alonso@umich.mx)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.595>

Recepção: 01/03/2022 | Aceitação: 19/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

Foram analisadas as modificações apresentadas por diferentes estabilizantes (cal, cimento, fibra de figueira-da-índia (palma), líticos fluviais, líticos vulcânicos, sulfato de sódio e gesso) nas propriedades e envoltório de ruptura de um solo argiloso natural remodelado de Santiago Undameo, em Michoacán, México. Granulometria, hidrometria, testes de índice, compressão simples e teste de Proctor foram realizados no solo argiloso. A variação nas propriedades de índice e envoltório de ruptura foram determinadas para as misturas estabilizadas. As adições propostas melhoraram o comportamento do solo altamente plástico, reduzindo deformações volumétricas e aumentando sua resistência mecânica normal, resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito interno. A pesquisa contribui favoravelmente para a restauração de construções de terra do patrimônio histórico, obras civis, patologias em edifícios e tecnologias de construção. A pesquisa foi realizada em laboratório utilizando normas internacionais.

**Palavras-chave:** estabilização do solo; propriedades mecânicas; resistência ao cisalhamento; coesão; ângulo de atrito interno; restauração.

**Citar como:** Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Chávez, H., Navarrete, M., Arreola, M., Borrego, J., Equihua, L., Núñez, E., Miranda, O. (2022), “*Modificações da envoltória de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos*”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 227 – 247, DOI: [se asigna al publicar el artículo](https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.595)

<sup>1</sup> Faculty of Architecture, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico

<sup>2</sup> Materials Department, Faculty of Civil Engineering, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os testes foram realizados por O. Miranda (50%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%); a atividade de pesquisa bibliográfica O. Miranda (25%), L. Equihua (25%), A. Sanchez (25%) e E. Alonso (25%); a atividade de extração de informação por E. Nuñez (20%), J. Borrego (20%), A. Sanchez (20%), E. Alonso (20%), W. Martinez (20%); análise e discussão dos resultados por M. Navarrete (25%), M. Arreola (25%), J. Borrego (25%), H. Chavez (25%); a redação do documento por A. Sanchez (20%), H. Chavez (20%), W. Martinez (20%), M. Navarrete (20%) e M. Arreola (20%); a revisão do texto por E. Alonso (20%), H. Chavez (20%), M. Arreola (20%), M. Navarrete (20%) e J. Borrego (20%); desenho da figura e adaptação do formato por W. Martinez (25%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%) e O. Miranda (25%); Tradução inglesa A. Sanchez (100%).

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## Modifications of the rupture envelope in clayey soils with different volumetric stabilizer

### ABSTRACT

The modifications of seven different stabilizers (lime, cement, nopal fibers, river sand, volcanic sand, sodium sulphate and gypsum) on a clayey soil of Santiago Undameo, in Michoacan, Mexico, were analyzed to observe the changes in the properties and the rupture envelope. Sieve analysis, hydraulic sedimentation, index properties, compressive strength and Proctor were performed to the natural soil; while the variation of the index properties and the rupture envelope were determined for the stabilized mixtures. The additions improved the behavior of the high plasticity soil, diminishing the volumetric deformations and increasing the mechanical resistance, shear strength and angle of internal friction. This research contributes positively to the restoration of earthen heritage buildings, civil works, construction pathologies and construction technologies. The research was performed in the laboratory under international standards.

**Keywords:** soil stabilization; mechanical properties; shear strength; cohesion; angle of internal friction; restoration.

## Modificaciones de la envolvente de falla en suelos arcillosos con distintos estabilizadores volumétrico

### RESUMEN

Se analizaron modificaciones presentadas por distintos estabilizadores (cal, cemento, fibra de nopal, lútics de río, lútics volcánicos, sulfato de sodio y yeso) en propiedades y envolvente de falla de un suelo arcilloso natural remoldeado de Santiago Undameo, en Michoacán, México. Al suelo arcilloso se le realizó granulometría, hidrometría, pruebas índice, compresión simple y prueba Proctor; a las mezclas estabilizadas se determinó la variación en propiedades índice y envolvente de falla. Las adiciones propuestas mejoraron el comportamiento del suelo altamente plástico, disminuyendo las deformaciones volumétricas e incrementando su resistencia mecánica normal, al cortante y ángulo de fricción interna. La investigación contribuye favorablemente a la restauración de construcciones de tierra histórico-patrimoniales, obra civil, patologías en edificaciones y tecnologías constructivas. La investigación fue realizada en laboratorio bajo normatividad internacional.

**Palabras clave:** estabilización de suelos; propiedades mecánicas; cortante; cohesión; ángulo de fricción interna; restauración.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

*Listado de acrónimos (por orden de aparición en el texto)*

Acrónimo	Significado
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
BTC	Bloque de Tierra Comprimida
UU	No Consolidado no Drenado
MT	Muestra Testigo
C	Cal
CP	Cemento Portland
FN	Fibras de Nopal
LR	Líticos de Río
LV	Líticos Volcánicos
SS	Sulfato de Sodio
Y	Yeso
UMSNH	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
A	Actividad
IP	Índice Plástico
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
C <sub>Lin</sub>	Contracción Lineal
C <sub>Vol</sub>	Contracción Volumétrica
CH	Arcillas de Alta Plasticidad
CL	Arcillas de Baja Plasticidad
MH	Limo de Alta Plasticidad
ML	Limo
OH	Arcilla Orgánica
OL	Limo Orgánico



## 1. INTRODUÇÃO

Os solos argilosos, também chamados de argilas, são usados para muitas aplicações, inclusive como material de construção, e são elementos essenciais para nossa sociedade desde os primórdios da civilização até os tempos modernos. Diferentes elementos construtivos como o adobe têm sido utilizados em culturas e lugares muito diversos, como é o caso dos continentes europeu e americano, com exemplos de antiguidade excepcional (Mauricio, et al., 2021). Podemos encontrar importantes exemplos da utilização dos solos como elementos impermeáveis nos núcleos de barragens e corpos d'água para agricultura e irrigação, fabricação de cimento Portland, construção de estradas e rodovias, para confecção de peças e componentes cerâmicos, na arquitetura vernacular e de terrenos, como elementos para a restauração de estruturas históricas e edifícios patrimoniais, para zonas úmidas, limpeza e tratamento de água.

Devido à sua fácil acessibilidade e abundância de material em muitas e variadas regiões do planeta, os solos argilosos têm uma excelente valorização devido às suas propriedades sustentáveis e ao baixo impacto energético e ambiental que geram (Costa et al., 2019). As argilas são por definição sedimentos minerais constituídos principalmente por agregados de silicatos de alumínio hidratados e granulometria finamente dividida. Além disso, as argilas têm excelentes propriedades aglutinantes, razão pela qual historicamente têm sido usadas como materiais cimentícios (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

No México, existem diferentes tipos de argilas que foram usadas para construção ao longo do tempo; em particular, no estado de Michoacán, encontramos a presença de argilas em componentes de construção como alvenaria de adobe, tijolos cerâmicos, argamassas de assentamento e terra, entre muitos outros. Santiago Undameo, cidade localizada no nordeste do estado de Michoacán, possui um dos bancos de argila mais importantes da região devido à sua proximidade com a capital do estado, Morelia, (ver Figura 1) cujo centro histórico está inscrito na lista Patrimônio Mundial da UNESCO, e possui mais de 1.000 edifícios com caráter patrimonial, todos eles construídos com técnicas construtivas tradicionais e coloniais, com uso extensivo de solos argilosos e outros materiais locais da região.



Figura 1. (a) Localização do estado de Michoacán no México; (b) Localização do município de Morelia, incluindo Santiago Undameo, no estado de Michoacán.

Os solos desta localidade possuem uma proporção de material argiloso, que devido às suas propriedades de alta plasticidade apresentam instabilidade causando consideráveis alterações volumétricas em contato com a água, o que geralmente causa problemas patológicos em edificações e obras civis. Historicamente, uma grande variedade de materiais têm sido utilizados como estabilizadores de argilas, para reduzir a alta plasticidade higroscópica que apresentam e, conseqüentemente, reduzir a retração e expansão linear e volumétrica em contato com a água

(Daneels et al., 2020). Esta estabilização é essencial para áreas como arquitetura e construção com terra, as bases e sub-bases de pavimentos flexíveis; uma vez que contribui para aumentar a durabilidade destas estruturas à medida que a resistência mecânica aumenta (Laborel-Préneron et al., 2021), sendo todas estas propriedades muito apreciadas no setor da construção.

O interesse da presente investigação reside na complexidade dos solos analisados em Santiago Undameo, uma vez que (historicamente) apresentam uma elevada plasticidade e conseqüentemente consideráveis deformações volumétricas que afetam a estabilidade das construções existentes na região de estudo.

Por outro lado, a arquitetura de terra no estado de Michoacán e em geral no México, apesar de sua riqueza, variedade e importância cultural, foi deslocada e abandonada, por isso é essencial aumentar o trabalho de pesquisa sobre esse recurso sustentável e facilmente acessível às comunidades. Além disso, a compreensão do comportamento desses solos argilosos em combinação com diferentes estabilizantes ajudará a melhorar a intervenção, restauração e compreensão das patologias existentes.

Existem muitos materiais que são usados como estabilizadores de argila para construção, muitos deles com formação em estudos científicos: cal (Taallah e Guettala, 2016; Navarro Mendoza et al., 2019), cimento Portland (Dao et al., 2018; Jitha et al., 2020), fibra desidratada em pó de cacto opuntia ficus indica (Ige y Danso, 2020; Li Piani, 2020), líticos fluviais, líticos vulcânicos, sulfato de sódio e gesso (sulfato de cálcio semi-hidratado) (Martínez, et al., 2018).

Estabilizações com cimento, cal e soluções alcalinas são as mais comuns globalmente (Abhilash, et al., 2022), além disso, em outras investigações, as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar têm sido utilizadas como alternativa na melhora do solo, nas suas características físicas como a compactação, densificação e estabilidade volumétrica, e características químicas através das reações do agente estabilizante (cimento ou cal) com água (Moraes et al., 2015; Ojeda Farías et al., 2018).

Podemos encontrar uma bibliografia abundante sobre o uso de fibras e materiais vegetais, seu principal uso sempre foi prevenir a retração e trincas de elementos construtivos compactos, como adobes, ajudando a melhorar suas capacidades mecânicas (Yetgin, et al., 2008), encontrando várias investigações relevantes que conseguiram melhorar as propriedades da alvenaria (Sharma, et al., 2015; Araya-Letelier, et al., 2021). No entanto, atualmente o desenvolvimento de técnicas melhoradas de construção em terra, como o BAC, tornou possível buscar soluções incluindo fibras de origens muito diferentes em combinação com outros estabilizantes como CP ou C (Nagaraj, et al., 2014; Taallah e Guettala, 2016; Navarro Mendoza, et al., 2019).

No México, o uso de produtos derivados do cacto opuntia ficus indica, popularmente conhecido como palma, é muito comum na construção civil, tanto na forma de mucilagem quanto de fibras. Uma das formas mais frequentes na região de utilizar a mucilagem é fervendo o cacto e adicionando o líquido às misturas de argamassa, sendo uma solução recomendada pelos órgãos reguladores do patrimônio para intervir e restaurar prédios históricos; com esse método, foram monitorados aumentos na resistência mecânica e alta trabalhabilidade das misturas (Martínez et al., 2008). Além disso, estudos correlativos com outras adições e estabilizantes de uso histórico mostraram um melhor comportamento mecânico em materiais com adição de mucilagem (Alonso et al., 2002).

Neste estudo, sete materiais estabilizantes foram usados para melhorar o comportamento da argila Santiago Undameo em uma amostra de testemunho (AT). Foram utilizados cal (C), cimento Portland (CP), fibra desidratada em pó do cacto opuntia ficus indica (FP), líticos fluviais (LF), líticos vulcânicos (LV), sulfato de sódio (SS) e gesso (G) (sulfato de cálcio semi-hidratado). Para medir as alterações geradas no material analisado, foram realizados testes triaxiais não consolidados não drenados (NN), hidrometria, granulometria e teste de Proctor, tanto para as amostras controle quanto para as misturas melhoradas. A análise das amostras adicionadas de diferentes materiais estabilizantes fornecerá informações relevantes que contribuem para o

aprimoramento das técnicas e uso do barro como elemento construtivo em obras de natureza moderna e conservação do patrimônio edificado.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

As amostras de solo foram obtidas do banco de argila de Santiago Undameo, uma cidade muito próxima à cidade de Morelia, capital do estado de Michoacán, no México. O banco está localizado a 19°42' de latitude norte e 101°11,4' de longitude oeste, às margens da barragem de Cointzio (ver Figura 2), onde são produzidos adobes artesanais e tijolos de barro recozido (ver Figura 3), que dar origem, principalmente, a moradias rurais em comunidades próximas. Após amostragem e retirada das amostras de solo, estas foram transportadas para o laboratório de materiais “Ing. Luis Silva Ruelas” da Faculdade de Engenharia Civil da UMSNH, onde foi realizada a presente investigação.

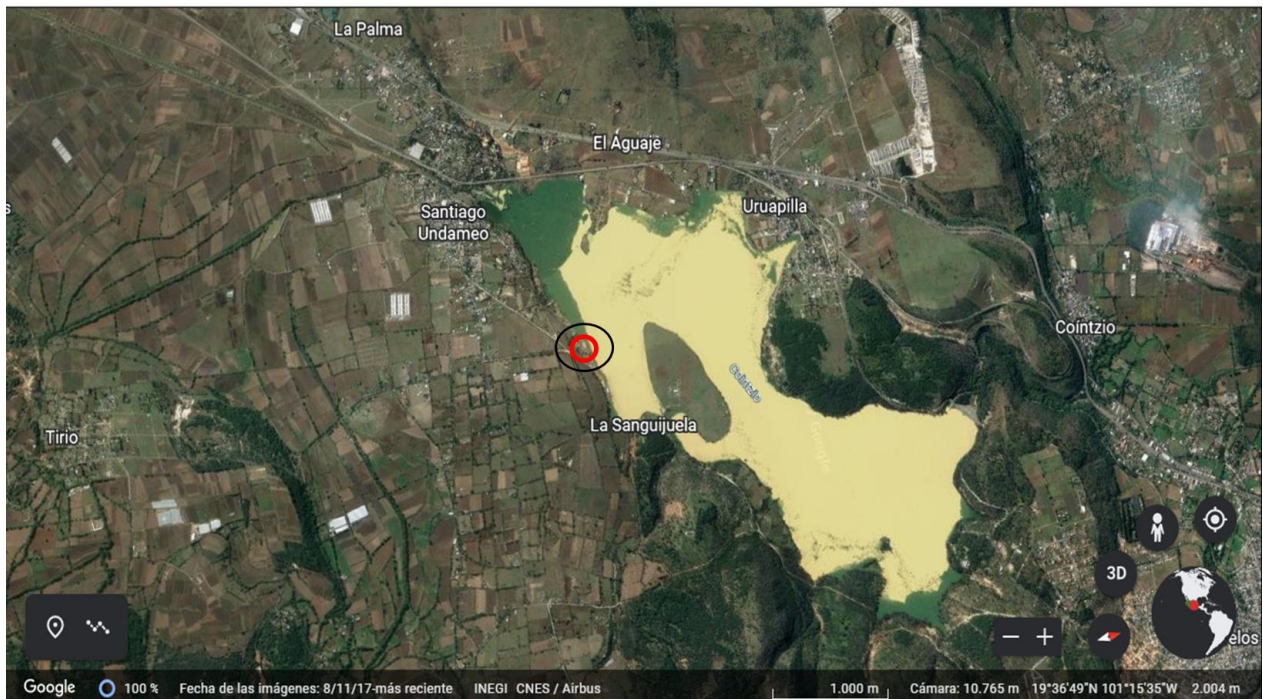


Figura 2. Localização do banco de materiais em Santiago Undameo (Fonte: Google Earth, 2022).





Figura 3. (a) Banco de solo argiloso precursor de Santiago Undameo; (b) Produção e elaboração de componentes construtivos.

Todos os ensaios aqui propostos foram realizados em triplicata. Os testes foram realizados tanto no solo controle como posteriormente nos solos estabilizados. A Tabela 1 mostra os estabilizantes utilizados, bem como a porcentagem em peso utilizada para as misturas projetadas.

Quanto aos líticos, o LF provém do banco "El Cuervo" na cidade de Huajúbaro, no México, coordenadas; longitude (dez): 100,742500, latitude (dez): 19,403333 e 1800 msnm, sendo agregados siliciosos de morfologia arredondada; enquanto o material LV vem do banco "Joyitas", também localizado no estado de Michoacán, coordenadas; longitude (dez): 101,380000, latitude (dez): 19,730000 e 2082 msnm, rodovia Morelia-Quiroga, sendo agregados andesíticos com formato irregular.

É importante destacar que em estudos anteriores foi realizada uma varredura com cada uma das adições com porcentagens de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10% em peso do solo (Flores Rentería, 2010), para encontrar os teores ótimos de cada estabilizador, concluindo que os melhores comportamentos mecânicos foram os indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Porcentagens dos estabilizadores em peso.

Estabilizadores	% Estabilizante
C	3.0
CP	3.0
FP	0.5
LF	10.0
LV	10.0
SS	0.5
G	6.0

Na presente investigação foram realizados vários ensaios para a caracterização dos solos, que estão representados na Tabela 2. Todos os ensaios foram realizados no laboratório "Ing. Luis Silva Ruelas" da Faculdade de Engenharia Civil, UMSNH.

Tabela 2. Ensaio aplicados na pesquisa e normas seguidas.

Ensaio	Norma
Limites de Consistência e Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	ASTM D2487-17 ASTM D4318-17
Granulometria	ASTM C136/C136M-19
Hidrometria	ASTM D7928-17
Triaxial não consolidado não drenado (NN)	ASTM D2850-15 UNE-EN ISO 17892-8:2019
Proctor Normal variante A	ASTM D698-12
Granulometria < malha nº 200	ASTM D421-85(2007) W2016
Granulometria > malha nº 200	ASTM D 422-63(2007) W2016

O ensaio triaxial não consolidado não drenado foi realizado com três confinamentos diferentes ( $\sigma$ ), para cada uma das misturas estudadas, conforme pode ser observado na Tabela 3. Uma vez que os corpos de prova romperam, eles foram deixados na estufa por 24 horas a aproximadamente 105 +/- 5 °C de acordo com os regulamentos para determinar a umidade.

Tabela 3. Ensaio NN e pressões confinantes aplicadas.

Amostra	Confinamento (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	$\sigma_3 = 0.3$
2	$\sigma_3 = 0.6$
3	$\sigma_3 = 0.9$

A distribuição granulométrica do solo natural de controle, para partículas retidas na malha ASTM nº 200, foi realizada seguindo a norma ASTM D421-85 (2007) W2016; enquanto o material aprovado na malha ASTM nº 200 foi analisado por meio do teste de sedimentação do hidrômetro, com duração aproximada de uma semana para realização de leituras periódicas conforme a norma ASTM D 422-63 (2007) W2016. Para classificar as amostras de solo argiloso, foi utilizado o SUCS regido pela norma ASTM D-2487-17, sendo este sistema o mais utilizado na prática geotécnica. A resistência ao cisalhamento foi obtida pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, lei constitutiva do ano de 1773 que permite conhecer a coesão (c) e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ).

Por outro lado, para obter os corpos de prova reconstituídos dos testes triaxiais UU, foram adicionados os estabilizantes, homogeneizando e combinando a reconstituição com o Peso Volumétrico Máximo Seco ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e a umidade ótima ( $\omega_{\acute{o}pt}$ ) obtida no teste Proctor. Padrão (variante A). A umidade ótima ( $\omega_{\acute{o}pt}$ ) é o teor de água com o qual se obtém a melhor acomodação das partículas e o índice de vazios mínimo ( $e_{m\acute{i}n}$ ) e também, desta forma, o maior peso volumétrico do material seco, para uma dada energia de compactação, o peso volumétrico correspondente é designado como peso volumétrico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ).

O índice de atividade da argila (A) foi obtido a partir da análise do hidrômetro, (ASTM D 422-63, 2016) usando a expressão (1). A Figura 4 apresenta a variação de A para diferentes argilominerais.

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de argila em peso inferior a } 2\mu\text{m}} \quad (1)$$

Onde:

A = atividade de argila

IP = índice de plásticidade

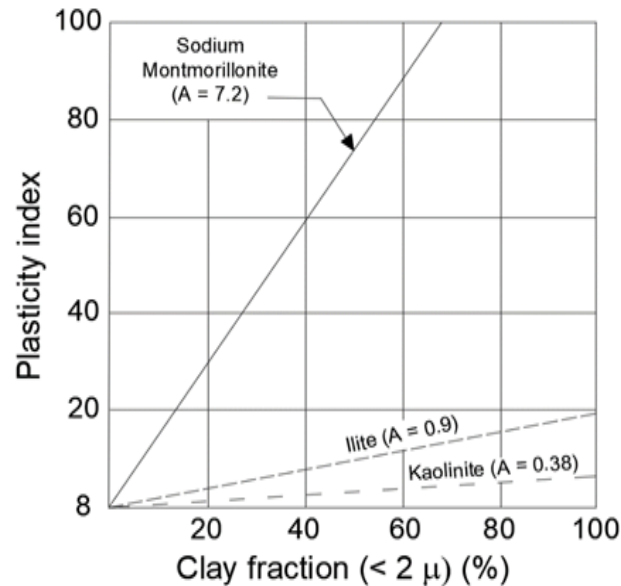


Figura 4. Atividade e correlação entre PI e a porcentagem de fração argila < 2 μm (%). (Skempton, 1953).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo, investigou-se a modificação da envoltória de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos. Assim, no decorrer da seção seguinte, os resultados obtidos serão analisados e discutidos, primeiramente, analisando os resultados dos ensaios realizados no solo remoldado natural que atuou como controle (AT), posteriormente correlacionando os resultados de as misturas de solo também foram remoldadas e estabilizadas com as sete adições diferentes.

#### 3.1 Análise de amostras de solo de controle

Os resultados dos testes de índice são apresentados na Tabela 4, incluindo umidade ( $\omega$ ), LL, LP, IP,  $C_{Lin}$  e  $C_{Vol}$  respectivamente.

Tabela 4. Índice de propriedades do solo de Santiago Undameo, México.

Material	$\omega$ (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$C_{Lin}$ (%)	$C_{Vol}$ (%)
AT	51.15	52.20	19.51	32.69	12.93	42.27

A Figura 5 mostra os resultados obtidos da granulometria graúda do solo argiloso, realizada por peneiramento do material com malhas ASTM; e a granulometria fina, obtida a partir do teste de sedimentação com o densímetro, em escala semi-logarítmica. Deste último teste obteve-se o A da argila.



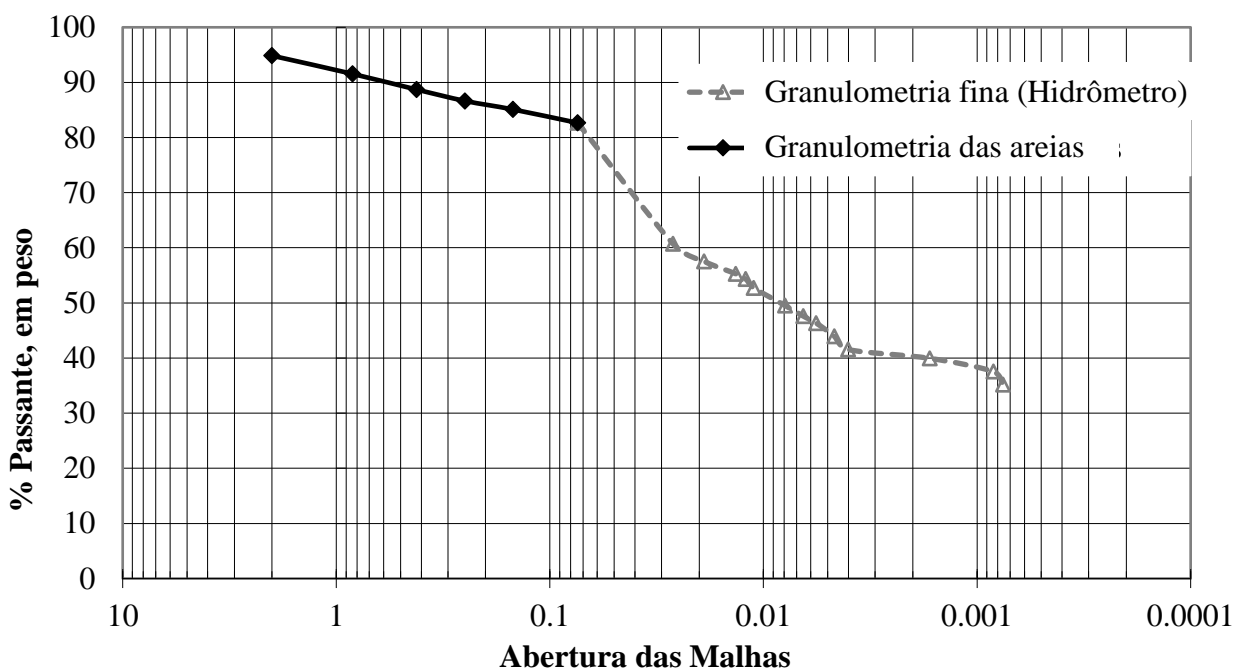


Figura 5. Análise granulométrica combinada de solo gráudo e solo fino da amostra controle.

Pela análise granulométrica, verificou-se que 82% do material passou na malha ASTM nº 200, classificando-o como um solo fino. Além disso, os valores de LL e IP localizaram o material dentro da zona CH, de acordo com a classificação SUCS (ver Figura 6). A análise hidrométrica foi realizada para obter a granulometria fina e determinar A das argilas. A Figura 4 mostra que a porcentagem de material que passa pelo filtro, inferior a  $2\mu\text{m}$ , é de 40%, o que indica uma quantidade considerável de partículas de tamanho micrométrico, dentro da amostra de solo natural de Santiago Undameo.

Do IP obtido, com valor de 32,7%, obteve-se um A de 0,81 (Expressão 1). Segundo Skempton, o mineral corresponde a uma ilita (ver Figura 4), que possui um A muito menor do que, por exemplo, o caso de uma montmorilonita. As ilitas apresentam inconvenientes para a construção devido à sua tendência ao colapso e às alterações volumétricas que apresentam quando entram em contato com a água, sendo problemáticas para as obras civis (Mirjalili et al., 2020).

### 3.2 Análise do solo argiloso a argila adicionando os diferentes estabilizantes

Para classificar o solo argiloso (% passante na malha ASTM nº 200) com os diferentes estabilizantes, foi realizado o teste de limites de Atterberg. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico de plasticidade da Figura 6, onde a posição do solo não perturbado e das misturas estabilizadas refletem sua classificação de acordo com o sistema SUCS. O solo natural de Santiago Undameo é classificado como CH, coincidindo com os resultados do A apresentados pelo material. Todas as amostras de solo adicionadas estavam localizadas na zona CL, evidenciando a alteração das propriedades proporcionadas pelos estabilizadores; entretanto, a mistura contendo FN ficou muito próxima do limite entre argilas de alta e baixa plasticidade. Por outro lado, a combinação que corresponde ao solo natural com 0,5% de SS adicionado, foi classificada como CL (ver Figura 6), apresentando a maior diminuição no LL de 52,2% da amostra controle para 40,2% (ver Tabela 5).

Nos casos de argilas estabilizadas não patrimoniais (já que, devido à sua disponibilidade, permitem obter mais quantificações do que as amostras patrimoniais), podem-se buscar equações de correlação (Parisi et al., 2020; Vasic et al., 2020) entre os resultados dos diferentes testes físico-

mecânicos (Olacia et al., 2020; Rodríguez et al., 2018; Lan et al., 2020). As equações de correlação permitem estimar parâmetros, seja para validar modelos matemáticos ou para encontrar relações entre variáveis com coeficientes de correlação estatisticamente aceitáveis, sendo úteis para estimar parâmetros em projetos de engenharia onde são utilizados solos argilosos. Existem vários pesquisadores que encontraram equações de correlação entre variáveis do solo e que lhes permitiram propor equações de correlação para fins práticos (Akkaya, Özvan e Özvan, 2019; Chompoorat et al., 2022; Wang et al., 2021; Wu et al. al., 2022).

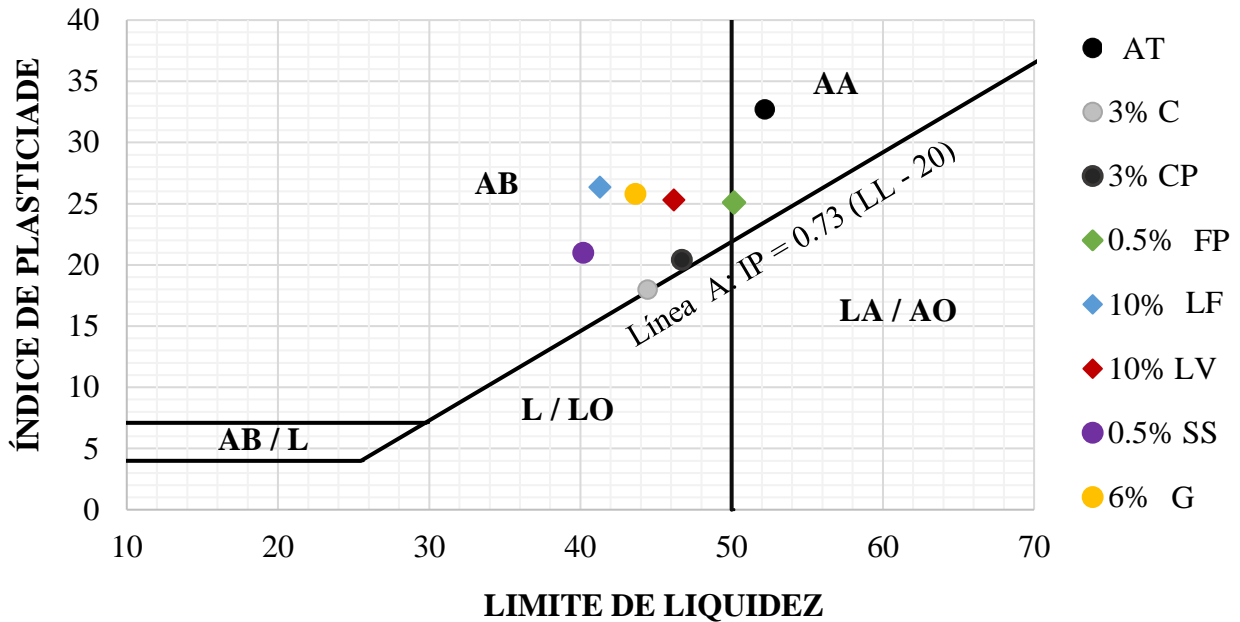


Figura 6. Gráfico de plasticidade e localização das amostras originais e estabilizadas.

Tabela 5. Propriedades de índice do solo e as misturas com os diferentes estabilizantes adicionados.

Material	$\omega$ (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$C_{Lin}$ (%)	$C_{Vol}$ (%)
AT	51.15	52.20	19.51	32.69	12.93	42.27
3 % C	44.28	44.44	26.47	17.97	12.05	43.52
3% CP	46.67	46.71	26.29	20.42	12.33	45.46
0.5% FP	49.38	50.17	25.08	25.09	14.86	54.90
10 % LF	41.10	41.30	14.96	26.34	12.31	41.71
10% LV	46.06	46.19	20.89	25.34	10.04	42.98
0.5% SS	40.71	40.20	19.20	20.99	11.02	40.27
6% G	44.44	43.64	17.84	25.80	12.26	44.72

A Figura 7 mostra o conjunto de propriedades índice de cada uma das misturas estabilizadas e o solo de controle de Santiago Undameo. Na referida figura pode-se observar que os estabilizantes reduzem o teor ótimo de água ( $\omega$ ), o LL e o IP; por outro lado, também provocam um comportamento irregular do LP e do  $C_{Lin}$  e  $C_{Vol}$ , o que pode corresponder às características particulares de cada adição. Para essas três propriedades índice (LP, CL e IP), os valores obtidos foram tanto maiores quanto menores do que o solo controle.

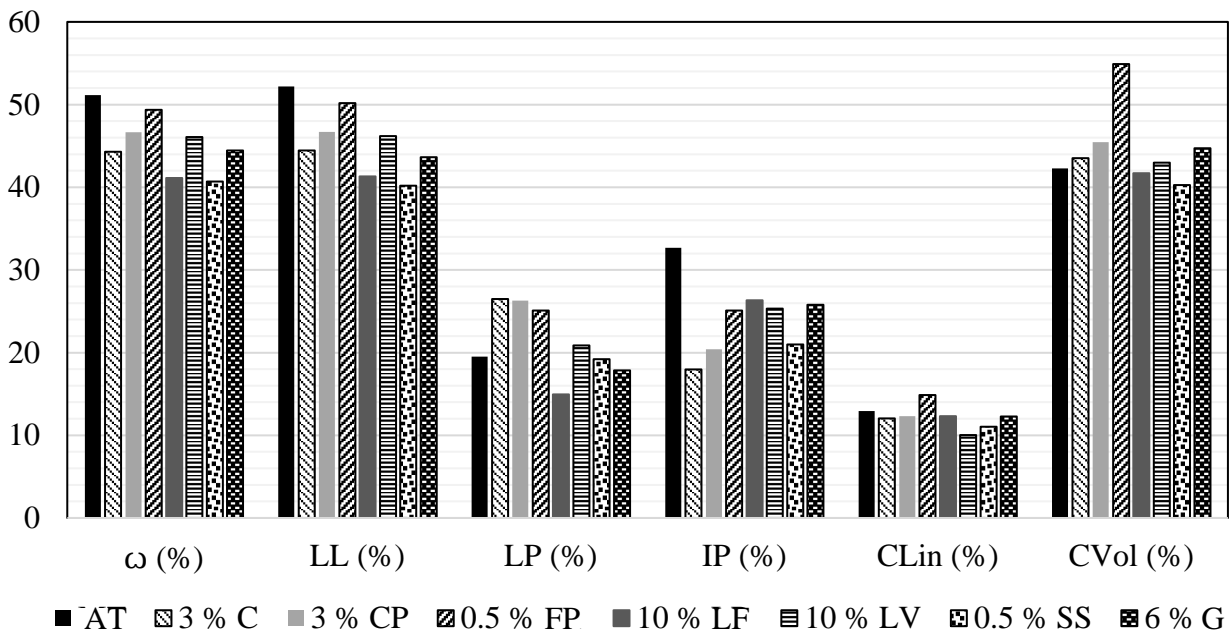


Figura 7. Propriedades de índice do solo de controle e das misturas com os diferentes estabilizantes adicionados.

