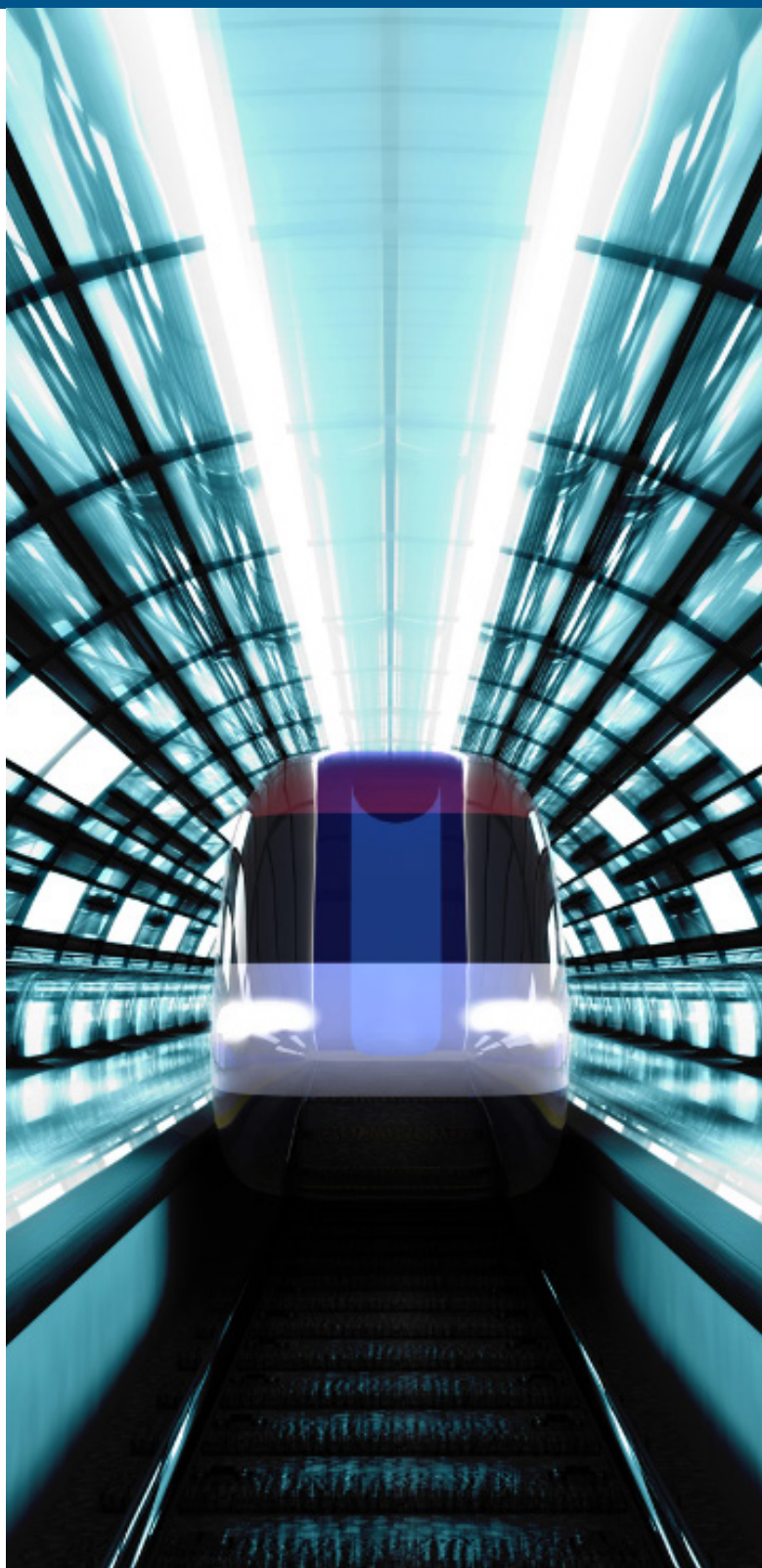


revista IPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

#29

v. 9, n. 29, dez., 2025



CAUSAL IMPACT

Reflexos da pandemia em serviços públicos

INSPEÇÃO DE MONOTRILHOS

Drones com câmeras convencional e termográfica

SEGURANÇA AO FOGO

Retardantes de chama para forros e revestimentos



revista **IPT**
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

v.9, n.29, dezembro, 2025
Quadrimestral

Editores-chefes

Eduardo Luiz Machado
Andreia Longuinho da Silva
José Maria de Camargo Barros

Conselho Editorial

Eduardo Luiz Machado
Silas Derenzo

Assistentes Editoriais

Denis Martins Lemos
Flavio Sergio Jorge de Freitas
João Antonio Rodrigues Garcia

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

Créditos técnicos

DIAGRAMAÇÃO E ARTE:

Silvia Megumi Mizoguti Padovani

REVISÃO:

Eduardo Luiz Machado

José Maria de Camargo Barros

sapiens.ipt.br

revista@ipt.br

Av. Prof. Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - Butantã
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830



na capa
Foto Canva

revista
IPT
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

#29

revista IPT
T E C N O L O G I A E I N O V A Ç Ã O

SUMÁRIO

artigos técnicos

06 Drones para inspeção de mon trilhos.

Autores: Caio Pompeu Cavalhieri, Eduardo Moreira, José Antonio dos Santos, Rodolfo Szmidke

25 Análise do número de passageiros transportados pelo metrô da cidade do Rio de Janeiro: uma aplicação do método *Causal Impact*

Autores: Mario Antonio Margarido, Daniel Kiyoyudi Komesu, Helcio Shiguenori Takeda

47 Eficácia de tratamentos retardantes de chama para forros e revestimentos de Pinus em edificações

Autores: Henrique Bandeira Faccio, Antonio Fernando Berto

59 Influência de recobrimento da superfície e da adição de fibras de PVA sobre as propriedades da matriz cimentícia

Autores: Vanessa Gabrielle da Silva, Indira Teixeira Bessa de Oliveira, Ivone Regina de Oliveira

REVISTA IPT SOBE O NÍVEL

A 29ª edição da 'Revista IPT - Tecnologia e Inovação', fechando o ano de 2025, chega aos seus leitores com uma grande notícia! A publicação avançou no 'Qualis Periódicos', que é um sistema brasileiro de avaliação de periódicos mantido pela Capes. Passou da categoria B4 para B2, o que reflete o fortalecimento da produção científica e do trabalho editorial desenvolvidos pelo Instituto, por meio da publicação no âmbito dos programas. Uma grande revista científica e tecnológica é o melhor suporte para a veiculação de artigos técnicos da melhor qualidade, como os selecionados para esta edição. Confira.

Um sobrevoo de conteúdo técnico intitulado "Drones para inspeção de monotrilhos" abre esta edição. Seus autores são Caio Pompeu Cavallieri, pesquisador do IPT; e Eduardo Moreira; José Antonio dos Santos; e Rodolfo Szmidke, todos da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô-SP). O objetivo foi avaliar o uso de drones em inspeções de monotrilhos para localizar elementos em estruturas de concreto e evidenciar padrões construtivos. Foram testados dois modelos de drone nas linhas 15-Prata e 17-Ouro: um com câmera convencional e termográfica, outro apenas com a convencional.

"Análise do número de passageiros transportados pelo metrô da cidade do Rio de Janeiro: uma aplicação do método 'Causal Impact'" é o título do artigo seguinte. São seus autores Mario Antonio Margarido; Daniel Kiyoyudi Komesu; e Helcio Shiguenori Takeda, todos da Pezco Economics, sendo o primeiro também pesquisador do PSP Hub. Foram analisadas mudanças estruturais provocadas pela pandemia, a partir de abril de 2020, que impactaram o número de passageiros transportados pela companhia do metrô na cidade do Rio de Janeiro.

Na sequência o artigo "Eficácia de tratamentos retardantes de chama para forros e revestimentos de Pinus em edificações", dos pesquisadores Henrique Bandeira Faccio; e Antonio Fernando Berto, ambos do IPT. Algumas espécies de Pinus amplamente utilizadas na construção civil brasileira, em forros e revestimentos de paredes e divisórias, têm desempenho desfavorável na reação ao fogo, restringindo seu uso em edificações. Este estudo compilou a eficácia de diferentes tratamentos retardantes de chama para melhoria de desempenho dessas madeiras.

O artigo "Influência de recobrimento da superfície e da adição de fibras de PVA sobre as propriedades da matriz cimentícia" fecha esta edição. Sua autoria é de Vanessa Gabrielle da Silva; Ivone Regina de Oliveira, ambas do Laboratório de Desenvolvimento de Materiais Avançados no Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba; e Indira Teixeira Bessa de Oliveira, do Instituto de Química de Araraquara na Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Este estudo investigou o desempenho de uma matriz cimentícia formulada com cimento Portland (CP III) e aditivada, para aplicação em ambiente agressivo como uma estação de tratamento de esgoto, visando mitigar a adesão bacteriana para melhorar a durabilidade do material.

Boa leitura!

*Eduardo
L. Machado*

Eduardo Luiz Machado
Diretor Técnico em Ensino Tecnológico



Artigo Técnico

Drones para inspeção de mon trilhos

Drone-based monorail inspection

Caio Pompeu Cavallieri^{a*}, Eduardo Moreira^b,
José Antonio dos Santos^b, Rodolfo Szmidke^b

^a Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado
de São Paulo S.A. (IPT),
São Paulo-SP, Brasil.

^b Companhia do Metropolitano
de São Paulo (Metrô-SP),
São Paulo-SP, Brasil.

Palavras-chave: drone; metrô; mon trilho; termografia.

Keywords: drone; metro; monorail; thermography.

* e-mail: caiopc@ipt.br

Resumo

Este artigo reúne os resultados das atividades desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. (IPT) em conjunto com a Companhia do Metropolitan de São Paulo (Metrô-SP) para avaliar as potencialidades e limitações relacionadas ao uso de drones em inspeções de mon trilhos. Com o propósito de localizar elementos de destaque em estruturas de concreto e evidenciar características relacionadas ao padrão construtivo, dois modelos de drone foram testados, um deles com câmeras convencional e termográfica (*DJI Mavic 2 Enterprise Advanced*) e o outro apenas com uma câmera convencional (*DJI Mini 4 Pro*). Os experimentos foram conduzidos em seis trechos dos mon trilhos do Metrô-SP, quatro deles na linha 15-Prata e os outros dois na linha 17-Ouro. No geral, os resultados indicaram que os drones têm um importante papel na inspeção não destrutiva dos mon trilhos do Metrô-SP. Embora as imagens da câmera termográfica não tenham evidenciado satisfatoriamente nenhuma característica esperada, os registros feitos pela câmera convencional possibilitaram a rápida identificação de características importantes – como o estado de conservação dos *finger plates* – e ainda permitiram a construção de ortomosaicos. Mesmo sem contar com pontos de apoio, os ortomosaicos viabilizaram verificações qualitativas relacionadas à geometria de vias construídas e a elementos como edificações, pavimentação, guias e calçadas. Por fim, comparando-se os dois drones, a operação do *DJI Mini 4 Pro* mostrou-se mais segura e confortável quanto à aproximação de alvos e à prevenção de colisão.

Abstract

This article presents the results of activities carried out by the Institute for Technological Research of the State of São Paulo (IPT), in collaboration with the São Paulo Metropolitan Company (Metrô-SP), to assess the potential and limitations of using drones in monorail inspections. Aiming to detect notable elements in concrete structures and highlight features related to construction patterns, two drone models were tested: one equipped with both conventional and thermal cameras (DJI Mavic 2 Enterprise Advanced), and the other with only a conventional camera (DJI Mini 4 Pro). The experiments were conducted along six sections of Metrô-SP's monorails – four of them on Line 15-Silver and two on Line 17-Gold. Overall, the results indicated that drones play an important role in the non-destructive inspection of Metrô-SP's monorails. Although the thermal camera did not satisfactorily reveal any expected features, the conventional camera successfully enabled the rapid identification of key characteristics – such as visual data on the condition of finger plates – and made it possible to generate orthomosaics. Even

without ground control points, the orthomosaics allowed for qualitative assessments of the geometry of constructed tracks and elements such as buildings, pavement, curbs, and sidewalks. Finally, when comparing the two drones, the DJI Mini 4 Pro proved to be safer and more comfortable to operate, especially in terms of approaching targets and preventing collisions.

1 Introdução

A proposta deste artigo é apresentar as atividades desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. (IPT) e pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô-SP) que, de maneira geral, tiveram o objetivo de avaliar de que forma drones podem ser usados em inspeções de monotrilhos.

As atividades realizadas foram motivadas pelo fato de que, em setores como o da construção civil, o uso de drones para aquisição de imagens convencionais (RGB, isto é, com as cores *red*, *green* e *blue* combinadas entre si em diferentes intensidades) e termais tem se destacado por permitir a coleta de dados de forma rápida e sem danificar as propriedades do material inspecionado (SANTOS; BECERE; CAVALHIERI, 2024). Imagens assim têm sido úteis para, por exemplo, detectar patologias em fachadas (ANDRADE, 2020; TONDELO; BARTH, 2019) e estruturas de concreto (DING *et al.*, 2023; FUNAHASHI FILHO *et al.*, 2024), além de complementar procedimentos convencionais como testes a percussão e ensaios com arrancamento de amostras. Complementarmente, câmeras embarcadas em drones podem conferir agilidade e segurança a atividades de inspeção em empreendimentos que tradicionalmente oferecem algum tipo de restrição de acesso (ARAÚJO *et al.*, 2020), como no caso de obras de arte especiais (FEROZ; DABOUS, 2021) e vias elevadas.

Particularmente em empreendimentos lineares elevados (como vias expressas e monotrilhos), a avaliação do estado de conservação das porções visíveis da obra por métodos convencionais costuma ter sua dinâmica prejudicada pela própria geometria das estruturas. De fato, o tamanho dos vãos entre os pilares e a altura livre do empreendimento podem tornar desafiadora a visualização de elementos importantes como, por exemplo, fissuras, bolhas, aparelhos de apoio e *finger plates*¹. Além disso, há que se considerar ao menos outras duas características que tornam singulares obras assim. São elas: as particularidades da faixa de domínio e do entorno desses

1 Dispositivos metálicos com placas dentadas instaladas nas juntas de dilatação da via permanente para o tráfego do trem em condições de conforto.

empreendimentos e suas especificidades construtivas e operacionais como aquelas relacionadas ao tráfego de veículos (carros, caminhões e os próprios trens).

Sendo assim, este artigo discute diferentes aspectos do uso de drones com câmeras convencional e termográfica em dois empreendimentos elevados do Metrô-SP, tendo como foco identificar e avaliar elementos importantes (ex: estado de conservação das estruturas de concreto e geometria das vigas).

2 Objetivo

O objetivo deste artigo foi explorar as potencialidades e limitações relacionadas ao uso de drones em inspeções de empreendimentos lineares elevados do Metrô-SP. Para tanto, avaliou-se o desempenho de dois drones de asa rotativa e pequeno porte (um deles com câmera convencional e o outro com câmeras convencional e termográfica) em relação à identificação de elementos importantes (ex: integridade das estruturas de concreto e estado de conservação de *finger plates*) e à segurança e ao conforto durante a operação.

3 Procedimento metodológico

Para alcançar os objetivos propostos, inicialmente as atividades buscaram identificar experiências em que os drones já tivessem sido usados como tecnologia não destrutiva para inspeção de empreendimentos lineares. Houve ainda a busca por registros de uso de câmeras (convencional e termográfica) na identificação de patologias superficiais e subsuperficiais em estruturas de concreto, bem como por métodos de extração de patologias e análise de seus padrões (DIAS-DA-COSTA *et al.*, 2016; CHA; CHOI; SUH, 2017).

3.1 Ferramentas utilizadas

Para avaliar de forma concreta o desempenho dos drones² em inspeções de monotrilhos, o foco foi testar dois drones de asa rotativa e pequeno porte (classe 3) – DJI Mavic 2

² O termo drone foi usado como sinônimo de RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), um tipo de aeronave não tripulada (*unmanned aircraft* – UA) que permite intervenção humana de forma remota a qualquer instante do voo.

Enterprise Advanced (M2EA)³ e DJI Mini 4 Pro⁴ – como ferramentas de inspeção não destrutiva. De maneira geral, foram priorizadas tomadas com orientação ortogonal, isto é, as lentes das câmeras eram – sempre que possível – posicionadas de forma perpendicular ao objeto de interesse, de modo que a superfície da estrutura pudesse ser visualizada sem as distorções espaciais características de tomadas oblíquas. Quanto à proximidade entre drones e monotrilha, a prioridade foi garantir que os equipamentos estivessem a uma distância segura contra condições adversas como zonas de turbulência e interferência de sinal.

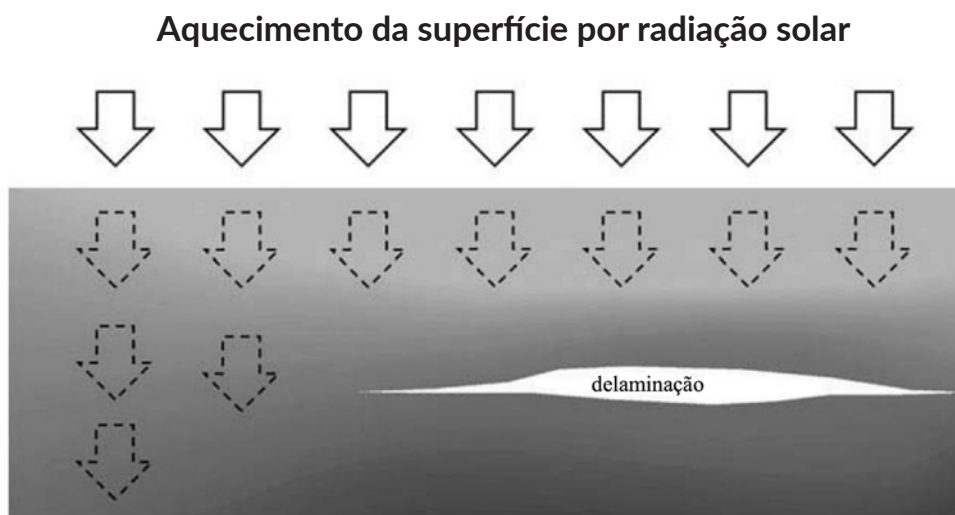
Para os registros feitos com a câmera convencional (isto é, capaz de fazer registros em RGB) foi priorizado o uso do drone DJI Mini 4 Pro, buscando-se garantir uma iluminação adequada para que as imagens geradas possibilitassem a caracterização de eventuais anomalias superficiais. Já em relação à termografia, os registros foram feitos pelo drone DJI M2EA, sendo que cada captura feita por esse aparelho dava origem a dois registros simultaneamente: um convencional e outro termográfico. A técnica utilizada foi a da termografia passiva (isto é, sob efeito exclusivo da energia solar) e foram priorizadas situações em que as estruturas de concreto estivessem em processo de aquecimento ou resfriamento, buscando-se contrastes de temperatura que pudessem evidenciar alguma característica anômala.

Isso se deve ao fato de que a temperatura na porção superficial de uma dada estrutura de concreto tende a variar de forma relativamente uniforme (seja em aquecimento ou resfriamento). Esse padrão só não é seguido em trechos em que a presença de patologias subsuperficiais (ex: delaminação) interrompe a via de condução do calor, favorecendo o surgimento de padrões distintos de temperatura (ELLENBERG *et al.*, 2016; SCOTT; KRUGER, 2014). Nesse sentido, caso exista alguma anomalia que represente uma descontinuidade subsuperficial no concreto, o fluxo de calor é interrompido e a superfície que cobre a patologia fica mais aquecida do que o restante da estrutura (**FIGURA 1**).

3 Especificações em: <https://enterprise.dji.com/mavic-2-enterprise-advanced/specs> (Acesso em: 30 jul. 2025).

4 Especificações em: <https://www.dji.com/br/mini-4-pro> (Acesso em: 30 jul. 2025).

Figura 1 - Representação de uma estrutura de concreto em que o aquecimento sobre a área da delaminação é superior ao do restante da peça.



Fonte: adaptado de Escobar-Wolf et al. (2017).

As diferentes temperaturas na superfície do concreto assumem padrões distintos nos termogramas criados a partir de imagens aéreas. O tratamento e a análise desses termogramas foram feitos com o DJI *Thermal Analysis Tool 3*⁵, um software gratuito que possibilita a captura de dados de temperatura e a delimitação de áreas críticas. Além disso, procederam-se análises com o Pix4DMapper. Trata-se de um *software* pago dedicado ao processamento de imagens ortogonais para geração de modelos digitais e ortomosaicos (em .TIF) no datum WGS84 / UTM 23S a partir da técnica de fotogrametria por *Structure-from-Motion Multi-view Stereopsis* (SfM-MVS) para consulta em *softwares* de geoprocessamento como o gratuito QGIS.

Particularmente em relação aos ortomosaicos, esses materiais resultaram do processamento de imagens geradas a partir de voos manuais e sem pontos de apoio (isto é, sem dispor de pontos com coordenadas conhecidas para o processamento das imagens aéreas e a análise da qualidade dos ortomosaicos). Embora a fotogrametria por SfM-MVS se beneficie de validações com pontos de apoio, assumiu-se que a qualidade posicional de produtos gerados exclusivamente com metadados das imagens aéreas seria suficiente para possibilitar alguns tipos de verificação que não fossem da ordem de milímetros.

⁵ Em: <https://www.dji.com/downloads/softwares/dji-dtat3> (Acesso em: 30 jul. 2025).

Ainda que existam trabalhos que tratem especificamente sobre critérios para geração de produtos cartográficos por drone sem o uso de pontos de apoio (SOPCHAKI *et al.*, 2018; FORLANI *et al.*, 2018; GUTIÉRREZ *et al.*, 2024), entende-se que a ausência desse tipo de recurso é uma limitação metodológica deste trabalho. De qualquer forma, não foram utilizados pontos de apoio principalmente porque os trabalhos de campo contavam com intervalos de tempo relativamente curtos, de modo que a coleta de pontos de apoio não seria viável.

3.2 Áreas de estudo

Com o propósito de contribuir para o desenvolvimento e a validação de soluções relevantes, os testes com drones foram conduzidos em seis trechos dos monotrilhos do Metrô-SP (CAVALHIERI *et al.*, 2024), quatro deles na linha 15-Prata (em operação desde 2014) e os outros dois na linha 17-Ouro (em construção).

A Linha 15 – Prata conta com quase 15 km de extensão, 11 estações e via permanente dupla em vigas de concreto. Embora a inspeção visual das faces interna e superior das suas vias esteja relativamente bem resolvida por ser feita a partir de passarelas metálicas de serviço existentes entre as duas vias, o processo de diagnóstico das faces externas ainda se mostra desafiador. A porção externa das vias, também conhecida como abismo, não dispõe de acesso para verificação visual de eventuais manifestações patológicas e a condição de fixação dos parafusos dos *finger plates*.

Com previsão de inauguração para o ano de 2026, o monotrilho da Linha 17 – Ouro terá uma extensão de quase 7 km e conta com oito estações, ligando o aeroporto de Congonhas à estação Morumbi da Linha 9 – Esmeralda de trens metropolitanos. Nesta linha, além das dificuldades existentes para inspeção do abismo, há uma distância significativa entre a via permanente e as passarelas de serviço que dificulta a realização das inspeções, só sendo possível a visualização geral das condições do concreto e *finger plates*. Para inspeções mais próximas e precisas, a verificação das consolidações⁶ somente é possível mediante a montagem de estrutura provisória com linhas de vida, sendo esta a motivação para buscar alternativas para se realizar avaliações com drones em estruturas com essas características.

6 Trecho de via permanente concretado in loco após o lançamento de vigas-guia adjacentes com comprimento usual de 120 a 165cm sobre os pilares.

Os seis trechos selecionados para a realização dos testes foram escolhidos por possuírem elementos representativos de condições adversas ao uso de drones, tais como: (i) obstáculos verticais como árvores, edificações, linhas de transmissão e veículos; (ii) elementos metálicos e subestação de energia com potencial para descalibrar sensores em voo e interferir na comunicação entre drone e rádio; (iii) fluxo de veículos e estruturas com configurações favoráveis à formação de zonas de turbulência aérea (OMAR; NEHDI, 2017); (iv) estruturas cujas geometrias pudessem instabilizar a recepção do sinal de satélite.

4 Resultados e discussão

Durante as buscas por experiências anteriores, os materiais encontrados evidenciaram que os drones já são usados na construção civil nacional e internacional de forma ampla e consistente como tecnologia de inspeção não destrutiva. Ainda que nenhum dos artigos e relatórios consultados faça menção direta ao uso de drones em monotrilhos, esses materiais reúnem experiências com esse tipo de ferramenta em obras de arte especiais de empreendimentos lineares (como pontes e viadutos de rodovias) e também em fachadas de edifícios. Também foram encontrados registros sobre o uso de câmeras (convencional e termográfica) na identificação de patologias superficiais e subsuperficiais em estruturas de concreto. Esses materiais foram referenciados ao longo deste artigo e ainda ajudaram a estruturar as atividades que resultaram nas visitas técnicas deste trabalho.

Em relação às atividades com drones, as avaliações foram todas conduzidas em estruturas ligadas às linhas 15-Prata e 17-Ouro. A proposta era que o Metrô-SP pudesse ter uma experiência direta com esse tipo de ferramenta. Foram três visitas de campo ao todo, a saber:

- 05/02/24:
 - pátio de vigas da linha 15-Prata
 - horários dos voos: 11h40 a 12h36 / 14h57 a 15h52
 - localização aproximada:
 - 352417 E / 7392122 S (23 K / WGS84)

- 18/03/24:
 - dois trechos das obras da linha 17-Ouro
 - horários dos voos: 10h02 a 10h45 / 11h21 a 12h32

- localização aproximada do primeiro trecho:
 - 326925 E / 7387535 S (23 K / WGS84)
- localização aproximada do trecho com pátio de vigas:
 - 330229 E / 7384984 S (23 K / WGS84)
- 19/04/24:
 - três trechos da linha 15-Prata
 - horários dos voos: 10h21 a 11h46 / 13h51 a 14h26 / 14h40 a 14h48
 - localização aproximada do primeiro trecho:
 - 343026 E / 7389776 S (23 K / WGS84)
 - localização aproximada do segundo trecho:
 - 341030 E / 7391167 S (23 K / WGS84)
 - localização aproximada do terceiro trecho:
 - 341124 E / 7390635 S (23 K / WGS84)

A primeira visita de campo ocorreu no pátio de vigas da linha 15-Prata (**FIGURA 2**) por ser uma área que conta com vigas estocadas ao nível do terreno, onde existem duas unidades que, devido ao seu quadro fissuratório pós desforma, foram condenadas e transformadas em vigas teste, sendo submetidas a diversos ensaios. Por se tratar de um ambiente controlado, a proposta nesta etapa foi investigar a qualidade com que essas características eram registradas pelas câmeras convencional e termográfica do drone DJI M2EA.

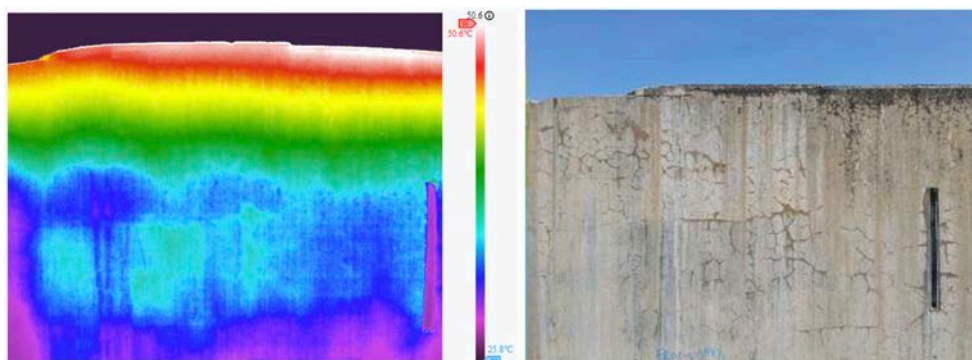
Figura 2 – Vista geral do pátio de vigas da linha 15-Prata. Registro oblíquo convencional feito por drone na visita técnica de 05/02/24.