O ensaio Padrão Proctor determina o teor de água necessário para atingir o peso específico máximo por compactação mecânica (consulte a Figura 8). Neste caso, pode-se observar o efeito dos estabilizadores na quantidade de água necessária e no aumento ou diminuição do peso específico máximo possível. Para este ensaio, a Figura 8 mostra o comportamento da amostra de controle e das misturas estabilizadas em diferentes cores, observando os resultados mais altos para LF e os mais baixos para C. Os teores de água ideais para atingir o peso específico máximo de cada estabilizador são mostrados na Figura 9.

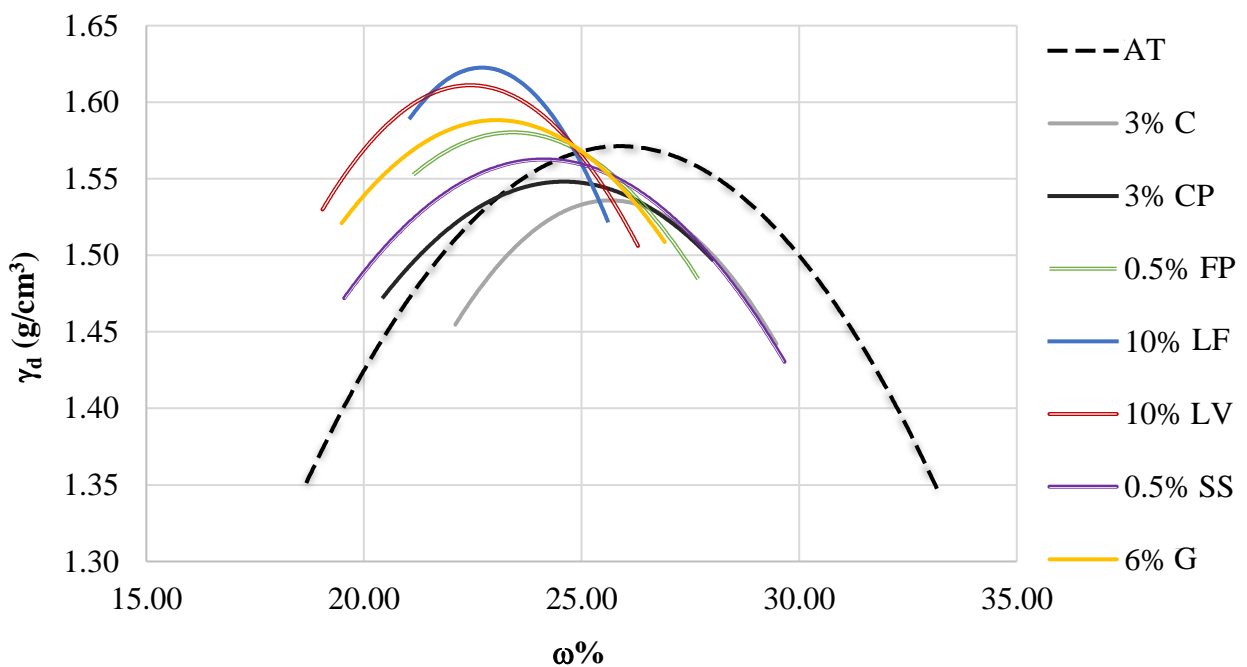


Figura 8. Resultados do ensaio Padrão Proctor (variante A).

A Figura 9 mostra os resultados do Ensaio Padrão Proctor (variante A), permitindo perceber o efeito que os estabilizadores têm em termos do peso específico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e do teor de água ideal ( $\omega_{\acute{o}pt}$ ) para realizar a sua compactação no laboratório. Observando o gráfico, podemos perceber uma clara diminuição do teor ótico de água com a adição de C, CP e FP; essa diminuição de  $\omega_{\acute{o}pt}$  também impacta em um menor  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ , que pode ser atribuído às propriedades de trabalhabilidade e plasticidade que caracterizam esses materiais, sem perder de vista que a água é um lubrificante para a acomodação de partículas, o ótico corresponderá a o maior valor de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ . Tanto o CP quanto o C se destacam por manter um certo grau de fluidez por um determinado tempo para facilitar seu uso durante as obras; além disso, esse mesmo comportamento foi observado em misturas de argamassas à base de cal e cimento Portland que incorporam FP (Díaz-Blanco, et al., 2019; Knapen e Van Gemert, 2009; Ramírez-Arellanes et al., 2012).

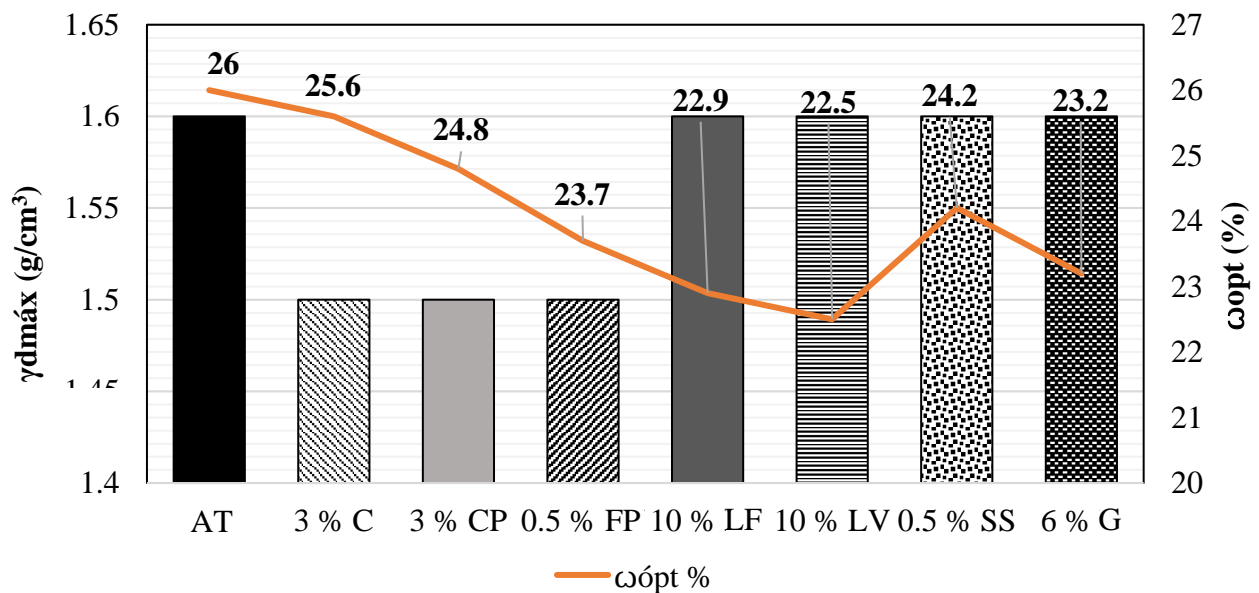


Figura 9. Resultados do ensaio padrão Proctor (Variante A) em função do teor ótico de água.

Em relação aos líticos utilizados, fica evidente que eles não alteram suas propriedades físicas na presença de água, portanto, não interferem na  $\omega_{\acute{o}pt}$ ; entretanto, diminuem o  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  da amostra sem adição, o que pode ser atribuído ao seu tamanho de partícula, porosidade e densidade, pois ocupam um volume maior que o solo controle. O SS pode se comportar um pouco como um lítico se a água for adicionada à temperatura ambiente, e sua dissolução na amostra também pode ser mais lenta do que o tempo necessário para executar o ensaio.

A Figura 9 revela pequenas variações do parâmetro  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  (Miranda, 2017), enquanto as mudanças mais significativas são aquelas que ocorrem com o teor de água ótico  $\omega_{\acute{o}pt}$ , com variações muito mais notáveis. Este teor de água também é necessário para obter posteriormente o parâmetro  $e_{m\acute{i}n}$ .

### 3.3 Ensaio triaxiais não consolidados não drenados (NN)

Para a realização dos ensaios triaxiais NN, foram utilizados corpos de prova reconstituídos, para os oito casos que consideram o solo natural mais as sete misturas adicionadas. Um total de 144 amostras foram ensaiadas (ver Figura 10).

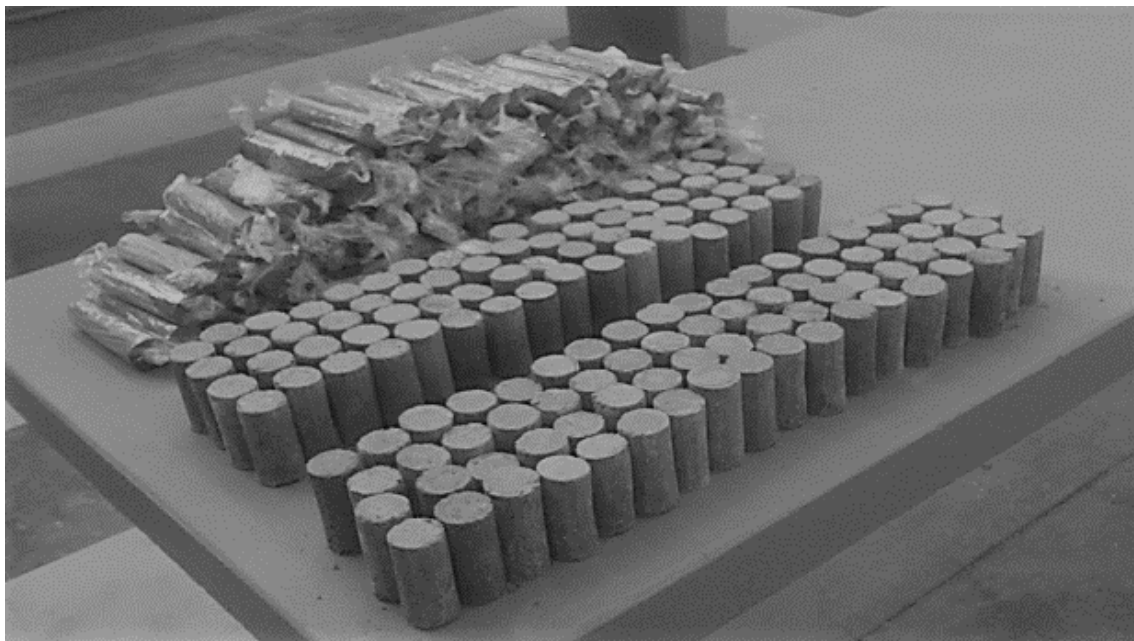


Figura 10. 144 corpos de prova de solos argilosos com diferentes estabilizantes para o ensaio triaxial NN (Miranda, 2017).

Na Figura 11 podemos observar a correlação entre Deviating Stress ( $\sigma$ ) e a Deformação unitária ( $\epsilon$ ), dados que indicam o tipo de falha obtido para cada uma das combinações entre o solo argiloso controle e seus estabilizadores. As amostras que apresentaram melhora em sua plasticidade (AB) apresentaram alterações em seu comportamento expansivo. Esse comportamento das misturas é muito significativo, pois pode melhorar esses materiais e ter um impacto muito positivo no seu uso para aplicações na construção civil, estabilizantes podem ser usados em campo entre muitos outros usos.

Praticamente todas as misturas melhoraram seu comportamento em termos de tensão de compressão e deformação. Fica evidente que a mistura com 6% G como estabilizante melhora o material ao enrijecê-lo e aumentar sua resistência à compressão, isso é observado por apresentar uma maior inclinação na curva descrita por este material.

A estabilização do solo com gesso não é muito comum na prática e as informações sobre seu comportamento são muito limitadas, porém, com os resultados apresentados, demonstra uma certeza em seu uso, mas sabe-se que o gesso é solúvel em água, portanto o que requer cuidadosas medidas de proteção. Abaixo das misturas com G, as misturas com C, LF e CP, que são materiais muito utilizados na estabilização do solo e esperava-se uma melhora no material, como por exemplo no caso das misturas com C, quando a reação de cal e água ocorre, o solo diminui sua permeabilidade e aumenta a capacidade de carga em poucas horas, formando finalmente uma camada estrutural forte e flexível (Reginaldo et al., 2018).

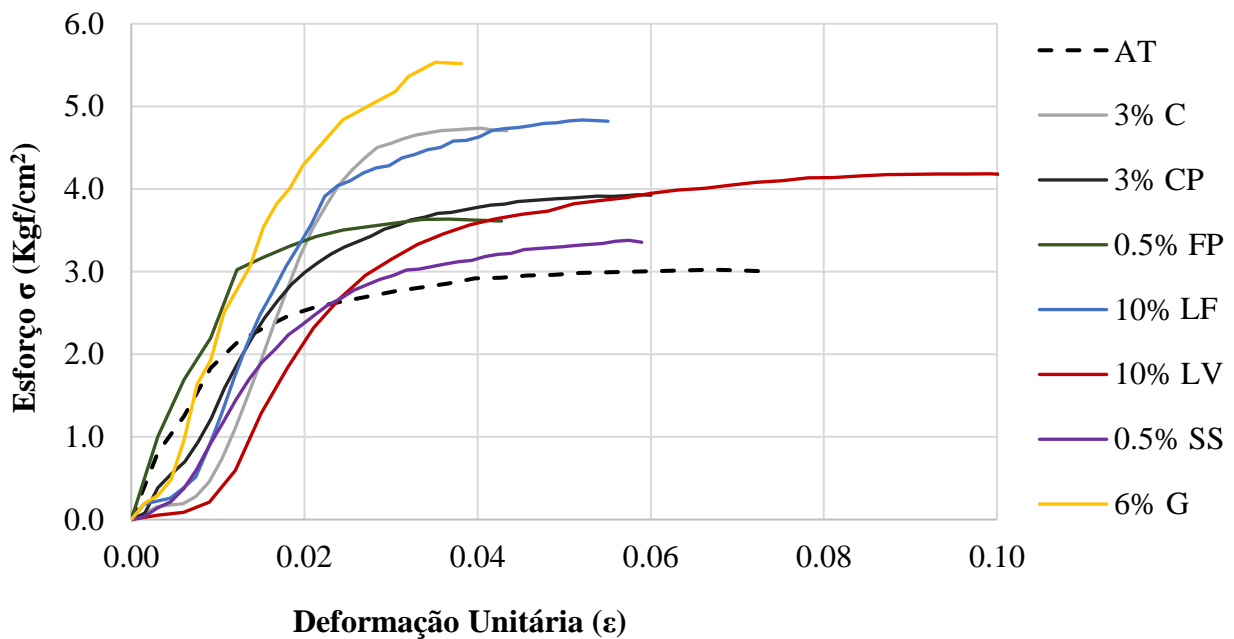


Figura 11. Curvas de tensão do desviador  $\sigma$ - deformação unitária  $\varepsilon$ .

A Figura 12 mostra um exemplo da envoltória de ruptura, utilizando pelo menos 3 círculos de Mohr para conhecer a tendência da linha da envoltória e, com isso, calcular a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\varphi$ ).

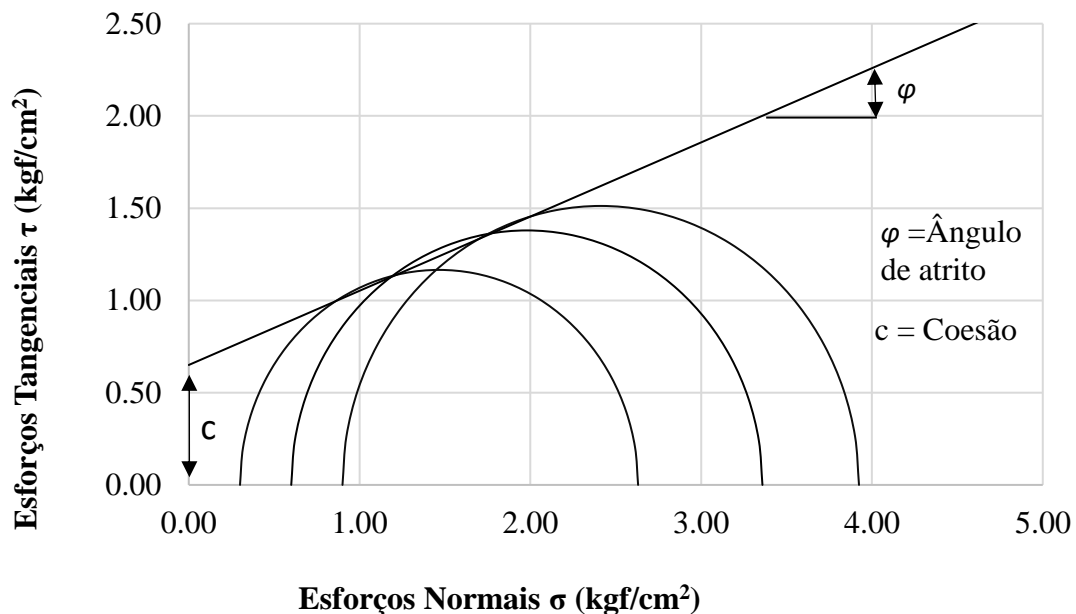


Figura 12. Envoltória de ruptura obtido para o solo natural, obtendo  $c = 0,65 \text{ kgf/cm}^2$  e  $\varphi = 22^\circ$ .

Para simplificar a observação das envoltórias de ruptura e a sua representação gráfica, apresentase a figura 13 com o resumo dos resultados dos solos argilosos adicionados dos diferentes estabilizantes, sem colocar os respectivos círculos de 3 Mohr que deram origem ao envoltório.



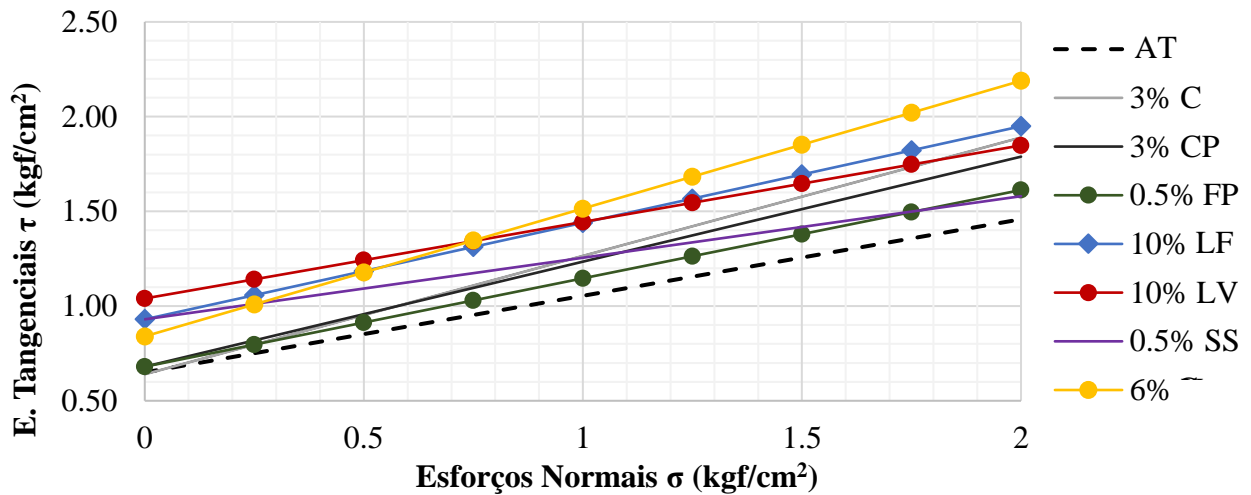


Figura 13. Comparação das envoltórias de ruptura do solo argiloso de Santiago Undameo, natural (Controle) e com estabilizadores.

A Figura 14 mostra como todos os estabilizadores usados melhoram a coesão em maior ou menor grau. A variação do nível de melhoria da coesão (c) depende das características particulares de cada estabilizador em relação a essa matéria-prima ou solo argiloso natural. Neste ensaio, destacaram-se principalmente LF, LV, SS e G. Em relação ao ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), observa-se um comportamento inversamente proporcional ao apresentado pela coesão, visto que os melhores resultados correspondem a C, CP e G, esses três estabilizadores são materiais que reagem quimicamente com a água e formam novas fases mineralógicas mecanicamente mais resistentes, o que impacta positivamente no valor de  $\phi$ . O fato de G ter impacto positivo em ambas as variáveis é muito interessante, sendo o único estabilizador com esse comportamento.

Vale ressaltar que o aumento do ângulo de atrito interno é mais significativo que o aumento da coesão, sendo especialmente apreciado e favorável para os usos dos solos utilizados na construção civil. Isso se deve ao fato de que a resistência mecânica pode variar facilmente quando se adiciona água às partículas do solo, de modo que a capacidade de resistência se torna mais importante devido à união entre as partículas do solo argiloso.

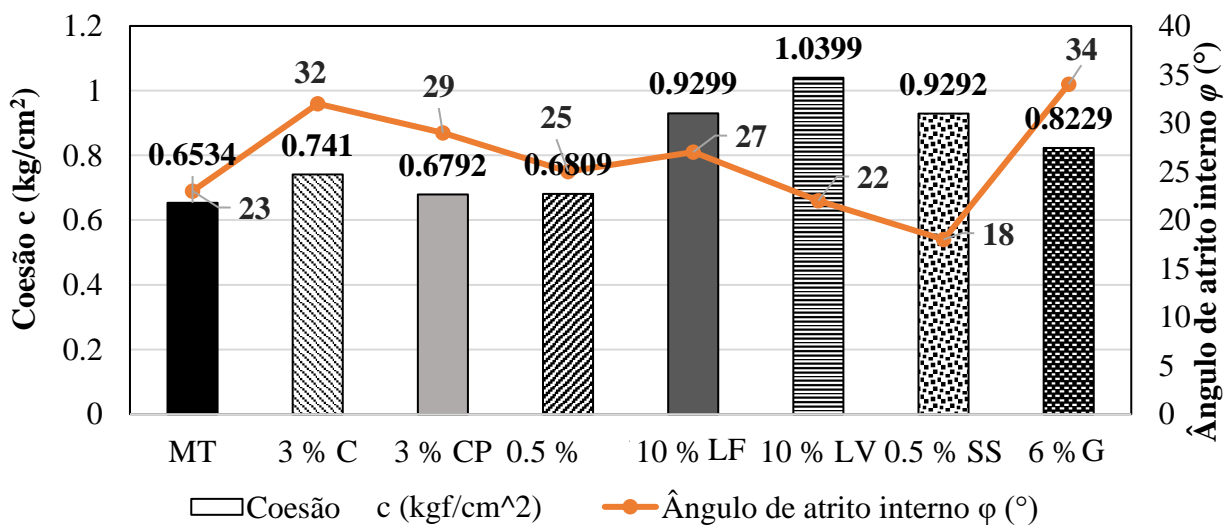


Figura 14. Valores de coesão (c) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) da amostra controle e das misturas com diferentes estabilizantes.

## 4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados correspondem e se limitam ao estudo dos solos argilosos de Santiago Undameo, em Michoacán, México. É importante notar que qualquer extrapolação para material de estudo semelhante deve ser cuidadosa e baseada em experimentação direta. A metodologia desenvolvida neste trabalho e o grau de inovação dos ensaios quanto ao conhecimento desses materiais podem ser muito úteis em aplicações relacionadas à construção e restauração de imóveis. Ao melhorar um solo, apresenta-se um impacto positivo no nosso ambiente, uma vez que é possível obter benefícios ambientais e econômicos, por exemplo, os custos de transporte dos materiais aumentam substancialmente com a distância a que se encontra o local de exploração; é permitido, com a estabilização, que os materiais que não atendem aos requisitos das normas, como é o caso mais frequente dos materiais encontrados in situ, atinjam a resistência necessária para que seu desempenho, dentro da estrutura do pavimento, seja satisfatório; ou que se consiga um melhor comportamento destes materiais, reduzindo a espessura das estruturas do pavimento a construir, o que implica que os orçamentos para obras de pavimentação sejam significativamente reduzidos e que as pedreiras ou bancos de materiais sejam menos explorados.

As envoltórias de ruptura da amostra original (solo natural remodelado não estabilizado) permitiram determinar a variação do esforço máximo suportado, obtendo a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno para cada caso ( $\phi$ ), sendo esta a principal contribuição da pesquisa.

Os resultados obtidos mostraram que seis dos estabilizantes adicionados ao solo argiloso de controle modificam sua classificação SUCS, passando de AA para AB. A amostra adicionada com 3% C (hidróxido de cálcio) apresentou melhores resultados em relação às demais amostras adicionadas, pois a mistura estava localizada próxima à linha limite entre silte e argila com baixa plasticidade. Por outro lado, FP não apresentou grandes alterações nas propriedades do material, colocando-o no limiar entre alta plasticidade e baixa plasticidade. Os estabilizadores proporcionam muitas outras alterações nas propriedades do solo, no entanto, a plasticidade é uma das mais importantes, devido aos problemas explicados anteriormente apresentados pelas construções de terra, infraestrutura e edifícios patrimoniais.

Com as envoltórias de ruptura, observou-se uma mudança na coesão  $c$  e no ângulo de atrito  $\phi$ , resultando em aumento da resistência mecânica de algumas misturas. Os estabilizadores que favoreceram maior atrito entre as partículas do solo (maior  $\phi$ ) correspondem a G, C, CP, LF e FP. Ao contrário, o LV não proporciona aumento nas propriedades mecânicas, resultando em um ângulo de atrito ( $\phi$ ) muito semelhante ao do solo natural; além disso, a SS também não teve muito sucesso nessa tarefa.

A adição de alguns estabilizantes garante um aumento significativo nas propriedades mecânicas dos solos expansivos. Para o caso particular da argila em Santiago Undameo, a adição de C e G como estabilizantes mostrou melhorias nas propriedades físicas e mecânicas. Esses estabilizadores reduzem a plasticidade e melhoram a trabalhabilidade do material, sendo uma propriedade muito atrativa para usos em construção e restauração com mínimas alterações estéticas e colorimétricas. Os dois materiais (C e G) requerem menos energia do que outros estabilizantes industriais para sua produção, por isso têm menor impacto ambiental e são mais sustentáveis.

No caso dos adobes para a conservação do patrimônio vernacular mexicano, com problemas de sobrevivência e dificuldades de estabilização com materiais históricos tradicionais, mostra-se que a cal continua a ser a melhor opção para a estabilização da argila, em contraste com a CP. No entanto, este último tem demonstrado sua utilidade para outros fins, como a produção de BAC, uma tecnologia de construção de baixo impacto que pode atingir considerável resistência mecânica e que apresenta melhor comportamento na presença de água devido ao seu processo de compactação.

Por fim, pode-se concluir que as sete adições propostas, quando analisadas em laboratório sob as normas internacionais ASTM, melhoraram o comportamento do solo altamente plástico, reduzindo deformações lineares e volumétricas e aumentando a resistência mecânica e o ângulo de atrito interno dos solos argilosos adicionados. A investigação contribui favoravelmente para a melhoria dos solos argilosos utilizados na recuperação de construções de terra de patrimônio histórico, obras civis, problemas patológicos em edifícios e tecnologias de construção.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordinación de la Investigación Científica y del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” da Faculdade de Engenharia Civil, da UMSNH; do CONACYT com o Proyecto Pronaces 321260 e o Programa de Becas Nacionales; da SEP, Secretaría de Educación Pública em seus programas Prodep/Promep; bem como o inestimável apoio técnico dos Engenheiros O. S. Miranda Leal, F. J. Jerónimo Rodríguez, J. I. Bocanegra Torres e P. García Díaz nas quantificações mecânicas, e LANCIC-UNAM na microcaracterização do material.

## 6. REFERÊNCIAS

- Abhilash, H. N., Hamard, E., Beckett, C. T., Morel, J.-C., Varum, H., Silveira, D., Ilampas, R. (2022), Chapter 4. Mechanical Behaviour of Earth Building Materials. En A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, B. V. Venkatarama Reddy (Eds.), “*Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials*”, Springer, cap. 4, pp. 127-180. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_4)
- Akkaya, İ., Özvan, A., Özvan, E. E. (2019), *A new empirical correlation between pressuremeter modules (EM) and shear wave velocity (Vs) for clay soils*. Journal of Applied Geophysics. 171(103865). <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103865>
- Alonso, E., Martínez-Gomez, L., Martínez, W., & Castano, V. M. (2002), *Preparation and Characterisation of Ancient-Like Masonry Mortars*. Advanced Composite Letters. 11(1). doi: <https://doi.org/10.1177/096369350201100105>
- Araya-Letelier, G., Antico, F. C., Burbano-García, C., Concha-Riedel, J., Norambuena-Contreras, J., Concha, J., & Saavedra Flores, E. I. (2021), *Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers*. Construction and Building Materials. 276(122127). doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (1998). *UNE 103402: Determinación de los Parámetros Resistencia de Una Muestra de Suelo en el Equipo Triaxial*.
- Asociación Española de Normalización (AENOR) (2019), *UNE-EN ISO 17892-8:2019 Investigación y ensayos geotécnicos; Ensayos de laboratorio de suelos, Parte 8: ISO 17892-8:2018 Ensayo triaxial sin consolidación y sin drenaje*.
- ASTM International (2019), *ASTM C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. doi: [https://doi.org/10.1520/C0136\\_C0136M-19](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19)
- ASTM International (2017), *ASTM D7928-17 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. doi: <https://doi.org/10.1520/D7928-17>
- ASTM International (2017). *ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. doi: <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- ASTM International (2017). *ASTM D4318-17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. doi: <https://doi.org/10.1520/D4318-17>

- ASTM International (2021). *ASTM D698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup>(600 kN-m/m<sup>3</sup>))*. doi: <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>
- ASTM International (2015). *ASTM D2850-15 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. doi: <https://doi.org/10.1520/D2850-15>
- ASTM International. (2007) *ASTM D421-85 Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (Withdrawn 2016)*.
- ASTM International (1998). *ASTM D 422-63 (Reapproved 1998) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.
- Chompoorat, T., Thepumong, T., Khamplod, A., Likitlersuang, S. (2022), *Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing*. Construction and Building Materials. 316(125858). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125858>
- Costa, C., Cerqueira, Â., Rocha, F., & Velosa, A. (2019), *The sustainability of adobe construction: past to future*. International Journal of Architectural Heritage. 13: 639-647. doi: <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1459954>
- Daneels, A., Romo de Vivar, A., Chávez, L., Reyes, M., Tapia, E., León, M., . . . Otero, F. J. (2020), *Bitumen-stabilized earthen architecture: The case of the archaeological site of La Joya, on the Mexican Gulf Coast*. Journal of Archaeological Science: Reports, 34(A). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102619>
- Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., Rocabruno-Valdés, C. I., Uruchurtu-Chavarín J. (2019), *Influencia de un aditivo natural (mucílago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto*. Revista ALCONPAT. 9 (3): 260- 276. doi: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>
- Flores Rentería, A. (2010), “*La norma ASTM D6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Kalifala, D., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J. E., Gomina, M. (2018), *Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement*, Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001>
- Knapen, E., Van Gemert, D. (2009), *Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers*. Cement and Concrete Research. 39(1): 6-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.10.003>
- Ige, O. and Danso, H. (2021), *Physico-mechanical and thermal gravimetric analysis of adobe masonry units reinforced with plantain pseudo-stem fibres for sustainable construction*. Construction and Building Materials. 273(121686). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121686>
- Jitha P. T., Sunil Kumar B., Raghunath, S. (2020), *Strength development and masonry properties of geopolymer stabilised soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes*. Construction and Building Materials. 250(118877). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118877>
- Laborel-Préneron, A., Faria, P., Aubert, J.-E., Magniont, C. (2021), *Assessment of Durability of Bio-based Earth Composites*. Recent Progress in Materials. 3(2). doi:10.21926/rpm.2102016
- Lan Guanqi, L., Yihong Wan, Y., Xin, L., Liu, Y. (2020), *Shear test method analysis of earth block masonry mortar joints*. Construction and Building Materials. 264 (119997). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119997>
- Li Piani, T., Weerheijm, j., Peroni, M., Koene, L., Krabbenborg D., Solomos, G., Sluys, L. J. (2020), *Dynamic behaviour of adobe bricks in compression: The role of fibres and water content at various loading rates*, Construction and Building Materials. 230(117038). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117038>



- Martínez, W., Alonso, E. M., Rubio, J. C., Bedolla, J. A., Velasco, F. A., Torres, A. A. (2008), *Comportamiento Mecánico de Morteros de Cal Apagada Artesanalmente, Adicionados con Mucílago de Cactácea y Ceniza Volcánica, para su uso en Restauración y Conservación de Monumentos Coloniales*. Revista de la Construcción. 7(2): 93-101.
- Martínez, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez, H. L., Lara, C., Bedolla, A., Ruvalcaba, J. L. (2018), *Colorimetry of clays modified with mineral and organic additives*. Revista ALCONPAT. 8(2):163-177. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>
- Mauricio, A. C., Grieseler, R., Heller, A. R., Kelley, A. R., Rumiche, F., Sandweiss, D. H., Viveen, W. (2021), *The earliest adobe monumental architecture in the Americas*. PNAS, 118(48). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2102941118>
- Miranda Leal O. S. (2017), “*Envolvente de falla en arcilla de Santiago Undameo, con diferentes estabilizadores; realizados en la máquina triaxial Soiltest t-500*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Mirjalili, A., Eslami, A., Morshed, R. (2020), *Experimental investigation into the effect of vertical loading on in-plane cyclic behavior of adobe walls*. Construction and Building Materials. 264(120706). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120706>
- Moraes, J. C., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., . . . Tashima, M. M. (2015), *Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars*. Construction and Building Materials. 94: 670-677. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G., & Jagadish, K. S. (2014), *Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks*. International Journal of Sustainable Built Environment. 3(1): 54-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.03.001>
- Navarro Mendoza, E. G., Sánchez Calvillo, A., Alonso Guzmán, E. M. (2019), “*Estabilización de suelos arcillosos con cal para firmes y blocks*”. En C. Neves, Z. Salcedo Gutiérrez, O. Borges Faria (Eds.), 19° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, FUNDASAL / PROTERRA). San Salvador: El Salvador, pp. 284-291.
- Ojeda Farías, O. F., Baltazar Zamora, M. Á., Mendoza Rangel, J. M. (2018), *Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material*. Revista ALCONPAT. 8(2): 194-208. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>
- Olacia, E., Pisello, A. L., Chiodo, V., Maisano, S., Frazzica, A., Cabeza, L. F. (2020), *Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization*. Construction and Building Materials. 239(117669). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>
- Parisi, F., Balestrieri, C., Varum, H. (2019), *Nonlinear finite element model for traditional adobe masonry*. Construction and Building Materials. 223: 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.001>
- Pérez Nora, A., Bucio, L., Lima, E., Soto, E., Cedillo, C. (2016), *Identification of allophane and other semi-crystalline and amorphous phases on pre-Hispanic Mexican adobe earth bricks from Cholula, Mexico*. Microchemical Journal. 126(349-358). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.12.033>
- Rodríguez-Mariscal, J. D., Solís, M., Cifuentes, H. (2018), *Methodological issues for the mechanical characterization of unfired earth bricks*. Construction and Building Materials. 175: 804-814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.118>
- Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P. F. de J., Julián-Caballero, F., Gómez-Yañez, C. (2012), *Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con*

- adición de mucílago de nopal como aditivo natural. *Materiales de Construcción*. 62(307): 327–341. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2012.00211>
- Reginaldo-Sérgio, P., Fabiano-Emmert, E., Pereira-Miguel A. G. (2018), *Soil Stabilization with Lime for the Construction of Forest Roads*. *Floresta e Ambiente*. 25(2). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.007715>
- Sanchez-Calvillo, A., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Navarrete-Seras, M. A., Ruvalcaba-Sil, J. L., Navarro-Ezquerria, A., Mitrani, A. (2021), *Characterization of adobe blocks: Point-load assessment as a complementary study of damaged buildings and samples*. *Heritage*. 4(2): 864-888. doi: <https://doi.org/10.3390/heritage4020047>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (2007), *M-MMP-1-07/07. Límites de Consistencia*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (2006), *M-MMP-1-09/06. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Compactación AASHTO*.
- Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015), *Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement*. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 4(2): 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.07.002>
- Skempton, A. W. (1953). “*The colloidal activity of clays*” en: *Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering*. ICOSOMEF, Zurich: Switzerland, pp. 57-61.
- Taallah, B., Guettala, A. (2016), *The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers*. *Construction and Building Materials*. 104(1): 52-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>
- Vasic M.V., Pezo, L. L., Radojevic, Z. (2020), *Optimization of adobe clay bricks based on the raw material properties (mathematical analysis)*. *Construction and Building Materials*. 244(118342). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118342>
- Wang, C., Li, S., He, X., Chen, Q., Zhang, H., & Liu, X. (2021), *Improved prediction of water retention characteristic based on soil gradation and clay fraction*. *Geoderma*. 404(115293). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115293>
- Wu, B., Li, L., Xu, L., Li, X. (2022), *Modelling sheet erosion on steep slopes of clay loess soil using a rainfall simulator*. *Biosystems Engineering*. 216:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.017>
- Yetgin, Ş., Çavdar, Ö., Çavdar, A. (2008), *The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes*. *Construction and Building Materials*. 22(3): 222-227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022>



## Estudo da ação de agentes de degradação de fachadas associados à temperatura e a chuva dirigida em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras

A. L. Ramos<sup>1\*</sup> , E. Bauer<sup>2</sup> 

\* Autor de Contato: [analin.ramos@gmail.com](mailto:analin.ramos@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.560>

Recepção: 10/01/2022 | Aceitação: 01/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

Logo, objetiva-se investigar as condições de exposição a agentes de degradação em edifícios localizados em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Estudar a ação do intemperismo é essencial para compreender a degradação das fachadas. Selecionou-se oito cidades representativas de cada Zona: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos e Belém. Definiu-se um edifício modelo para simulação higrotérmica para avaliação da radiação total, amplitude térmica, choque térmico, índice de intensidade da temperatura e chuva dirigida. Como resultado, são identificadas as zonas de condições críticas, que são classificadas em função de sua gravidade. Para temperatura e chuva dirigida, as cidades mais expostas são Goiânia-GO e Belém-PA, respectivamente. As de exposição mais amenas são Belém-PA para agente de temperatura e Niterói-RJ para chuva dirigida.