Fonte: elaborado pelos autores.

No geral, as imagens obtidas com a câmera termográfica foram feitas sem que o drone estivesse em voo e a uma distância de aproximadamente 2 m, não resultando em nada que fosse diferente daquilo já registrado pela câmera convencional. Além disso, a interação com a câmera termográfica mostrou que nem sempre esse equipamento contava com o contraste de temperatura necessário para evidenciar elementos superficiais que eram detectados com nitidez pela câmera convencional (**FIGURA 3**). Esses dois aspectos mostraram-se suficientes para que os trabalhos de campo seguintes passassem a contar também com o drone DJI Mini 4 Pro (isto é, equipamento que conta apenas com uma câmera convencional sem o recurso termográfico). Esse drone, em comparação com o modelo com câmera termográfica, dispõe de um sistema de detecção de obstáculos mais sofisticado, além de ser mais barato se comparado com o modelo de duas câmeras.

Figura 3 – Exemplo de fissuras em vigas teste que não foram evidenciadas na imagem da câmera termográfica (à esquerda) e são detectadas com nitidez pela câmera convencional (à direita). Registros feitos por drone na visita técnica de 05/02/24.



Fonte: elaborado pelos autores.

O fato das fissuras nem sempre ficarem evidentes nos registros com câmera termográfica pode estar relacionado com os horários em que os voos foram realizados. O ideal teria sido dar prioridade a situações em que as estruturas de concreto estivessem em processo de aquecimento ou resfriamento por efeito da energia solar (NEXCO-WEST USA, 2014), algo que varia função das estações do ano e das condições meteorológicas de cada dia. No entanto, como os voos sempre foram feitos a partir das 10h00, provavelmente as estruturas de concreto e suas fissuras já estavam com temperaturas relativamente homogêneas, não havendo contraste suficiente para que esses elementos distintos se destacassem no registro termográfico.

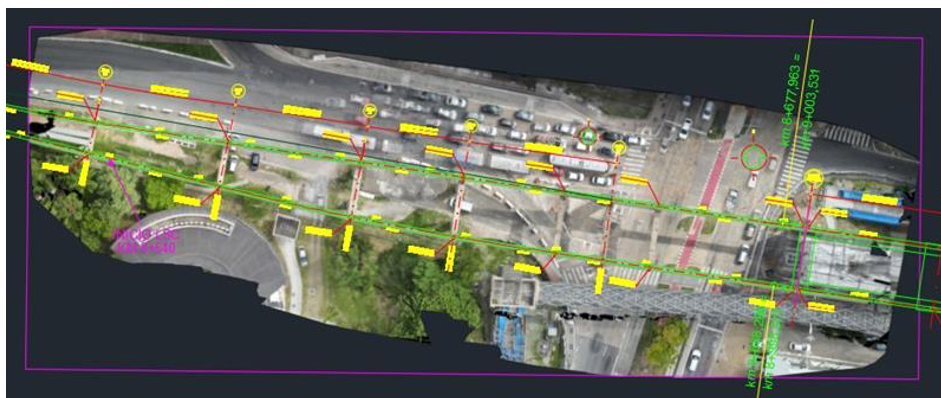
O segundo campo foi feito em dois trechos das obras da linha 17-Ouro. Em ambos os casos, registros de drone contemplaram imagens de vigas pré-moldadas que já haviam

sido içadas e consolidadas. Além de imagens oblíquas, também foram feitas tomadas ortogonais em RGB para dar origem a um ortomosaico de uma área pré-determinada e produzindo também dois vídeos.

As imagens ortogonais foram registradas a partir de um voo feito em modo manual, ou seja, não se seguiu a abordagem convencional de se traçar um plano de voo em aplicativo específico para que o drone fizesse a varredura da área de forma automática. A opção pelo modo de registro manual justifica-se pelo fato de que drones de modelos mais simples (como é o caso do DJI Mini 4 Pro) geralmente não permitem a realização de voos voltados especificamente para aerofotogrametria. Nesse sentido, a proposta foi justamente avaliar o resultado de um ortomosaico gerado a partir de um voo manual e sem pontos de apoio.

A qualidade do material gerado demonstrou ser suficiente para que se compare, por exemplo, a geometria da via construída com aquela prevista em projeto, além de possibilitar verificações relacionadas a edificações, pavimentação, guias e calçadas (**Figuras 4 e 5**).

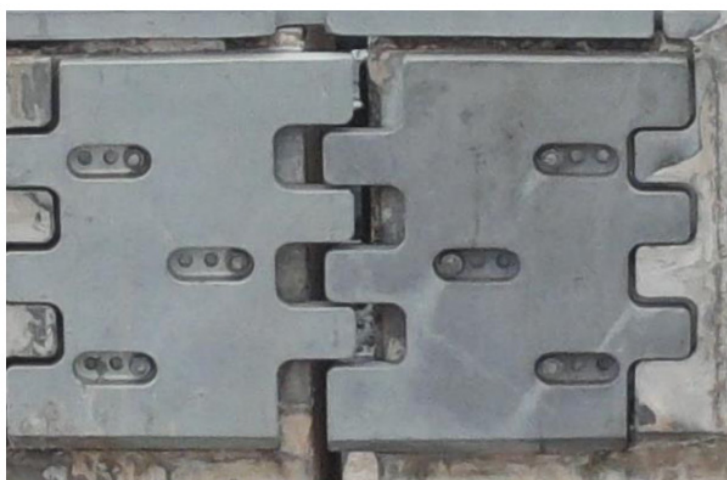
Figuras 4 e 5 – Ortomosaico do primeiro trecho visitado na linha 17-Ouro em 18/03/24 (acima) e sua versão sobreposta por dados de projeto (abaixo) . Dados gerados por drone em voo manual.



Fonte: elaborado pelos autores.

Já as imagens oblíquas e os vídeos⁷ foram feitos em diferentes ângulos. Os registros obtidos com a câmera convencional possibilitaram a rápida identificação de elementos como fissuras superficiais e finger-plates. Particularmente no caso dos finger-plates, o maior interesse era avaliar as condições em que se encontravam os parafusos usados na fixação desse dispositivo (FIGURA 6). Essas tomadas também foram utilizadas na verificação geométrica qualitativa das vigas instaladas (FIGURA 7).

Figura 6 – Detalhe de um dos finger-plates existentes no segundo trecho visitado da linha 17-Ouro em 18/03/24. Registro feito por drone.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 7 – Exemplo de registro oblíquo feito para a caracterização geométrica das vigas. Registro feito por drone no segundo trecho visitado da linha 17-Ouro em 18/03/24.

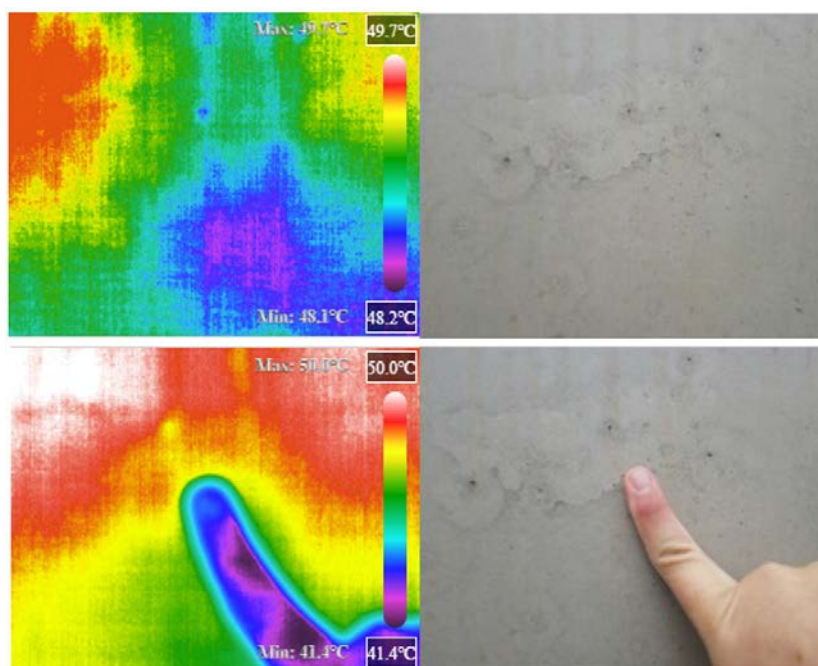


Fonte: elaborado pelos autores.

7 Em <https://youtu.be/ISA33SdzvZM> e https://youtu.be/xxD_BO2bmLk (Acesso em: 30 jul. 2025).

Também foram feitos registros com a câmera termográfica no pátio de vigas da linha 17-Ouro. Novamente as imagens dessa câmera não evidenciaram características que apareceram de forma nítida nos registros da câmera convencional. Na temperatura e no horário em que ocorreu a visita técnica, não foi possível registrar de forma nítida nenhuma alteração com a câmera termográfica nem mesmo quando se adicionou à cena a mão do operador de drone por ser capaz de promover contraste de temperatura, efeito que foi obtido com a temperatura corporal (Figuras 8 e 9). Mais uma vez o resultado obtido com a câmera convencional contava com uma nitidez superior. Além disso, os registros termográficos atribuíram à temperatura corporal valores entre 41,4°C e 42,5°C, algo que não correspondia à realidade.

Figuras 8 e 9 – Registros sem e com contraste de temperatura na visita ao pátio de vigas da linha 17-Ouro. Notar que a temperatura corporal promove o contraste termográfico em relação à superfície do concreto. Registro feito com o drone em mãos em 18/03/24.



Fonte: elaborado pelos autores.

O terceiro e último campo contemplou três trechos da linha 15-Prata. Nesse caso, além de imagens oblíquas e registros ortogonais em RGB para dar origem ao ortomosaico (FIGURA 10), a proposta dessa etapa foi realizar voos em meio a condições adversas representadas pela presença de: (i) obstáculos verticais com edifícios, árvores e linha de transmissão (FIGURA 11); (ii) elementos metálicos e subestação de energia; e (iii) zonas de turbulência

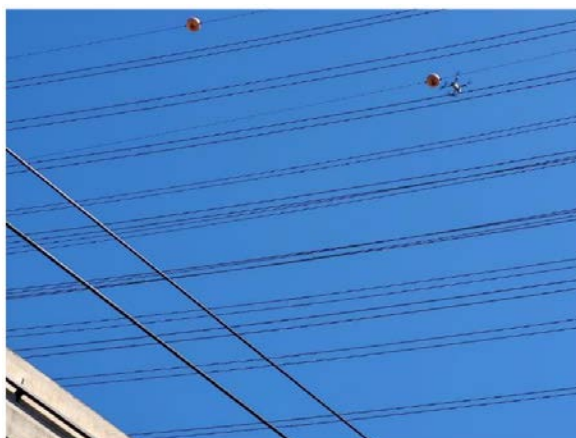
aérea com a passagem de trens (FIGURA 12). No geral, os dois drones não apresentaram quaisquer sinais de instabilidade e nenhuma anormalidade foi detectada durante os voos feitos nessas condições desfavoráveis. Ainda assim, o fato do drone DJI Mini 4 Pro contar com um sistema de detecção de obstáculos de qualidade superior ao do drone DJI M2EA tornou a sua operação mais segura e confortável, inclusive favorecendo uma maior aproximação em relação aos alvos.

Figura 10 – Ortomosaico do primeiro do trecho visitado na linha 15-Prata (estação Camilo Haddad) em 19/04/24. Dados gerados por drone em voo manual.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 11 – Registro durante teste dedicado a identificar eventuais interferências que a linha de transmissão de alta tensão poderia causar no voo do drone. Registro feito por drone em 19/04/24 no primeiro trecho visitado da linha 15-Prata.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 12 – Registro durante teste dedicado a identificar eventuais interferências que a passagem de trem poderia causar no voo do drone. Registro feito por drone em 19/04/24 no primeiro trecho visitado da linha 15-Prata.



Fonte: elaborado pelos autores.

5 Conclusões

Este artigo apresentou os resultados das atividades desenvolvidas pelo IPT e pelo Metrô-SP, reunindo considerações sobre as potencialidades e limitações relacionadas ao uso de dois drones DJI M2EA e DJI Mini 4 Pro em inspeções não destrutivas de seis trechos dos mon trilhos do Metrô-SP, quatro deles na linha 15-Prata e os outros dois na linha 17-Ouro. No geral, os resultados são suficientes para se afirmar que drones constituem uma importante ferramenta para a inspeção de empreendimentos lineares desse tipo.

Trata-se de um equipamento que, por meio dos registros com suas câmeras convencional e termográfica, permite a aquisição de dados de forma rápida, segura para os operadores e sem comprometer a integridade dos materiais inspecionados. Além disso, sua versatilidade possibilita a identificação de características relevantes (especialmente na fase construtiva)

e avaliação do estado de conservação das estruturas (mais comum na fase de operação), o que vale inclusive para trechos em que a visualização de elementos importantes costuma ficar prejudicada pela geometria das próprias estruturas e/ou pela existência de obstáculos.

Em relação aos dois drones testados, constatou-se que as imagens feitas com a câmera termográfica não detectaram nenhum elemento diferente daqueles registrados pela câmera convencional. Além disso, muitas vezes os registros da câmera termográfica não apresentam nitidez suficiente para evidenciar características distintas que, em contrapartida, apareceram com clareza nos registros feitos na forma de imagem e vídeo com a câmera convencional.

Outro aspecto interessante é que as imagens ortogonais feitas com a câmera convencional mesmo sem pontos de apoio podem ser usadas para dar origem a ortomosaicos com qualidade suficiente para, por exemplo, que se compare a geometria da via construída com aquela prevista em projeto. Complementarmente, em comparação com o drone DJI M2EA, o drone DJI Mini 4 Pro mostrou-se mais seguro e confortável em relação à aproximação de alvos e à prevenção de colisão, algo que está diretamente associado à qualidade do sistema de detecção que esse modelo apresenta.