**Palavras-chave:** degradação; fachadas; revestimento cerâmico; zonas bioclimáticas; temperatura.

**Citar como:** Ramos, A. L., Bauer, E. (2022), "*Estudo da ação de agentes de degradação de fachadas associados à temperatura e a chuva dirigida em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 248 – 262, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.560>

<sup>1</sup> Aluna de mestrado PECC, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

<sup>2</sup> Professor Doutor do PECC, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

este trabalho, Ana Lin Ramos contribuiu com a atividade de estruturação e redação do texto (100%), análise e discussão dos resultados (100%). Elton Bauer contribuiu com a atividade coleta de dados (100%), supervisão (100%) e correção do texto (100%).

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## Study of the facade degradation agents associated with temperature and driving rain in different Brazilian bioclimatic zones

### ABSTRACT

Therefore, the aim is to study the conditions of exposure to these degradation agents in buildings located in different Brazilian bioclimatic zones. Knowing the action of weathering is essential to understand the facades degradation. For this purpose, eight cities were selected: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos and Belém. A model building was defined for hygrothermal simulation to assess total radiation, temperature range, thermal shock, intensity index temperature and driving rain. As a result, zones of critical conditions are identified, providing exposure rankings. For temperature agents and directed rain, the most exposed cities are Goiânia-GO and Belém-PA, respectively. Finally, the mildest exposure zones are Belém-PA for temperature agent and Niterói-RJ for driving rain.

**Keywords:** degradation; facades; ceramic coating; bioclimatic zones; temperature.

## Estudio de la acción de los agentes de degradación de fachadas asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas

### RESUMEN

El objetivo es estudiar las condiciones de exposición a estos agentes degradantes en edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. Conocer la acción de la meteorización es fundamental para comprender la degradación de las fachadas. Para ello, se seleccionaron ocho ciudades: Curitiba, Santa María, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos y Belém. Se definió un modelo de construcción de simulación higrótérmica para evaluar radiación total, amplitud térmica, choque térmico, índice de intensidad de temperatura y lluvia dirigida. Como resultado, se identifican zonas de condiciones críticas, proporcionando clasificaciones de exposición. Para agentes de temperatura y lluvia dirigida, las zonas más expuestas son Goiânia y Belém. Las zonas de exposición más suaves son Belém para agente de temperatura y Niterói para lluvia dirigida.

**Palabras clave:** degradación; fachadas; revestimiento cerámico; zonas bioclimáticas; temperatura.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

A fachada é elemento construtivo de proteção da edificação ao ambiente externo tendo como consequência a sua maior exposição á fatores como radiação solar, chuva dirigida e temperatura. Tal exposição possibilita um processo de degradação complexo que envolve agentes de diferentes naturezas, que podem atuar em sinergia, afetando o desempenho e vida útil dos componentes e materiais por meio de diferentes mecanismos de degradação (Bauer et al., 2021).

O uso de revestimentos cerâmicos em fachadas é comum e está associado a um processo de degradação específico caracterizado principalmene pelo descolamento (Bauer et al, 2015; Pacheco e Vieira, 2017) além da fissuração, falta de adesão cerâmica-substrato e pela expansão de substratos devido à umidade ou variações térmicas (Bezerra et al., 2018). Nesse caso, as camadas que compões o sistema de revestimento apresentam propriedades distintas (coeficientes de dilatação térmica, módulo de elasticidade, condutividade térmica, etc) e a ação agentes associados à temperatura apresentam alta relevância (Gaspar e Brito, 2011).

A variação da temperatura superficial do revestimento pode causar alterações físicas no sistema de vedação de fachada (Silva, 2000). Esse mecanismo de degradação se dá a partir do efeito de dilatação e contração pelas variações e incrementos não homogêneos de temperatura, o que causa esforços de cisalhamento gerando uma tendência de separação na interface do sistema (Saraiva, 1998). Como resultado tem-se descolamentos e fissuras no revestimento cerâmico, o que pode ser intensificado pela fadiga causada pelos esforços termomecânicos derivados das variações de temperatura somados as restrições ás deformações (Barbosa, 2013).

A amplitude térmica ponderada representada pelo Índice de intensidade da temperatura (Iit), a radiação solar e choques térmicos são utilizados como valor representativo da amplitude térmica e indicativo de uma maior degradação. O IIT constitui uma análise da amplitude térmica obtendo-se uma medida ponderada em relação à frequência (Nascimento, 2016) e o choque térmico são eventos pontuais caracterizados por uma alta diferença de temperatura superficial em um curto intervalo de tempo (Zanoni, 2015).

Considera-se como agente de grande relevância a ação da chuva dirigida sob as fachadas (Nascimento et al., 2016). Esta se origina a partir da associação da chuva com o vento, e é uma das principais fontes de água nas fachadas dos edifícios. Sem a ação do vento a chuva cairia no sentido vertical e molharia de forma pouco significativa as paredes (Zanoni, 2015). Por causa da ação do vento, a chuva atinge principalmente as partes superior e lateral dos edifícios. Desse modo, apesar dos revestimentos cerâmicos sofrerem de forma menos significativa com a incidência das precipitações se comparado ao sistema em argamassa (Bauer et al., 2018), é importante considerá-la nas simulações higrotérmicas para se compreender o processo de degradação.

A degradação de sistemas de revestimentos cerâmicos é caracterizada principalmente pelo descolamento cerâmico, ainda que se considerem mudanças no processo de degradação para diferentes localizações geográficas dos edifícios (Souza, 2019). Por isso é necessário o estudo das condições de exposição ás ações de agentes climáticos de forma a compreender as diferentes condições que desencadeiam o processo de degradação em diferentes regiões.

O Brasil, como um país continental, apresenta variações climáticas ao longo de seu território. Por esta razão a ABNT NBR 15220-3 (2005) estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro, classificando 330 cidades a partir de seu clima em oito zonas bioclimáticas. Estas são definidas como regiões geográficas homogêneas quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano. As edificações e seus elementos localizados em zonas diferentes estão condicionados a diferentes condições de exposição aos agentes climáticos que ocasionam o processo de degradação.

O objetivo da investigação proposta é analisar a ação dos agentes de degradação associados à temperatura e a chuva dirigida nas fachadas de edifícios localizados em diferentes zonas

bioclimáticas brasileiras. Para tanto, a simulação higratérmica pelo software WUFI Pro 6.5, como ferramenta útil para finalidade de estudo da degradação (Bauer et al., 2018; Gonçalves et al., 2018) é utilizada na obtenção de dados relativos à radiação solar incidente, temperatura superficial e chuva dirigida das fachadas Norte de um edifício modelo submetido às diferentes condições climáticas de cada zona.

## 2. MÉTODOS

### 2.1 Detalhes do edifício modelo.

Determina-se um edifício modelo de 20 metros de altura com sistema de revestimento cerâmico de absorvência 63,5% (Dornelles, 2007) correspondente a cor vermelha escura, escolhida para ressaltar os efeitos da temperatura, devido a cores escuras apresentarem maior temperatura superficial quando exposta a radiação (Uchôa et al, 2016). Aplica-se este modelo a cidades localizadas nas oito zonas bioclimáticas brasileiras estabelecidas na ABNT NBR 15220-3 (2005). A Tabela 1 mostra as cidades escolhidas e a zona bioclimática correspondente.

Tabela1. Cidade, Estado e Zonas bioclimáticas.

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Curitiba-PR	Santa Maria-RS	Florianópolis-SC	Brasília-DF	Niterói-RJ	Goiânia-GO	Picos-PI	Belém-PA

### 2.2 Simulação

A simulação higratérmica no programa WUFI Pro 6.5 é usada para avaliar a ação dos agentes climáticos nas fachadas em cada cidade. O programa permite a entrada de dados, como: período de simulação, configuração, orientação e inclinação do sistema construtivo, coeficientes de chuvas incidentes e de transferência à superfície e condições iniciais de temperatura e umidade relativa e condições climáticas interiores e exteriores (Freitas, 2011). A partir disso, são obtidos como dados horários de saída os valores de radiação total incidentes nas fachadas, de temperatura superficial e de precipitação.

O período de simulação compreende ano de 01/01/2019 a 01/01/2020. Já para a definição das condições climáticas exteriores são utilizados os dados arquivos Typical Meteorological Year (TMY) da base EPW/ANTAC (Roriz, 2012) referente a cada cidade. A tabela 2 contém os valores adotados dos coeficientes de transferência à superfície.

Tabela 2. Coeficientes de transferência à superfície externa adotados na simulação.

Coeficiente	Unidade	Valor
Resistência Térmica (lado esquerdo)	m <sup>2</sup> K/W	0,058
Absorção (Radiação de onda curta)	-	0,635
Refletividade do solo	-	0,2
Fator de redução de chuva incidente	-	0,7

No estudo, opta-se por analisar apenas a orientação Norte de cada edifício, uma vez que esta se apresenta como crítica para incidência de radiação solar nas cidades estudadas, situadas abaixo da linha do equador. O sistema construtivo simulado é composto por: revestimento cerâmico,

argamassa de emboço de composição cimentícia, bloco cerâmico e argamassa interna e o ponto de monitoramento principal na superfície do revestimento. A Figura 1 mostra o sistema lançado no programa.

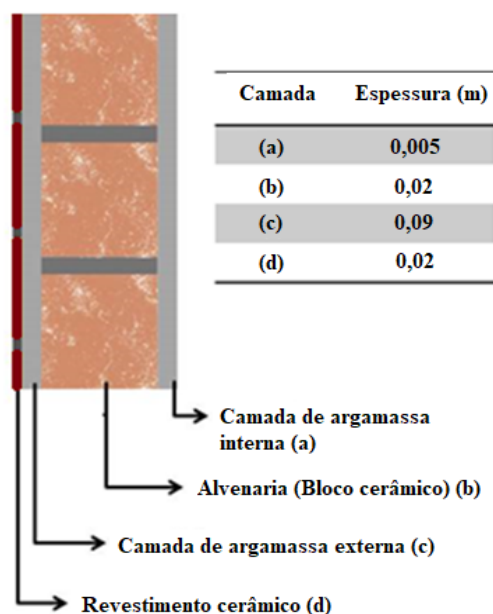


Figura 1. Sistema construtivo avaliado: (a) placa cerâmica; (b) argamassa externa/emboço; (c) bloco cerâmico; (d) argamassa externa.

As propriedades dos materiais componentes das camadas do sistema estudado são previamente de ensaios, realizados por outros pesquisadores. Tais ensaios são: massa específica aparente, porosidade, permeabilidade ao vapor de água para o cálculo do Fator de resistência à difusão de vapor de água; coeficiente de absorção de água ou coeficiente de capilaridade; curva higroscópica. Esse ensaios e seus resultados são descritos no Relatório Interno do LEM-UnB (Bauer et al., 2015), os quais estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo das propriedades dos materiais.

Propriedades	Bloco Cerâmico	Placa Cerâmica	Argamassa de emboço
Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	578	1730	1830
Porosidade (-)	0,486	0,29	0,2604
Permeabilidade ao vapor de água (kg/(m.s.Pa))	$8,38 \cdot 10^{-12}$	$1,66 \cdot 10^{-12}$	$7,9 \cdot 10^{-12}$
Coeficiente de absorção de água (kg/m <sup>2</sup> .√s)	0,09	0,001	0,089

## 2.3 Ação dos agentes associados à temperatura.

### 2.3.1 Radiação total, temperatura superficial máxima e mínima e amplitude térmica máxima.

A partir dos dados de temperaturas superficiais são determinadas as temperaturas máximas e mínimas assim como as amplitudes térmicas diárias ao longo do período de simulação, calculadas como mostrado em (1). Com os dados de radiação solar determinou-se a radiação solar acumulada na fachada ao longo do período de simulação, somando os valores diários observados em cada fachada.

$$\Delta T = t_{m\acute{a}x} - t_{m\acute{i}n} \quad (1)$$

Onde  $\Delta T$  é a amplitude térmica,  $t_{m\acute{a}x}$  é a temperatura máxima diária da superfície da fachada e  $t_{m\acute{i}n}$  é a temperatura mínima diária da superfície da fachada.

### 2.3.2 Choque térmico

Como parte do estudo dos efeitos associados à temperatura, é analisado o choque térmico (Zanoni, 2015). Para tanto, determina-se a frequência de ocorrência dos eventos denominados como choque térmico pleno e choque térmico atenuado para um ano de simulação em todas as fachadas. O primeiro configura-se quando há um diferença de temperatura superficial superior a 8 °C no intervalo de 1 hora, já o segundo quando a mesma diferença de temperatura é verificada em um intervalo de 2 h. A equações para choque térmico pleno e choque térmico atenuado são mostrados em (2) e (3), respectivamente.

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-1} \quad (2)$$

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-2} \quad (3)$$

Os resultados são apresentados em gráficos de frequência de ocorrência anual, tal frequência é dada em valores percentuais e calculada a partir da relação entre o número total ocorrência de choques térmicos e o número de horas em um ano.

### 2.3.3 Amplitude Térmica Ponderada

Na intenção de analisar os efeitos associados á temperatura, calcula-se para todas as fachadas a amplitude térmica ponderada expressa IIT, o qual leva em consideração os efeitos dos ciclos e valores alcançados de temperatura superficial nos sistemas (Nascimento, 2016). O IIT é estabelecido com base nas variações de temperaturas e suas frequências de ocorrência em um determinado intervalo pré-estabelecido. Para tanto, a faixa de variação de amplitude térmica é dividida em quatro intervalos iguais, os quais são representados por valores de amplitude média. O IIT é calculado como uma média ponderada a partir dos valores de frequências verificados para o clima de Brasília em um intervalo de tempo. Para apresentação dos resultados, o IIT foi calculado para um intervalo de 1 ano.

A Tabela 4 mostra os quatro intervalos iguais nos quais são distribuídas as faixas de variação da amplitude térmica (Nascimento, 2016), as quais consideram intervalos inferiores a 11,5°C (faixa 1) até intervalos superiores a 27,7°C (faixa 4). Por fim, o Iit é calculado como é mostrado em (4).

Tabela 4. Faixas de intervalo de amplitude térmica consideradas para o cálculo de Iit.

Faixa	$\Delta T(^{\circ}C)$	$\Delta T$ médio ( $^{\circ}C$ )
4	>27.7	31.8
3	19.7 a 27.7	23.7
2	11.5 a 19.6	15.6
1	< 11.5	7.5



$$I_{it} = \sum \frac{\Delta T_{\text{médio}} \times f_n}{f_{\text{total}}} \quad (4)$$

Onde  $I_{it}$  é o índice de intensidade da temperatura (°C),  $\Delta T_{\text{médio}}$  é a amplitude de temperatura média da faixa de ocorrência (°C),  $f_n$  é a frequência de ocorrência da faixa “n” de  $\Delta T$  e  $f_{\text{total}}$  é a frequência de todas às ocorrências das quatro faixas de estudo no ano, ou seja,  $f_{\text{total}} = 365$ .

### 2.3.4 Chuva Dirigida

O estudo de Chuva dirigida é realizado pelo método de quantificação do WUFI, no qual são obtidos os dados horários com um total de 8760 horas para precipitação, velocidade e direção do vento de modo a alimentar as simulações computacionais (Zanoni, 2015). A partir disso a intensidade de chuva dirigida é calculada em (5).

$$R_{wdr} = R_2 \cdot R_h \cdot V \cdot \cos(D - \theta) \quad (5)$$

Onde  $R_{wdr}$  é a Intensidade de chuva dirigida (mm/h);  $R_h$  é a Precipitação em superfície horizontal (mm);  $R_2$  é o Coeficiente dependente da localização na fachada (s/m);  $V$  é a Média horária da velocidade do vento a 10m de altura (m/s);  $D$  é a Direção do vento (ângulo a partir do Norte);  $\theta$  Orientação da fachada: ângulo entre o Norte e a direção normal à parede.

O valor de  $R_2$ , na metodologia de quantificação do WUFI, depende da altura do edifício e da localização da área de estudo da fachada como mostrado na Tabela 5. Nesse caso, o valor adotado é 0,2 correspondente a edifícios altos, parte superior maior que 20 metros. Como dados de saída da simulação são obtidos os valores de precipitação incidente nas fachadas e o valor acumulado anual em l/m<sup>2</sup> de chuva dirigida é calculado.

Tabela 5. Valores tabelados de  $R_2$  na metodologia de quantificação do WUFI.

Altura	R2
Edifício pequeno, altura até 10 metros	0,07
Edifício alto, parte baixa até 10 metros	0,05
Edifício alto, parte média 10 a 20 metros	0,1
Edifício alto, parte alta maior que 20 metros	0,2

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Radiação total, temperatura superficial máxima e amplitude térmica máxima.

Os resultados de radiação total incidente e das amplitudes térmicas superficiais máximas absolutas, calculadas como mostrado em (1), das fachadas Norte das oito zonas são mostrados na Figura 2. Nota-se que os maiores valores de amplitude térmica ocorrem para a zona Z6 (38,15°C) seguido da zona Z2 (37,5°C) e Z1 (37,15°C), já o menor valor é verificado na Z8 (22,64°C) e as demais zonas apresentam valores intermediários. Quanto à incidência de radiação solar, a Z4 apresenta maior valor (1.014.409 W/m<sup>2</sup>) seguida da Z6 (995.347 W/m<sup>2</sup>), enquanto isso Z8 apresenta o menor valor de incidência de radiação (743.527 W/m<sup>2</sup>). Ademais, observa-se que a incidência de radiação solar está associada ao ganho de temperatura em cada fachada principalmente no que se nota nas zonas Z8 e Z6, com exceção a zona Z4 a qual apresentou maior incidência de radiação e a terceira

menor amplitude térmica.

Em relação à radiação total, as zonas Z4 e Z6 são críticas e a Z8 apresenta condições de exposição mais amenas, apesar de ser representada pela cidade de Belém-Pa localizada próximo à linha do equador. Esse resultado é encontrado devido à radiação solar incidente na fachada ser apenas uma parcela da radiação solar global horizontal (constituída pelas componentes direta, difusa e refletida) (Silva, 2011) dependente, portanto, da orientação e inclinação da fachada.

A temperatura superficial e a amplitude térmica na superfície, por serem resultados da interação entre a radiação solar e a elevação da temperatura do ar ao longo do dia, são melhores indicadores das variações higrótérmicas do que o total da irradiação solar incidente (Zanoni, 2015). Nesse caso, Z6 e Z7 são zonas críticas, por apresentarem maior amplitude térmica (Figura 2) e maior temperatura superficial (Figura 3) ao longo do ano, respectivamente.

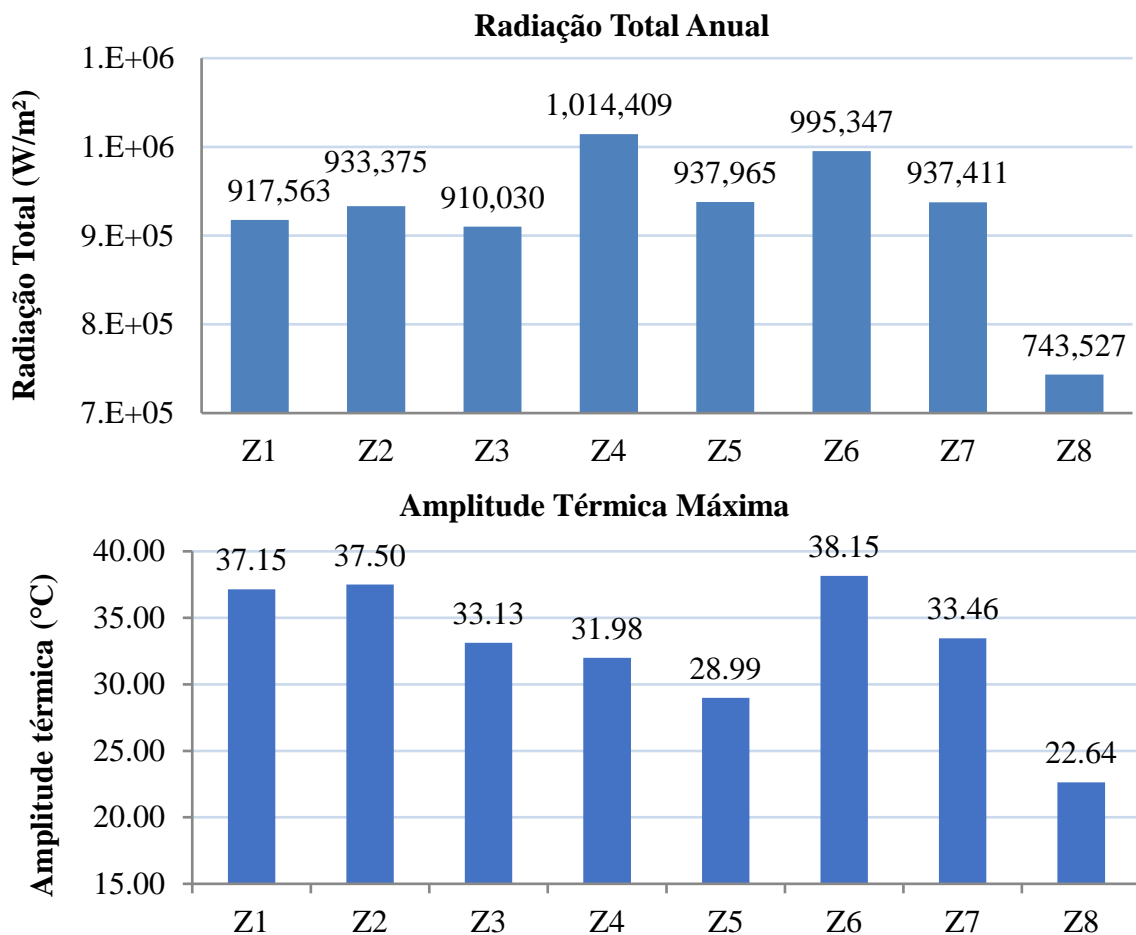


Figura 2. Radiação total acumulada e Amplitude térmica máxima em um ano de simulação.

Os resultados de temperatura máxima e mínima absoluta anual para cada uma das fachadas são mostradas na Figura 3. Nota-se que as temperaturas mínimas, as quais ocorrem quando não há incidência de radiação sobre a fachada, apresentam grandes distinções entre si. Z2, Z1 e Z3 apresentam os menores valores de temperatura 2,99°C, 5,48°C e 6,98°C, respectivamente. Enquanto isso, Z8 apesar de ter menor incidência de radiação total na fachada apresenta temperatura mínima mais elevada (22,07°C) e menor valor de temperatura máxima (46,16 °C) o que condiz com amplitudes térmicas reduzidas, como mostrado na Figura 2. Nesse caso, enfatiza-se que a temperatura superficial está ligada não apenas a incidência de radiação na fachada, mas também à temperatura do ar (ASHRAE, 2009; Lamberts et al., 2011).

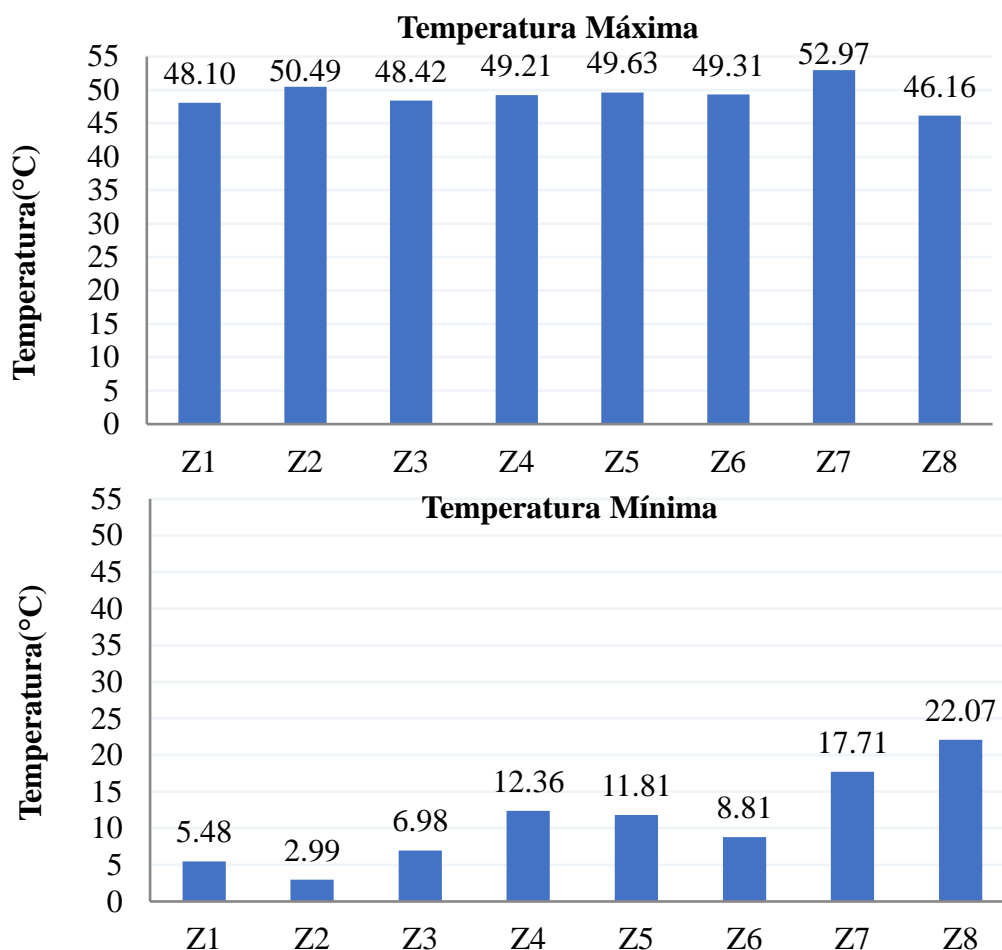


Figura 3. Temperatura superficial máxima e mínima absolutas em um ano de simulação para cada zona bioclimática.

### 3.2 Choque térmico.

Com relação aos resultados de choque térmicos, são apresentadas na Figura 4 as frequências de ocorrência de choques plenos para todas as fachadas. Ressalta-se a maior frequência na zona Z6, na qual 1,59% das medidas se caracterizam como choques térmicos plenos, seguido de Z1 (0,92%) e Z4 (0,79%). As zonas Z5 e Z7 apresentaram as menores frequências 0,16% e 0,19%, respectivamente.

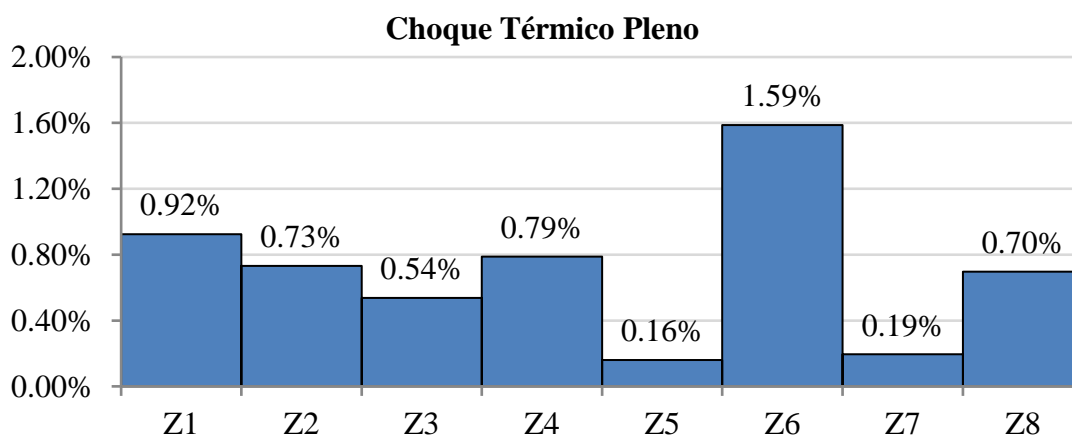


Figura 4. Frequência de ocorrência de choque térmico pleno para um ano de simulação.

Os picos de choques plenos estão concentrados nos meses de maio a julho segundo a Tabela 6, que expõe a distribuição mensal do número de choques. Ao longo de um ano, é possível verificar em qual mês ocorre o maior número de choques térmicos para cada zona isolada. Dessa forma, Z1 e Z5 têm seus respectivos picos de choques térmicos plenos em julho, Z3, Z4, Z6 e Z7 em junho e Z2 e Z8 em maio. Nas zonas de 1 a 7 os choques térmicos diminuem nos meses de outubro a março chegando à zero em um ou mais meses desse período. No entanto, isso não ocorre na Z8 que apresenta os eventos de choques térmicos melhor distribuídos ao longo do ano.

Tabela 6. Número de eventos de choque térmico pleno mensal ao longo de um ano de simulação.

Choque Térmico Pleno													
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	soma
<b>Z1</b>	1	1	1	9	14	18	<b>25</b>	9	1	1	0	1	81
<b>Z2</b>	0	1	0	4	<b>21</b>	10	7	12	7	0	0	2	64
<b>Z3</b>	1	0	0	1	6	<b>25</b>	14	0	0	0	0	0	47
<b>Z4</b>	1	1	0	4	17	<b>23</b>	19	0	0	1	0	3	69
<b>Z5</b>	0	0	0	0	1	5	<b>6</b>	1	1	0	0	0	14
<b>Z6</b>	4	1	3	10	13	<b>53</b>	38	12	0	0	1	4	139
<b>Z7</b>	0	1	3	3	2	<b>6</b>	2	0	0	0	0	0	17
<b>Z8</b>	5	5	6	7	<b>10</b>	5	2	3	1	4	5	8	61

A frequência de ocorrência de choques atenuados é mostrada na Figura 5. A Z6 apresenta maior ocorrência com 13,65%, seguida da Z4 com 10,88%. Z8, Z5 e Z2 apresentam as menores frequências sendo estas 2,84%, 3,35% e 4,95%, respectivamente. Nota-se que na Z6 ocorrem aproximadamente 5 vezes mais choques atenuados em comparação a Z8. Z4 e Z1 também apresentam valores elevados de frequência (10,88% e 10,31%, respectivamente) seguidos de Z3 e Z7 (8,75% e 8,60%).