Tendo em vista a realização de eventuais estudos complementares a este, sugere-se que seja priorizada a realização de ensaios com a câmera termográfica em situações em que as estruturas de concreto estejam em processo de aquecimento ou resfriamento. Em condições assim, a temperatura na porção superficial irá variar de forma uniforme, com exceção de trechos em que a via de condução de calor seja interrompida pela presença de patologias subsuperficiais. Nesse sentido, outra sugestão é que parte dos ensaios seja conduzida em estruturas de concreto que contenham alguma anomalia (ex: delaminação). Contar com estruturas que disponham de anomalias subsuperficiais e acompanhá-las em situações de aquecimento ou resfriamento são duas condições que, se conciliadas simultaneamente, tendem a favorecer a avaliação do desempenho das câmeras termográficas. Por fim, em relação a casos que se proponham a elaborar ortomosaicos, sugere-se a utilização de um equipamento compatível com aplicativo que permita a elaboração de planos de voo, além do uso de pontos de apoio. Isso favorecerá a aquisição de imagens ortogonais com sobreposições adequadas que, ao serem processadas em software de fotogrametria ou na nuvem, darão origem a ortomosaicos com maior precisão e acurácia.

6 Agradecimentos

À geóloga Juliana Sabrina da Conceição Silva (FIPT), ao geólogo MSc. Lucas Henrique Sandre (FIPT), à engenheira ambiental Luciana Conceição Valentim (FIPT) e ao engenheiro civil MSc. Alexandre Cordeiro dos Santos (IPT) pelas participações nas coletas de dados em campo. À oceanógrafa MSc. Larissa Felicidade Werkhauser Demarco (IPT) e à pesquisadora Edna Baptista dos Santos Gubitoso (IPT) pelas contribuições nas etapas de revisão e referências.

6 Referências

ANDRADE, R. P. **Uso da termografia infravermelha embarcada em drone como ferramenta para a inspeção de patologias em revestimentos aderidos de fachada.** 2020. 237 f. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3153/tde-18112020-102555/publico/RenanPereiradeAndradeCORR20.pdf>. Acesso em: 25 maio 2024.

ARAÚJO, W.; GOMES, G. N. S.; LUCENA, A.; SOUZA, H.; RIBEIRO, I. Avaliação de manifestações patológicas com uso de drone. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Porto Alegre: Alconpat, 2020. 8 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343327398_AVALIACAO_DE_MANIFESTACOES_PATOLOGICAS_COM_USO_DE_DRONE. Acesso em: 15 maio 2024.

CAVALHIERI, C. P.; SANTOS, J. A.; SILVA, E. M.; SZMIDKE, R. Monorail Track Inspection with the Use of Drones. In: ANNUAL CONFERENCE, MONORAILEX, 16., 2024, Berlin. **Proceedings [...]**. Berlin: International Monorail Association, 2024. v. 1. p. 1-18.

CHA, Y.; CHOI, W.; SUH, G. Autonomous Structural Visual Inspection Using Region-Based Deep Learning for Detecting Multiple Damage Types. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, n. 4, p.1-17, Nov. 2017.

DIAS-DA-COSTA, D.; VALENÇA, J.; JULIO, E. N. B. S.; ARAUJO, H. J. Crack propagation monitoring using an image deformation approach. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 24, n. 10, p. 1-14, Dec. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312921787_Crack_propagation_monitoring_using_an_image_deformation_approach. Acesso em: 02 jul. 2025.

DING, W.; YANG, H.; YU, K.; JIANGPENG, S. Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer. **Automation in Construction**, v. 152, art. 104929, Aug. 2023.

ELLENBERG, A.; KONTSOS, A.; MOON, F.; BARTOLI, I. Bridge deck delamination identification from unmanned aerial vehicle infrared imagery. **Automation in Construction**, v. 72, part 2, p. 155-165, Dec. 2016.

ESCOBAR-WOLF, R. OOMMEN, T.; BROOKS, C. N.; DOBSON, R. J.; AHLBORN, T. M. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Assessment of Concrete Bridge Deck Delamination Using Thermal and Visible Camera Sensors: A Preliminary Analysis. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 29, n. 4, p. 1-16, Apr. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316173366_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV-Based_Assessment_of_Concrete_Bridge_Deck_Delamination_Using_Thermal_and_Visible_Camera_Sensors_A_Preliminary_Analysis. Acesso em: 02 jul. 2025.

FEROZ, S.; DABOUS, S. A. UAV-based remote sensing applications for bridge condition assessment. **Remote Sensing**, v. 13, n. 91809, p. 1-38, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/9/1809>. Acesso em: 15 maio 2024.

FORLANI, G.; DALL'ASTA, E.; DIOTRI, F.; MORRA DI CELLA, U.; RONCELLA, R.; SANTISE, M. Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 1-22, Feb. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323283344_Quality_Assessment_of_DSMs_Produced_from_UAV_Flights_Georeferenced_with_On-Board_RTK_Positioning. Acesso em: 02 jul. 2025.

FUNAHASHI FILHO, E. I.; GAMBALE, P.; GUY, P-Y; KUPERMAN, S. C.; HASPAYK, N. P. Inspeção de estruturas de concreto afetadas por reações expansivas com o uso de drone. **Revista Concreto & Construções**, v. 52, p. 65-71, abr./jun. 2024. Disponível em: https://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/edicao114/Revista%20Concreto%20IBRACON%20114%20-%20Inspecao%20e%20manutencao%202.pdf. Acesso em: 02 jul. 2025.

GUTIÉRREZ, A. G.; SANCHEZ-FERNANDEZ, M.; SANJOSE-BLASCO, J. J.; GUDINO-ELIZONDO, N.; LAVADO-CONTADOR, F. Is it possible to generate accurate 3D point clouds with UAS-LIDAR and UAS-RGB photogrammetry without GCPs? A case study on a beach and rocky Cliff. **Landscape Ecology**, v. 39, n. 11, p. 1-24, Nov. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/385594771_Is_it_possible_to_generate_accurate_3D_point_clouds_with_UAS-LIDAR_and_UAS-RGB_photogrammetry_without_GCPs_A_case_study_on_a_beach_and_rocky_cliff. Acesso em: 02 jul. 2025.

NEXCO-WEST USA. **Comparison of Infrared Cameras for Concrete Bridge Deck Scanning**: vol. 2 Field Test at Haymarket Bridge. Washington, DC, Nexco-West, 2014. v. 2, 19 p. Disponível em: <https://www.w-nexco-usa.com/assets/documents/Vol.2%20On-Site%20Test.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

OMAR, T.; NEHDI, M. L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography. **Automation in Construction**, v. 83, p. 360-371, Nov. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301139>. Acesso em: 15 maio 2024.

SANTOS, A. C.; BECERE, O. H.; CAVALHIERI, C. P. Tecnologias digitais: inspeção de fachadas com drone acoplado com câmera convencional ou termográfica. **Revista Concreto & Construções**, v. 52, n. 114, p. 29-31, abr./jun. 2024. Disponível em: <https://site.ibracon.org.br/revista-concreto-construcoes-edicao-114/>. Acesso em: 02 jul. 2025.

SCOTT, M.; KRUGER, D. Infrared thermography as a diagnostic tool for subsurface assessments of concrete structures. In: EKOLU, S. T.; DUNDU, M.; GAO, X. **Construction Materials and Structures**. Amsterdam: IOS Press Books, 2014. p. 904 – 909. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/389248109_Infrared_thermography_as_a_diagnostic_tool_for_subsurface_assessments_of_concrete_structures#:~:text=Infrared%20thermography%2C%20as%20a%20diagnostic,techniques%20used%20for%20delamination%20surveys. Acesso em: 02 jul. 2025.

SOPCHAKI, C. H.; PAZ, O. L. S.; GRAÇA, N. L. S. S.; SAMPAIO, T. V. M. Verificação da qualidade de ortomosaicos produzidos a partir de imagens obtidas com aeronave remotamente pilotada sem o uso de pontos de apoio. **Revista Ra'e Ga**, Curitiba, v. 43, p. 200-214, fev. 2018. (Temático de Geotecnologias). Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/56564/34905>. Acesso em: 02 jul. 2025.

TONDELO, P. G.; BARTH, F. Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e019009, fev. 2019. ISSN 1980-6809. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652817>. Acesso em: 15 maio 2024. Doi: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652817>.

10.29327/2774886.9.29-1



Artigo Técnico

Análise do número de passageiros transportados pelo metrô da cidade do Rio de Janeiro: uma aplicação do método *Causal Impact*

Analysis of the number of passengers transported by the subway in the city of Rio de Janeiro: an application of the Causal Impact method

Mario Antonio Margarido^{ab*}, Daniel Kiyoyudi Komesu^a, Helcio Shiguenori Takeda^a

^a Pezco Economics

^b Pesquisador do PSP Hub

Palavras-chave: Reequilíbrio Econômico-Financeiro, Contrafactual, Pandemia, Causal impact.

Keywords: Economic-financial rebalancing, counterfactual, pandemic, causal impact.

* e-mail: mario.margarido@pezco.com.br

Resumo

Eventos exógenos negativos, os quais não podem ser previstos na elaboração de contratos, podem comprometer as receitas de concessionárias de serviços públicos, necessitando assim, o reequilíbrio econômico e financeiro destas empresas sob condição de afetar os serviços públicos prestados pelas concessionárias. Este artigo utiliza o método denominado *Causal Impact*, cuja base é o Modelo Bayesiano Estrutural, para analisar como mudanças estruturais provocadas pela pandemia, com foco a partir de abril de 2020, impactaram o número de passageiros transportados pela companhia do metrô da Cidade do Rio de Janeiro. Este modelo permitiu criar um cenário contrafactual caso não tivesse ocorrido a pandemia. Os resultados mostram que os efeitos sobre o número de passageiros transportados foram permanentes, sendo que, em termos relativos, para o período de abril de 2020 até fevereiro de 2024, na média, o número de passageiros transportados caiu 41%, comparativamente ao período que antecedeu a pandemia. Neste caso, fica claro a necessidade da revisão contratual entre as partes para se determinar o reequilíbrio da concessionária, para não comprometer sua saúde financeira, nem os serviços prestados à população.

Abstract

Negative exogenous events, which cannot be foreseen in the drafting of contracts, can compromise the revenues of public service concessionaires, thus requiring the economic and financial rebalancing of these companies under the condition of affecting the public services provided by the concessionaires. This article uses the method called Causal Impact, based on the Bayesian Structural Model to analyze how the structural changes caused by the pandemic, focusing on April 2020, impacted the number of passengers transported by the subway company of the City of Rio de Janeiro. This model allowed the creation of a counterfactual scenario if the pandemic had not occurred. The results show that the effects on the number of passengers transported were permanent, and in relative terms, for the period from April 2020 to February 2024, on average, the number of passengers transported fell by 41%, compared to the period before the pandemic. In this case, there is a need for contractual review between the parties to determine the rebalancing of the concessionaire, so as not to compromise its financial health or the services provided to the population.

1 Introdução

A crise da Covid-19 pode ser considerada um divisor de águas, uma vez que impactou, em menor e maior escala, diversos setores da economia, no Brasil e no mundo.

A fase inicial da pandemia se caracterizou pela estratégia de restringir a circulação de pessoas para conter a disseminação do próprio vírus, dada a inexistência de uma vacina. Assim, os primeiros meses da pandemia foram os mais críticos, com acentuados efeitos negativos sobre a atividade econômica, caracterizando-se por uma forte contração tanto da demanda quanto da oferta.

O segundo momento se caracterizou pelo desenvolvimento de vacinas, aliado a uma rápida expansão da demanda, conjuntamente com lenta recuperação da oferta, resultando em inflação em função desse desequilíbrio.

A pandemia da Covid-19 gerou efeitos duradouros em diversos aspectos da vida social e econômica. Na educação, observou-se uma intensificação do uso de tecnologias voltadas ao ensino a distância. No setor de alimentação, houve um crescimento expressivo na utilização de aplicativos para entrega de refeições. De forma mais ampla, empresas de diferentes segmentos flexibilizaram a exigência de presença física dos trabalhadores, adotando o regime de trabalho remoto, seja parcial ou integral (BOTELHO, CARDOSO, CANELLA, 2020; VELOSO, 2021; GÓES, MARTINS, NASCIMENTO, 2022).

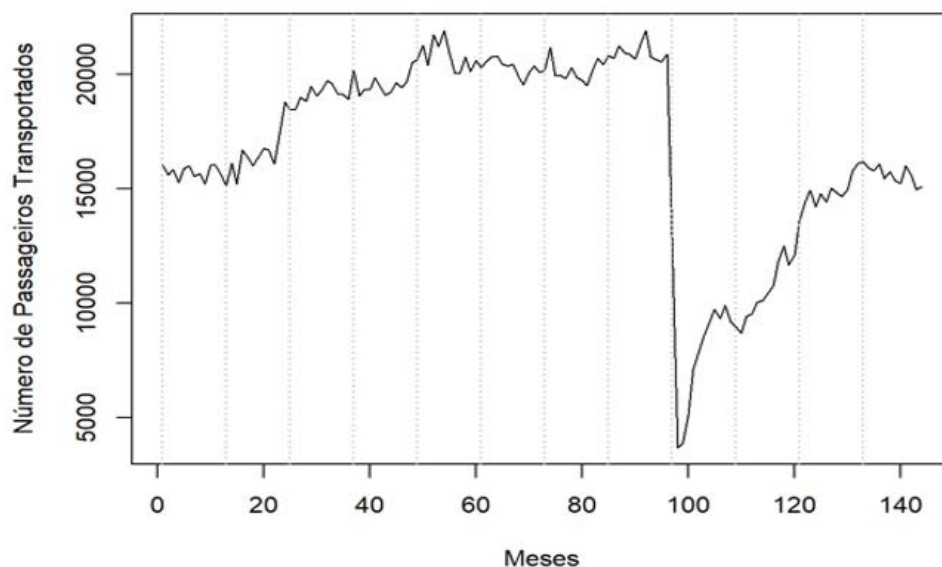
Enquanto alguns segmentos econômicos conseguiram, em maior ou menor grau, contornar a questão da restrição de mobilidade das pessoas, em outros, como no caso do segmento de transporte coletivo de passageiros (ônibus, trens e metrô), isto não foi possível, em função de sua especificidade. Isso resultou em uma expressiva redução no número de passageiros e, conseqüentemente, nas receitas dessas empresas ao redor do mundo (LABATE et al., 2020).

Nos casos de concessões públicas, existem contratos entre o poder concedente e a concessionária. Quando ocorrem os denominados efeitos exógenos, os quais não podem ser previstos na elaboração dos contratos, as receitas dessas empresas concessionárias são afetadas, levando a necessidade de um reequilíbrio contratual, para evitar eventual prejuízo para a concessionária e garantindo assim a qualidade dos serviços prestados junto aos usuários do serviço (ZABAN; POMPERMAYER; CARVALHO, 2021).

Especificamente, no caso do metrô da Cidade do Rio de Janeiro, o serviço de transporte de passageiros é uma concessão. Em se tratando do transporte de passageiros, é estabele-

cida uma tarifa, sendo que a receita da concessionária reside em multiplicar o número de passageiros transportados pelo valor da respectiva tarifa. Para se ter uma real dimensão do efeito da pandemia sobre o número de passageiros transportados pelo sistema de metrô da Cidade do Rio de Janeiro, é apresentada a **FIGURA 1**. Observam-se dois efeitos da pandemia sobre o número de passageiros transportados pelo sistema. Em primeiro lugar, verifica-se uma queda abrupta a partir de abril de 2020. Em segundo lugar, apesar da recuperação do número de passageiros transportados após abril de 2020, essa recuperação não foi suficiente para retomar o número de passageiros transportados no período anterior à pandemia, configurando assim um impacto permanente sobre o número de passageiros transportados, e, conseqüentemente, sobre a receita da concessionária a partir de então.

Figura 1 – Número de Passageiros Transportados por Mês em Milhares de Pessoas, Cidade do Rio de Janeiro, Março de 2012 – Fevereiro de 2024.



Fonte: Elaborada a partir de dados do Data.Rio.

O objetivo principal deste estudo é estimar o número de passageiros que teriam sido transportados pelo Metrô da Cidade do Rio de Janeiro, caso a pandemia não tivesse ocorrido, elaborando um cenário contrafactual utilizando o método denominado *Causal Impact*, o qual tem como base os Modelos State Space e Bayesiano Estrutural. Além disso, o estudo visa determinar, com base nesse modelo, as elasticidades da renda média real e do número de pessoas desocupadas sobre o nível de passageiros transportados pelo metrô.

2 Mobilidade urbana e metrô: aspectos gerais

Em linhas gerais, a mobilidade urbana está diretamente ligada com o fato das pessoas se deslocarem dentro de uma região urbana de forma eficiente, segura e acessível. Especificamente, consiste na possibilidade de ir de um ponto a outro, seja para trabalhar, estudar, se divertir ou realizar outras atividades do dia a dia. Portanto, a mobilidade urbana envolve complexa interação entre diferentes modais de transporte, infraestrutura urbana e planejamento.

Nas grandes metrópoles, o metrô é um dos sistemas de transporte coletivo mais eficientes devido a diversos aspectos. Entre eles, destacam-se a alta capacidade, que permite transportar muitas pessoas em curto período, e a rapidez nos deslocamentos, reduzindo o tempo de viagem. Outro aspecto positivo é a regularidade, pois, opera com horários definidos, oferecendo maior previsibilidade aos usuários. Comparado a outros modais de transporte, o metrô proporciona maior grau de conforto aos passageiros. Do ponto de vista ambiental, contribui para a redução da emissão de poluentes e ajuda a aliviar congestionamento de trânsito nas ruas das cidades.

Por outro lado, a construção e manutenção do metrô exigem elevados investimentos, o que abre caminho para a concessão desse serviço via Parceria Público-Privada (PPP). Nesse tipo de estratégia, a operação e, em alguns casos, a manutenção de um sistema metroviário são transferidas para uma empresa privada. Essa modalidade tem sido cada vez mais adotada em diversas cidades do mundo, visando otimizar a gestão dos sistemas de transporte público e atrair investimentos privados para a expansão e modernização das redes (RIO DE JANEIRO, s.d.).

Os benefícios proporcionados pela PPP incluem atrair investimentos privados para a expansão e modernização das redes metroviárias, algo que pode ser difícil de ser realizado apenas com recursos públicos. Além disso, empresas privadas tendem a buscar maior eficiência operacional, reduzindo custos e melhorando a qualidade dos serviços. Em termos de inovações, empresas privadas podem trazer novas tecnologias e soluções inovadoras para o sistema metroviário, como sistemas de bilhetagem eletrônica mais avançados e integração com outros modais de transporte de forma mais rápida do que o setor público (RIO DE JANEIRO, s.d.).

Outro fato de expressiva relevância é a questão dos riscos financeiros. A viabilidade financeira de um contrato de concessão pode ser afetada por diversos fatores, como variações na demanda, aumento dos custos de operação, mudanças nas políticas públicas ou outros

tipos de choques exógenos. É fundamental que os contratos de concessão estabeleçam mecanismos de controle e fiscalização para garantir que os interesses dos usuários sejam preservados e que a qualidade do serviço seja mantida. Além disso, é necessária a inclusão de salvaguardas nos contratos de concessão para proteger a rentabilidade das empresas concessionárias, evitando que problemas financeiros afetem negativamente as operações e a segurança dos usuários do sistema metroviário.

3 Principais aspectos de contratos de concessão: breve descrição

Os Contratos de Concessões¹ são instrumentos jurídicos que permitem ao poder público transferir, por um determinado período, a execução de um serviço público ou a exploração de um bem público a uma pessoa jurídica de direito privado. Essa modalidade de parceria público-privada visa otimizar a prestação de serviços e a utilização de recursos públicos.

Os principais aspectos a serem considerados em relação aos Contratos de Concessões podem ser resumidos em cinco quesitos. Em primeiro lugar, sua natureza: são contratos administrativos, regidos por normas específicas e princípios de Direito Administrativo, como legalidade, impessoalidade, moralidade, publicidade e eficiência. Outro aspecto relevante é o objeto: esses contratos podem ter como objeto a prestação de serviços públicos, como rodovias, saneamento básico, energia elétrica, entre outros, ou a exploração de bens públicos, como portos e aeroportos. Outro quesito refere-se às modalidades desses contratos. Existem diversas modalidades de concessão, como a comum², a patrocinada³ e a administrativa⁴, cada uma com suas especificidades.

1 A Lei nº 8.987/95 Dispõe sobre o regime de concessão e permissão de serviços públicos, enquanto a Lei nº 11.079/04: Regula as parcerias público-privadas.

2 É um tipo de contrato em que o governo (Poder Concedente) delega a uma empresa privada (Concessionária) a responsabilidade de prestar um determinado serviço público ou realizar uma obra pública. Detalhes podem ser encontrados em JUSTEN FILHO e SCHWIND (2022).

3 A concessão patrocinada é uma modalidade de parceria público-privada (PPP) em que o poder público delega a uma empresa privada a prestação de um serviço público ou a execução de uma obra pública. A principal característica desse tipo de concessão é a existência de um pagamento adicional do governo à empresa privada, além das receitas provenientes das tarifas cobradas dos usuários. Detalhes encontram-se em MELLO et al. (2023).

4 A concessão administrativa é uma modalidade de parceria público-privada (PPP) em que o poder público delega a uma empresa privada a prestação de um serviço público, tendo a própria administração pública como usuária direta ou indireta. Neste caso, o serviço prestado pela empresa privada não é destinado diretamente ao cidadão comum, mas sim ao próprio governo ou a alguma entidade pública.

Analisando mais detalhadamente cada uma dessas modalidades, a Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995 (Brasil, 1995), dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no artigo 175 da Constituição Federal, regulando a concessão comum. Um exemplo é a concessão de rodovias com pedágios. Já a Lei nº 11.079, de 30 de dezembro de 2004 (Brasil, 2004), institui as normas gerais para licitação e contratação de PPP no âmbito da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, nos termos do artigo 37, inciso XXI, da Constituição Federal (Brasil, 2023), regulando as concessões patrocinadas e administrativas. Exemplos de concessões patrocinadas e administrativas são as concessões de linhas de metrô e a construção e a gestão de presídios, respectivamente.

O tempo de vigência do contrato é definido pelo respectivo edital e pode variar conforme a complexidade do serviço ou bem concedido. Por fim, a remuneração da concessionária pode abranger diversos tipos, como tarifas pagas pelos usuários, contraprestações pecuniárias do poder concedente ou uma combinação de ambas.

Quanto às obrigações entre as partes, cabe ao poder concedente elaborar o edital, realizar a licitação, fiscalizar a execução do contrato e garantir o equilíbrio econômico-financeiro do contrato. Cabe à concessionária executar o serviço ou explorar o bem concedido, investir na melhoria do serviço ou bem, e cumprir as normas técnicas e legais aplicáveis. Ainda sobre as obrigações, tem-se o denominado equilíbrio financeiro. Em caso de descumprimento das obrigações contratuais pela concessionária, o poder concedente pode encampar o contrato, retomando a prestação do serviço ou a exploração do bem. Finalmente, a renovação do contrato pode ser prevista em edital, mas está sujeita à análise da conveniência e oportunidade por parte do poder concedente.

Outro aspecto relevante em relação às concessões é o equilíbrio econômico-financeiro, um dos pilares dos contratos de concessão, essencial para garantir a viabilidade e a continuidade da prestação do serviço público ou da exploração do bem público. Ele representa a manutenção das condições econômicas e financeiras inicialmente estabelecidas no contrato, de modo a assegurar que a concessionária possa recuperar seus investimentos e obter um retorno adequado. Em linhas gerais, implica que a relação entre os encargos da concessionária (custos de operação, manutenção, investimentos) e as receitas provenientes da exploração do serviço ou bem concedido deve permanecer equilibrada ao longo da vigência do contrato. Portanto, é necessário garantir que as receitas devem ser suficientes para cobrir todos os custos e gerar margem adequada para a concessionária.

O equilíbrio financeiro é fundamental para o sucesso das concessões. Além disso, o equilíbrio financeiro garante que a concessionária recupere os investimentos realizados e

obtenha um retorno adequado. Um ambiente de estabilidade econômica incentiva a concessionária a investir em melhorias e a prestar um serviço de qualidade.

Por outro lado, o desequilíbrio financeiro pode levar a concessionária à insolvência e comprometer a qualidade e continuidade da prestação do serviço. Diversos fatores podem impactar negativamente o equilíbrio econômico-financeiro das concessionárias, como alterações legislativas, que podem gerar custos adicionais para a concessionária, e eventos imprevisíveis ou exógenos, como catástrofes naturais, crises econômicas e pandemias. Variáveis econômicas, como taxa de câmbio e inflação, podem afetar tanto as receitas quanto os custos. Finalmente, alterações nas condições de mercado, como concorrência, demanda por serviços e mudanças tecnológicas, também podem influenciar o desempenho da concessionária.

Diante desse cenário, visando manter o equilíbrio econômico-financeiro, os contratos de concessão geralmente preveem mecanismos de reequilíbrio, como revisões periódicas para ajustar as tarifas ou outras condições contratuais em função de variações nos índices econômicos ou outros fatores relevantes. Em caso de eventos extraordinários e imprevisíveis, as partes podem negociar uma repactuação do contrato para restabelecer o equilíbrio. Finalmente, a concessionária pode ter direito a indenização por parte do poder concedente em caso de descumprimento contratual ou de eventos não previstos que afetem o equilíbrio econômico-financeiro.

Portanto, o equilíbrio econômico-financeiro é um princípio fundamental dos contratos de concessão, que garante a viabilidade e a continuidade dos serviços públicos. Ao compreender os mecanismos e os fatores que influenciam esse equilíbrio, é possível avaliar melhor os riscos e as oportunidades envolvidos nesse tipo de contrato.

4 Dados

Foram utilizadas três séries temporais com frequência mensal: a Quantidade de Passageiros Transportados (QUANT) pelo metrô da Cidade do Rio de Janeiro, em milhares de pessoas, cuja fonte é o Site DATA.RIO; o Número de Pessoas Desocupadas (PES_DESO), em milhões de pessoas; e a Renda Média Real do Trabalhador (REND_MED), em reais, sendo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a fonte dessas duas últimas séries. O período analisado vai de março de 2012 até fevereiro de 2024, totalizando 144 observações.

Do ponto de vista socioeconômico, as variáveis mais relevantes para explicar a demanda por transporte público incluem renda, emprego (ou desemprego), preços e tarifas do

metrô e de modais alternativos, como ônibus, táxis, aplicativos de transporte e o preço dos combustíveis. No entanto, variáveis relacionadas a preços e tarifas foram excluídas da modelagem devido à dificuldade de acesso a dados mensais consistentes e à baixa variabilidade temporal. Em geral, tarifas de transporte público são administradas e permanecem constantes por longos períodos, sendo reajustadas apenas anualmente ou em intervalos ainda maiores, o que compromete sua utilidade em modelos de séries temporais que exigem variabilidade nas covariáveis. Por essa razão, optou-se por utilizar variáveis com maior disponibilidade e variação ao longo do tempo, como renda média real e taxa de desocupação, que são amplamente reconhecidas na literatura como determinantes da mobilidade urbana.

5 Procedimento Metodológico

Dado que as variáveis *QUANT*, *PES_DESO* e *REND_MED* se caracterizam por possuírem componente sazonal, estas variáveis foram dessazonalizadas pelo Método da Decomposição *X13-ARIMA-SEATS* e passaram a ser denominadas como *QUANT_d11*, *PES_DESO_d11* e *REND_MED_d11*, respectivamente. Em função da escassez de espaço, não são apresentados detalhes sobre o *X13-ARIMA-SEATS*. Maiores informações sobre a questão da dessazonalização podem ser encontradas em Margarido, Shikida e Komesu (2023) e Margarido (2020).

Métodos econométricos tradicionais, como modelos de regressão ou de séries temporais, incluindo Modelos de Função de Transferência, Cointegração de Engle-Granger e Modelos de Correção de Erros Vetoriais (VECM), entre outros, permitem estimar a elasticidade média tanto no curto quanto no longo prazo. No entanto, esses métodos não consideram os componentes não observáveis, que são apresentados em detalhes nesta subseção.