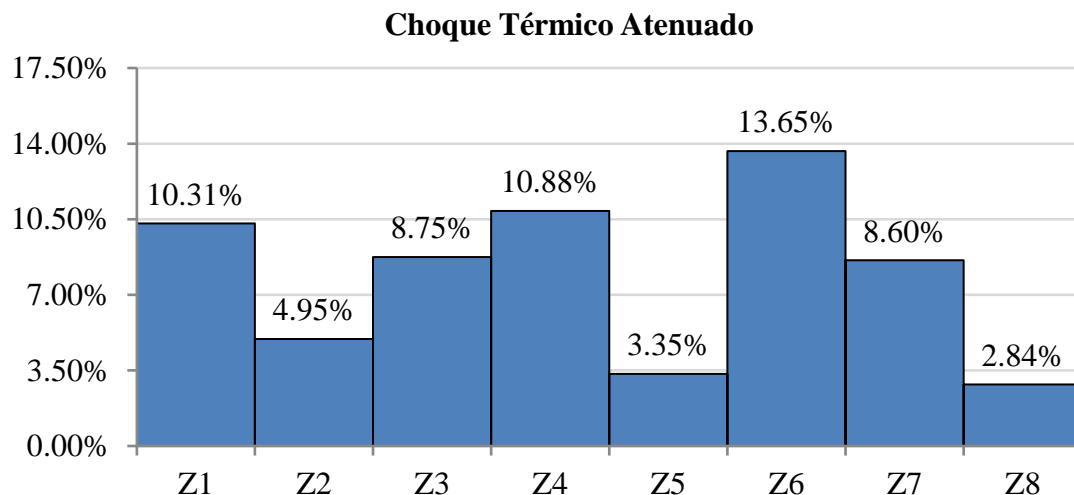


Figura 5. Frequência de ocorrência de choque térmico atenuado para um ano de simulação.

Quando a distribuição desses eventos no ano nota-se que eles ocorrem nos meses de maio a agosto, como mostra a Tabela 6. Apenas Z5 apresenta meses sem a ocorrência de choques térmicos (novembro e dezembro). Z2 e Z8 tiveram seu pico de ocorrência no mês de maio, Z4 e Z6 em junho, Z1, Z5 e Z7 em julho e Z3 em agosto. Evidencia-se uma melhor distribuição de ocorrências ao longo do ano em Z8, onde esta varia de 12 em setembro a 32 em maio, já em outras zonas há uma variação mais elevada entre os meses de menor e maior ocorrência como na Z6 que apresenta menor ocorrência em novembro com 14 eventos e maior em junho com 211.

Tabela 7. Número de eventos de choque térmico atenuado mensal ao longo de um ano de simulação.

Choque térmico Atenuado													
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	soma
<b>Z1</b>	13	24	64	112	146	103	<b>190</b>	114	78	46	4	9	903
<b>Z2</b>	6	14	39	65	<b>85</b>	38	50	62	44	27	1	3	434
<b>Z3</b>	6	25	72	106	127	115	76	<b>128</b>	73	28	5	5	766
<b>Z4</b>	6	18	52	120	148	<b>182</b>	177	143	71	16	10	10	953
<b>Z5</b>	2	1	5	32	46	56	<b>82</b>	44	22	3	0	0	293
<b>Z6</b>	27	33	76	121	175	<b>211</b>	207	170	84	56	14	22	1196
<b>Z7</b>	10	11	32	80	155	145	<b>157</b>	114	40	3	2	4	753
<b>Z8</b>	18	15	22	29	<b>32</b>	20	29	19	12	18	14	21	249

As zonas com maior frequência de choque térmico apresentam condições de exposição críticas e aquelas que apresentam menores frequências condições mais amenas. Destaca-se a Zona Z6 que apresentou maior frequência tanto para choques térmicos plenos quanto para atenuados. Por fim, a zona Z5 apresentou frequências reduzidas nos dois tipos de choques considerados e a Z8 menor frequência para choques atenuados.

### 3.3 Amplitude Térmica Ponderada.

A Figura 6 mostra os resultados de IIT para todas as fachadas correspondentes a cada zona bioclimática. Os resultados levam em consideração valores de variação de temperatura para um ano de simulação. Assim como notado nos resultados de amplitude térmica máxima e choque térmico, a zona Z6 apresentou valores críticos (22,55) quanto à ação de agentes de temperatura. Da mesma forma, a zona Z8 e Z5 apresentaram os menores valores de IIT (16,53 e 16,55). Z2, Z4 e Z7 apresentaram valores também elevados se comparados aos demais e Z3 e Z1 apresentaram valores intermediários.

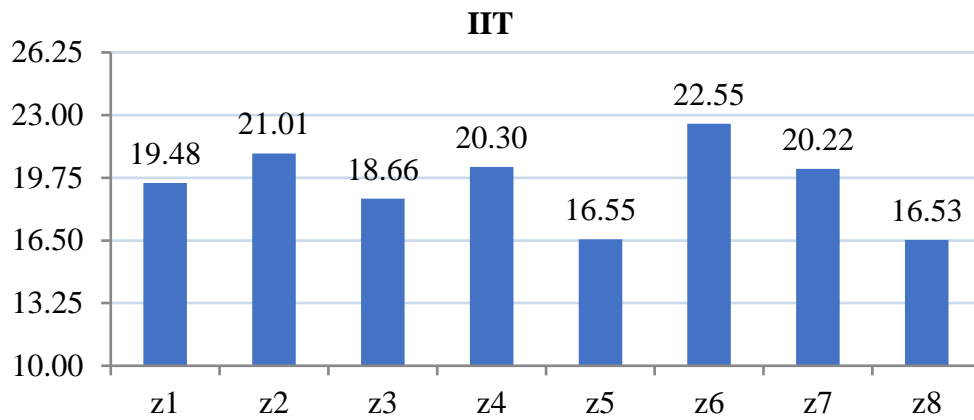


Figura 6. Valores de Iit para todas as zonas bioclimáticas.

As variações térmicas nas fachadas são causas de deformações no sistema de revestimento e induzem esforços por fadiga em consequência de sua característica cíclica. Desse modo, as variações térmicas estão relacionadas com as anomalias nos revestimentos de fachadas, principalmente no que se refere ao descolamento cerâmico e fissuração (Silva, 2014; Souza, 2016). O IIT é mostrado como um valor referência em nível de comparação entre as cidades, e que demonstra a gravidade de exposição ao agente térmico de degradação. Logo, valores mais elevados representam maior exposição e maior potencial para a degradação e diminuição da vida útil. Os valores de IIT foram considerados adequados quando relacionados à degradação de fachadas (Nascimento, 2016) e, a partir deles, foi estabelecido um Ranking relativo à exposição das fachadas à temperatura, classificadas de acordo com a sua gravidade. Logo, em ordem decrescente, as zonas de maior gravidade foram: Z6-Z2-Z4-Z7-Z1-Z3-Z5-Z8.

### 3.4 Chuva dirigida.

A chuva dirigida foi analisada em termos de incidência precipitação total anual ( $l/m^2$ ), Figura 7, para as mesmas fachadas de orientação Norte, de forma completar a análise dos agentes de degradação realizada. Nota-se que a zona Z8 é crítica para esse caso ( $113,15 l/m^2$ ) apresentando valor cerca de 6 vezes mais elevado que a zona Z5 de menor incidência ( $18,21 l/m^2$ ), contrastando com os resultados anteriores. As zonas Z4 ( $100,12 l/m^2$ ) e Z3 ( $71,72 l/m^2$ ) também apresentam valores elevados em comparação às demais. Por fim, Z1 ( $52,19 l/m^2$ ) e Z6 ( $59,67 l/m^2$ ) apresentam valores intermediários enquanto Z2 ( $35,57 l/m^2$ ) e Z7 ( $30,57 l/m^2$ ) valores mais amenos de incidência de chuva.

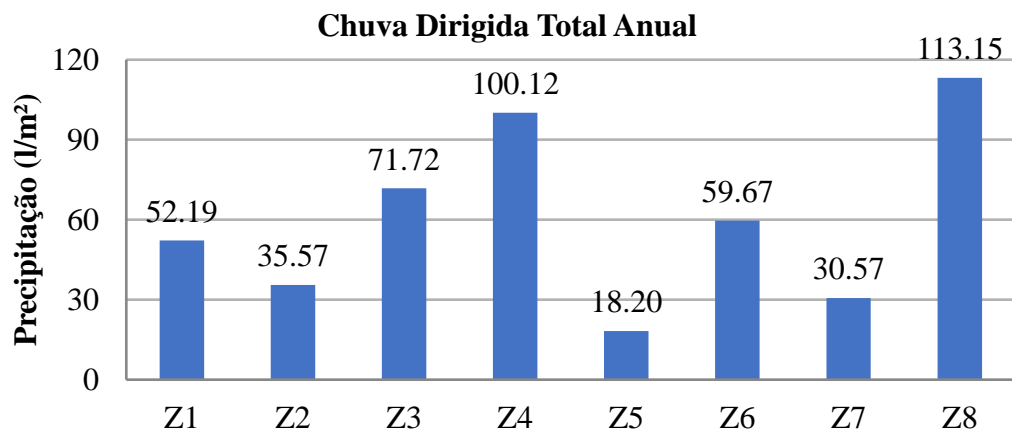


Figura 7. Valores de chuva dirigida acumulada para um não de simulação em todas as zonas bioclimática



Ressalta-se que a chuva dirigida é resultando da ação dos ventos sob a precipitação (Freitas, 2011; Zanoni, 2015), logo, está condicionada a velocidade e direção dos ventos. Para a cidade Brasília e Goiânia a orientação de maior incidência de chuva é a Norte (Zanoni et al., 2014; Zanoni et al., 2018; Andrade et al., 2021; Melo e Carasek, 2011) enquanto para Curitiba é a orientação Leste (Batista et al., 2017) e para Florianópolis é a orientação Sul (Giango et al., 2010; Giango, 2007). Nesse caso, os resultados apresentados não representam necessariamente a orientação de exposição crítica a umidade proveniente da chuva, mas a orientação adotada como referência, a Norte.

#### 4. CONCLUSÃO

Propôs-se a investigar a ação dos agentes de degradação associados à temperatura e a chuva dirigida nas fachadas de edifícios localizados em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Nesse contexto, é possível identificar zonas que apresentam condições críticas de exposição aos agentes de degradação como forma de contribuir para o conhecimento das diferentes condições que desencadeiam o processo de degradação no Brasil. Dessa forma, foi possível levantar os seguintes comportamentos:

- A zona Z6, representada pela cidade de Goiânia-GO, proporciona condições críticas de exposição em relação a amplitude térmica, choque térmico atenuado e pleno e índice de intensidade da temperatura;
- A zona Z8, representada pela cidade de Belém-PA, apesar de apresentar condição de exposição mais amena para os agentes associados a temperatura (radiação solar, amplitude térmica, choque térmico atenuado e Índice de intensidade da temperatura) se mostra crítica para exposição à chuva dirigida.
- As zonas Z1, Z2, Z3, Z5 e Z7, representados pelas cidades de Curitiba-PR, Santa Maria-RS, Florianópolis-SC, Niterói-RJ e Picos-PI, respectivamente, apresentaram valores de incidência de radiação total anual na fachada Norte semelhantes. No entanto Z1 e Z2 apresentam elevadas amplitudes térmicas se comparada às demais.
- Em relação à Chuva dirigida, as fachadas Norte das zonas Z8 e Z4 (Brasília-DF) apresentaram mais exposição considerando valores anuais de precipitação e a Zona Z5 apresentou a condição mais amena de exposição.
- Conclui-se que as fachadas Norte analisadas nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras possuem diferentes condições de exposição aos agentes associados à temperatura e à chuva dirigida. Estas afetam a durabilidade do edifício, uma vez que a sinergia dos agentes de degradação atuando nas fachadas acelera a degradação comprometendo o seu desempenho e afetando a sua vida útil. Além disso, como contribuição o estudo fornece um ranking relativo à gravidade da exposição à temperatura, portanto, com maior potencial para a degradação e diminuição da vida útil. Em ordem decrescente, as zonas mais expostas: Z6-Z2-Z4-Z7-Z1-Z3-Z5-Z8, ou pelas cidades Goiânia-Santa Maria-Brasília-Picos-Curitiba-Florianópolis-Niterói-Belém.

#### 5. AGRADECIMENTOS


Agradecemos ao PECC (Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil) da Universidade de Brasília, e ao DMMPROJECT (Degradação: Masurement and Modelling). Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Finanças 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e pela Pró-Reitoria Acadêmica de Pós-Graduação (DPG) da Universidade de Brasília (UnB).

## 6. REFERÊNCIAS

- Andrade, D., Kardec, T., Bauer, E.(2021). “*Sinergia dos agentes higrotérmicos na degradação de fachadas*”. In: XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das construções, 2021, Fortaleza.
- ASHRAE - American Society of Heating (2009), *Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Inc. Handbook 2009 -Fundamentals. Atlanta, artigo 2SPPC1017, pp. 199–212, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, A. S. (2013), “*Estudo Numérico-Computacional e Analítico do Choque Térmico em Fachadas de Edificações*”. Dissertação (Mestrado). Masters Thesis, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Batista, G., Rufato, R., Miranda, D., Giordano, D. Medeiros, M. (2017), “*Análise do índice de chuva dirigida em cidades do Paraná e sua importância no projeto de fachadas de edifícios*”. IN: Simpósio Paranaense de Patologia das construções, 2017.
- Bauer, E., Aidar, L. A. G., Piña, A. B. S. (2018), “*Estudo do transporte de água oriunda da chuva dirigida em fachadas – aplicação com o emprego da simulação higrotérmica*”. IN: Construção, 2018, Brasília, Livro de Atas.
- Bauer, E., Castro, E. K., Silva, M. N. B. (2015), “*Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília*”. *Cerâmica*, v. 62, p. 151-159. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581786>
- Bauer, E., Mota, L., Souza, J. (2021). “*Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil*”. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 23-43. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400557>
- Bauer, E., Nascimento, M. L. M., Castro, E. K.(2015), “*Parâmetros e ensaios físicos de materiais e componentes da fachada. Relatório interno*” – Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) – UnB/ENC.
- Bezerra, L. M., Uchôa, J. C., Araújo, J. A., Bonilla, J. (2018), “*Experimental and Numerical Investigation of Fatigue in Base-Rendering Mortar Used in Façades Undergoing Thermal Cycles*”. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 30. n. 8. pp.1-14. [https://doi.org/ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002319](https://doi.org/ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002319)
- Dornelles, K. A., Roriz, M. (2007), “*A ilusão das cores na identificação da absorvância solar de superfícies opacas*”. In: IX ENCAC E VII ELACAC, 2007, Ouro Preto. Anais. Ouro Preto: ANTAC.
- Freitas, A. S. S. L. A. (2011), “*Avaliação do comportamento hidrotérmico de revestimentos exteriores de fachadas devido à acção da chuva incidente*”, Masters Thesis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 170 p.
- Gaspar, P., Brito, J. (2005), “*Mapping Defect Sensitivity in External Mortar Renders*”. *Journal of Construction and Building Materials*, v. 19(8), p. 571-578, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.014>
- Giongo, M. (2007), “*Análise do nível de exposição das edificações à chuva dirigida para Florianópolis*”. Masters Thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- Giango, M., Padaratz, I. J., Lamberts, R. (2011), “*Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC: índices de chuva dirigida e métodos semi-empíricos*”. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 1, p. 7-23. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000100002>
- Lamberts, R (2011). “*Desempenho térmico de edificações. Apostila da disciplina ECV 5161 do LABEEE-Laboratório de Eficiência Energética em Edificações*”. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

- Melo, C. M., Carasek, H. (2011), “Índices de chuva dirigida direcional e análise do nível de umedecimento em fachadas de edifício multipavimentos em Goiânia, GO”. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 3, p. 23-37. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000300003>
- Moscoso, Y. F. M. (2013), “Estudo numérico e experimental de tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica”. Masters Thesis, Universidade de Brasília, Brasília. p. 142.
- Nascimento, M. (2016), “Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios”, Masters Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.p. 127
- Nascimento, M. L. M., Bauer, E., de Souza, J. S. (2016), “Wind-driven rain incidence parameters obtained by hygrothermal simulation”. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* 1, 5. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0006-5>.
- Pacheco, C. P., Vieira, G. L. (2017), “Análise quantitativa e qualitativa da degradação das fachadas com revestimento cerâmico”. *Cerâmica*, v. 63, p. 432-445. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682156>
- Roriz, M. (2012), “Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC”. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos – SP.
- Saraiva, A. G. (1998), “Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachada”. Masters Thesis. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 164 p.
- Silva, A., Dias, J. L., Gaspar, P. L., Brito, J. (2011), “Service life prediction models for exterior stone cladding”. *Building Research and Information*, 39(6): 637-653, 2011. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.617095>
- Silva, M. N. B. (2000), “Avaliação Numérica com o Método dos Elementos Finitos das Tensões Termo-Mecânicas em Sistemas de Revestimento de Fachadas”. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 218 p.
- Souza, J. (2019), “Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios”, Doctoral thesis, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, p. 101.
- Uchôa, J. C. B., Bezerra, L. M., Brito, M. A. N., Júnior, A. C. M., Silva, W. T. M. (2016), “análise de tensões internas em sistemas de revestimentos Cerâmicos de fachadas no distrito federal devido a Carregamentos térmicos utilizando modelagem MEF 3D”. IN: XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Brasília, DF, Brazil, November 6-9.
- Zanoni, V. (2015), “Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília”. Doctorial Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. p. 253.
- Zanoni, V., Sánchez, J., Bauer, E. (2014), “Chuva dirigida: um estudo da iso 15927-3 no contexto brasileiro. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014, Maceió-AL.
- Zanoni, V., Sánchez, J., Bauer, E. (2018), “Avaliação de métodos para quantificação de chuva dirigida nas fachadas das edificações”. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 122-132, jun. 2018. ISSN 1980-6809. <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8650260>

## Avaliação não destrutiva das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração

A. Hernández Oroza<sup>1\*</sup> , E. Berreo Alayo<sup>1</sup>, R. Expósito Mendez<sup>1</sup>

\* Autor de Contato: [ahernandez@proyectos.ohc.cu](mailto:ahernandez@proyectos.ohc.cu)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

Recepção: 01/02/2022 | Aceitação: 08/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

O objetivo do estudo foi avaliar, por meio de classificação visual e ensaios não destrutivos, o estado de conservação de 32 vigas de madeira para reaproveitamento como projeto de restauração de um edifício histórico. Para isso, foram feitas medições do teor de umidade, penetrômetro, estimativa do módulo de elasticidade e tensão de ruptura por velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados mostraram que 66% das vigas foram afetadas por apodrecimento, desfibramento e fissuração. Os ensaios realizados nas vigas deterioradas permitiram determinar que, para uma fiabilidade de 95%, das restantes 21 vigas foi possível reaproveitar 17 delas com densidade média de 0,4 g/cm<sup>3</sup>.

**Palavras-chave:** restauração; vigas de madeira; deterioração; penetrômetro; ultrassom.

**Citar como:** Hernández Oroza, A., Berreo Alayo, E., Expósito Mendez, R. (2022), “Avaliação não destrutiva do estado de conservação das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 263 – 278, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

<sup>1</sup> Departamento de Diagnóstico y Levantamiento. Empresa Filial RESTAURA, Oficina del Historiador de La Habana, La Habana Vieja, Cuba.

#### Contribuição de cada autor

Este trabalho do autor A. H. Oroza contribuiu com o projeto da investigação (100%), a redação do texto (60%), a discussão dos resultados (100%) e a revisão (100%). O autor E. Berrio Alayo contribuiu com a redação do texto (40%) e o processamento dos dados obtidos (100%). O autor R. Expósito Mendez contribuiu com a atividade de registro de las mediciones (100%). Todos os autores contribuem de forma equitativa na execução das medições e no desenvolvimento da investigação.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## **Non-destructive evaluation of the wooden beams of the Narciso López building in the Historic Center of Havana for reuse in its restoration**

### **ABSTRACT**

The objective of the study was to evaluate, through visual classification and non-destructive tests, the state of conservation of 32 wooden beams for reuse as a restoration project for a historic building. For this, measurements of the moisture content, penetrometer, estimation of the modulus of elasticity and breaking stress by ultrasonic pulse velocity were made. The results showed that 66% of the beams were affected by rot, defibration and cracking. The tests carried out on the deteriorated beams made it possible to determine that, for a reliability of 95%, of the remaining 21 beams it was possible to reuse 17 of them with an average density of 0.4 g/cm<sup>3</sup>.

**Keywords:** restoration; wooden beams; decay; penetrometer; ultrasound.

## **Evaluación no destructiva de las vigas de madera del edificio Narciso López del Centro Histórico de La Habana para reuso en su restauración**

### **RESUMEN**

El estudio tuvo como objetivo evaluar, a través de clasificación visual y ensayos no destructivos, el estado de conservación de 32 vigas de madera para su reuso como proyecto de restauración de un edificio histórico. Para esto se realizaron mediciones del contenido de humedad, penetrómetro, estimación del módulo de elasticidad y tensión de rotura mediante velocidad del pulso ultrasónico. Los resultados mostraron que el 66% de las vigas presentaban afectación por pudrición, desfibramiento y fisuración. Los ensayos realizados a las vigas deterioradas permitieron determinar que, para una confiabilidad del 95%, de las restantes 21 vigas era posible reutilizar 17 de ellas con una densidad promedio de 0.4 g/cm<sup>3</sup>.

**Palabras clave:** restauración; vigas de madera; deterioro; penetrómetro; ultrasonido.

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.



## 1. INTRODUÇÃO

A utilização da madeira como material de construção tem suas origens nos primeiros povoadamentos humanos, com a formação de cabanas primitivas. Os benefícios de suas propriedades em termos de manuseio, durabilidade, dureza, resistência e cor levaram ao seu uso ao longo da história da humanidade, tanto para a criação artística quanto construtiva. Em edificações onde a utilização deste material tem um desempenho estrutural, que influencia na segurança da obra e de seus operadores, é necessário realizar avaliações periódicas da integridade da madeira por meio de inspeções e testes (Szostak et al., 2020; Zielińska and Rucka, 2021). Fatores como a baixa disponibilidade global de madeira maciça, a diminuição do diâmetro dos troncos de espécies madeireiras que os tornam menos utilizáveis industrialmente, aliados à necessidade de preservar a memória histórica das edificações, levaram ao desenvolvimento de regulamentações, metodologias e técnicas de ensaio para avaliação da qualidade e estado de conservação deste material (Documento Básico SE-M, 2019; Manavella et al., 2019; Salazar et al., 2018; UNE 56544, 2011). Para tornar a intervenção em estruturas de madeira o menos invasiva possível, a aplicação de testes de velocidade de pulso ultrassônico (VPU), resistografia, extração de parafuso ou penetrômetro permitem obter resultados confiáveis de medições in situ. para determinar o estado de conservação de elementos estruturais de madeira. Sua aplicação permite estimar parâmetros como densidade, tensão de ruptura e módulo de elasticidade para reutilização ou substituição de acordo com os requisitos do projeto. Embora o uso dessas técnicas ofereça vantagens em termos de segurança de classificação com base em seus resultados, a avaliação visual da madeira, como critério de aceitação, continua sendo atualmente o método mais utilizado, fundamentalmente devido ao seu baixo custo em relação ao uso de equipamentos, e a facilidade que a madeira oferece para mostrar suas características e lesões em sua superfície.

As edificações do Centro Histórico de Havana construídas antes do século XX têm em comum o uso da madeira como elemento estrutural de sustentação de mezaninos e lajes, onde se combinam sistemas de vigas e pranchas, com vigas e lajes por prancha. Essas madeiras, na época em que foram serradas para exploração como elemento estrutural, não foram classificadas por suas características devido à falta de regulamentação a esse respeito, por isso critérios como a largura dos anéis de crescimento, rachaduras, sacos de resina, gemas, deformações e alterações biológicas não foram consideradas de forma padronizada. Nesse sentido, a regulamentação em vigor (DIN EN 338:2016-07, 2016; ISO 9709:2018, 2018; UNE 56544, 2011), eles estabelecem critérios de rejeição que levariam à substituição total ou parcial de elementos de madeira que, após mais de um século de uso, demonstraram sua durabilidade e capacidade de carga, por serem projetados para madeira nova.

No entanto, quando se trata de reaproveitar elementos estruturais de madeira para reabilitação e conservação do patrimônio, é importante o uso combinado de critérios visuais e analíticos, pois estes últimos podem fornecer melhores critérios de sucesso em relação à classificação visual, como foi comprovado por (Rello et al., 2007) onde obtiveram que através do VPU é possível atingir até 72% em relação aos 53% de sucesso na qualidade da madeira. Ao longo dos anos de exploração, os materiais de construção sofrem diferentes formas de deterioração que, no caso da madeira, começam fundamentalmente pela presença de humidade devido ao facto de ser um material higroscópico e poroso. Nesse sentido, vários pesquisadores (Bratasz et al., 2010; Sotomayor Castellanos, 2015) mostraram a influência do teor de água na conservação da madeira e suas propriedades. De acordo com (Arriaga et al., 2006), o módulo de elasticidade pode variar em 2% para faixas de umidade entre 5% e 30%.

Com base nas considerações anteriores e na necessidade de avaliar o possível reaproveitamento de vigas de madeira em edifícios históricos, este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da avaliação do estado de conservação das vigas de madeira do primeiro nível de apoio entre os



eixos. 6:A-C do edifício Narciso López (Figuras 1 e 2), localizado no Centro Histórico de Havana. Foi construído em 1858 e tem 4 pisos, dos quais o rés-do-chão e a mezzanine são em paredes de pedra, enquanto os pisos superiores são em alvenaria. Os mezaninos são suportados por vigas de madeira de pinus (*pinus sp.*). Os processos de restauro iniciados em 2019 exigiram um diagnóstico patológico, pela primeira vez desde a construção do imóvel, para determinar a sua possível utilização e assim preservar, na medida do possível, os elementos originais do edifício.



Figura 1. Edifício Narciso López.  
Fonte: Centro de Documentação Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

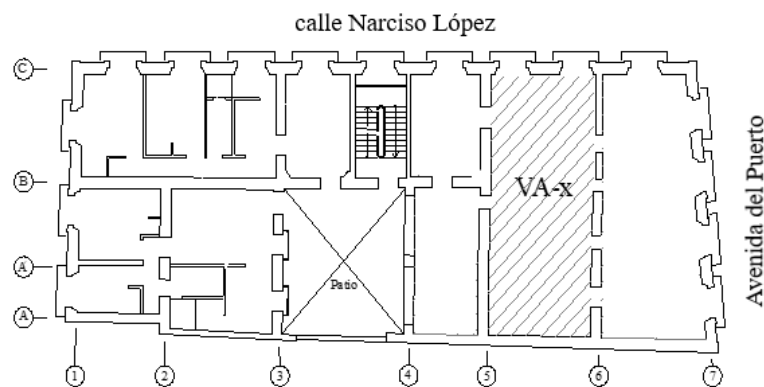


Figura 2. Vista em planta do primeiro nível do edifício.  
Sinalização da área de estudo. Elaboração própria

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

O estudo começou com a remoção do piso e o desmantelamento de todas as vigas. Isso permite uma inspeção detalhada em todos os lados (Figuras 3 e 4), principalmente na área dos cabeçotes, que, por estarem embutidos nas paredes, apresentam maior deterioração por apodrecimento devido ao acúmulo de umidade no interior das juntas (Figuras 5 e 6). Essa primeira etapa permite registrar a posição, comprimento, direção e sentido de cada fissura, fissura, podridão e/ou desfibramento presente nas vigas, para as quais a distância da lesão em relação à cabeça foi tomada como referência (Figura 7). Adicionalmente, foram identificadas as áreas de teste que apresentam as condições ideais para a realização das medições. Em áreas onde há fissuras ou deterioração devido a diferentes formas de podridão (marrom, mole, etc.) não é possível realizar medições porque não se consegue uma correta transmissão ou confinamento do sinal, do emissor ao receptor ou os resultados obtidos são alterados pela presença de filmes microbianos que afetam a composição físico-química da madeira, degradando sua estrutura e densidade. Por outro lado, as técnicas de impacto ou penetração têm o inconveniente de não serem aplicadas em superfícies irregulares que influenciem o momento de impacto da broca, seja pela sua deformação, alteração no ângulo de entrada ou falta de madeira. oferecem um valor de densidade representativo das propriedades reais do elemento estrutural. Para a preparação das áreas de teste, foram selecionados dois cortes para cada feixe, livres de lesões superficiais.

Posteriormente, cada viga foi identificada utilizando o código local (VA-x), onde x representa um número consecutivo, a partir de 1. O local possui um total de 32 vigas de madeira, que se apoiam nos eixos 5-6. Para a determinação das dimensões, foi utilizada uma fita métrica e registradas as medidas de largura, profundidade e comprimento (Tabela 1). As cabeças das vigas foram identificadas com as letras A e B (Figura 8).



Figura 3. Etapa de inspeção detalhada em viga montada em burros de madeira



Figura 4. Inspeção e classificação visual de vigas desmontadas



Figura 5. Estado das cabeças do feixe



Figura 6. Vigas desmontadas com diferentes manifestações patológicas





Figura 7. Fita métrica da seção do feixe afetada



Figura 8. Identificação de vigas de madeira

### 2.1 Ensaios não destrutivos aplicados

Os testes aplicados consistiram em estimar a densidade ( $\rho$ ), tensão de ruptura ( $f_k$ ) e módulo de elasticidade dinâmico (MED), combinando as técnicas de penetrômetro e VPU. Para ambos é necessário fazer ajustes em relação ao teor de umidade, para o qual toma-se como referência o valor de 12%. No caso do penetrômetro, para determinar a densidade a 12% de umidade, a equação de ajuste utilizada foi (Kuklík, 2007):

$$\rho_{12} = -0.027102 * t_{p,12} + 0.727987 \quad (1)$$

$$t_{p,12} = t_p(1 - 0.007\Delta w) \quad (2)$$

$$\Delta w = w - 12 \quad (3)$$

Onde:

$\rho_{12}$ = densidade da madeira a 12% de umidade;  $g/cm^3$

$t_{p,12}$ = profundidade de penetração na madeira com 12% de umidade; mm

$t_p$ = profundidade de penetração na madeira testada; mm

$w$ = umidade da madeira no momento da medição; %

Para a medida da VPU, o equipamento utilizado foi o Proceq Pundit Lab+, com transdutores cônicos de 54KHz (Figura 9). Elas foram colocadas perpendicularmente às fibras (Figura 10) e a distância entre elas foi programada no equipamento para cada viga. O ajuste foi feito a 12% de umidade usando a seguinte equação (Liñán et al., 2011):

$$VPU_{12} = 27.5(w - 12) + VPU \quad (4)$$

Onde:

$VPU_{12}$ = taxa de pulso ultrassônico referida a 12% de umidade; m/s

$w$ = umidade da madeira no momento da medição; %

$VPU$ = velocidade de pulso ultrassônica medida; m/s



Figura 9. Aplicação de testes VPU em vigas de madeira

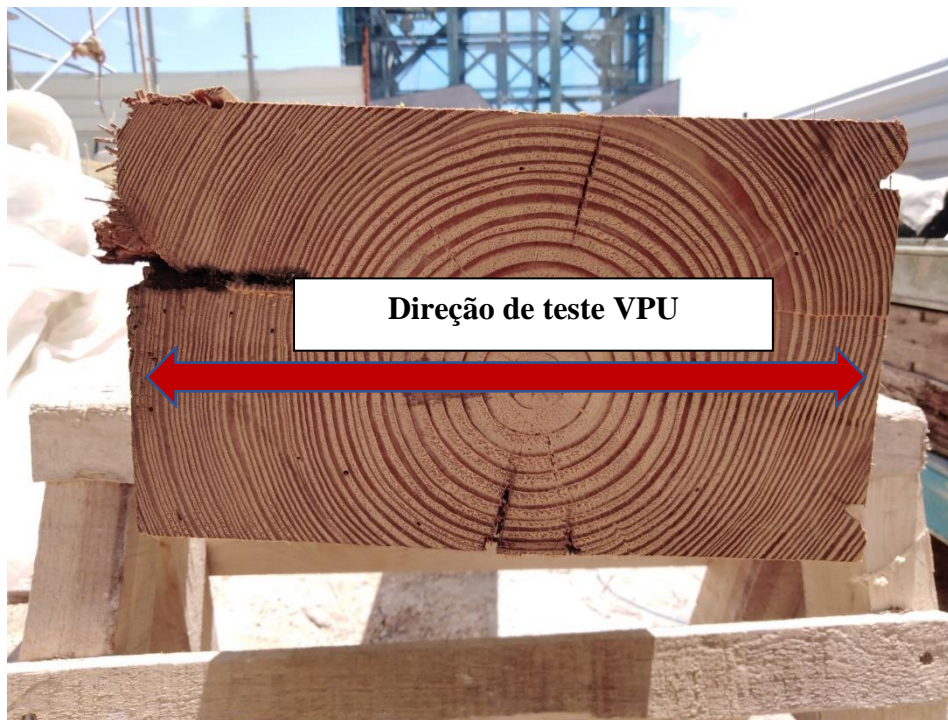


Figura 10. Esquema de aplicação VPU perpendicular à fibra

Com base nos mesmos critérios, foi calculada a tensão básica de ruptura ( $f_k$ ) e o limite para determinação do estado de conservação das vigas de madeira:

$$f_k = (0.212VPU_{12} - 183.09) * 1/10 \quad (5)$$

Onde:

$f_k$ = tensão de ruptura; MPa

$VPU_{12}$ = taxa de pulso ultrassônico referida a 12% de umidade; m/s



A partir das medições de VPU e dos valores de estimativa de densidade obtidos, os módulos dinâmicos foram calculados aplicando a equação utilizada por (Alquicira and Castellanos, 2021; Ettelaei et al., 2018):

$$MED = \rho * VPU_{12}^2 \quad (6)$$

Onde:

MED= módulo de elasticidade dinâmico; N/m<sup>2</sup>

$\rho$ = densidade; Kg/m<sup>3</sup>

$VPU_{12}^2$ = taxa de pulso ultrassônico referida a 12% de umidade; m/s

Para medir a umidade nas vigas de madeira foi utilizado o termo-higrômetro TotalCheck da Delmhorst (Figura 11).



Figura 11. Medição da umidade da superfície com o equipamento termo-higrômetro TotalCheck da Delmhorst

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Avaliação visual

Das 32 vigas inspecionadas, onze delas não apresentaram nenhum tipo de lesão (Tabela 1). De acordo com os requisitos de classificação visual da norma (UNE 56544, 2011), 4 feixes categorizados como ME-1 e 7 como ME-2 (Tabela 2). As demais vigas são classificadas como Rejeitadas considerando os danos recorrentes por trincas e fissuras longitudinais, apodrecimento e estilhaçamento, principalmente na área das cabeças até uma distância de aproximadamente 40 cm. No entanto, por se tratar de um projeto de reabilitação que pretende utilizar as vigas originais, com exceção da VA-18, todas elas precisam ser reavaliadas através dos ensaios propostos.