A principal vantagem da utilização do Modelo Estrutural é que ele permite a decomposição de séries temporais em quatro componentes não observáveis: Tendência, Sazonalidade, Ciclo e Componente Irregular. De acordo com Margarido *et al.* (2020, p.8), o Modelo Estrutural permite desagregar o componente de tendência em duas partes: o “nível da série e sua respectiva inclinação, permitindo determinar se o nível de série é constante ou não, e se sua inclinação é constante ou não ao longo do tempo. Também, permite determinar se há sazonalidade e, uma vez confirmada, se ela é estocástica ou determinística; o mesmo ocorre com o componente Ciclo. Em relação ao componente Irregular, o Modelo Estrutural permite sua modelagem através do Modelo Autorregressivo-Média Móvel (ARMA), tanto para parâmetros regulares quanto sazonais.

Conforme mencionado anteriormente, um aspecto que torna o Modelo Bayesiano Estrutural interessante é que ele lida com componentes não observáveis. Diferentemente do Modelo Autorregressivo Integrado de Médias Móveis (ARIMA), o Modelo Bayesiano Estrutural não se baseia em variáveis estacionárias, componentes autorregressivos (valores defasados ou passados) ou componentes de médias móveis (choques presente e passados). Com o Modelo Bayesiano Estrutural, é possível inspecionar visualmente os componentes subjacentes do modelo. Além disso, é necessário realçar que este modelo permite lidar melhor com a questão da incerteza, pois é possível quantificar a incerteza posterior dos componentes individuais, controlar a variância dos componentes e impor crenças prévias ao modelo.

O modelo Bayesiano Estrutural de séries temporais tem como base o modelo State Space, conforme apresentado em Brodersen *et al.* (2015). Matematicamente é representado pelas **Equações 1 e 2**:

$$y_t = Z_t^T \alpha_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\alpha_{t+1} = T_t \alpha_t + R_t \eta_t \quad (2)$$

sendo que $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^2)$ e $\eta_t \sim N(0, Q_t)$ são independentes de outras incógnitas. Além disso, a primeira equação é denominada de equação de observação, a qual faz a ligação entre os dados observados para a variável y_t em relação a um vetor de estado de dimensão d latente (ou não observado) α_t . A segunda equação é denominada de equação de estado (ou de transição), a qual comanda a evolução do vetor α_t através do tempo. A variável y_t é representada por um escalar, enquanto Z_t consiste em um vetor de produto de dimensão d . O elemento T_t representa uma matriz de transição de ordem $d \times d$. O termo R_t corresponde a uma matriz de controle de ordem $d \times q$. O elemento ε_t representa uma observação de erro escalar com variância σ_t , enquanto o termo η_t representa um sistema de erro com dimensão q com base numa matriz de difusão de estado Q_t , onde $q \leq d$. É necessário destacar que ao se escrever a estrutura da segunda equação como $R_t \eta_t$, permite que se incorpore componentes de estado com rank incompleto, permitindo a inclusão de elementos temporais relevantes como sazonalidade, nível e tendência.

O modelo de espaço de estado se caracteriza por ser modular. Componentes de estado independentes podem ser combinados, concatenando seus vetores de observação representados por Z_t e organizando as outras matrizes do modelo como elementos em uma matriz diagonal de bloco. Isto fornece ao usuário flexibilidade considerável para escolher componentes para modelar tendências, sazonalidade, efeitos de regressão e potencialmente outros componentes de estado que podem ser necessários.

Segundo Scott e Varian (2013), adicionando o modelo de regressão ao modelo estrutural tem-se as **Equações 3, 4, 5 e 6**:

$$y_t = \mu_t + \tau_t + \beta^T x_t + \epsilon_t \quad (3)$$

$$\mu_t = \mu_{t-1} + \delta_{t-1} + u_t \quad (4)$$

$$\delta_t = \delta_{t-1} + v_t \quad (5)$$

$$\tau_t = -\sum_{s=1}^{S-1} \tau_{t-s} + \omega_t \quad (6)$$

sendo que, $\eta_t (u_t, v_t \text{ e } \omega_t)$ contém componentes independentes de ruído aleatório gaussiano. Embora as matrizes do modelo em um modelo de série temporal estrutural possam depender de t, neste caso Q_t representa uma matriz diagonal constante com elementos diagonais $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_\omega^2$, e ϵ_t tem variância constante σ_ϵ^2 . Este modelo contém os componentes relacionados com tendência, sazonalidade e de regressão. O nível da tendência corrente é representado por μ_t , enquanto a inclinação contemporânea da tendência é representada por δ_t . O componente sazonal τ_t pode ser pensado como um conjunto de variáveis fictícias S com coeficientes dinâmicos restritos a ter expectativa zero ao longo de um ciclo completo de estações S. Os parâmetros de interesse são as variâncias $\delta_\epsilon^2, \sigma_u^2, \sigma_v^2$ e σ_ω^2 , além dos coeficientes β s do modelo de regressão. Neste contexto, o vetor x_t é um conjunto contemporâneo de consultas de pesquisa ou verticais de tendências, incluindo quaisquer defasagens desejadas ou outras transformações. É claro que x_t pode ser estendido para incluir outros fatores também.

O Modelo de Série Temporal Estrutural se caracteriza por ser flexível no que concerne sobre a escolha dos componentes apropriados para a tendência, sazonalidade ou regressão estática ou dinâmica para controle do modelo.

Neste artigo, como as variáveis que apresentam sazonalidade foram dessazonalizadas, opta-se pelo componente denominado *Local Linear Trend*, composto pelas **equações 3 e 4**. Esse componente se adapta rapidamente a variações locais, sendo muito útil para previsões de curto prazo. Conjuntamente, foi utilizado um modelo de regressão com coeficientes estáticos. É importante destacar que as séries temporais de controle que não receberam tratamento são críticas para a obtenção de previsões contrafactuais precisas, pois levam em conta os componentes de variância compartilhados pela série, incluindo, em particular, os efeitos de outras causas não observadas que, de outra forma, não seriam explicadas pelo modelo. Portanto, é necessário incluir séries de controle no modelo por meio de uma regressão linear. Seus coeficientes podem ser estáticos ou variáveis no tempo.

Neste caso, todas as covariáveis são consideradas contemporâneas; assim, o modelo aqui utilizado não infere a inclusão de termos defasados entre séries temporais tratadas e não tratadas. No entanto, caso seja necessário, defasagens podem ser facilmente incorporadas deslocando o regressor correspondente a determinada variável no tempo.

De acordo com Brodersen *et al.* (2015, p.252), o “componente de estado mais importante para as aplicações consideradas é o componente de regressão que permite obter previsões contrafactuais construindo um controle sintético baseado em uma combinação de mercados que não foram tratados. As respostas observadas de tais mercados são importantes porque permitem explicar os componentes de variância no mercado tratado que não são prontamente capturados por submodelos sazonais mais genéricos”. Finalmente, é necessário realçar que essa abordagem pressupõe que as covariáveis não são afetadas pelos efeitos do tratamento.

Tradicionalmente, a Avaliação de Impacto procura responder com rigor científico se a implementação de determinada política pública, e somente tal política pública, determinou (causou) alteração na variável de resultado. Em outras palavras, a avaliação de determinada política pública constituiu um problema de inferência causal. Conforme Gertler *et al.* (2018), o impacto ou efeito causal de um programa (P) sobre determinada variável de resultado de interesse (Y), matematicamente, é representada pela **Equação 7**:

$$\Delta = (Y|P = 1) - (Y|P = 0) \quad (7)$$

onde, o termo Δ consiste no impacto ou efeito causal de determinada política pública (P) sobre determinada variável de resultado (Y), com o emprego da política pública, representado pelo termo $P=1$ e o mesmo resultado (Y) sem a existência de tal política, ou seja, $P=0$.

Outro conceito relevante na avaliação de impactos é o denominado contrafactual, que representa o que teria acontecido, ou seja, qual teria sido o resultado (Y) para um participante desta política pública, na ausência desta política (P), situação representada pelo termo $(Y|P=0)$. Como não é possível observar diretamente o contrafactual, é necessário estimá-lo. Nas palavras de Gertler *et al.* (2018, p.55), ao se “realizar uma avaliação de impacto, é relativamente fácil obter o primeiro termo da fórmula básica ($Y|P = 1$) — ou seja, o resultado com a realização de um programa (também conhecido como resultado para os tratados). Simplesmente mede-se o resultado de interesse para o participante do programa. No entanto, não se pode observar diretamente o segundo termo da fórmula ($Y|P = 0$) para o participante. É preciso obter essa lacuna de informação estimando o

contrafactual". Portanto, é necessário encontrar um grupo de comparação que tenha as mesmas características do grupo de tratamento na ausência de determinada política pública. Assim, um grupo de comparação não viesado deve ter as mesmas características, em média, que o grupo de tratamento na ausência desta política pública. Além disso, o grupo de comparação não pode ser impactado por essa política pública e, finalmente, deve reagir a essa política da mesma forma que o grupo de tratamento, caso pudesse usufruir dela. Somente quando estas três condições são preenchidas é que a implementação de tal política pública explicará plenamente as diferenças na variável de resultado (Y) entre os grupos de comparação e tratamento. Para que todas essas condições sejam respeitadas, o método mais adequado consiste na seleção aleatória de tratamento dos elementos amostrais, minimizando dessa forma, vieses.

Em resumo, a avaliação de impacto procura determinar os efeitos de políticas públicas antes e depois da implementação dessas políticas. Neste artigo, em vez de utilizar a implementação de uma política pública como divisor de águas para averiguar sua efetividade, foi considerado um evento exógeno: a crise da Covid-19, que teve impactos estruturais permanentes sobre diversos setores da economia. Exemplos incluem o mercado de trabalho, com a adoção do regime de *home office*, total ou parcial, por parte das empresas, e a educação, com a aceleração da adoção de cursos *online*. Por outro lado, a crise da Covid-19 gerou impactos negativos em determinados segmentos econômicos, como o setor de transporte público. No caso do metrô da cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, o número de passageiros transportados não voltou ao nível anterior à Covid-19, desde o pior momento da pandemia em abril de 2020 até dezembro de 2024, configurando uma quebra estrutural de caráter permanente.

6 Resultados e discussão

Os resultados dos parâmetros estimados pelo modelo Bayesiano Estrutural mostram que as variáveis Número de Pessoas Desocupadas e Renda Média Real são estatisticamente significativas, sendo que a primeira é significativa estatisticamente ao nível de significância de 5%, enquanto a segunda é estatisticamente significativa ao nível de significância de 1%. Os sinais dos respectivos coeficientes estimados estão em linha com o que preceitua à Teoria Econômica, sendo positiva para a variável renda e negativa para o número de pessoas desocupadas (**TABELA 1**). Portanto, um aumento na renda real induz aumento no número de passageiros transportados pelo metrô, enquanto um aumento no desemprego reduz o número de passageiros que utilizam o metrô para se locomoverem.

Tabela 1 – Resultados do Modelo Bayesiano Estrutural, Variável Dependente (QUANT_d11) e Variáveis Independentes (REND_MED_d11 e PES_DESO_d11), Brasil, Março de 2012 – Fevereiro de 2024

| Variáveis | Estimativa | Erro Padrão | t valor | Pr(> t) |
|--------------|------------|-------------|---------|-----------|
| DESOCUPA_d11 | -0,2795 | 0,1251 | -2,234 | 0,0271 * |
| REND_MED_d11 | 6,5791 | 0,4559 | 14,429 | 0,0000 ** |

****Estatisticamente significativo ao nível de significância de 1%. *Estatisticamente significativo ao nível de significância de 5%.**

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do DATA.RIO e IBGE.

Com base nos parâmetros estimados pelo modelo Bayesiano Estrutural indicados na **TABELA 1**, pode-se determinar as respectivas elasticidades, conforme apresentado em Gujarati (2012). Para calcular cada elasticidade com base nos valores originais, dado que se trata de um modelo linear, utiliza-se a **Equação 8**:

$$\varepsilon = \beta \times \frac{\bar{X}}{\bar{Y}} \quad (8)$$

onde, ε corresponde a elasticidade, β é o valor do coeficiente estimado pelo modelo econométrico, \bar{X} é a média da série da respectiva variável independente e \bar{Y} é a média da série da variável dependente.

Observa-se na **TABELA 2** que a elasticidade renda tem valor igual a 1,17 e seu sinal é positivo. Este resultado mostra que a relação entre a renda das famílias e o transporte de passageiros pelo metrô da Cidade do Rio de Janeiro é elástica, uma vez que, variação de 1% na renda induz variação de 1,17% no número de passageiros pelo metrô, variação mais que proporcional, ou seja, esta relação é elástica. No caso da variável desemprego, a elasticidade assume valor igual a -0,17. Mais uma vez, o sinal está coerente com o que preceitua à Teoria Econômica, quando o desemprego se eleva em 1% o número de passageiros transportados pelo metrô cai somente 0,17%, configurando uma relação inelástica. Como base nestes dois resultados, pode-se inferir que a elevação na renda aumenta a circulação de pessoas e conseqüentemente, aumenta a demanda pelo transporte via metrô. Por outro lado, quando ocorre aumento no desemprego a demanda por viagens utilizan-

do o metrô decaí, porém, em menor escala, indicando que, mesmo desempregadas, as pessoas precisam utilizar o deslocamento via metrô, seja para suas atividades diárias, seja para procurar emprego, por exemplo.

Tabela 2 – Média do Coeficiente Estimado, Valor da Elasticidade e Classe da Elasticidade, Variáveis QUANT_d11, REND_MED_d11 e DESO_d11, Brasil, Março de 2012 – Dezembro de 2022

| Variável | Média | Coeficiente Estimado Médio | Valor da Elasticidade | Classe da Elasticidade |
|--------------|-----------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| QUANT_d11* | 16.833,00 | | | Passageiros |
| REND_MED_d11 | 3.009,86 | 6,5791 | 1,1763 | Renda |
| DESO_d11 | 10.620,00 | -0,2795 | -0,1763 | Desemprego |

*Variável Normalizada, valor igual a unidade.