Tabela 1. Resultados da inspeção realizada nas vigas de madeira.

ID	Ampla (cm)	Camber (cm)	Comprimento (cm)	Lesões
VA-1	15	19.5	312	Lascado por PI a 70 cm da cabeça A.
VA-2	16	20	320	Fendas longitudinais descontínuas no meio da profundidade do FL, desde a cabeça B até um comprimento de 250 cm.
VA-3	18	20	309	Fendas descontínuas longitudinais no meio da profundidade.
VA-4	17.5	20	295	Desfiado em BS em todo o comprimento da viga.
VA-5	17.5	20	310	Fendas e fissuras longitudinais descontínuas por FL, no meio da profundidade. Desfiado por FS da cabeça B até um comprimento de 70 cm.
VA-6	14	20	304	Rachadura no FL, desde a cabeça B até um comprimento de 20 cm no meio da superelevação.
VA-7	12.5	20	304	Fenda longitudinal no meio da profundidade de ambas as faces laterais, desde a cabeça A até um comprimento de 90 cm.
VA-8	12.5	20	310	Fendas longitudinais da cabeça B até um comprimento de 60 cm na metade superior do FL. FL podridão da cabeça A, até um comprimento de 70 cm.
VA-9	14.5	20	309	Não foram observadas lesões.
VA-10	15.5	20	310	Fissura longitudinal na metade superior do FL, ao longo de todo o comprimento. Trituração superficial por FL, a 90 cm da cabeça B.
VA-11	17.5	21	310	Não foram observadas lesões.
VA-12	17	20	310	
VA-13	11.5	21.5	476	Triturado pelo FS afetando 5 cm da largura do FL e 2-3 cm da altura.
VA-14	11.5	21.5	475	Não foram observadas lesões.
VA-15	11.5	21.5	472	Fissura longitudinal no meio da profundidade do FL ao longo do comprimento.
VA-16	12	22	480	Não foram observadas lesões.
VA-17	13	21.5	480	Triturado por FS a 30 cm da cabeça B, até um comprimento de 60 cm.
VA-19	13	21	480	Não foram observadas lesões.
VA-18	Podridão generalizada			
VA-20	12	20	480	Não foram observadas lesões.
VA-21	11.5	20	480	
VA-22	11.5	21	480	Fendas e fissuras longitudinais descontínuas por FL ao longo do vão da viga na metade inferior da profundidade.



				Triturado por FS a partir de 160 cm da cabeça A, até um comprimento de 200 cm.
VA-23	15	20	299	Desfibramento superficial no terço superior do FL, da cabeça B até 40 cm de comprimento.
VA-24	14	19.5	297	Não foram observadas lesões.
VA-25	15.5	20	306	
VA-26	18	20	305	Desfiado em toda a borda superior do FL.
VA-27	17	20	305	Rachaduras longitudinais por FS em toda a luz.
VA-28	15	20	310	Amolecimento e desfibramento por FS, em todo o comprimento. Fissuras longitudinais descontínuas pelo FL.
VA-29	14.5	20	310	Desfiado na cabeça A e B pelo FS até um comprimento de 40 cm respectivamente.
VA-30	14.5	20	310	Triturado por FS afetando 3 cm de profundidade ao longo de todo o comprimento.
VA-31	16.5	20	362	Lascado por PI a 60 cm da cabeça B. Desfibramento superficial em BS do FL.
VA-32	11	21	361	Não foram observadas lesões.
Abreviaturas usadas: PI: parte inferior FL: face lateral FS: face superior BS: borda superior				

Tabela 2. Classificação visual de vigas de madeira.

Qualidade visual (UNE 56544, 2011)	Número de vigas
ME-1	4
ME-2	7
Rejeição	21

A inspeção visual permitiu determinar a extensão do dano na superfície, mas não sua profundidade na massa da madeira, exceto nos casos em que a podridão está muito avançada. Lesões por podridão ou trincas profundas no interior das vigas podem levar à perda da capacidade de carga do elemento e causar sua fratura.

Conforme nos (Nuere, 2007), casos em que a deterioração possa levar à invalidação do elemento para cumprir a função estrutural que lhe foi atribuída no conjunto, deve decidir-se pela substituição ou reforço das vigas. A aplicação desses critérios a cada feixe dependerá da análise conjunta das lesões visíveis e dos resultados obtidos por técnicas não destrutivas (Tabela 3). A remoção de um elemento de madeira exigirá necessariamente a sua substituição por outro de dimensões semelhantes que atenda aos requisitos de classificação visual e classe de resistência, de modo a não afetar os requisitos de carga para o projeto.

### 3.1 Aplicação de ensaios não destrutivos

Para a realização dos testes de penetrômetro e VPU, foram preparados dois pontos em cada viga. Em cada uma, foram registradas 5 leituras, totalizando 10 resultados para cada elemento. A Figura 12 mostra um resumo dos valores em algumas das vigas testadas.

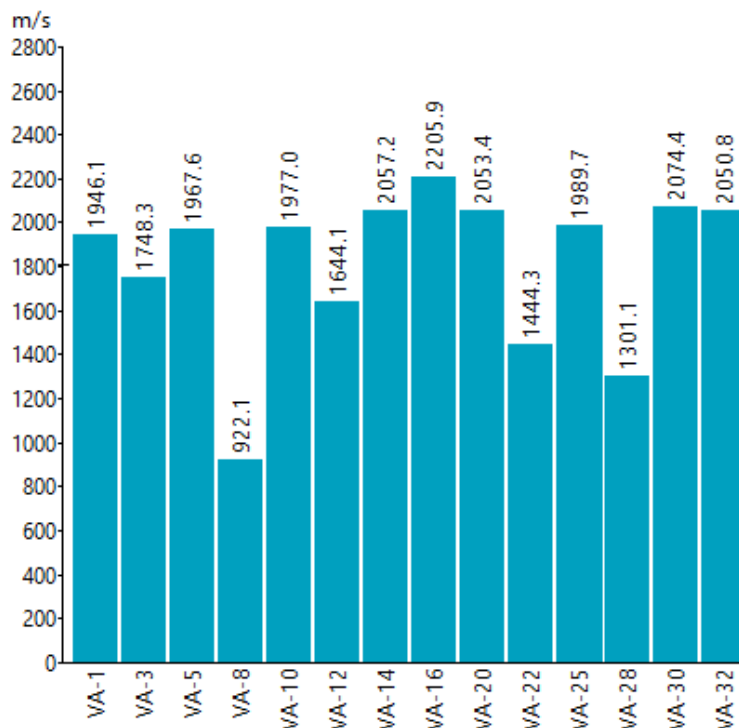


Figura 12. Resumo das medições VPU em um ponto de teste para as vigas de madeira. Dados extraídos do software Proceq PunditLink

Os critérios para estimar a deterioração da madeira com base nos resultados do VPU foram estabelecidos de acordo com (Liñán et al., 2011), em que se estabelece que:

VPU > 1400 m/s: madeira saudável (MS)

VPU < 1400 m/s: madeira deteriorada (MD)

Tabela 3. Resultados médios de medições e cálculos aplicados.

ID	w (%)	Tp (mm)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm <sup>3</sup> )	VPU <sub>12</sub> (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m <sup>2</sup> )	Critério
VA-1	13.3	10.5	10.4	0.45	2011.58	24.34	1804.33	MS
VA-2	12.3	10.0	10.0	0.46	2143.33	27.13	2101.57	MS
VA-3	11.8	12.0	12.0	0.40	2020.32	24.52	1642.40	MS
VA-4	14.3	12.0	11.8	0.41	1972.75	23.51	1587.83	MS
VA-5	17.9	9.5	9.1	0.48	1930.15	22.61	1792.52	MS
VA-6	13.7	9.5	9.4	0.47	2108.75	26.40	2105.94	MS
VA-7	15.8	9.5	9.2	0.48	2565.00	36.07	3140.70	MS
VA-8	15.2	10.5	10.3	0.45	921.20	1.22	381.70	MD
VA-9	19.9	11.3	10.7	0.44	2147.25	27.21	2022.57	MS
VA-10	12.2	10.7	10.7	0.44	1865.80	21.25	1526.17	MS
VA-11	14.6	9.0	8.8	0.49	2043.00	25.00	2038.96	MS

VA-12	18.1	12.3	11.8	0.41	1733.55	18.44	1228.72	MS
VA-13	17.8	10.7	10.3	0.45	2375.50	32.05	2538.05	MS
VA-14	14.9	12.3	12.1	0.40	2101.05	26.23	1771.94	MS
VA-15	15.6	11.7	11.4	0.42	2019.70	24.51	1708.71	MS
VA-16	19.3	11.0	10.4	0.45	2336.25	31.22	2429.38	MS
VA-17	15.7	12.0	11.7	0.41	2273.55	29.89	2125.43	MS
VA-18	Feixe descartado devido à deterioração avançada							
VA-19	17.0	10.3	9.9	0.46	2126.00	26.76	2072.85	MS
VA-20	15.4	10.3	10.1	0.46	2066.10	25.49	1944.34	MS
VA-21	15.6	11.0	10.7	0.44	2126.20	26.77	1977.26	MS
VA-22	14.4	10.7	10.5	0.44	1485.10	13.18	976.75	MS
VA-23	14.4	10.0	9.8	0.46	2165.10	27.59	2163.45	MS
VA-24	13.1	9.3	9.2	0.48	1995.55	24.00	1903.02	MS
VA-25	12.0	10.7	10.7	0.44	1996.20	24.01	1745.33	MS
VA-26	13.2	10.0	9.9	0.46	2073.90	25.66	1975.23	MS
VA-27	16.2	10.7	10.4	0.45	2015.70	24.42	1814.24	MS
VA-28	18.4	12.7	12.1	0.40	1397.50	11.32	779.66	MD
VA-29	15.7	11.7	11.4	0.42	1960.35	23.25	1610.61	MS
VA-30	14.5	11.7	11.5	0.42	2193.75	28.20	2004.15	MS
VA-31	14.6	12.0	11.8	0.41	1914.30	22.27	1497.63	MS
VA-32	13.9	9.7	9.6	0.47	1960.15	23.25	1800.43	MS

Nos resultados de VPU obtidos, apenas duas vigas (VA-8 e VA-28) apresentam valores inferiores ao limite estabelecido de 1400 m/s, sendo classificadas como “madeira deteriorada”. Isso pode ser devido à infestação de fungos por apodrecimento, amolecimento e lascamento na madeira que se espalhou nas vigas, o que se reflete na saída da velocidade de transmissão da onda entre os transdutores. Ao longo dos anos de exploração do imóvel, não é possível determinar as causas pelas quais estas vigas sofreram uma deterioração consideravelmente maior do que as restantes. É possível que a sua localização tenha coincidido com a de zonas húmidas como casas de banho ou cozinhas, embora os teores de humidade registados não apresentem valores extremos que suportem esta hipótese. A análise estatística dos dados (Tabela 4), em que foram excluídos os feixes VA-8 e VA-28, mostra uma dispersão para VPU inferior a 10%, com confiabilidade de 95%, de modo que para o restante dos valores a população de dados obtidos é aceita.

Tabla 4. Cálculos estadísticos de los resultados obtenidos en las vigas clasificadas como MS.

Parâmetros estatísticos	w (%)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm <sup>3</sup> )	VPU, 12 (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m <sup>2</sup> )
X <sub>med</sub>	15.1	10.8	0.4	2059.5	25.4	1898.3
sd	2.1	1.0	0.0	197.3	4.2	400.3
CV(%)	14.0	9.2	5.8	9.6	16.5	21.1
Min.	11.8	9.0	0.4	1485.1	13.2	976.8
Max.	19.9	12.3	0.5	2565.0	36.1	3140.7

A densidade mínima das vigas foi de  $0,4 \text{ g/cm}^3$ . Isso corresponde a uma classificação de classe de resistência superior a C35, de acordo com (Documento Básico SE-M, 2019). Os resultados de VPU inferiores a 1400 m/s obtidos para VA-8 e VA-28 inferem que a deterioração por podridão e fissuras se estende para o interior do elemento. No entanto, seus resultados de profundidade de penetração não foram significativos em comparação com as demais vigas.

Isso mostra que a estimativa do estado de conservação da madeira com base na densidade calculada pelo penetrômetro, pode levar a falsos positivos se não for combinada com outras técnicas de medição. A dureza da madeira no ponto de impacto da agulha pode resultar em um valor alto que não reflete a deterioração no interior do material. A Figura 13 mostra a análise geral dos resultados que correlacionam o teor de umidade/penetração/densidade calculada. Nos casos de VA-9 e VA-16, identifica-se como atingem um valor de penetração  $\geq 11,0 \text{ mm}$  para umidade próxima a 20%, no qual seria esperado um amolecimento da madeira que resultaria em maior penetração, como acontece com o VA-28. A comparação do teor de umidade entre essas vigas é muito semelhante, mas com resultados opostos. No caso de VA-9 e VA-16 não apresentaram lesões e mantiveram VPU maior que 2000 m/s, enquanto que em VA-28 o avanço das lesões para o interior do feixe foi confirmado com resultados de PUV inferior a 1400m/s.

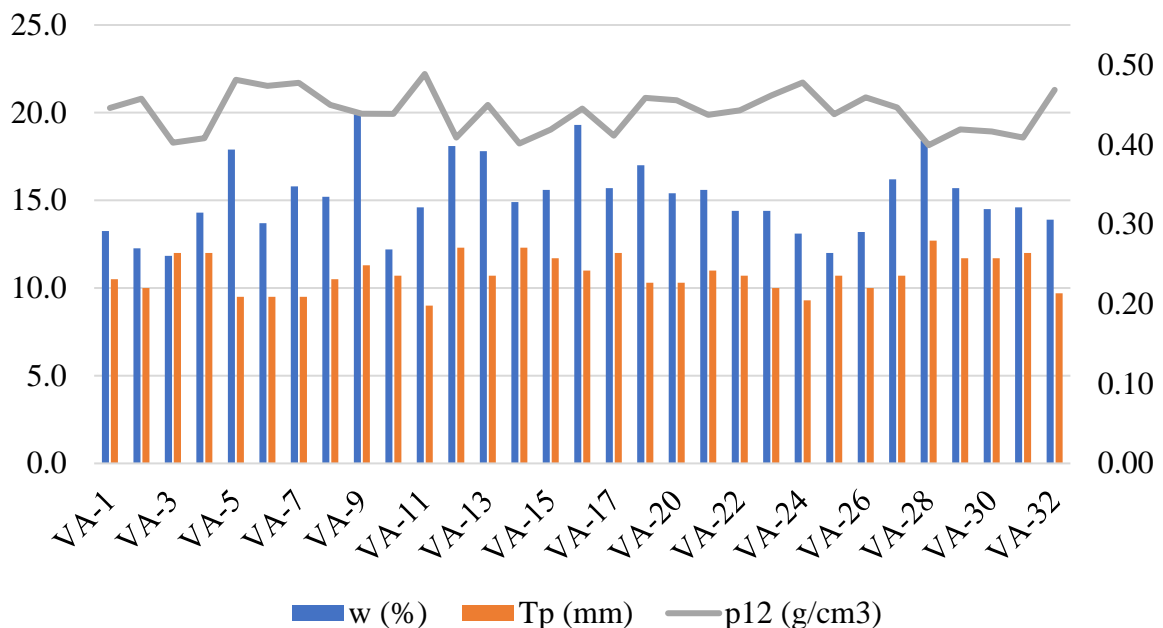


Figura 13. Relação dos resultados de umidade, penetrômetro e densidade calculada a 12% para todas as vigas de madeira estudadas

Do total de medições de VPU realizadas, 82% oscilou em uma profundidade de penetração entre 9,0 mm e 12,0 mm. Na análise gráfica (Figura 14) pode-se observar como o conjunto majoritário de resultados ocupa a faixa entre 1800 m/s e 2400 m/s para o referido intervalo. O gráfico permitiu identificar o feixe VA-22 como uma variável distante da média populacional com resultado de VPU= 1485,10 m/s. Se forem levados em conta o desvio padrão calculado e as lesões presentes na viga, seria razoável por razões de segurança estrutural substituí-la por uma nova. Os valores obtidos das equações propostas para estimar o  $f_k$  e o MED apresentam uma alta correlação entre eles (Figura 15), caracterizando as vigas na classe estrutural ME-2 (UNE 56544, 2011), sobre as quais devem aplicar todos os ações de restauração e consolidação necessárias para sua reutilização.

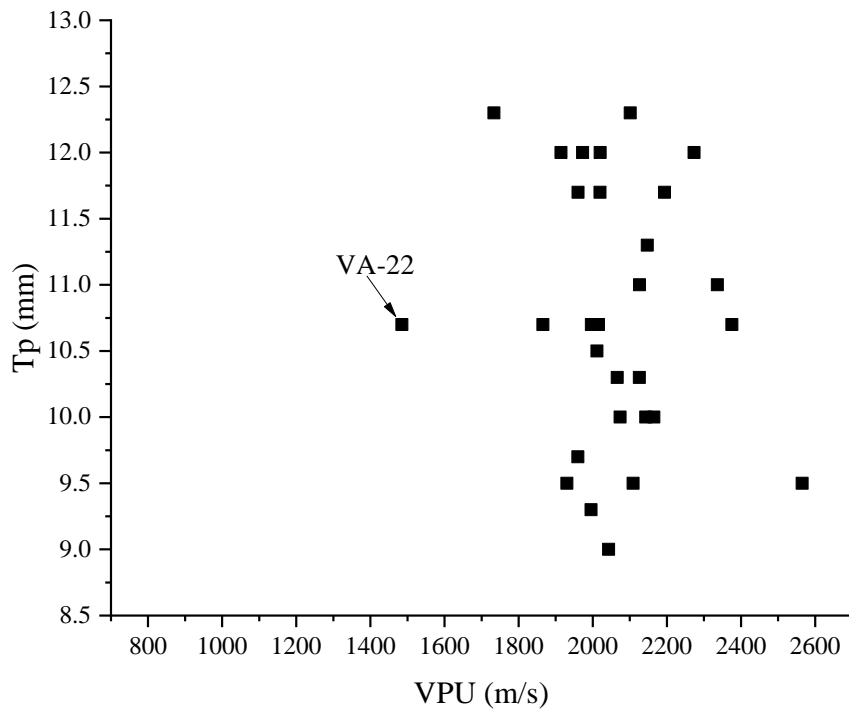


Figura 14. Relação dos resultados de VPU vs Tp para as vigas avaliadas como Madeira Sadia

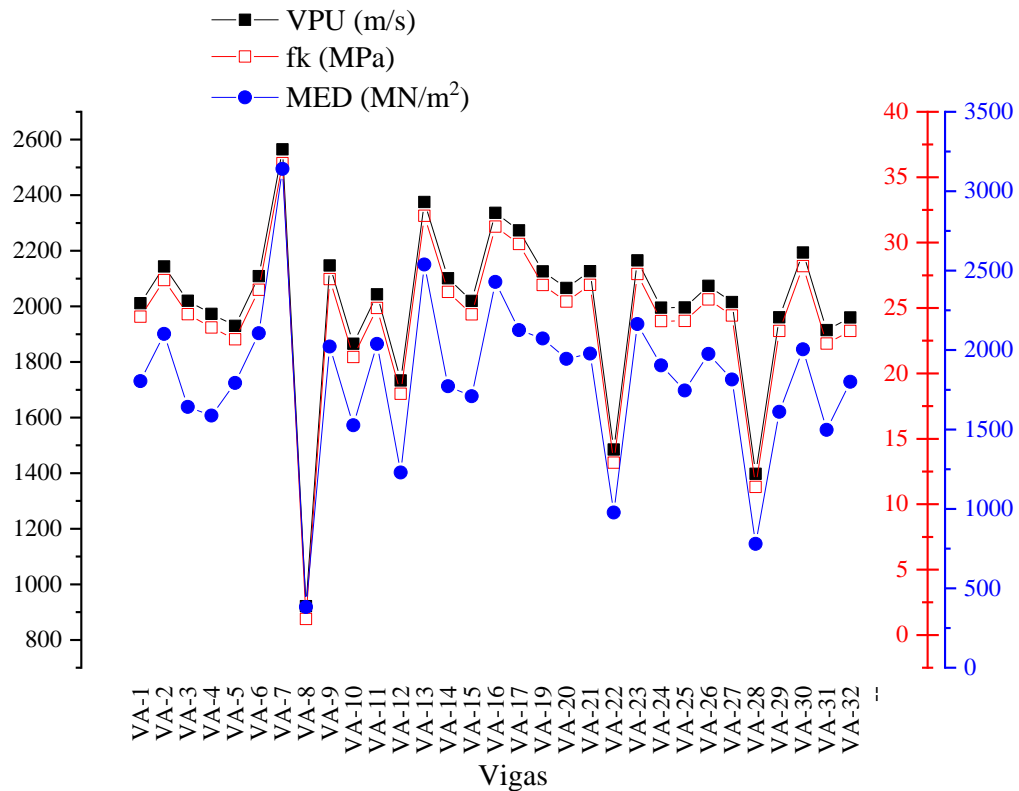


Figura 15. Correlação dos resultados obtidos de VPU, fk e MED para vigas de madeira



### 3. CONCLUSÕES

Das 32 vigas diagnosticadas para avaliar a sua possível reutilização como madeira estrutural na reabilitação do imóvel, chega-se às seguintes conclusões:

As lesões mais recorrentes encontradas durante a inspeção visual foram a deterioração das cabeças por excesso de umidade nas juntas, devido ao desenvolvimento de fungos podres, além de fissuras e rachaduras descontínuas nas faces e bordas. Entre as técnicas de restauração e reforço mais comuns para esses tipos de deterioração estão o uso de tampas e suportes metálicos para garantir a fixação das vigas nos pontos de apoio. Decapagem ou escovação das faces e bordas até atingir uma superfície com o menor número possível de lesões. As fissuras, por outro lado, podem ser seladas com resinas, ou a partir da preparação de uma pasta de cola de carpinteiro misturada com serragem. Fumigação e tratamento com produtos biocidas e, finalmente, o recálculo estrutural para as novas dimensões das vigas.

O estudo combinado de avaliação visual e ensaios não destrutivos permitiu identificar que as vigas VA-8, VA-18, VA-22 e VA-28 devem ser substituídas devido a lesões avançadas e baixa densidade para serem reutilizadas como elemento estrutural.

A regulamentação atual para a classificação visual da madeira serrada para uso estrutural é muito conservadora no que diz respeito à deterioração, o que pode resultar na substituição total de elementos de madeira antigos. Nos projetos de reabilitação e conservação de bens patrimoniais, a avaliação do estado de conservação é mais eficaz através da aplicação de ensaios de medição nas peças de madeira.

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, a técnica VPU apresentou resultados mais precisos com relação à condição de densidade da madeira em comparação com a técnica penetrômetro, na qual, através das equações utilizadas, não se refletiu nas densidades para variações de teor de umidade. entre 11,8% e 19,9%.

### 4. OBRIGADO

El presente estudio fue financiado por el Grupo Inversionista Avenida del Puerto, perteneciente a la Dirección de Inversiones de la OHCH bajo contrato S-No. 4DG /2021 al Contrato 6DG/2020. Los autores desean agradecer el apoyo de los técnicos Lázaro Y. Martínez García y Raúl de Jesús Expósito Mendez, así como reconocer la labor y colaboración de los obreros y carpinteros de la obra.

### 5. REFERÊNCIAS

- Alquicira, I. M., Castellanos, J. R. S. (2021), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de Pinus pseudostrobus*. Madera y Bosques, 27(3): e2732235-e2732235. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Fernández-Golfín, J. I. (2006), *Structural Tali timber (Erythrophleum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods*. Holz als Roh-und Werkstoff, 64(5): 357-362. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0100-5>
- Bratasz, L., Rachwal, B., Kozłowski, A., Kozłowski, R. (2010). *Sorption of Moisture and Dimensional Change of Wood Species Used in Historic Objects, Wood science for conservation of cultural heritage-Braga 2008 : proceedings of the international conference held by Cost action IE0601 in Braga (Portugal) 5-7 November 2008. - ( Proceedings e report ; 67)*. Firenze University Press, Firenze.

- DIN EN 338:2016-07. (2016). *Structural timber - Strength classes*. Germany. <https://dx.doi.org/10.31030/2463437>.
- Documento Básico SE-M. (2019). *Seguridad Estructural. Madera*.
- Ettelaei, A., Layeghi, M., Hosseinabadi, H. Z., Ebrahimi, G., (2018), *Prediction of Modulus of Elasticity of Poplar Wood Using Ultrasonic Technique by Applying Empirical Correction Factors*. Measurement. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.076>
- ISO 9709:2018. (2018). *ISO 9709:2018(en) Structural timber — Visual strength grading — Basic principles*.
- Kuklík, P. (2007). *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.
- Liñán, C. R., Conde, J. M., Hita, P. R. D., Gálvez, F. P. (2011), *Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz)*. Informes de la Construcción, 63(521): 13-22. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.032>
- Manavella, R. D., Guillaumet, A. A., Filippetti, M. C., Meyer, L. C. (2019), "*Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa*". 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo, Uruguay.
- Nuere, E., (2007), *Madera, en restauración y rehabilitación*. Informes de la Construcción, 59(506): 123-130.
- Rello, L. A., Barra, R. D., Sanz, M. C., Fernández, A. L., Sánchez, M. T. L., Basterra, A. (2007). *Clasificación de madera estructural de P. pinaster Ait. Mediante ultrasonidos*, Congreso Iberoamericano de productos forestales - Iberomadera, Buenos Aires, Argentina.
- Salazar, D. V., Delgado, J. C., Yoza, L. Y., Mallque, M. A. (2018), *Propuesta metodológica para la evaluación de estructuras de madera en monumentos históricos – Caso Hotel El Comercio*. Revista Forestal del Perú, 33(2): 117-132. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i2.1225>
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad de la madera de Pinus douglasiana, en relación a su contenido de humedad*. Revista de Ciencia y Tecnología(23): 25-30.
- Szostak, B., Trochonowicz, M., Kowalczyk, M. (2020), *Determination of the strength parameters of pinewood based on the non-destructive sclerometric test with a wood hammer*. Civil and Environmental Engineering Reports, 30(1): 43-52. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0004>
- UNE 56544. (2011). *Norma Española UNE 56544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Madrid. España.
- Zielińska, M., Rucka, M. (2021), "*Using the ultrasonic tomography method to study the condition of wooden beams from historical building*". 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC). International Institute for Conservation of Historic And Artistic Works.

## Degradação do concreto através da formação de ácido sulfúrico biogênico em uma Estação Elevatória de Esgoto

G. Coni<sup>1\*</sup> , A. Tafuri<sup>2</sup> , A. Costa<sup>1</sup> , G. Sakuma<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [conigabriella@gmail.com](mailto:conigabriella@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.571>

Recepção: 06/12/2021 | Aceitação: 04/03/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo realizado em uma Estação Elevatória de Esgoto após ser constatado severa degradação. O ataque por ácido sulfúrico biogênico em sistemas de esgoto sanitário é amplamente estudado na literatura, entretanto, dados em situações reais de obra ainda são bastante limitados. Foram realizadas análises da concentração de H<sub>2</sub>S no ar, profundidade de carbonatação, ensaio de resistência à compressão, petrografia, MEV/EDS, DRX e determinações químicas em testemunhos de concreto extraídos acima do nível do efluente. Os produtos identificados na superfície foram Gipsita, Jarosita, Hidróxido Ferroso, Cloreto Ferroso e possivelmente Hisingerita. Os resultados demonstram a presença na superfície tanto de produtos oriundos da dissolução da pasta cimentícia quanto das barras de aço de 16 mm localizadas na região atacada.

**Palavras-chave:** ataque por ácido sulfúrico biogênico; degradação; concreto armado.

**Citar como:** Coni, G., Tafuri, A., Costa, A., Sakuma, G. (2022), "Degradação do concreto através da formação de ácido sulfúrico biogênico em uma Estação Elevatória de Esgoto", Revista ALCONPAT, 12 (2022), pp. 279 – 295, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.571>

<sup>1</sup> Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A (Sabesp), São Paulo, State of São Paulo, Brasil.

<sup>2</sup> Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a autora Gabriella contribuiu com as atividades coleta de dados 25%, redação do trabalho 35%, discussão de resultados 30%, a autora Amanda contribuiu coleta de dados 25%, redação do trabalho 35%, discussão de resultados 30%, o autor Guilherme contribuiu coleta de dados 25%, redação do trabalho 15%, discussão de resultados 20% e a autora Adriana contribuiu coleta de dados 25%, redação do trabalho 15%, discussão de resultados 20%.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

## Concrete degradation by the formation of biogenic sulfuric acid in a Sewage Pumping Station

### ABSTRACT

This work presents the study carried out in a Sewage Pumping Station after severe degradation was observed. The attack by biogenic sulfuric acid in sanitary sewage systems is widely studied in the literature, however, data on real work situations are still quite limited. Analyzes of the concentration of H<sub>2</sub>S in the air, carbonation depth, compressive strength test, petrography, SEM/EDS, XRD and chemical determinations were carried out in concrete cores extracted above the effluent level. The products identified on the surface were Gypsum, Jarosite, Ferrous Hydroxide, Ferrous Chloride and possibly Hisingerite. The results demonstrate the presence on the surface of both products from the dissolution of cement paste and 16 mm steel bars located in the attacked region.

**Keywords:** biogenic sulfuric acid attack; degradation; reinforced concrete.

## Degradación del hormigón mediante la formación de ácido sulfúrico biogénico en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales

### RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio realizado en una Estación de Bombeo de Aguas Residuales luego de que se observara una severa degradación. El ataque por ácido sulfúrico biogénico en los sistemas de alcantarillado sanitario es ampliamente estudiado en la literatura, sin embargo, los datos sobre situaciones reales de trabajo aún son bastante limitados. Se realizaron análisis de concentración de H<sub>2</sub>S en el aire, profundidad de carbonatación, prueba de resistencia a la compresión, petrografía, SEM/EDS, XRD y determinaciones químicas en núcleos de concreto extraídos por encima del nivel del efluente. Los productos identificados en la superficie fueron yeso, jarosita, hidróxido ferroso, cloruro ferroso y posiblemente hisingerita. Los resultados demuestran la presencia en la superficie de ambos productos de la disolución de pasta de cemento y barras de acero de 16 mm ubicadas en la región atacada.

**Palabras clave:** ataque de ácido sulfúrico biogénico; degradación; hormigón armado.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

O ambiente de esgoto sanitário tem um microclima que propicia a formação de ácido sulfúrico biogênico ( $H_2SO_4$ ) devido à presença de bactérias do tipo oxidantes e redutoras de sulfatos (Estokova et.al., 2012). Este ácido, produzido pelas bactérias oxidantes, é extremamente agressivo ao concreto uma vez que ataca a pasta cimentícia, descalcificando os produtos de hidratação do cimento, resultando na perda de coesão do concreto (Wu et.al., 2018).

Outro ponto crítico é a redução do pH do concreto a um valor extremamente baixo, podendo alcançar valores em torno de pH 1-2. Conseqüentemente, ocorre a despasseivação das armaduras e inicia-se o processo de oxidação (Estokova et.al., 2012). Dessa forma, o ácido produz uma ação conjunta de degradação tanto do concreto quanto do aço em um curto período de tempo, podendo alcançar taxas de deterioração de 12mm/ano em muitos sistemas de esgoto sanitário (Wu et.al., 2018). No trabalho de Fernandes et.al., (2012) foi apresentado um sistema de esgoto sanitário com 300 km de extensão que sofreu deterioração superficial do concreto em apenas 2 anos após sua construção. Atualmente, estuda-se estratégias para mitigar a degradação das infraestruturas de esgoto, cita-se, por exemplo, a utilização de bio-concretos que reduzem a quantidade de bactéria sulfo-oxidantes (Song et.al., 2021).

O processo de degradação do concreto por ácido sulfúrico biogênico, apesar de ser amplamente discutido na literatura, dados de pesquisas executadas em situações reais de obra ainda são limitados (O'Connell et.al., 2010; WU et.al., 2020). Segundo Wu et.al., (2020), as taxas de corrosão obtidas em estudos de campo e de laboratório de forma geral apresentam grande variação e ainda é difícil estabelecer relações quantitativas para ambas as situações com base no conhecimento existente. Este trabalho busca, portanto, relatar um estudo de caso realizado em uma Estação Elevatória de Esgoto pertencente à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, a qual apresentou severa deterioração com apenas 20 anos de construção e operação. Espera-se que os resultados do presente trabalho forneçam parâmetros que auxiliem na validação de estudos realizados em escala laboratorial e no desenvolvimento de estratégias que visem aumentar a vida útil das infraestruturas de saneamento.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ataque do ácido sulfúrico biogênico inicia-se com a formação do ácido sulfídrico aquoso ( $H_2S$ ) através de bactérias anaeróbicas que causam a dessulfatação, chamadas de *Desulfovibrio desulfuricans*, presentes em uma das camadas do lodo do efluente (Wu et.al., 2018). Essas bactérias, sob condições anaeróbicas e com concentração de oxigênio dissolvido (DO) menor do que 0,1mg/L, convertem os compostos de enxofre presentes no efluente em ácido sulfídrico aquoso ( $H_2S$ ) (House e Weiss, 2014; Wu et.al., 2018).

Parte do ácido sulfídrico aquoso é liberado na forma gasosa como sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) sobre a linha do efluente. A passagem do  $H_2S$  (aq) para a fase de gasosa é fortemente influenciada pelo pH do efluente, pelas condições de equilíbrio entre a fase gás/líquido, pela temperatura e turbulência (Wells et.al., 2009; Wu et.al., 2020).

O sulfeto de hidrogênio liberado condensa sobre a superfície do concreto onde é submetido à múltiplos estágios de oxidação por microrganismos oxidantes de enxofre, como as bactérias aeróbicas do grupo *Thiobacillus*, as quais atuam em diferentes faixas de pH, transformando-o em ácido sulfúrico biogênico (House e Weiss, 2014; Monteny et.al., 2000; Wu et.al., 2018).

A colonização de microrganismos no concreto depende da disponibilidade de nutrientes (matéria orgânica), umidade e da redução do pH. A redução do pH do concreto ocorre pela carbonatação e pela própria acidificação da superfície causada pela liberação do  $H_2S$  (g) (Jiang et.al., 2014). Quando o pH da superfície atinge valores próximos à 9, o meio já apresenta condições suficientes



para iniciar a proliferação de bactéria do tipo *T. thioparus* (Wu et.al., 2018).

A atividade bacteriana é responsável por governar a diminuição gradual do pH da superfície do concreto, alterando simultaneamente as comunidades microbianas atuantes. As bactérias do tipo *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus intermedius* e *Thiobacillus neapolitanus* passam a proliferar até atingir o pH  $\approx 3,0$ , então, há declínio das bactérias até então colonizadas para que haja a rápida proliferação das bactérias do tipo *Thiobacillus thiooxidans*, cuja presença está associada com corrosão severa do aço (Scrivener e Belie, 2013).

A Portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$ , principal responsável pela alcalinidade (pH  $\approx 13,0$ ) da matriz cimentícia, é o primeiro composto a reagir com o ácido sulfúrico, formando a Gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). A Gipsita precipitada pode reagir com fases contendo aluminatos para formar a Etringita ( $(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{CaSO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) (House e Weiss, 2014; Wells et.al., 2009). A formação de Etringita resulta em tensões expansivas que comumente causam a fissuração do concreto e facilita a penetração do ácido, acelerando o processo de degradação da estrutura (Wu et.al., 2018). A partir de pH inferiores à 10,6 a Etringita é instável e passa a se dissolver (Duchesne e Bertron, 2013). Dessa maneira, a Etringita é um produto intermediário do ataque ácido, sendo a Gipsita o produto final da reação (Davis et.al., 1998). À medida que a reserva de íons de cálcio fornecido a priori pela Portlandita se esgota, as reações seguintes se concentram na descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal composto responsável pela resistência mecânica do concreto. O produto desta reação é a sílica gel, material sem capacidade portante (Monteny et.al., 2000). Em síntese, a degradação da matriz cimentícia ocorre na região não submersa, a partir da superfície, avançando gradativamente para o interior da estrutura.

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho apresenta o estudo realizado da degradação do concreto no poço úmido de uma Estação Elevatória de Esgoto pertencente a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) posta em operação em dezembro de 1999. Foram realizadas inspeções internas da estrutura com obtenção de registro fotográfico e extração de amostras de concreto da parede do poço úmido da Elevatória para análise.



Figura 1. (a) Vista interna do poço úmido (b) Degradação do concreto e do aço

A estrutura possui dois poços circulares concêntricos, seco e úmido, com diâmetro de 25,60 m e 13,70 m, respectivamente. O primeiro foi executado em concreto armado, com cobertura metálica, e o segundo em concreto protendido. O poço seco é onde estão localizados seis conjuntos de motobombas e o poço úmido, objeto deste trabalho, com 18,70 m de altura, é a parte da estrutura que recebe e destina o esgoto para a estação de tratamento.

A inspeção da estrutura foi realizada no poço úmido (Figura 1a) e restrita à área de gases (acima do nível do efluente). Nessa região, a superfície do concreto apresentava condição atípica com camadas de até 15 cm de espessura com perda de consistência, sendo de fácil remoção com o uso de espátula (Figura 2a). A espessura determinada em projeto da parede é de 35 cm. A armadura passiva de 16 mm estava oxidada (Figura 2b), com perda de seção e trechos seccionados e/ou completamente dissolvidos.



Figura 2. (a) Facilidade de remoção da camada de concreto degradada utilizando uma espátula e (b) trecho de dissolução das armaduras

Os seguintes ensaios foram realizados no presente estudo:

### 3.1 Concentração de gases

Foram realizadas medições diárias das concentrações de gás sulfídrico ( $H_2S$ ), na área de gases, da estação elevatória, durante o período 07/02/2020 a 30/11/2020, utilizando o myDataSens  $H_2S$  da Microtronics, com capacidade de medição de 0-1000 ppm. O medidor coleta e armazena os dados, automaticamente, a cada 5 minutos

### 3.2 Análise da frente de carbonatação

O ensaio qualitativo para determinação da frente de carbonatação do concreto foi realizado utilizando uma solução composta de fenolftaleína, indicador incolor ácido/básico o qual sofre alteração de cor para roxo em pH acima de 9 (alcalino), denotando a presença de  $Ca(OH)_2$ .

### 3.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em quatro (04) testemunhos cilíndricos de concreto extraídos, conforme ABNT NBR 7680-1/15, da parede com diâmetro nominal de 75 mm. O ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos foi executado de acordo com a ABNT NBR 5739/18.

### 3.4 Ensaio Petrográfico

A análise petrográfica foi baseada na norma ASTM C 856/2017 - “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”. Dois dos testemunhos extraídos foram utilizados para confecção das lâminas delgadas com dimensões de 2,5 cm x 4,0 cm com o intuito de caracterizar a interface entre a região aparentemente sã e a região atacada. Foi utilizado o microscópio modelo DM4500 P acoplado a câmera digital DFC7000 T, ambos da marca Leica, e lupa binocular estereoscópica modelo M-8, marca Wild. A edição de imagens foi realizada no software LAS X. A técnica fotográfica por meio de fotomicrografia foi empregada no ensaio para obtenção de imagens ampliadas da microestrutura do material.

### 3.5 Microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e determinações químicas

Em um mesmo testemunho foram realizadas análises em três camadas distintas: uma mais externa, obtida através de raspagem do concreto sem consistência, uma intermediária e outra mais interna, aparentemente sã. Para microscopia eletrônica de varredura a amostra raspada foi seca em dessecador vedado, à temperatura ambiente, por 4 dias. Os fragmentos secos foram cuidadosamente montados no porta amostra de alumínio, com auxílio de fita de carbono e fita de alumínio. As amostras intermediária e mais interna foram rompidas com o auxílio de um martelo, em cada extremidade do testemunho de concreto. Os fragmentos foram coletados, criteriosamente selecionados e prontamente montados em porta amostra de alumínio, com auxílio de fita de carbono e fita de alumínio e recobertos com fina camada de ouro-paládio.

Para as análises de difratometria de raios X uma alíquota da amostra raspada foi seca a  $(45 \pm 5)$  °C por 7 dias ao passo que os fragmentos das amostras intermediária e mais interna foram britados em almofariz para obtenção da argamassa, em seguida, foram moídos em almofariz de porcelana até passarem totalmente em peneira ABNT No 200 (75  $\mu$ m). Foi utilizado o equipamento de difração de raios X da marca Panalytical modelo EMPYREAN, operando na radiação  $K\alpha$  do cobre com 45 kV – 40 mA e varredura de  $2^\circ$   $2\theta$ /min. A identificação dos compostos foi executada por meio do software X-pert HighScore Plus (versão 4.9) da Panalytical e padrões difratométricos fornecidos pelo ICDD (International Center for Diffraction Data) com atualização até 2017.

A determinações químicas foram realizadas apenas no material raspado, sendo elas:

Determinação de resíduo insolúvel em água em ácido, com base nas diretrizes gerais da ASTM C114-18 "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement" e ABNT NBR 13810:1997 "Água - Determinação de metais - Método de espectrometria de absorção atômica por chama". Determinação de sódio (Na), potássio (K), ferro (Fe), magnésio (Mg) e cálcio (Ca), solúveis em água e ácido, com base nas diretrizes gerais da ASTM C114-18 "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement" e ABNT NBR 13810:1997 "Água - Determinação de metais - Método de espectrometria de absorção atômica por chama". Determinação íons cloreto e íons sulfatos solúveis, conforme diretrizes gerais da NBR 9917:2009 "Agregados para concreto - Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis".

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Concentração de gases

A concentração de sulfeto de hidrogênio presente no ar tende a aumentar com o aumento da temperatura, conforme observado na Figura 3. O aumento da temperatura reduz a solubilidade do  $H_2S$  (aq) nas águas residuais e favorece a liberação na forma gasosa com sulfeto de hidrogênio (Wu et.al., 2018). Entretanto, a temperatura não é o único fator de influência na concentração, pois a liberação de  $H_2S$ (g) dentro da elevatória é influenciada também pela turbulência que está diretamente relacionada com a quantidade de bombas em operação no momento da medição.



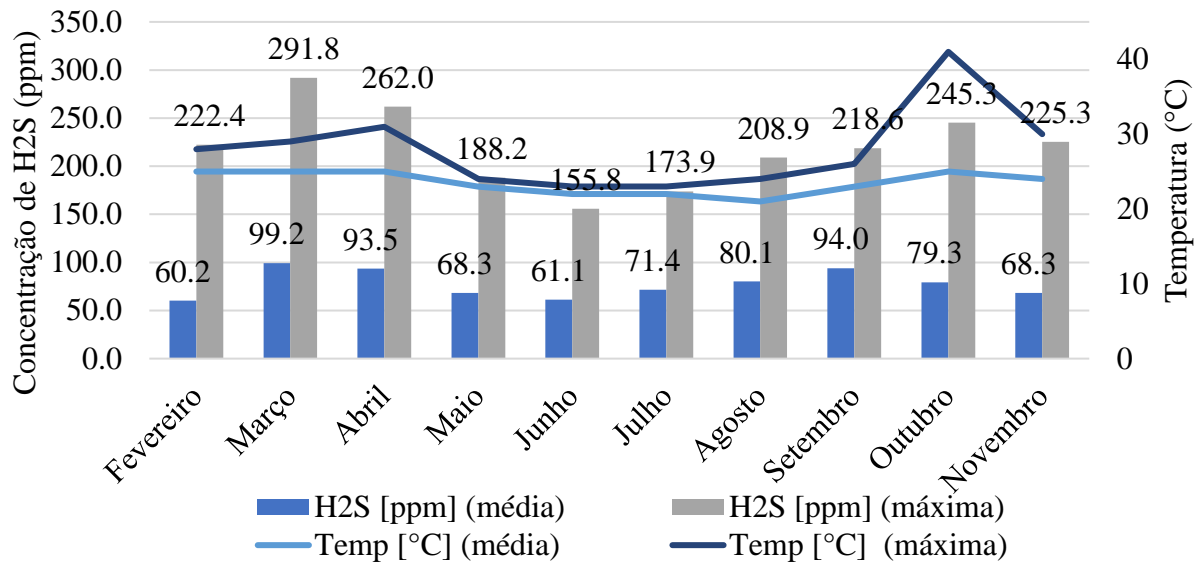


Figura 3. Concentração de H<sub>2</sub>S e temperatura ao longo dos meses

#### 4.2 Análise da frente de carbonatação

Após a remoção da camada sem consistência de aproximadamente 8 cm na parede do poço úmido, observou-se que o concreto estava carbonatado, pois não apresentou alteração de cor com aplicação da solução de fenolftaleína. Então, executou-se uma perfuração de 5 cm, observando-se que a região mais interna do concreto ainda estava alcalina, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Parede do poço úmido com o concreto alcalino.

#### 4.3 Resistência à compressão

Nos resultados dos ensaios de compressão direta, ilustrados na Tabela 1, observou-se que todos os testemunhos extraídos apresentaram resistências superiores ao especificado no projeto (20 MPa). Apesar da condição atípica observada na superfície do concreto, esse resultado já era esperado, pois a parte utilizada no ensaio foi a central da amostra, a qual ainda não aparentava ter sido contaminada pelo ácido sulfúrico biogênico.

Tabela 1. Resultados de resistência à compressão direta

n° C. P	Dimensões médias (mm)		fci,ext, inicial (MPa)	k1	k2	k3	k4	fci,ext (*) (MPa)
	Altura (h)	Diâmetro (d)						
1	109,2	73,6	56,3	-0,04	0,09	0,05	-0,04	59,7
2	111,2	73,6	55	-0,04	0,09	0,05	-0,04	58,3
3	93,0	73,6	56	-0,07	0,09	0,05	-0,04	57,7
4	145,3	73,6	54,1	0,00	0,09	0,05	-0,04	59,5

NOTA - (\*) Resultados corrigidos da resistência obtida na ruptura dos testemunhos extraídos pelos coeficientes k1, k2, k3 e k4, de acordo com o item 5.2 da ABNT NBR76801:2015.

#### 4.4 Ensaio Petrográfico

A espessura identificada da região atacada nas lâminas confeccionadas corresponde em 1,6 mm a 4,1 mm para o testemunho 1 e 500  $\mu\text{m}$  a 3,7 mm para o testemunho 2. A Figura 5 apresenta o local de interface entre a região atacada (em cima) e a região aparentemente não atacada (embaixo) para ambos os testemunhos. Notar, em tons azuis, a presença de microfissuras e microporosidade. A região atacada de ambos os testemunhos apresenta três zonas de alterações distintas, sendo elas:

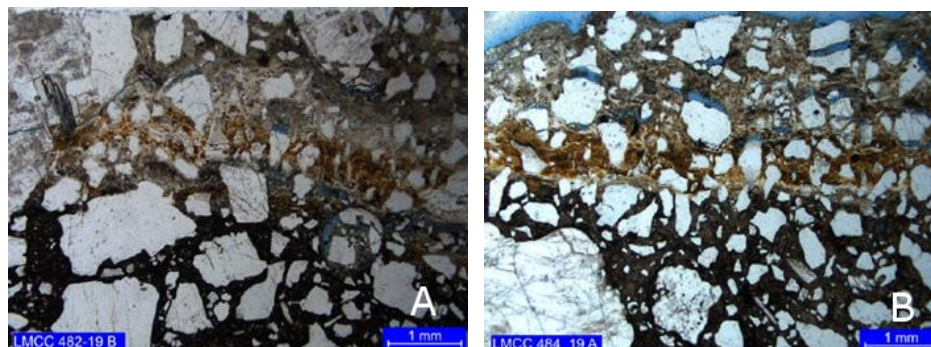


Figura 5. Local de interface entre as regiões testemunhos (a) 1 e (b) 2. Polarização simples com condensador.

Zona primária (mais externa): caracteriza-se pela intensa substituição da pasta por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa, possivelmente gipsita, em textura semelhante a “mortar” (Figura 6). O testemunho 1 exibe, também, a presença pontual de carbonatação.

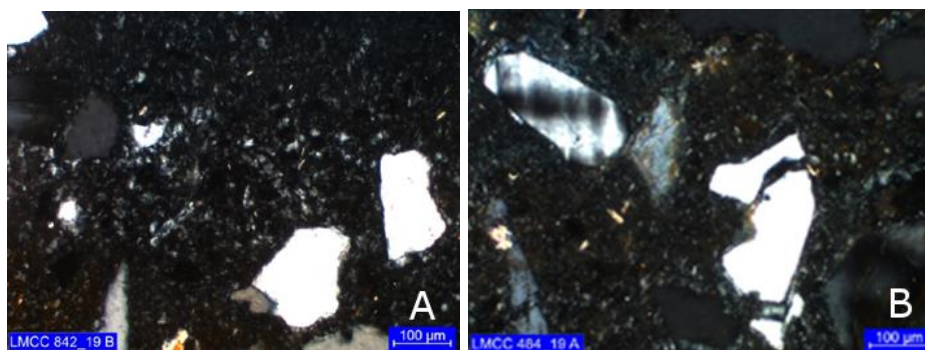


Figura 6. Primeira camada de alteração, possivelmente gipsita testemunhos (a) 1 e (b) 2. Polarização cruzada, com condensador.

Zona secundária (intermediária): exibe substituição parcial da pasta, com impregnação de hidróxidos de ferro e possível matéria orgânica (Figura 7). No trabalho Sun (2015), o enriquecimento de Fe, devido à precipitação da ferrugem foi atribuído como uma das causas da presença de microfissuras nas zonas de alteração do concreto.



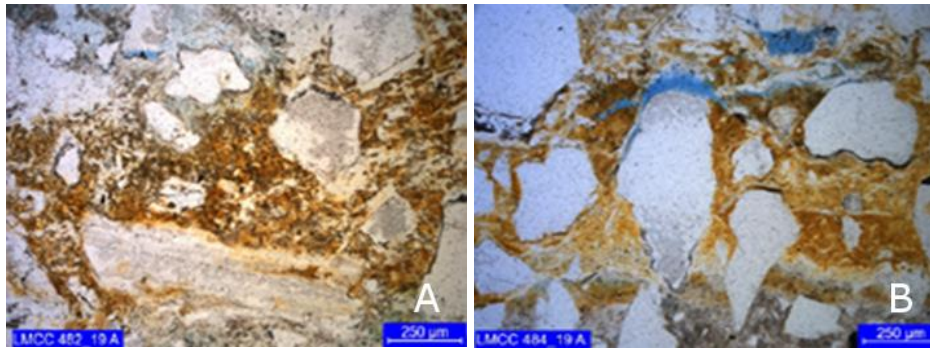


Figura 7. Impregnação de hidróxidos de ferro (tons avermelhados) testemunhos (a) 1 e (b) 3. Polarização simples com condensador.

Zona terciária: trata-se de uma zona de carbonatação, descontínua, na interface com o concreto aparentemente não atacado (Figura 8).

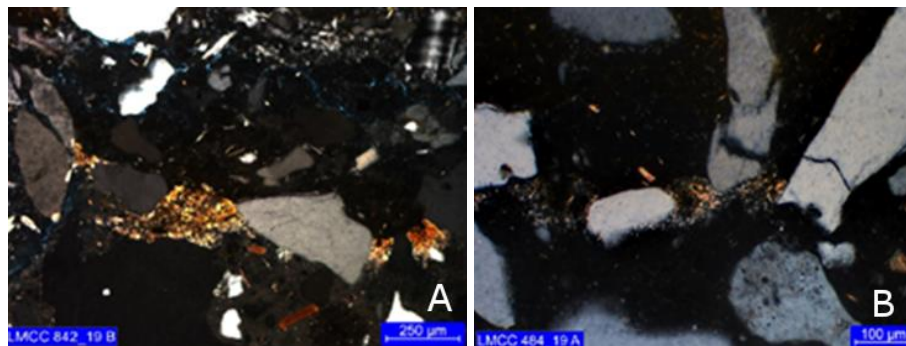


Figura 8. Presença de carbonatação (tons amarelados) no limiar entre as regiões atacadas (em cima) e aparentemente não atacada (embaixo) testemunhos (a) 1 e (b) 2. Polarização cruzada com condensador.

Em ambos os testemunhos (Figura 9), as três zonas apresentam abundante microfissuramento, sem preenchimento ou parcialmente preenchido por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa, gipsita.

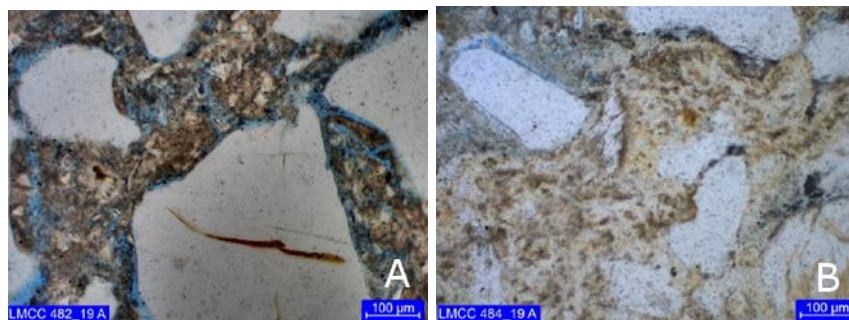


Figura 9. Zonas de microporosidade na pasta associadas a microfissuras em tons azuis testemunhos (a) 1 e (b) 2. Polarização simples, com condensador.

#### 4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A análise da microestrutura revelou consideráveis alterações mineralógicas na superfície atacada (Figura 10). Foram identificados na amostra cristais de fase cristalina sulfoaluminossilicática, contendo Ca, Fe e K. Na figura 10, as setas apontam para os locais de análise por sistema de energia dispersiva (EDS – Figura 11).

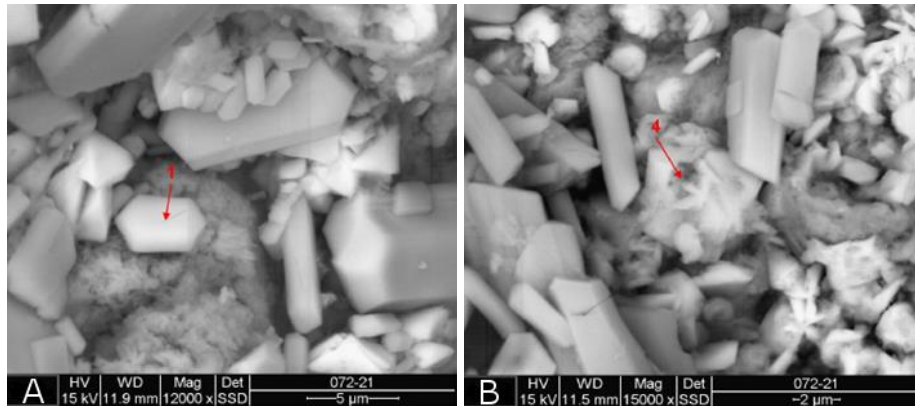


Figura 10. MEV material raspado fases cristalinas sulfoaluminossilicáticas, contendo Ca, Fe e K.

Na micrografia do material raspado não foi identificado a presença de cristais de portlandita, indicando que esta se dissociou completamente. Pode-se perceber que o ácido reduziu a matriz a um material mais poroso, consistindo de partículas menores.

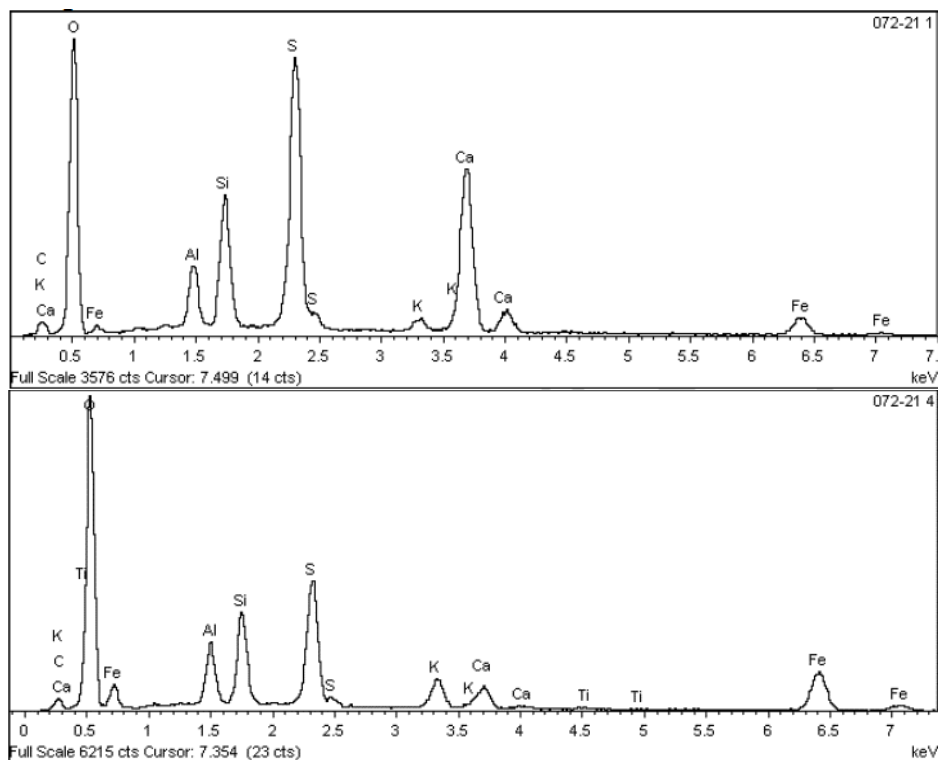


Figura 11. Espectros das microanálises pontuais indicadas na Figura 10 (a) e (b)

Na amostra intermediária foram analisados dois fragmentos da porção clara e escura. Na porção mais clara, foram identificados cristais de morfologia retangular de sulfato de cálcio hidratado (Foto 12.a), conforme espectro EDS (Figura 13) com fortes sinais de S e Ca, sugerindo a gipsita como componente principal e cristais de etringita (Foto 12.b)

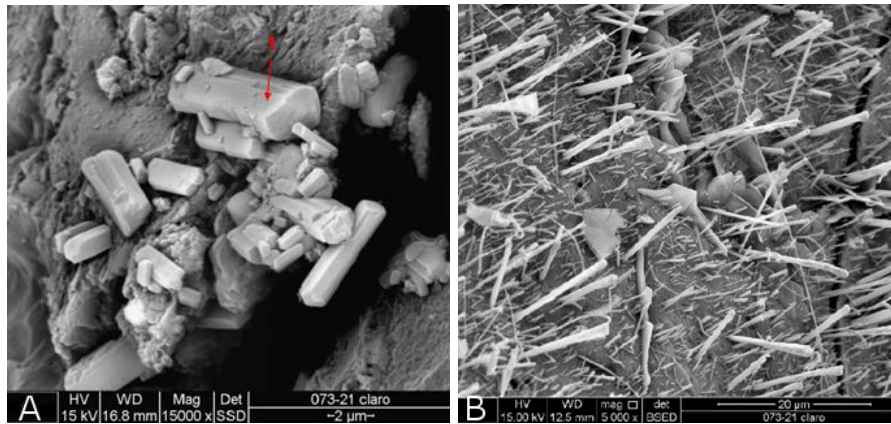


Figura 12. MEV amostra intermediária - fragmentos da porção clara (a) sulfato de cálcio hidratado e (b) cristais de etringita.

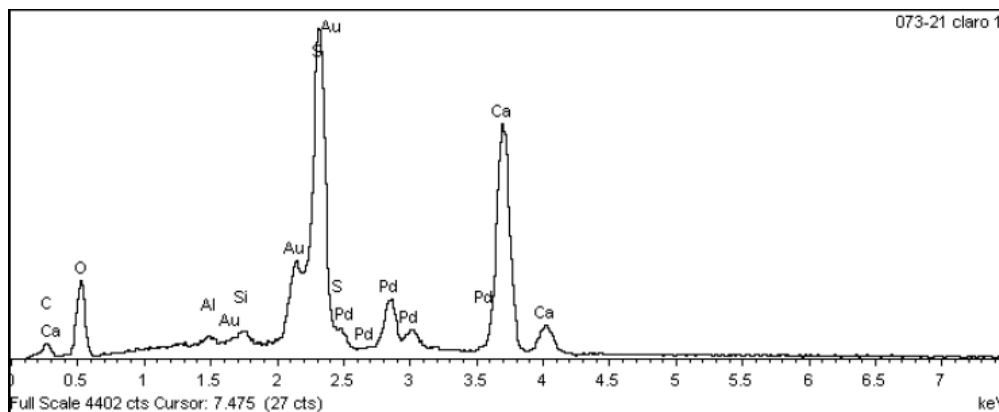


Figura 13. Espectro da microanálise pontual amostra intermediária da Figura 12.a

Nos fragmentos analisados da porção mais escura da amostra intermediária foram identificados cristais de aluminossilicato de cálcio com enxofre ou sulfoaluminossilicato de cálcio (Figura 14).

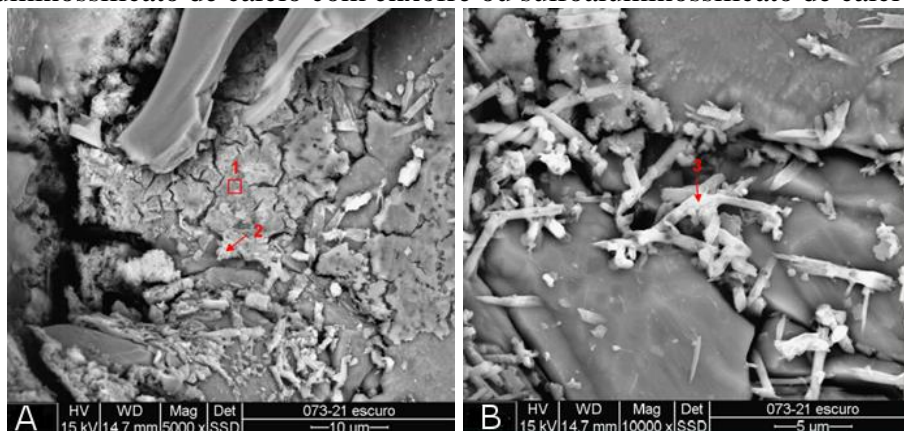


Figura 14. MEV amostra intermediária cristais de aluminossilicato de cálcio com enxofre ou sulfoaluminossilicato de cálcio - fragmentos da porção escura



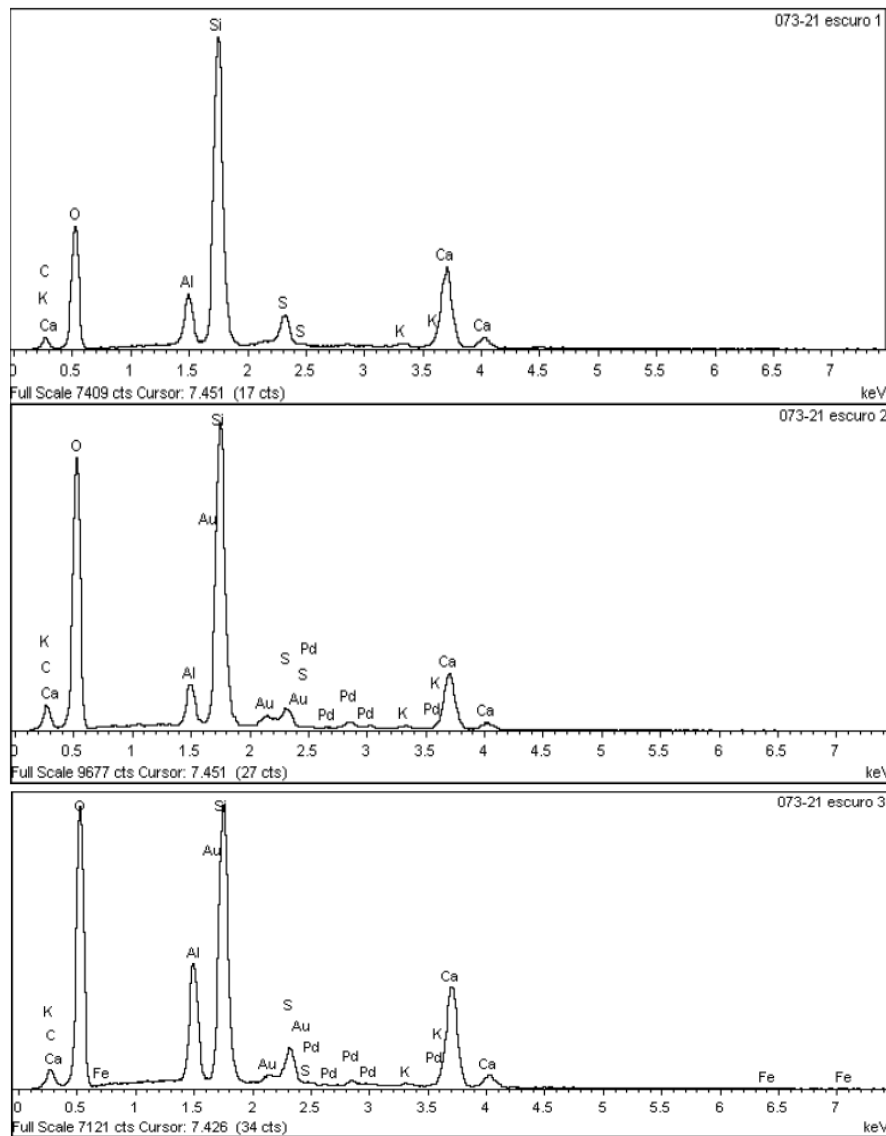


Figura 15. Espectros das microanálises pontuais indicadas na Figura 14 a e b.

Amostra mais interna, aparentemente não atacada, observa-se placas de portlandita com mais de 10µm com acículas de etringita não patológica em trama de C-S-H (Figura 16).

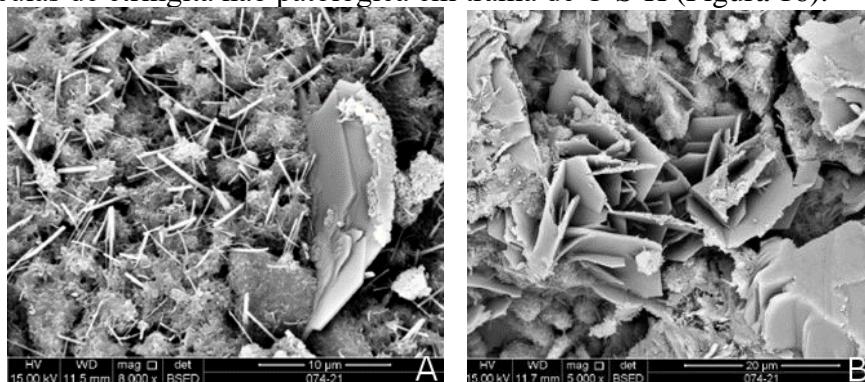


Figura 16. MEV amostra mais interna ampliação de (a) 10µm e (b) 20µm.

#### 4.6 Difração de raios x -DRX

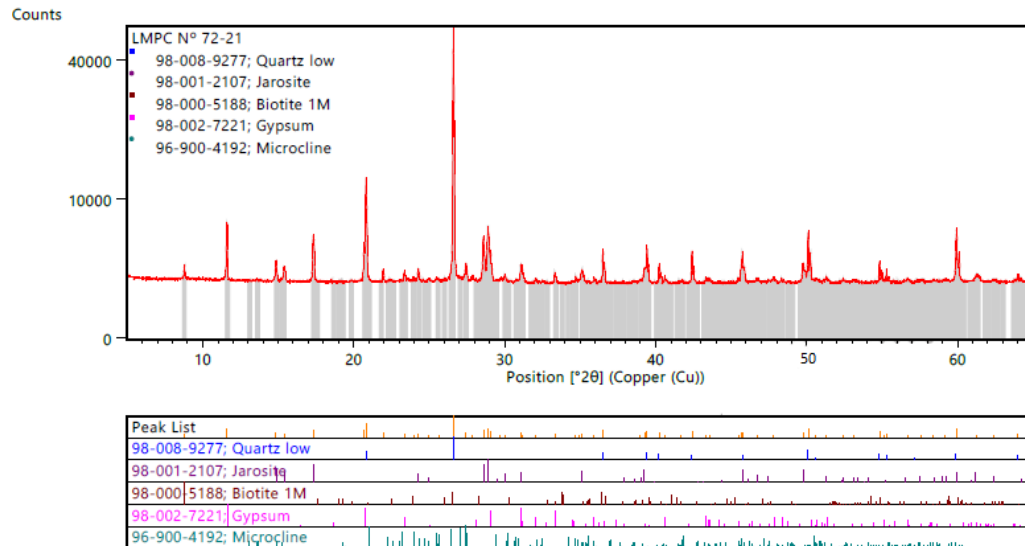


Figura 17. Difratoograma de raios X – material raspado.