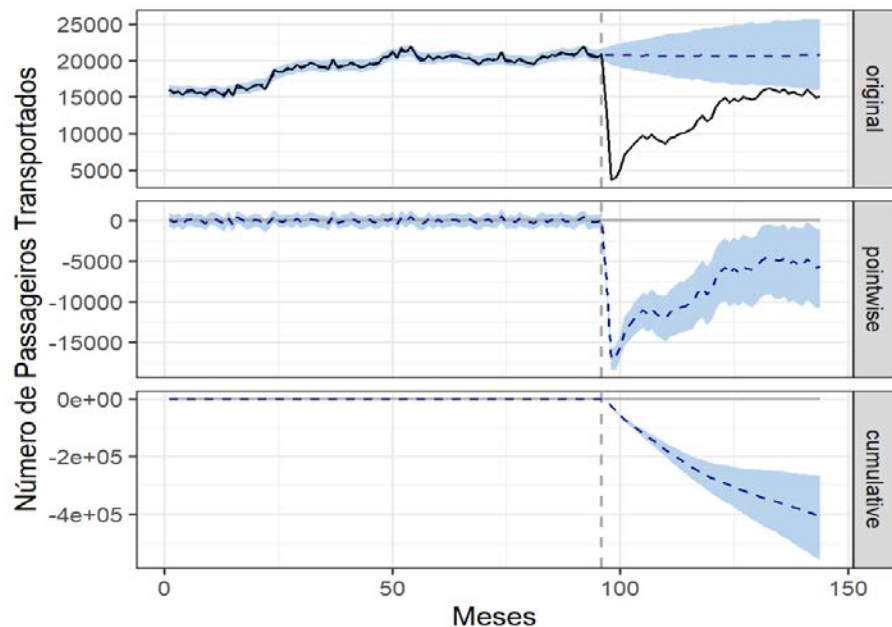
Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do DATA.RIO e IBGE.

A parte superior da **FIGURA 2** apresenta o número de passageiros efetivamente transportados pelo metrô da Cidade do Rio de Janeiro (Linha Cheia) e o Número de Passageiros Transportados Previsto pelo modelo econométrico antes e depois da pandemia. Como pode ser observado, os efeitos da pandemia sobre o número de passageiros transportados tiveram caráter permanente, pois, apesar de apresentar recuperação ao longo do tempo, não retornou ao patamar anterior da pandemia.

A parte central da **FIGURA 2** apresenta a diferença entre os valores efetivamente observados e previstos pelo modelo. Como pode ser observado na **FIGURA 2**, o saldo líquido em relação ao número de passageiros transportados apresenta tendência ascendente. Portanto, o ponto localizado em abril de 2020, apresenta um cenário distinto do que prevaleceu anteriormente a esta data, logo, a crise gerada pela Covid-19 conjuntamente com as mudanças estruturais proporcionadas no período pós-pandemia, tiveram impactos permanentes sobre o número de passageiros transportados pelo metrô da Cidade do Rio de Janeiro, e, conseqüentemente, sobre a receita auferida pela concessionária.

Finalmente, a parte inferior da **FIGURA 2** mostra os valores acumulados mês a mês para o número de passageiros transportados, e, como pode ser observado, trata-se de uma tendência descendente.

Figura 2 – Número de Passageiros Transportados pelo Metrô da Cidade do Rio de Janeiro Prevista (Linha Tracejada) e Número de Passageiros Efetivamente Transportados pelo Metrô da Cidade do Rio de Janeiro (Linha Cheia), parte superior da Figura. Diferença entre o Número de Passageiros Transportados Previstos e Observados Ponto a Ponto, parte central da Figura. Diferença entre o Número de Passageiros Transportados Previstos e Observados Acumulado, parte inferior da Figura, Cidade do Rio de Janeiro, Março de 2012 – Fevereiro de 2024.



Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do DATA.RIO e IBGE.

Durante o período pós-intervenção (abril de 2020), a variável resposta teve um valor médio de aprox. 12,245 milhões de pessoas transportadas. Por outro lado, na ausência de uma intervenção, esperar-se-ia uma resposta média de 20,275 milhões de passageiros transportados. O intervalo de 95% dessa previsão contrafactual é [17,780 e 23,901 milhões de passageiros transportados]. Subtraindo essa previsão da resposta observada, obtém-se uma estimativa do efeito causal que a intervenção teve na variável resposta (TABELA 3). Este efeito médio é de -8,48 milhões de passageiros transportados com um intervalo de 95% de [-11,66 milhões, -5,54 milhões]. Como pode ser constatado, a pandemia e as mudanças estruturais decorrentes posteriormente, reduziram consideravelmente o número de passageiros transportados pelo metrô do Cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 3 – Número de Pessoas Transportadas pelo Metrô da Cidade do Rio de Janeiro, Valores Observados e Previstos, Média e Acumulado, Intervalo de Confiança, Cidade do Rio de Janeiro, Abril de 2020 – Fevereiro de 2024

| | Média (em milhares) | Acumulado (em milhares) |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Atual | 12.245* | 587.777 |
| Previsto (Erro Padrão) | 20.725 (1.467) | 994.811 (70.415) |
| Intervalo de Confiança de 95% | [17.780, 23.901] | [853.462, 1.147.269] |

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do DATA.RIO e IBGE.

Somando os pontos de dados individuais durante o período pós-intervenção, ou seja, em termos de valores acumulados para o período pós abril de 2020, a variável resposta teve um valor geral de 587,78 milhões de passageiros transportados. Por outro lado, se a intervenção não tivesse ocorrido, seria esperado uma soma de 994,81 milhões de passageiros transportados. O intervalo de 95% dessa previsão é [853,46 milhões, 1147,27 milhões de passageiro transportados], como pode ser observado na TABELA 3.

Em termos relativos, a variável resposta apresentou decréscimo de 41% no número de passageiros transportados. O intervalo de 95% dessa porcentagem é [-49%, -31%], como está apresentado na TABELA 4.

Tabela 4 – Número de Passageiros Transportados pelo Metrô da Cidade do Rio de Janeiro, Valores Observados e Previstos, Média e Acumulado, Efeitos Absoluto e Relativo e Intervalo de Confiança, Cidade do Rio de Janeiro, Março de 2012 – Fevereiro de 2024

| Efeitos | Média | Acumulado |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|
| Efeito Absoluto (Desvio Padrão) | -8480 (1467) | -407034 (70415) |
| Intervalo de Confiança de 95% | [-11656, -5535] | [-559492, -265685] |
| Efeito Relativo (Desvio Padrão) | -41% (4,2%) | -41% (4,2%) |
| Intervalo de Confiança de 95% | [-49%, -31%] | [-49%, -31%] |

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do DATA.RIO e IBGE.

A **TABELA 5**, apresenta um quadro resumo dos parâmetros estimados pelo Modelo Bayesiano Estrutural. Em síntese, no período pós abril de 2020 até fevereiro de 2024, o número observado de passageiros transportados pelo metrô da Cidade do Rio de Janeiro, na média, foi de 12,24 milhões de passageiros. No entanto, caso não tivesse ocorrido a pandemia, o número de passageiros previstos seria de 20,72 milhões de passageiros transportados. Em termos relativos, isto corresponde a uma redução de 40,61% no número de passageiros transportados. O grau de precisão desses resultados tem um intervalo de confiança de 95%, ou seja, esses resultados apresentam nível de significância de 5% (**TABELA 5**).

Tabela 5 – Síntese dos Resultados do Modelo Bayesiano Estrutural, Variável Dependente, Número de Passageiros Transportados pelo Metrô da Cidade do Rio de Janeiro, Valores Observados, Previstos, Efeitos Absoluto e Relativo e Nível de Significância, Cidade do Rio de Janeiro, Abril de 2020 – Fevereiro de 2024

| | Observado | Previsto | Previsto-Inferior | Previsto-Superior | Previsto-Desvio Padrão | Efeito Absoluto | Efeito Absoluto-Inferior |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|
| Média (em milhares) | 12245,35 | 20725,3 | 17780,45 | 23901,3 | 1466,97 | -8479,878 | -11656,8 |
| Acumulado (em milhares) | 587777 | 994811,14 | 853461,63 | 1147268,79 | 70414,55 | -407034,137 | -559491,79 |
| Efeito Absoluto-Superior | Efeito Absoluto-Desvio Padrão | Efeito Relativo | Efeito Relativo-Inferior | Efeito Relativo-Superior | | | |
| Média | -5535,096 | 1466,97 | -0,4061901 | -0,4876728 | -0,3113023 | | |
| Acumulado | -265684,63 | 70414,55 | -0,4061901 | -0,4876728 | -0,3113023 | | |
| Efeito Relativo-Desvio Padrão | α | p | | | | | |
| Média | 0,04233316 | 0,05 | 0,001069519 | | | | |
| Acumulado | 0,04233316 | 0,05 | 0,001069519 | | | | |

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do DATA.RIO e IBGE.

Isso significa que o efeito negativo observado durante o período de intervenção é estatisticamente significativo. A probabilidade de obter esse efeito por acaso é muito pequena (probabilidade bayesiana unilateral da área da cauda $p = 0,001$), conforme **TABELA 6**. Isso implica que o efeito causal pode ser considerado estatisticamente significativo, e conseqüentemente, os períodos da pandemia e pós pandemia, determinaram alterações estruturais permanentes em vários segmentos, sendo que, tais alterações se refletiram sobre o número de passageiros transportados pelo metrô da Cidade do Rio de Janeiro, afetando a rentabilidade da concessionária que administra o metrô, levando a necessidade de compensações, via reequilíbrio econômico financeiro para manter os serviços bem como a sustentabilidade da empresa.

Tabela 6 – Probabilidade de Efeito Causal, Variáveis QUANT_d11, REND_MED_d11 e DESO_d11, Cidade do Rio de Janeiro, Abril de 2020 – Fevereiro de 2024

| | |
|---|--------|
| Probabilidade da área da cauda posterior | 0,107% |
| Probabilidade posterior de um efeito causal | 99,89% |

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do DATA.RIO e IBGE.

7 Considerações finais

Do ponto de vista da Economia de Custos de Transação (ECT), conforme Kato e Margarido (2000, p.14), a “racionalidade dos agentes econômicos é limitada, por eles não terem condições de elaborar um modelo que possa prever perfeitamente os acontecimentos futuros; isso necessariamente implica que os contratos pertinentes a qualquer tipo de transação econômica são incompletos. Apesar de a racionalidade dos agentes econômicos ser limitada, eles estão cientes de que as relações contratuais necessitam passar por adaptações e renegociações ex-post para salvaguardar seus respectivos interesses”.

Dessa forma, considerando que a racionalidade é limitada, não é possível antecipar eventos exógenos que possam impactar as relações contratuais entre os agentes econômicos, comprometendo a rentabilidade econômica e financeira de uma empresa e a prestação de serviços públicos. No caso das concessionárias, isso torna necessária a readequação

contratual para evitar a redução da lucratividade e a consequente piora na qualidade dos serviços prestados, além de comprometer a segurança dos usuários, especialmente no setor de transporte coletivo.

Este artigo utilizou o método *Causal Impact*, baseado no Modelo Estrutural Bayesiano, para criar um cenário contrafactual sobre o transporte de passageiros pelo metrô da Cidade do Rio de Janeiro, considerando os impactos da crise da Covid-19 e suas consequências estruturais no mercado de trabalho. Os resultados indicam que a pandemia levou a uma redução média de 41% no número de passageiros transportados em comparação com o período anterior à pandemia. Dado que a principal fonte de receita da concessionária que administra o metropolitano da cidade do Rio de Janeiro é o volume de passageiros transportados, os achados deste estudo mostram que a pandemia e seus efeitos colaterais tiveram impactos contundentes sobre a receita da empresa, tornando necessário o reequilíbrio econômico e financeiro da Companhia do Metrô da Cidade do Rio de Janeiro.

A utilização do *Causal Impact* como ferramenta estatística se mostra ferramenta relevante para embasar, com rigor científico, a necessidade de renegociação do reequilíbrio econômico e financeiro, tanto no contexto das concessões quanto no setor privado, diante de choques exógenos negativos.

8 Referências

BOTELHO, L. V.; CARDOSO, L. de O.; CANELLA, D. S. COVID-19 e ambiente alimentar digital no Brasil: reflexões sobre a influência da pandemia no uso de aplicativos de delivery de comida. **Cadernos Saúde Pública**, n. 36, v. 11. 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00148020>

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, [2023]. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm>. Acesso em: 02 fev. 2025.

BRASIL. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 fev. 1995. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8987cons.htm>. Acesso em: 02 fev. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.079, de 30 de dezembro de 2004. Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 dez. 2004. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Lei/L11079.htm>. Acesso em: 02 fev. 2025.

BRODERSEN, K. H.; GALLUSSER, F.; KEHLER, J.; REMY, N. and SCOTT, S. Inferring Causal Impact Using Bayesian Structural Time Series Models. **The Annals of Applied Statistics**, Vol. 9, No. 1, 247–274. 2015. DOI: 10.1214/14-AOAS788.

GERTLER, P. J.; Martínez, S.; PREMAM, P., RAWLINGS, L. B.; VERMEERSCH, C. M.J. **Avaliação de Impacto na Prática**. Washington D.C.: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial. 2018. 406p.

GÓES, G. S.; MARTINS, F. dos S.; NASCIMENTO, J. A. S. **Um Panorama do Trabalho Remoto no Brasil e nos Estados Brasileiros Durante a Pandemia da Covid-19**. In: DA SILVA, Sandro Pereira (Org.); CORSEUIL, Carlos Henrique Leite (Org.); COSTA, Joana Simões de Melo (Org.). Impactos da pandemia de Covid-19 no mercado de trabalho e na distribuição de renda no Brasil. Brasília: IPEA, 2022. <http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-042-4>

GUJARATI, D. **Econometrics by Example**. Great Britain: Palgrave Macmillan. 2012. 416p.

JUSTEN FILHO, M.; SCHWIND, R. W. Parcerias público-privadas: reflexões sobre os 10 anos da Lei 11.079/2004. 2. ed. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2022. 915 páginas. ISBN 978-65-260-0615-3.