Na amostra raspada (Figura 17) foi identificado a presença em maior concentração de Jarosita e Gipsita. Resultados similares foram encontradas por Tazaki et.al., (1992) em tubulações de concreto severamente corroídas. De acordo com os autores, sob condições de pH extremamente baixa a atividade bacteriana é capaz de quebrar a Pirita (dissulfeto de ferro,  $\text{FeS}_2$ ) para formar a Jarosita. Normalmente, os principais micro-organismos envolvidos nessas reações identificados são os *Thiobacillus ferrooxidans* e/ou *Thiobacillus thiooxidans*. No estudo de Song et.al., (2020), quando a superfície atacada do concreto atingiu a superfície das barras de aço, o processo de corrosão das barras foi acelerado pelo  $\text{H}_2\text{S}$ , formando sulfeto de ferro, sendo um dos compostos identificados  $\text{FeS}_2$ . Desse modo, é possível que formação da Jarosita seja oriunda do  $\text{FeS}_2$ , formado pela oxidação das barras de aço de 16mm localizadas na região atacada. A Gipsita também foi identificada como composto mais abundante na superfície atacada do concreto por autores como Fernandes et.al., (2012), Davis et.al., (1998), Song, et. al., (2018) e Song et. al., (2020).

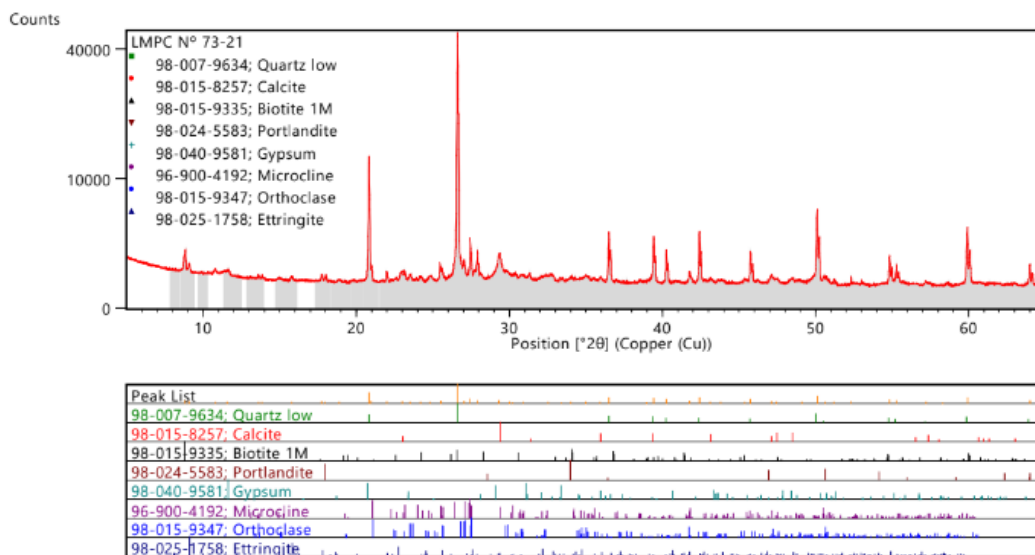


Figura 18. Difratoograma de raios X – amostra intermediária.



Os resultados obtidos pela DRX confirmam a presença de gipsita no concreto em todas as camadas analisadas. A presença de Gipsita identificada na camada mais interna (Figura 19), aparentemente não atacada, indica também o início da degradação nessa camada. A partir da amostra intermediária já é possível identificar a presença de Etringita, provavelmente devido à um pH mais elevado capaz de garantir a estabilidade da referida fase. A presença de calcita nas amostras intermediária e mais interna pode ser oriunda do produto da reação de carbonatação entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono.

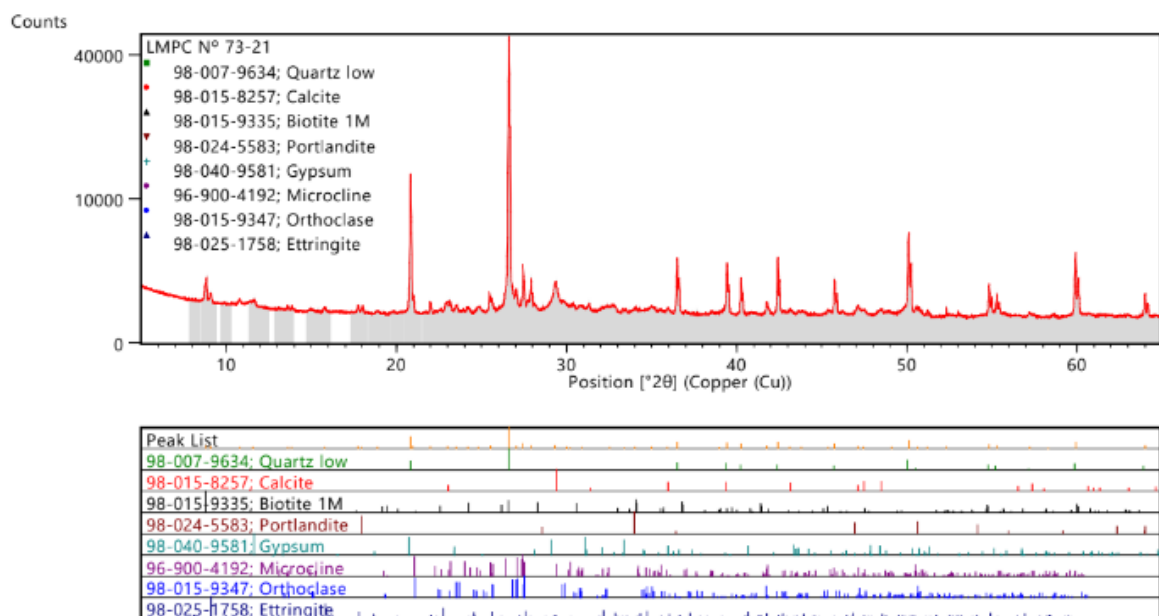


Figura 19. Difratoograma de raios X – amostra mais interna.

#### 4.7 Determinações químicas

Os resultados obtidos nas determinações químicas dos materiais, expressos na base original e na base seca estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados da determinação química da superfície

Determinações	Resultados, em %		
	Ataque com ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> )	Ataque com água (fração solúvel em água)	Diferença (fração solúvel em ácido)
Resíduo insolúvel	65,1	56,7	8,4
Ferro (Fe)	0,73	0,01	0,72
Sódio (Na)	0,04	0,02	0,02
Potássio (K)	0,11	0,01	0,10
Cálcio (Ca)	0,74	0,73	0,01
Magnésio (MgO)	0,01	0,01	0,00
Íons silicato (SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	0,49	0,38	0,11
Íons sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0,41	0,40	0,01
Íons cloreto (Cl <sup>-</sup> )	0,11	0,05	0,06

NOTA – (\*) O montante faltante para 100% é referente a água não determinada. Enfatiza-se que ambos os resultados das determinações se encontram na mesma base de cálculo e, por isso, foi possível determinar a diferença entre eles.

Os elementos encontrados na fração solúvel em água estão associados ao gel ácido formado de silicatos, sulfatos e cloretos de sódio, potássio, magnésio e cálcio. A amostra analisada apresentou pH 2,8 a 19,8°C. Esta condição favorece a colonização de microrganismos oxidantes de enxofre acidofílicos (ex. *Acidithiobacillus Thiooxidans* e *Acidithiobacillus Ferrooxidans*), os quais estão associados a oxidação severa do aço (Wu et.al., 2020), justificando a corrosão/dissolução das barras de aço de 16 mm de diâmetro. O resultado do pH, também, justifica a inexistência da Etringita na camada superficial. Os microrganismos acidófilos, além de oxidar o H<sub>2</sub>S em ácido sulfúrico, são capazes de oxidar o tiosulfato e enxofre elementar que por ventura estejam depositados na superfície do concreto (Wells et.al., 2009).

Quanto aos teores significativos de elementos encontrados na fração solúvel em ataque de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) (insolúvel em água, nas condições de ataque propostos no ensaio supracitado) estão associados a Jarosita [K<sub>2</sub>Fe<sub>6</sub>(OH)<sub>12</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>] e possível presença de hisingerita [Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>. 2H<sub>2</sub>O], hidróxido ferroso[Fe(OH)<sub>2</sub>] e cloreto ferroso [FeCl<sub>2</sub>].

Segundo Alexander e Fourie (2011), hidróxido de alumínio[Al(OH)<sub>3</sub>] e hidróxido de ferro [Fe(OH)<sub>3</sub>] podem precipitar na camada após a dissolução das fases aluminatos e/ou ferro-aluminatos dependendo da concentração do íon hidrogênio na solução - precipita hidróxido de ferro a um pH maior que 1,0 e hidróxido de alumínio precipita a um pH superior a 3,0.

O ácido sulfúrico biogênico anula o ambiente alcalino que inicialmente protege as barras de aço, ocasionando a corrosão das armaduras. A corrosão tradicional das barras de aço é um processo eletroquímico que provoca a dissolução do ferro, formando diversos produtos de corrosão, normalmente óxidos e hidróxidos de ferro. Entretanto, conforme apontado por Song et.al., (2020), quando o ataque por ácido sulfúrico biogênico atinge a superfície do aço, as reações e os produtos de corrosão podem ser diferentes. No trabalho dos autores, os principais produtos de corrosão das barras de aço incluem óxidos de ferro, oxihidróxidos de ferro, sulfetos de ferro, cloretos de ferro e sulfato de ferro. Embora os compostos contendo ferro sejam majoritariamente derivados da dissolução das barras de aço localizadas na região atacada, esses compostos podem ser oriundos também da dissolução da pasta cimentícia, já que o cimento Portland contém cerca de 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Jiang et.al., 2014). A formação da hisingerita, por exemplo, pode indicar a interação do Fe, produto da corrosão do aço e/ou da pasta cimentícia, com a Si oriunda da dissolução do C-S-H.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da inspeção da Estação Elevatória de Esgoto as seguintes conclusões podem ser inferidas:

1. Fatores como a temperatura e a turbulência do efluente influenciam na velocidade de degradação da estrutura, devido a maior liberação de sulfeto de hidrogênio no ar;
2. A resistência a compressão foi mantida preservada na parte íntegra da amostra, bem como sua alcalinidade, apesar da severa deterioração e carbonatação na região mais externa do concreto;
3. No ensaio petrográfico foi possível visualizar que a região atacada apresenta zonas de alterações distintas todas com presença abundante de microfissuras;
4. O ataque ácido inclui dissolução de fases de cimento, transporte das espécies químicas dissolvidas e (re) precipitação como minerais secundários, conforme observado no DRX e MEV/EDS. A gipsita, responsável pelo aspecto esbranquiçado observado na superfície do concreto, e a Jarosita foram os principais compostos identificados na superfície atacada. Além dos compostos citados, foram identificados hidróxido ferroso[Fe(OH)<sub>2</sub>] e cloreto ferroso [FeCl<sub>2</sub>] e a possível presença de hisingerita, indicativo da interação da sílica oriunda da dissolução do C-S-H com outros produtos da corrosão do aço e/ou da pasta cimentícia. Os resultados demonstram que quando o ácido atinge armaduras a camada passivadora é anulada, passando a existir ambos os produtos da corrosão na superfície atacada, tanto da

dissolução da pasta cimentícia quanto do aço, assim como uma possível interação entre eles. A Etringita só foi detectada a partir da camada intermediária do concreto, confirmando ser um produto intermediário da reação.

5. A estrutura analisada apresentou uma rápida deterioração em um curto período, apresentando a necessidade de intervenção antes do término de vida útil previsto, indicando que as especificações normativas vigentes sem outras medidas de proteção não garantem a durabilidade do concreto em ambientes com alta concentração de gás sulfídrico.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo por permitir a disponibilização da análise da estrutura e por subsidiar todos os ensaios apresentados.

## 7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). *NBR 7680: Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR 9917:2009 Agregados para concreto - Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 13810:1997 Água - Determinação de metais - Método de espectrometria de absorção atômica por chama*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM International. (2018). *ASTM C114/2018 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*
- ASTM International. (2017). *ASTM C 856/2017 Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*
- Alexander, M. G., Fourie, C. (2011), *Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack*. Materials and Structures, v. 44, pp. 313–330. DOI: [10.1617/s11527-010-9629-1](https://doi.org/10.1617/s11527-010-9629-1)
- Davis, J. L., Nica D., Shields K., Roberts D. J. (1998), *Analysis of concrete from corroded sewer pipe*. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 42, pp. 75–84. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(98\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)00049-3)
- Duchesne, J., Bertron, A. (2013), *Leaching of cementitious materials by pure water and strong acids (HCl and HNO3)*. In: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments: State-of-the-Art Report, RILEM TC 211 - PAE, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3_4)
- Eřtoková, A., Harbul'áková, V. O., Luptáková, A., řtevilová, N. (2012), *Study of deterioration of concrete influenced by biogenic sulphate attack*. Procedia Engineering, v. 42, pp. 1731-1738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.566>.
- Fernandes, I. et al. (2012), *Identification of acid attack on concrete of a sewage system*. Materials and Structures, v. 45, n. 3, p. 337–350. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9769-y>.
- House, M. W., Weiss, W. J. (2014), *Review of Microbially Induced Corrosion and Comments on Needs Related to Testing Procedures*. Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, pp. 94-103. DOI: <https://doi.org/10.5703/1288284315388>.
- Jiang, G., Wightman, E., Donose, B., Yuan, Z., Bond, P., Keller, J. (2014), *The role of iron in sulfide induced corrosion of sewer concrete*. Water research. V.49. pp. 166-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.007>.
- Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., Verstraete, W.

- (2000), *Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete*. Cement and Concrete Research, v. 30, pp. 623-634. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00219-2).
- O'Connell, M., McNally, C., Richardson, M. (2010), *Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review*. Cement and Concrete Composites, v 32, p 479–485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001>.
- Scrivener, K., Belie, N. (2013), *Bacteriogenic Sulfuric Acid Attack of Cementitious Materials in Sewage Systems*. In: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments, pp.305-318. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3_12).
- Song, Y., Tian, Y., Li, X. Wei, J., Zhang, H., Bond, P., Yuan, Z., Jiang, G. (2018), Distinct microbially induced concrete corrosion at the tidal region of reinforced concrete sewers. Water Research. 150. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.083>.
- Song, Y., Wightman, E., Kulandaivelu, J., Bu, H., Wang, Z., Yuan, Z., Jiang, G. (2020), *Rebar corrosion and its interaction with concrete degradation in reinforced concrete sewers*, Water Research. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115961>.
- Song, Y., Chetty, K., Garbe, U., Wei, J., Bu, H., O'moore, L., Jiang, G. (2021), *A novel granular sludge-based and highly corrosion-resistant bio-concrete in sewers*. Science of The Total Environment, 791, 148270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148270>.
- Tazaki, K., Mori, T., Nonaka, T. (1992), *Microbial jarosite and gypsum from corrosion of Portland Cement concrete*. Canadian Mineralogist. v. 30, pp. 431-444.
- Wells, T., Melchers, R. E., Bond, P. (2009), Factors involved in the long term corrosion of concrete sewers. In: Annual Conference of the Australasian Corrosion Association, 49th.
- Wu, L., Hu, C., Liu, W.V. (2018), *The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel—A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada*. Sustainability. v. 10, 517. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10020517>.
- Wu, M., et al. (2020), *Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena*. Construction and Building Materials, v. 239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117813>.
- Yuan, H. (2013), *Degradation modeling of concrete submitted to biogenic acid attack*. Tese de Doutorado, Université Paris-Est. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.002>.

## Diagnóstico e proposta de solução para as lesões presentes na laje do Convento de Santa Clara de Asís

A. Hernández Oroza<sup>1\*</sup> , A. Diomedes Almeida<sup>1</sup>, A. Romeo Sáez<sup>1</sup>, P. R. Cuétara Pérez<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [ahernandez@proyectos.ohc.cu](mailto:ahernandez@proyectos.ohc.cu)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

Recepção: 11/01/2022 | Aceitação: 20/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

### RESUMO

Para a restauração dos pisos de madeira do Convento de Santa Clara, foram aplicados ensaios de resistografia não destrutiva e penetrometria, estudos biológicos da madeira e técnicas geomáticas para análise de deformação e dimensionamento das vigas. No presente trabalho, os resultados do diagnóstico mostraram que 65% da laje de 98 vigas é afetada por podridão e organismos xilófagos. Estudos de densidade por comparação com valores de referência, mostraram uma perda na dureza da madeira. Os resultados concluem na necessidade de substituição de 17 vigas, e do reforço dos pés direitos e secções de vigas deslizantes.

**Palavras-chave:** ensaios não destrutivos, diagnóstico, edificações, patrimônio, geomática.

**Citar como:** Hernández Oroza, A., Diomedes Almeida, A., Romeo Sáez, A., Cuétara Pérez, P. R. (2022), “*Diagnóstico e proposta de solução para as lesões presentes na laje do Convento de Santa Clara de Asís*”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 296 – 310, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

<sup>1</sup> Departamento de Diagnóstico y Levantamiento. Empresa Filial RESTAURA, Oficina del Historiador de La Habana, La Habana Vieja, Cuba.

#### Contribuição de cada autor

Este trabalho do autor A. H. Oroza contribuiu com o projeto da investigação e a realização de ensaios na obra (100%), a redação do texto (50%), a discussão dos resultados (100%) e a revisão (50%). O autor A. Diomedes Almeida contribuiu com o projeto da investigação e a realização de ensaios em obra (100%), redação do texto (20%) e revisão (25%). O autor A. Romeo Sáez contribuiu para a investigação biológica (100%), redação do texto (20%) e revisão (25%). O autor P. R. Cuétara Pérez contribuiu com o levantamento com escâner laser e processamento digital 3D/ortoimágenes (100%) e redação do texto (10%).

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.



## **Diagnosis and solutions proposal to the damages present in the ceiling of the Convent of Santa Clara de Asís**

### **ABSTRACT**

For the restoration of the wooden ceilings of the Convent of Santa Clara, resistography and penetrometer tests, biological studies of the wood, and geomatic techniques for analysis of deformation and dimensioning of the beams were applied. In the present work, the results of the diagnosis showed that 65% of 98 beams is affected by rot and the presence of xylophagous organisms. Density studies by comparison with reference values, showed a loss in the hardness of the wood. The results conclude in the need to replace 17 beams, and the reinforcement of the wood pillars and sections of sliding beams.

**Keywords:** non-destructive testing, diagnosis, buildings, heritage, geomatics.

## **Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado de Convento de Santa Clara de Asís**

### **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es diagnosticar y proponer solución a las lesiones presentes en los forjados de madera del Convento de Santa Clara. Para ello, se aplicaron ensayos no destructivos de resistografía y penetrómetro, estudios biológicos a la madera, y técnicas geomáticas para análisis de deformación y dimensionamiento de las vigas. Los resultados del diagnóstico demostraron que el 65% del forjado compuesto de 98 vigas, está afectado por pudrición y organismos xilófagos. Los estudios de densidad mediante comparación con valores de referencia, mostraron pérdida en la dureza de la madera. Los resultados concluyen que la restauración implica la necesidad de sustituir 17 vigas, y el refuerzo de los pies derechos y secciones de vigas de corredera.

**Palabras clave:** ensayos no destructivos, diagnóstico, edificaciones, patrimonio, geomática.

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

A conservação de edifícios patrimoniais continua a ser um dos problemas mais complexos no campo da construção hoje. Como consequência dos séculos de exposição, essas estruturas foram submetidas à influência dos efeitos das mudanças climáticas e do aumento da atmosfera de gases corrosivos ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ ), que levou a uma deterioração acelerada de seus materiais constituintes (pedra, metal, madeira) devido a reações químicas, colonização biológica e formação de crostas negras (Kherais et al., 2021; Kumar and Imam, 2013; Sesana et al., 2021). Isso pode significar um risco significativo para a durabilidade do patrimônio cultural, que deve ser devidamente avaliado por um grupo de trabalho multidisciplinar, apoiado em diferentes técnicas de teste, muitas das quais baseadas em técnicas destrutivas como a extração de tubos de ensaio e a realização de ensaeadas. No entanto, quando se trata da conservação do patrimônio edificado, este tipo de estudos invasivos deve ser evitado de forma a manter a integridade da obra, dos seus elementos estruturais e, conseqüentemente, do seu valor patrimonial.

Atualmente existem novas técnicas de ensaios não destrutivos (END) que fornecem informações com alto nível de precisão, exatidão, repetibilidade e confiabilidade. As aplicações desenvolvidas são baseadas em diferentes princípios, como eletromagnético (ultrassom, potencial, resistividade), impacto (esclerometria, penetrômetro), geomática (scanner a laser, fotogrametria), emissivo (termografia), entre outros.

A análise quantitativa obtida a partir desses resultados durante o diagnóstico permite identificar as causas das lesões, avaliar o grau de deterioração ou apodrecimento (Liñán et al., 2011) e, em seguida, a tomada das ações corretivas e de conservação necessárias.

O Convento de Santa Clara de Asís foi inaugurado em Havana em 1644, tornando-se o primeiro convento religioso fundado em Cuba. Em 2018, o Escritório do Historiador de Havana (OHCH) iniciou um projeto de restauração e recuperação que envolveu profissionais e estudantes de diferentes ramos das carreiras técnicas e profissionais ligados ao campo da construção e conservação do patrimônio edificado. Os resultados obtidos destas investigações permitiram estabelecer prioridades e metodologias para a sua intervenção e recuperação gradual (Guevara et al., 2019).

O objetivo deste trabalho é avaliar o estado de conservação na estrutura do piso de madeira da galeria de circulação localizada no piso superior do primeiro claustro, para o qual se combinou uma série de ENDs que permitiram identificar as patologias presentes e determinar a magnitude das lesões nas traves e pés direitos que a compõem. Isso implica em uma proposta de solução que é discutida ao final do trabalho.

## 2. ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA

### 2.1 Identificação do objeto de estudo

A estrutura localiza-se no piso superior do primeiro claustro, em direção ao bloco A (Figura 1). Baseia-se numa laje de madeira e prancha composta por 98 vigas de 9 cm x 13 cm (base x altura), espaçadas entre 43 cm e 45 cm com inclinação de 17 graus da parede para os pés direitos, apoiadas eixo 3 na parede de taipa que compõe a igreja, e ao longo do eixo 4 em uma viga deslizante que repousa sobre 13 pés retos. O feixe deslizante é formado por 12 feixes unidos pelo raio de Júpiter, que repousam sobre os pés direitos (Tabela 1). O telhado é feito de telhas cerâmicas vermelhas.

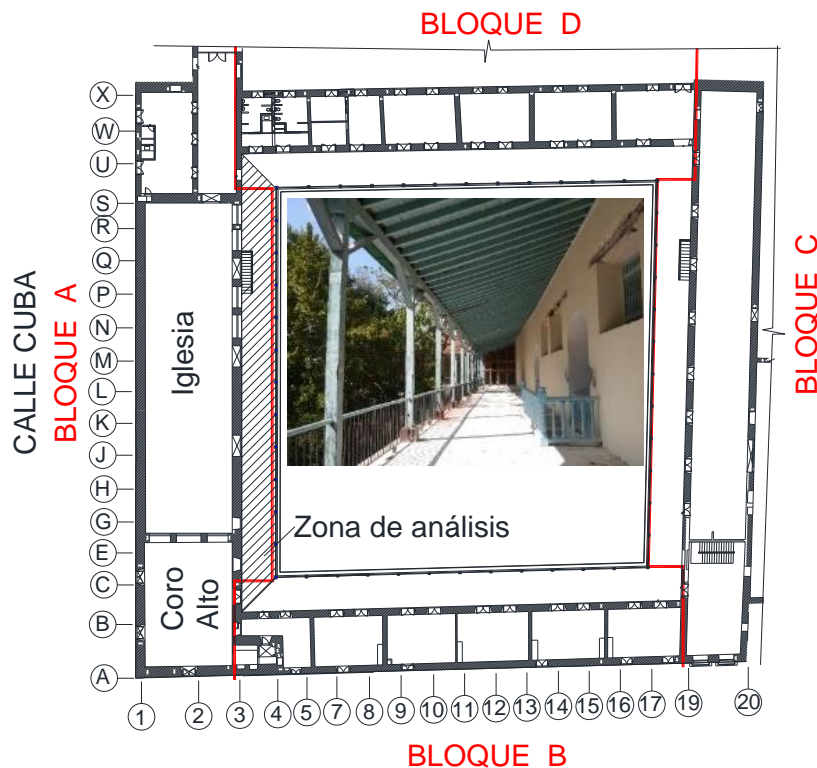


Figura 1. Esboço da planta do primeiro claustro, placas e fotografia da galeria estudada

## 2.2 Análise e seleção de ensaios não destrutivos

O objetivo do END é determinar a qualidade e integridade do material e seus componentes sem afetar suas propriedades, funções e utilidade por meio de inspeção, medição ou avaliação (Helal et al., 2015; Workman and Moore, 2012). A aplicação deste tipo de técnicas para estudar o estado de conservação de edifícios históricos tem ganhado validade, principalmente devido à vantagem de não necessitar de deterioração adicional nos elementos estruturais do edifício, para conhecer o seu estado de conservação (Binda and Saisi, 2009; Liñán et al., 2011; Ortega and Ripani, 2007). Por ser um material orgânico, a madeira é suscetível a processos de degradação causados por insetos xilófagos, ações mecânicas, exposição ao intemperismo, apodrecimento por fungos ou ação do fogo.

Em edificações patrimoniais, o uso de END agrega alto valor ao estudo diagnóstico, pois os elementos estruturais da madeira não são afetados ou recebem um impacto insignificante. Como resultado, é possível obter informações técnicas com precisão suficiente para estimar o estado de conservação, qualidade e durabilidade da obra ou objeto de trabalho estudado (Hasníková and Kuklík, 2014; Morales-Conde et al., 2013; Palaia et al., 2008).

As técnicas de trabalho aplicadas foram:

- Inspeção visual das lesões presentes em todos os elementos estruturais
- Medição de parâmetros ambientais e umidade superficial de elementos de madeira
- Identificação das espécies de madeira presentes
- Dimensionamento dos elementos de madeira que compõem o piso
- Aplicação de termografia infravermelha
- Detecção de danos internos em madeira por resistografia
- Estimativa de dureza por penetrômetro
- Avaliação estrutural a partir de um modelo 3D obtido com um scanner a laser terrestre (TLS)
- Elaboração de plantas baixas e cortes em plataforma CAD

### 2.2.1 Termografia infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva que permite a análise patológica através da emissão de energia térmica pelos materiais. A leitura da radiação emitida na faixa do infravermelho permite interpretar a temperatura do material com base na condutividade térmica ou no calor específico. Dependendo das características e condições de exposição, este material pode reter ou emitir calor. A emissividade é definida pela Lei de Stefan-Boltzman, que afirma que a radiação é proporcional à temperatura do corpo e às propriedades térmicas do material (Morales-Conde et al., 2013). As imagens foram tiradas com uma câmera FLIR E75 e pós-processadas usando o software FLIR Tools.

### 2.2.2 Resistografia

O resistógrafo é um equipamento especialmente desenvolvido para identificar facilmente áreas com cavidades, deformações, amolecimentos, entre outras lesões na madeira (Ortiz et al., 2017). Foi utilizado um equipamento modelo IML Resi PD400 e os resultados foram processados com o software PD-Tools. A resistografia foi realizada nos elementos selecionados com base nos danos encontrados durante a punção e inspeção visual das lesões. Nas vigas, as medições foram feitas principalmente nas extremidades das vigas que estão embutidas na parede, em três direções: diagonal, horizontal e vertical dependendo das patologias de cada elemento testado. Nos pés direitos, as medições foram feitas na diagonal nas bases para determinar o estado de conservação no suporte, e na horizontal em diferentes alturas, a partir da base com uma separação de 150 mm entre cada ponto de medição resistográfica.







### 2.2.3 Dureza por penetrômetro Pilodyn

É uma ferramenta que permite estimar a dureza da madeira através da penetração de uma haste de aço de 1,5 mm de diâmetro, a partir de um tiro em direção ao elemento de madeira (Palaia et al., 2008). A profundidade de penetração da haste varia dependendo da densidade do material. Devido ao fato de o resultado obtido ser adimensional, é necessário para sua correta interpretação realizar várias medições no mesmo elemento e referenciá-lo a um espécime de madeira da mesma espécie, em umidade conhecida (Kloiber, 2007; Kuklík, 2007).

### 2.2.4 Identificação de espécies madeiras

O ensaio foi realizado para conhecer as espécies madeiras presentes nos elementos que compõem a forja da galeria e os montantes que a sustentam. Amostras de 1 cm<sup>3</sup> de volume foram retiradas dos elementos de madeira presentes na área de análise. Cortes histológicos foram feitos nas três direções (transversal, tangencial e radial) para observar a disposição dos elementos constituintes por espécie e foram comparados com as descrições anatômicas de referência e as chaves de identificação relatadas e classificadas dentro de uma xiloteca. Os caracteres anatômicos macroscópicos avaliados foram cor, textura, cheiro (naqueles que o possuíam), brilho e presença de anéis de crescimento. As microfotografias foram tiradas com uma câmera digital acoplada a um microscópio Nikon modelo SMZ745. As imagens foram processadas usando o programa IC Capture versão 2.4. As espécies de madeira foram identificadas graficamente usando os seguintes símbolos (Tabela 1).

Tabela 1. Representação gráfica das espécies de madeira identificadas na laje estudada

Ícone/Nome		
 Ácana	 Pinheiro	 Caguairán
 Cedro	 Baría	 Najesí

### 2.2.5 Levantamento 3D e processamento digital

Foi utilizado o scanner a laser Z+F Imager® 5010c. Foram feitos 11 posicionamentos, com distância média entre cada um de 5 m. No equipamento, a resolução e a qualidade durante a varredura foram configuradas em “Alta” (Alta), além da aquisição de fotos. Esta configuração no TLS implica que a 10 metros do local do emissor, a distância máxima de erro entre os pontos marcados pelo laser é de 6 mm. Com este cronograma de trabalho, o tempo de atraso aproximado é de 8 minutos para cada posicionamento, no qual é obtido um modelo final de pontos com coordenadas *x*, *y* e *z* conhecidas, com seus valores RGB.

### 2.2.6 Geração de modelos 3D e extração de ortoimagens

Para os diferentes tipos de análises (geométricas, estruturais, etc.), que podem ser feitas em um elemento finito, é necessário obter um modelo 3D que possa ser facilmente manipulável e mensurável por programas convencionais existentes. As informações obtidas a partir de um levantamento 3D fornecem uma descrição quase contínua da superfície escaneada, o que possibilita identificar e quantificar anomalias nos elementos como assimetrias, deformações, descontinuidades, entre outras lesões que podem ser difíceis ou impossíveis de identificar com o olho nu (Tucci and Bonora, 2017). As ortoimagens podem ser extraídas dos modelos 3D, o que permite obter uma projeção ortogonal do modelo de pontos, que tem a mesma validade métrica de um desenho em escala tradicional (Figura 2). Um software comercial baseado em CAD permite a importação da ortoimagem, possibilitando a realização de desenhos precisos que posteriormente podem ser visualizados e analisados em outros ambientes de trabalho digital.



Figura 2. Ortoimagem obtida da galeria do bloco A

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Resultados da inspeção organoléptica

Da viga 1 a 17, o piso é suportado por um sistema de escoramento devido ao risco de colapso devido à deterioração avançada por apodrecimento, bem como à ausência de várias tábuas e rufos. Esta situação ocasionou uma queda no restante da laje e a ruptura de alguns elementos.

A cobertura é afetada pela proliferação de plantas invasoras em toda a galeria, o que leva ao aumento do teor de umidade na madeira, principalmente em épocas de chuva, bem como ao peso adicional que compromete a durabilidade das coberturas. área. O resultado do diagnóstico identificou o apodrecimento como as lesões mais recorrentes, principalmente nas articulações devido à colonização por fungos, desfibramento devido ao ataque de cupins subterrâneos do gênero *Coptotermes*, e falhas de flexão em vigas associadas à perda de capacidade de suporte das feixes elemento.

Os montantes que suportam a laje têm uma base de betão sobre o suporte, que responde a uma intervenção realizada na década de 1980. Na maioria destes, a base encontra-se fissurada em resultado do aumento de volume sofrido pela secção de madeira embutida, como consequência da acumulação de humidade no interior. O concreto não é capaz de absorver as tensões geradas no interior do material devido às variações de volume sofridas pela madeira, o que as faz fraturar.



Alguns pinos estão mais deteriorados do que outros devido ao fato de terem sido utilizadas madeiras de natureza diferente, razão pela qual suas capacidades de absorção e as tensões exercidas variam em cada caso.

### 3.2 Dimensionamento e deformação a partir de dados TLS

A alta precisão dos dados obtidos pelo scanner a laser a partir da união das nuvens de pontos e da obtenção do modelo 3D, permite que as medições dos elementos da laje sejam realizadas sem a necessidade de intervenção sobre eles. Para trabalhar com cortes representativos do mesmo e do pé direito, foram estabelecidas regiões e as vistas foram ajustadas para obter imagens mensuráveis. No caso do piso de madeira, foi extraída uma seção entre as vigas 35 a 49, enquanto para os elementos de apoio, foi selecionada uma seção das vigas 5 e 6. Os resultados são mostrados na figura 3. resumo das esquadrias é indicado na tabela 2.

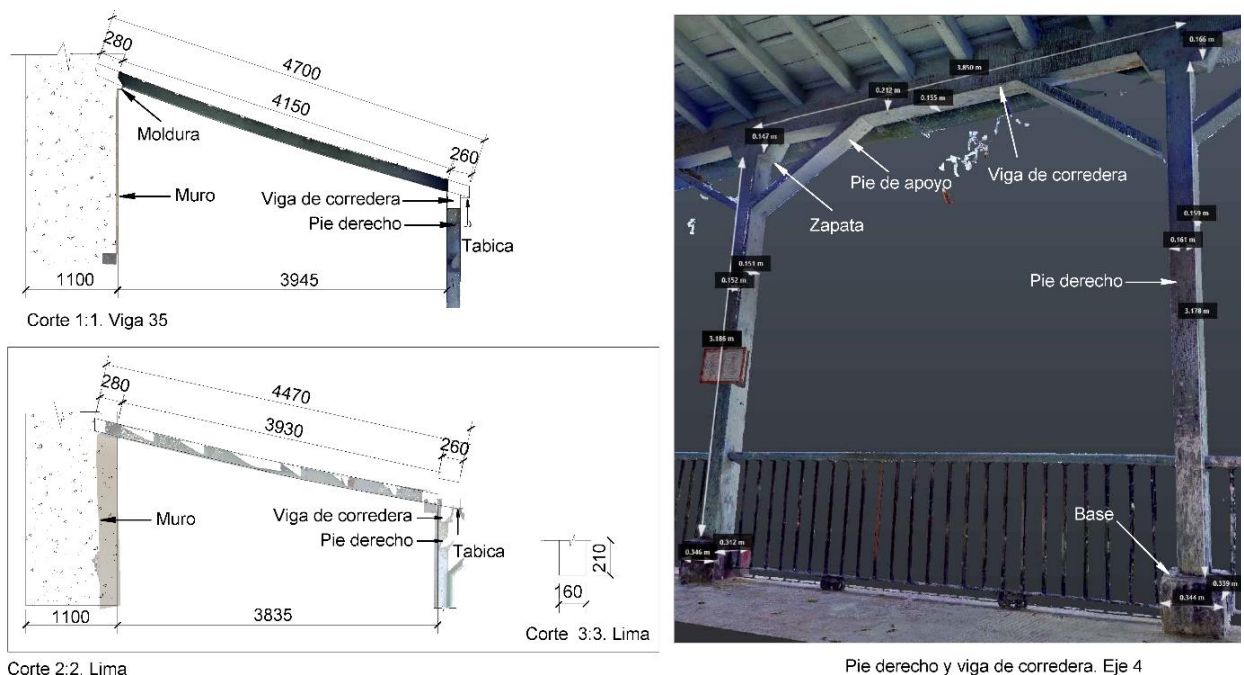


Figura 3. Dimensionamento e deformação (em mm) dos elementos de piso dos modelos 3D

Tabela 2: Dimensões gerais dos elementos do piso

Elemento	Base (cm)	Altura (cm)	Espaçamento (cm)
Feixe	9-10	13	43-45
Tabela	45-48	18-24	-
Piscando	45-48	5-6	31-38
Lima	16	21	-
Feixe deslizante	15-16	21	-
Sapato	15-16	16-17	-
Pé amigo	5	16	-
Pé direito	15-16	334-372	360-370
Base do pé direito	30-40	27-30	-

Para a análise estrutural das vigas da laje, as ortoimagens foram extraídas com o software Reconstructor, e os cortes foram feitos com o software Autodesk Recap da viga número 17 a 98. Todas as vigas que compõem a laje apresentam deformações em maior ou menor grau ( seta), e alguns apresentam falhas de flexão devido à diminuição de sua capacidade de carga. A norma cubana (NC 53-179:88, 1988), estabelece que a deflexão máxima admissível é  $1/240$  de luz para carga total. Isso indica que a deflexão admissível para as vigas do piso é de aproximadamente 1,5 cm, mas os valores obtidos no local são de 2 cm a 4 cm superiores aos aceitáveis pelo cálculo. A norma estabelece que a deflexão das vigas aumentará para períodos de carga superiores a 10 anos em 50% para madeira seca e 100% para madeira úmida. Considerando isso, a deflexão permitida aumentaria em 2,25 cm e 3,0 cm, respectivamente, para os quais ainda existem diferenças entre os valores permitidos e reais (Figura 4). Importa referir que nem todas as deformações máximas encontradas se situam no centro do vão, devido ao facto de existirem zonas onde o elemento se encontra mais deteriorado do que outros; é por isso que as vigas se deformam e falham na área mais vulnerável. Identificou-se que nem todas as vigas são da mesma espécie de madeira, razão pela qual sua dureza e resistência à flexão também variam. Nos pés 1 e 7 direitos, a deterioração das articulações provocou o deslocamento da mesma e de todos os elementos que a conjugam. Esses movimentos verticais que os pés direitos sofreram variam entre 3,5 cm - 20 cm aproximadamente, e a separação no raio de Júpiter entre os feixes que compõem o feixe deslizante varia entre 1 cm - 2 cm, o que representa deslocamentos consideráveis. Para avaliar a deformação das vigas e a densidade que apresentam, foi realizada a identificação das espécies de madeira, a partir da coleta de amostras diretamente das vigas e montantes. As espécies de madeira foram identificadas em um laboratório biológico e as densidades obtidas com um penetrômetro foram comparadas com os valores de referência informados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Agrofloretais (INAF).

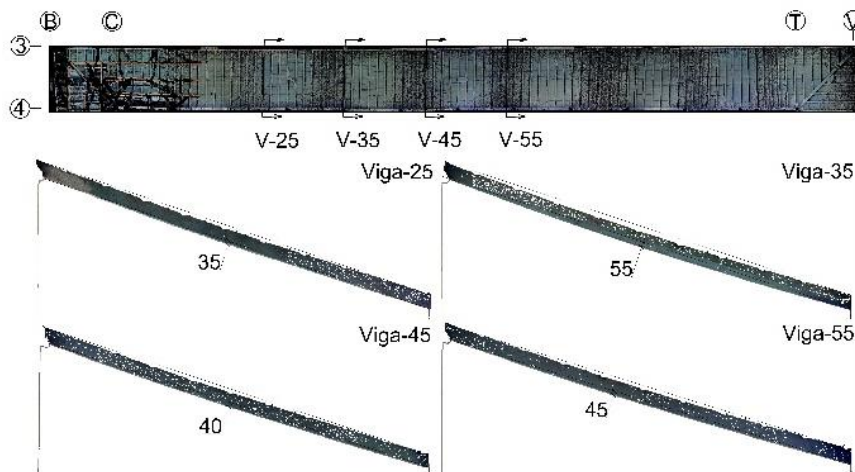


Figura 4. Deformações de algumas vigas de piso (seta em mm)

### 3.3 Espécies de madeira identificadas

Através da aplicação do método de anatomia comparada a partir dos cortes histológicos feitos nas direções transversal, tangencial e radial, obteve-se como resultado que as espécies de madeira que formam a estrutura do piso e o sistema de sustentação dos pés direitos são: cedro (*Cedrela odorata*), pinheiro (*Pinus sp.*), baría (*Cordia gerascantus*), caguairán (*Guibourtia hymenifolia*) e acana (*Manilkara grisebachii*). A Figura 5 mostra os cortes histológicos feitos para a identificação das espécies de madeira existentes.

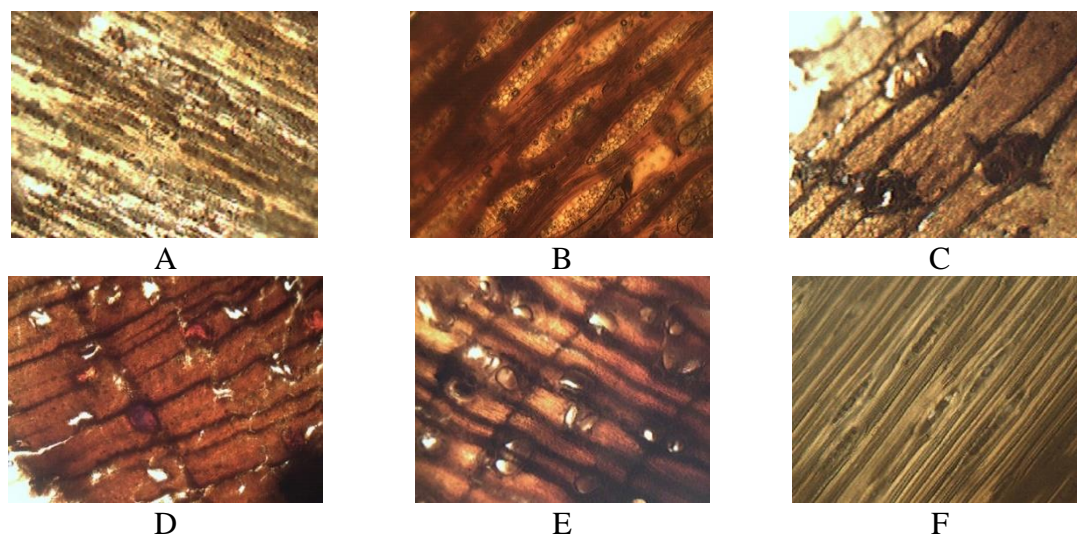


Figura 5. Cortes histológicos em 40x das espécies de madeira identificadas: A- ácana (corte longitudinal), B- baría (corte longitudinal), C- caguairán (corte transversal), D- cedro (corte longitudinal), E- najesí (corte transversal), F- pinho (corte longitudinal)

### 3.4 Análise dos resultados do diagnóstico

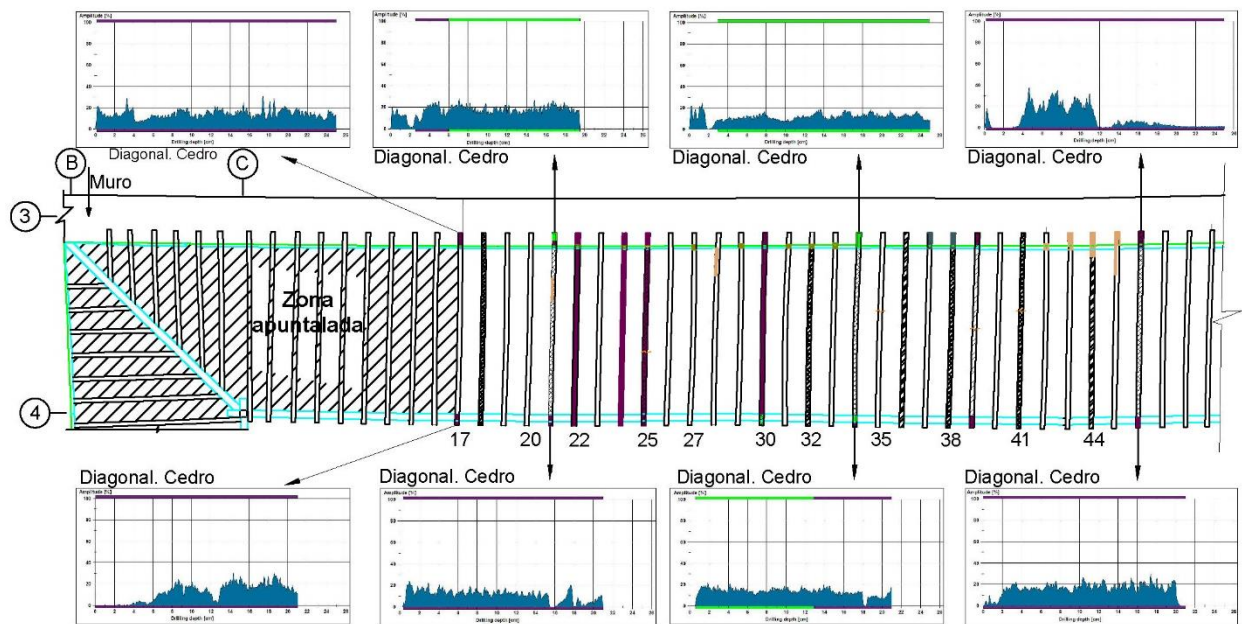
O teor de umidade medido nas vigas do piso está entre 9%-19%, nos pés direitos entre 11%-17% e na viga deslizante entre 11%-12%. As imagens termográficas obtidas refletiram como a parede de suporte apresenta áreas de alta umidade, o que favorece a absorção de água na madeira por ser um material higroscópico.

No caso dos montantes e da viga deslizante, os elementos estavam parcialmente molhados porque estão expostos à luz solar e suas condições de secagem e ventilação são mais favoráveis que as das vigas do piso. No entanto, em épocas de chuva e eventos climáticos extremos, essa mesma exposição faz com que a deterioração seja mais acelerada e favorece a proliferação e ataque de organismos degradadores de madeira.

Na análise com a câmera termográfica, foram identificadas variações de temperatura de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  em diferentes pontos de um mesmo elemento, o que leva a deformações térmicas na laje. No caso das vigas, os valores mais frios encontram-se junto às tábuas e na parede do eixo 3, onde as diferenças mais consideráveis aparecem na zona escorada e junto ao piso. Quando chove, a água se infiltra principalmente pelas áreas onde o sistema de impermeabilização é menos preservado e onde há maior presença de plantas invasoras, o que provoca o acúmulo de água, tanto na laje quanto na parede. O grau de saturação dos elementos da madeira varia de acordo com a espécie, o nível de exposição e as condições ambientais, o que leva ao desencadeamento de processos patológicos que enfraquecem suas propriedades mecânicas. Outras lesões identificadas com a termografia foram variações de temperatura no piso, associadas a desníveis ou danos que favorecem o acúmulo de água da chuva, e favorecem a absorção por capilaridade nos pés direitos da galeria. Estando embutido em uma base de concreto que funciona como uma camada impermeável, a secagem dentro da base é muito ineficiente e acelera o apodrecimento da madeira.

A análise realizada com o resistógrafo permitiu identificar que das 98 vigas que compõem a laje, 64 delas apresentam diferentes manifestações patológicas associadas à deterioração por exposição aos ciclos de molhagem e secagem. A resistografia iniciou-se na zona da junção por ser a zona mais vulnerável, e consoante o dano detetado, foram feitas medições também no centro do vão ou junto aos apoios (Figuras 6 e 7).





Leyenda:

- desfibrização
- decair
- rachaduras
- amolecimento
- madeira danificada
- madeira saudável

Figura 6. Resultados de ensayos de resistografía y lesiones en elementos del forjado entre las vigas 1-49

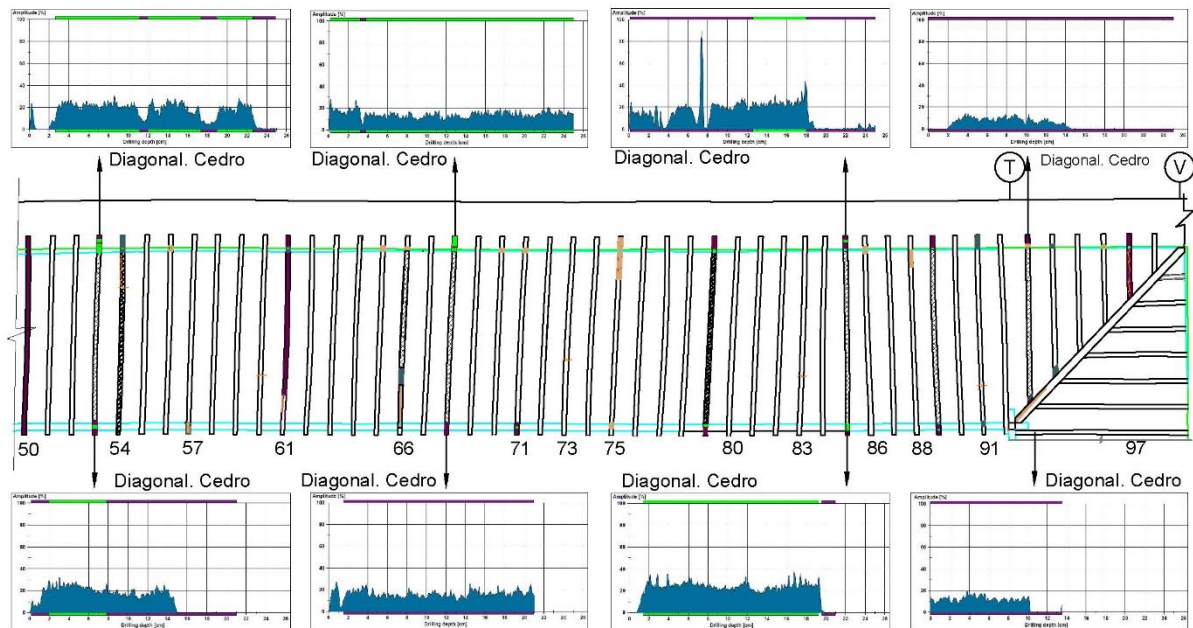


Figura 7. Resultados dos testes de resistografía e lesões em elementos de piso entre vigas 50-98

No caso das pernas direitas, a resistografía mostrou baixos valores de resistência à penetração para todas elas, e anomalias semelhantes às detectadas nas vigas de madeira. A extensão das lesões situa-se entre 150 mm e 750 mm da base de concreto para cima, e em mais de 50% dos pés direitos localiza-se nos primeiros 150 mm de altura.

A viga deslizante, com extensão de 45,5 m, é composta por seções, e cada seção por vigas de diferentes espécies de madeira. Devido ao facto de a zona mais vulnerável ser a face exterior, procedeu-se à resistografia desde a face interior (galeria) até ao exterior (pátio), com o objectivo de identificar a evolução da deterioração com base na largura da viga. No trecho entre o pé direito 8 e 9, a resistografia mostra áreas com desfibramento devido ao ataque de cupins. Esses organismos xilófagos se alimentam da madeira e deixam túneis em seu interior, consequentemente, a curva resistográfica muda repentinamente devido à falta de resistência durante seu avanço (Figuras 8 e 9). Ao realizar os testes de penetrômetro e os cálculos de ajuste correspondentes, avaliou-se que os elementos de madeira possuem uma dureza inferior aos valores tabulados para madeiras cubanas. Estes resultados estão em correspondência com as baixas resistências obtidas nos testes de resistografia. A Tabela 3 apresenta uma amostra de alguns dos elementos estudados.

Tabla 3: Resultados del cálculo de la dureza a partir del penetrómetro

Elemento	Localização	Espécies de madeira	Teor de umidade (%)	Penetração 12% de umidade (mm)	Densidade calculada 12% (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade tabulada 12% de umidade* (g/cm <sup>3</sup> )
Lima	Eixo 3	Pinheiro	14	14	0.35	0.74
Feixe 30	eixo 4	Cedro	13	17	0.27	0.37
feixe 50	Eixo 3	Cedro	13	21	0.16	0.37
pé direito 8	30 cm da base	Pinheiro	14	9.5	0.47	0.74
pé direito 9	30 cm da base	bariá	13	11	0.43	0.84

\*- valores de referencia aportados por el INAF

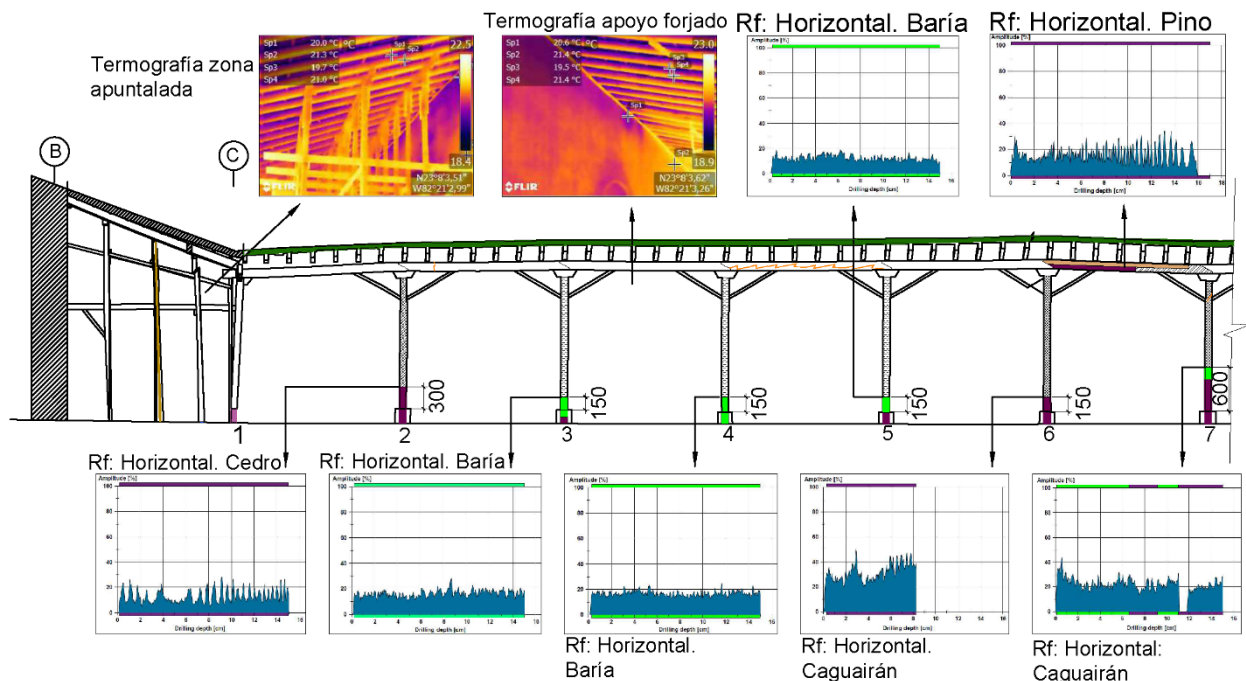


Figura 8. Resultados de ensaios em elementos da laje entre os montantes 1-7, onde a termografia reflete a umidade presente na parede do eixo 3 na área de apoio das vigas, e a resistografia nos montantes e viga deslizante de o eixo 4



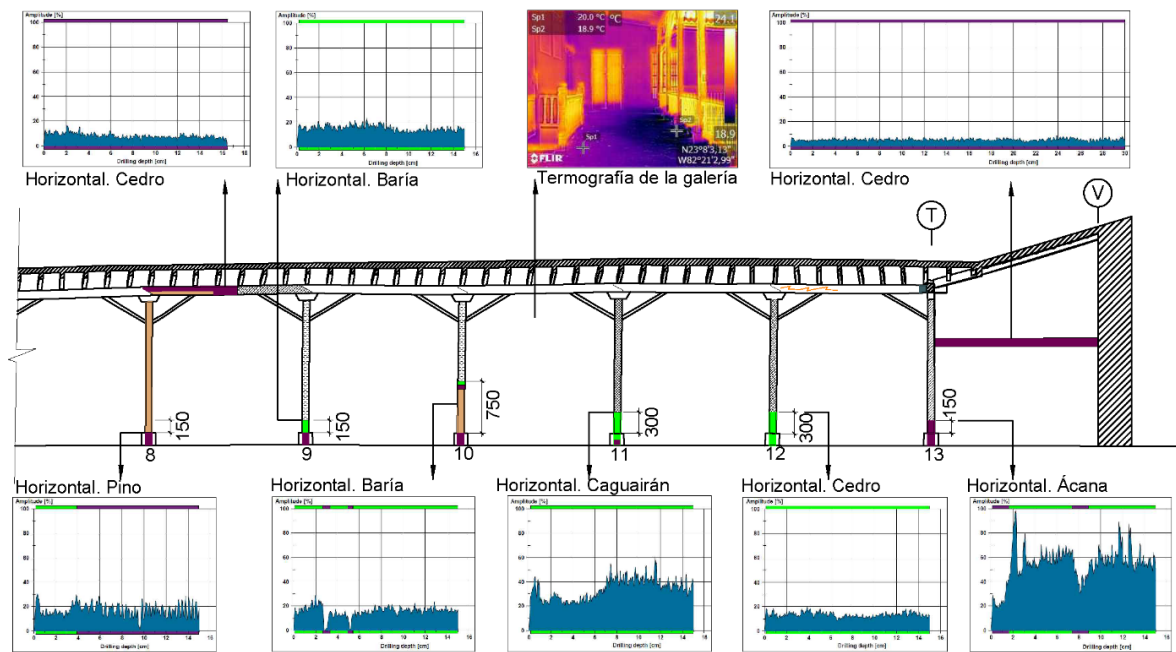
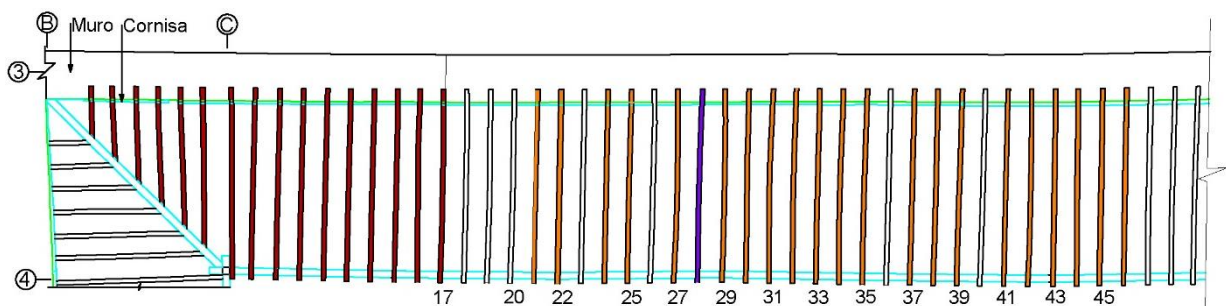


Figura 9. Resultados de ensaios em elementos da laje entre os pés direitos 8-13, mostrando a termografia da galeria com alto nível de umidade nos apoios dos pés direitos, e a resistografia nos pés direitos e viga de deslizamento do eixo 4

### 3.5 Propostas de solução

Nas vigas de piso, foi determinado que 17 delas precisam ser substituídas devido à sua deterioração avançada. Adicionalmente, outras 45 vigas devem ser reforçadas estruturalmente em diferentes áreas, dependendo das patologias desenvolvidas em cada uma. Das 34 vigas restantes para as quais não foram identificadas lesões significativas, será necessário desmontar e descascar 2 delas por danos superficiais, para posteriormente recalcular a carga para a nova seção da viga (Figuras 10 e 11). Todos os pés direitos apresentaram deterioração que exigiu ações de reforço estrutural, assim como nas vigas deslizantes, onde será necessário substituir dois trechos e reforçar outros 3 trechos (Figuras 12 e 13). A diminuição significativa da densidade da madeira da laje é resultado da exposição aos ciclos de umedecimento e secagem, principalmente nos meses chuvosos, com a consequente proliferação de fungos e infestação de cupins. As deformações presentes nas vigas não são apenas resultado do aumento de peso devido ao excesso de água e ao crescimento das plantas mais altas, mas também pela perda de suas propriedades da madeira, o que aumenta o risco de falha estrutural.



Lenda:

- - substituição
- - pickle e recalcular para nova seção
- - reforço

Figura 10. Proposta de solução para o piso entre vigas 1-49

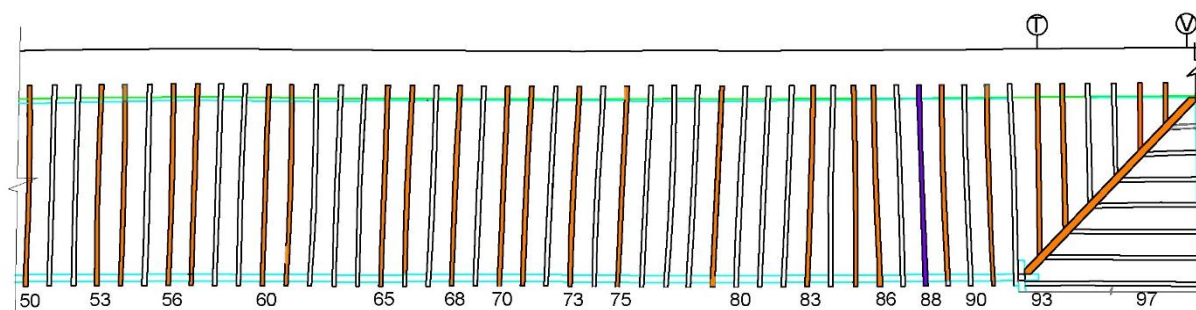


Figura 11. Proposta de solução para a laje entre vigas 50-98

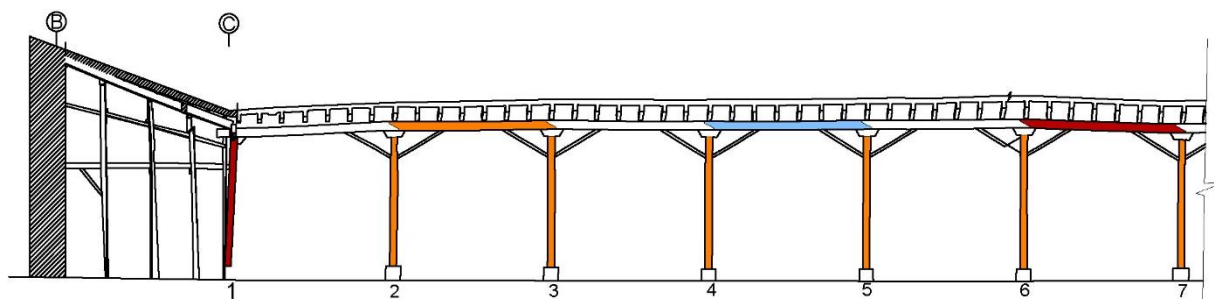


Figura 12. Proposta de solução para os pés direitos 1-7 e seção da viga deslizante

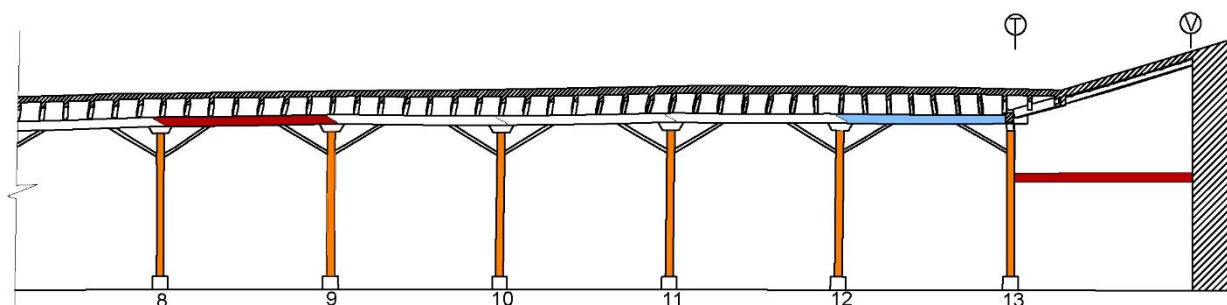


Figura 13. Proposta de solução para os pés direitos 8-13 e seção da viga deslizante

#### 4. CONCLUSÕES

A estrutura do piso de madeira da galeria estudada apresenta deterioração avançada, ocasionada pela deterioração devido ao excesso de umidade devido ao crescimento de plantas invasoras na cobertura. Esta situação levou à colonização por fungos e ao ataque de organismos xilófagos, o que levou a perdas nas propriedades da madeira utilizada,

Estudos de densidade aplicados mostraram afetações na dureza devido à exposição a ciclos de umedecimento e secagem e colonização biológica. Isso levou a deformações nas vigas e uma diminuição da capacidade de carga de seus elementos estruturais.

Como resultado do diagnóstico realizado, foi demonstrada a necessidade de substituição de 17 vigas de suporte da cobertura e o reforço estrutural de outras 45. As pernas direitas terão também de ser reforçadas, sendo que uma delas terá de ser substituída devido à deterioração avançada, bem como algumas seções de vigas deslizantes.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao OHCH Patrimonial Rehabilitation Investor Group pelo financiamento desta pesquisa sob o contrato No. S-5AI/2020 Ccto. 22DG/2019. Foi realizado com o apoio da Divisão de Materiais da Tecnia Research & Innovation Foundation no âmbito do projeto de colaboração FOCAD 2018.

Da mesma forma, agradecemos a participação dos especialistas e técnicos do Departamento de Diagnóstico e Pesquisa, em particular aos Engenheiros Rafael González Hernández e Dainelys Guerra Bouza por sua considerável contribuição, a todos os técnicos do Departamento de Diagnóstico e Pesquisa, bem como a à Bióloga Maider Arana da Fundação Tecnia na elaboração do plano de controle e erradicação de cupins, e da Cooperação Internacional à Ing. Ingrid Alonso Esquivel.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Binda, L. and Saisi, A. (2009), *Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France.
- Guevara, J. L., Toirac, Y. A., Marisy, C. M. C. (2019), *Un acercamiento al convento de Santa Clara de Asís de La Habana. Estudio de su estado de conservación y propuestas de intervención*. Revista ALCONPAT, 9(2): 228-246. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>
- Hasníková, H., Kuklík, P. (2014), *Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure*. Wood research, 59(3): 411-420.
- Helal, J., Sofi, M., Mendis, P. (2015), *Non-destructive testing of concrete: A review of methods*. Electronic Journal of Structural Engineering, 14(1): 97-105.
- Kherais, M., Cséfalvi, A., Len, A. (2021), *The climate impact on timber structures*. International journal of optimization in civil engineering, 11(1): 143-154.
- Kloiber, M. (2007), *"Ensayos no destructivos de las propiedades de la madera"*, Mendel University, Czech Republic, 208 pp.
- Kuklík, P. (2007), *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.
- Kumar, P., Imam, B., (2013), *Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure*. Science of The Total Environment, 444: 85-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.056>
- Liñán, C. R., Conde, J. M., Hita, P. R. D., Gálvez, F. P. (2011), *Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz)*. Informes de la Construcción, 63(521): 13-22. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.032>
- Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C., Rubio de Hita, P. (2013), *Application of non-destructive techniques in the inspection of the wooden roof of historic buildings: A case study*. Advanced Materials Research, 778: 233-242. 10.4028/[www.scientific.net/AMR.778.233](http://www.scientific.net/AMR.778.233)
- Norma Cubana (1988), *NC 53-179:88 - Estructuras de madera. Método de cálculo*. La Habana, Cuba.
- Ortega, N. F., Ripani, M. (2007), *Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas*, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007. Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos y Estructurales (AAENDE), Argentina, pp. 1-12.
- Ortiz, R., Fuentes, N., Jamet, A., Moya, A., González, M., Varela, M. P., Ramírez, A., Adofacci, G., Martínez, P. (2017), *Evaluación resistográfica en elementos de maderas desfibradas de la torre de lixiviación de la oficina salitrera Santa Laura en Chile*. Patrimonio de la Humanidad. Informes de la Construcción, 69(547): 1-6. <http://dx.doi.org/10.3989/id54678>
- Palaiá, L., Monfort, J., Sánchez, R., Gil, L., Álvarez, A., López, V., Tormo, S., Pérez, C., Navarro, P. (2008), *"Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-*

*destructive testing together with traditional ones*". 9th International Conference on NDT of Art. Jerusalem, Israel.

Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J. J. (2021), *Climate change impacts on cultural heritage: A literature review*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change: e710.

<https://doi.org/10.1002/wcc.710>

Tucci, G., Bonora, V. (2017), *Towers in San Gimignano: metric survey approach*. Journal of performance of constructed facilities, 31(6). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001085](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001085)

Workman, G. L., Moore, P. O. (2012), *"Nondestructive Testing Handbook 10: Overview"*. American Society for Nondestructive Testing.