KATO, H. T.; MARGARIDO, M. A. Economia dos custos de transação (ECT): análise do conflito das bananas. RAUSP. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 35, n.4, p. 13-21, 2000.

LABATE, E. D. *et al.* Impacto da Pandemia do COVID-19 na Demanda de Passageiros do Metrô de São Paulo e Metrôs do Mundo. 26ª Semana de Tecnologia Metroferroviária, 2020. Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Metrô (AEAMESP). Disponível em: <https://26edicao.semanadetecnologia.com.br/Arquivos/367_artigo_covid19demanda-dosmetros.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2025.

Lei nº 8.987 de 13 de fevereiro de 1995. <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=8987&ano=1995&ato=Ofdk3YE5UeJpWT127>

Lei nº 11.079 de 30 de dezembro de 2004. <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=11079&ano=2004&ato=fe1QTSU5UeRpWTfe1>

MARGARIDO, M. A.; SHIKIDA, P. F. A. e KOMESU, D. K. (2023). Elasticidades no mercado brasileiro de cigarros. **Práticas De Administração Pública**, 6(2), 65–90. <https://doi.org/10.5902/2526629284176>

MARGARIDO, M. A., SANTOS, G. R., VIAN, C. E. de F., SHIKIDA, P. F. A. e BAUERMANN, B. F. C. CIDE and elasticity oscillation on the ethanol and gasoline market: Brazilian taxation policy under discussion. **Italian Review of Agricultural Economics**, Vol. 75, n. 1: 3-17, 2020. ISSN 0035-6190 (print) | ISSN 2281-1559 (online) | DOI: 10.13128/rea-11738.

MARGARIDO, M. A. **Teoria e Aplicações de Modelos de Séries Temporais em Economia**. São Paulo: Independente. 2020. 481p. site da Amazon.com.

MELLO, C. A. B.; ZOCKUN, C. Z.; ZOCKUN, M. e ZANCANER, W. Curso de Direito Administrativo. Belo Horizonte: Editora Fórum. 36 ed. 2023. 981p.

RIO DE JANEIRO. Introdução ao Conceito de PPP e Concessões. Rio de Janeiro: Prefeitura do Rio de Janeiro, s.d. Disponível em: <<https://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/5305003/4138534/IntroducaoaoConceitodePPPeConcessoes.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2025.

SCOTT, S. L. and VARIAN, H. Predicting the Present with Bayesian Structural Time Series. **Electronic Journal**. January 2014. <https://www.researchgate.net/publication/264816307>

VELOSO, F. O impacto da pandemia no mercado de trabalho. Blog do IBRE, 22 mar. 2021. Disponível em: <<https://blogdoibre.fgv.br/posts/o-impacto-da-pandemia-no-mercado-de-trabalho>>. Acesso em: 02 fev. 2025.

ZABAN, B.; POMPERMAYER, F. M.; CARVALHO, C. H. de. Novo modelo de contrato de mobilidade urbana: como gerar receita, aumentar uso e reduzir custos de transporte público urbano. Nota Técnica, n. 23. Brasília: IPEA, abr. 2021. <http://doi.org/10.38116/ntdirur23>

10.29327/2774886.9.29-2



Artigo Técnico

^a Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado
de São Paulo S.A. (IPT),
São Paulo-SP, Brasil.

Eficácia de tratamentos retardantes de chama para forros e revestimentos de Pinus em edificações

*Effectiveness of flame retardant
treatments for fire reaction of pine
linings and coverings in buildings*

Henrique Bandeira Faccio ^{a*}, Antonio
Fernando Berto^a

Palavras-chave: madeira; reação ao fogo;
retardante de chamas; Pinus.

Keywords: wood; fire reaction; flame retardant; Pinus.

* e-mail: henriqueb@ipt.br

Resumo

Algumas espécies de Pinus, embora amplamente utilizadas na construção civil no Brasil, compondo forros e revestimentos de paredes e divisórias, apresentam desempenho desfavorável quanto à reação ao fogo, sendo comumente classificada como V-B, segundo os critérios da ABNT NBR 16626:2025 e das regulamentações de proteção contra incêndio dos Corpos de Bombeiros de diversos estados. Essa limitação restringe o seu uso em edificações onde a questão da segurança contra incêndios é determinante. O presente estudo teve como objetivo compilar a eficácia de diferentes tratamentos retardantes de chama para a melhoria da reação ao fogo dessas madeiras. Foram ensaiadas amostras de tábuas de Pinus sem tratamento e com diversos tipos de tratamento, como: verniz não intumescente; verniz intumescente; tinta intumescente; imersão em produto retardante de chamas; e tratamento em autoclave com produto retardante de chamas. Os ensaios seguiram as normas ABNT NBR 9442:2024 (índice de propagação de chamas) e ASTM E 662:2021 (densidade óptica de fumaça). Os resultados demonstraram que parte dos produtos de tratamento empregados teve desempenho negativo ou nulo, ou seja, pioraram o comportamento ao fogo ou não proporcionaram melhoria significativa. Entretanto, determinados tratamentos possibilitaram a reclassificação da madeira para a Classe II-A, evidenciando seu potencial de aplicação em contextos mais exigentes sob o ponto de vista da segurança contra incêndio.

Abstract

Although widely used in construction in Brazil for ceilings and wall or partition claddings, some Pinus species exhibit poor fire reaction performance, commonly classified as V-B according to the criteria of ABNT NBR 16626:2025 and the fire protection regulations of Fire Departments in several states. This limitation restricts their use in buildings where fire safety is a critical requirement. The present study aimed to compile the effectiveness of different flame-retardant treatments in improving the fire reaction performance of these woods. Samples of untreated Pinus boards and boards treated with various methods were tested, including non-intumescent varnish, intumescent varnish, intumescent paint, immersion in flame-retardant solution, and autoclave treatment with flame-retardant product. The tests were conducted in accordance with ABNT NBR 9442:2024 (flame spread index) and ASTM E 662:2021 (smoke optical density). The results showed that some of the tested treatments had negative or negligible effects, meaning they worsened the fire behavior or did not provide significant improvement. However, certain treatments enabled the reclassification of the wood to Class II-A, demonstrating its potential for use in more demanding applications from a fire safety perspective.

1 Introdução

A madeira é amplamente utilizada em edificações, tanto em elementos estruturais quanto em revestimentos, em razão de suas qualidades estéticas e viabilidade técnica. Em especial, o gênero Pinus é largamente utilizado na forma serrada, engenheirada ou tratada, sendo a espécie preferida por sua relação resistência/peso, colabilidade e aptidão para tratamentos sob pressão (SHIGUE, 2018). Apesar de suas vantagens, a madeira apresenta desempenho desfavorável quanto à reação ao fogo.

De acordo com o Decreto Estadual nº 69.118/2024 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, regulamentado pela Instrução Técnica nº 10/2025 (IT-10/25), materiais de acabamento e revestimento utilizados em edificações com diversas ocupações devem apresentar classificação II-A quanto à reação ao fogo. A ABNT NBR 15575, que trata do desempenho de edificações habitacionais, também estabelece requisitos específicos relacionados ao comportamento ao fogo de elementos construtivos, reforçando a importância de materiais com baixos índices de propagação das chamas e densidade de fumaça durante a queima. Contudo, o Pinus sem tratamento usualmente é classificado, quanto à reação ao fogo, como V-B, tornando seu uso limitado ou proibitivo quando se considera a questão da segurança contra incêndio.

A situação observada na tragédia da boate Kiss, ocorrida em 7 de janeiro de 2013 em Santa Maria, RS, demonstrou definitivamente a necessidade de se controlar as características de reação ao fogo dos materiais que compõem ou revestem forros e paredes, de modo a evitar o estabelecimento de condições favoráveis ao rápido crescimento de um incêndio e ao desenvolvimento de fumaça. A madeira, de modo geral, apresenta características indesejáveis sob esse ponto de vista e o Pinus, em particular, se destaca negativamente quando comparado com o desempenho de outras espécies de madeira. Essa condição se deve, principalmente, à sua baixa densidade e ao conteúdo de resina, fatores que favorecem a ignição rápida e a propagação das chamas.

A fim de compatibilizar o uso da madeira com os requisitos de segurança contra incêndio, diferentes métodos de tratamento com retardantes de chama vêm sendo desenvolvidos e aplicados. Esses tratamentos visam reduzir a ignitabilidade do material e permitir sua reclassificação em níveis superiores de desempenho quanto à reação ao fogo. Neste contexto, tem ocorrido, no Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões (LSFEx) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), o aumento na demanda por ensaios de avaliação do desempenho de produtos retardantes aplicados à madeira, com o propósito de verificar as melhorias promovidas no comportamento de reação ao fogo.

O presente trabalho apresenta uma avaliação comparativa das características de reação ao fogo da madeira Pinus. A análise compara os resultados de ensaio da madeira em sua condição natural (sem tratamento) com aqueles obtidos após a aplicação de produtos possivelmente considerados retardantes de chama. É importante considerar que a eficácia desses tratamentos pode apresentar variações significativas, dependendo tanto do tipo de produto quanto da técnica de aplicação empregada.

2 Procedimento metodológico

O presente estudo compila os resultados de ensaios realizados, no LSFEx/IPT, solicitados por diversas empresas, que avaliaram o desempenho de diferentes tipos de tratamentos retardantes de chama aplicados a madeira Pinus, com o objetivo de verificar sua eficácia para atingir a classificação II-A, segundo os critérios normativos vigentes. A comparação entre madeiras tratadas e não tratadas buscou identificar quais procedimentos são tecnicamente viáveis para o enquadramento na classe II-A, contribuindo para ampliar o uso seguro dessa madeira em edificações.

De acordo com a norma ABNT NBR 16626:2025 - Classificação da reação ao fogo de produtos de construção, o termo “reação ao fogo” deve ser entendido como resposta de um produto, ao contribuir pela sua própria decomposição, para um fogo a que está exposto, sob condições especificadas.

Os ensaios de reação ao fogo foram conduzidos no LSFEx/IPT, seguindo os procedimentos das normas ABNT NBR 9442:2024 - Materiais de construção — Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante, e ASTM E 662:2021 - *Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials*, para a determinação, respectivamente, do índice de propagação superficial de chama e do índice de densidade óptica específica da fumaça. Com base na obtenção desses índices, a classificação final da reação ao fogo é estabelecida, conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 16626:2025 - Classificação da reação ao fogo de produtos de construção, detalhada na **TABELA 1**:

Tabela 1 – Classificação de reação ao fogo de produtos de construção em geral, exceto revestimento de piso

| Classe | | Método de ensaio | | |
|--------|---|------------------|----------------------|----------------|
| | | ISO 1182 | ABNT NBR 9442 | ASTM E 662 |
| I | | Incombustível | - | - |
| II | A | Combustível | $l_p \leq 25$ | $D_m \leq 450$ |
| II | B | Combustível | $l_p \leq 25$ | $D_m \geq 450$ |
| III | A | Combustível | $25 < l_p \leq 75$ | $D_m \leq 450$ |
| III | B | Combustível | $25 < l_p \leq 75$ | $D_m \geq 450$ |
| IV | A | Combustível | $75 < l_p \leq 150$ | $D_m \leq 450$ |
| IV | B | Combustível | $75 < l_p \leq 150$ | $D_m \geq 450$ |
| V | A | Combustível | $150 < l_p \leq 400$ | $D_m \leq 450$ |
| V | B | Combustível | $150 < l_p \leq 400$ | $D_m \geq 450$ |
| VI | | Combustível | $l_p > 400$ | - |

Fonte: adaptado do item 14.2 da ABNT NBR 16626:2025.

A classificação de reação ao fogo, conforme a ABNT NBR 16626:2025, para materiais aplicados como revestimento de paredes, tetos e forros é equivalente à classificação proposta na IT-10/25 dos Corpos de Bombeiros de São Paulo, item 8 da ABNT NBR 15575-4 e Portaria nº 322, de 2021 do INMETRO. Todas estas normativas adotam os mesmos critérios para a classificação de reação ao fogo.

A madeira é intrinsecamente um material combustível, razão pela qual, portanto, admite-se que sua classificação de reação ao fogo parta da Classe II. Desta forma, torna-se desnecessária a realização do ensaio conforme a norma ISO 1182 (*Reaction to fire tests for products — Non-combustibility test*), para comprovar que o item ensaiado não atende aos requisitos da Classe I (Incombustível).

As classes de reação ao fogo II a VI são especificamente designadas para os materiais combustíveis. O enquadramento em cada uma dessas classe é determinado conforme o índice de propagação superficial de chamas (l_p), obtido por meio do ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 9442. Quanto menor o valor de (l_p), melhor o desempenho do material ensaiado.

Os atributos A e B referem-se ao índice da densidade óptica específica de fumaça (Dm), determinado pelo método de ensaio ASTM E 662. Este índice é avaliado sob as condições com chama (*flaming*) e sem chama (*non-flaming*), ambas em conjunto com uma fonte de radiação, sendo que o valor adotado como referência é o maior Dm entre as duas condições de ensaio. As regulamentações, que tratam do controle das características de reação ao fogo dos materiais admitem que materiais com índices Dm não maiores que 450 podem ser instalados em qualquer ambiente e aqueles com índices superiores a 450 devem ser empregados apenas em ambientes externos.

As boas práticas de segurança contra incêndio, consideradas nas regulamentações, prescrevem que forros e revestimentos de paredes e divisórias devem situar-se nas duas categorias superiores de reação ao fogo, a saber: Classe I ou classe II-A.

2.1 Características das amostras de Pinus

As placas de madeira utilizadas nos ensaios, tanto as tratadas quanto as não tratadas, apresentavam uma espessura média de 20 mm e uma densidade aparente média de 0,440 g/cm³. Antes da realização dos ensaios, todos os corpos de prova foram submetidos a um protocolo de condicionamento, a saber:

- a) Inicialmente, foram mantidos em estufa com ventilação forçada a uma temperatura de (60 ± 3) °C por 24 horas.
- b) Posteriormente, foram condicionados em câmara climatizada até atingir o equilíbrio higroscópico, sob temperatura de (23 ± 3) °C e umidade relativa de (50 ± 5) %.

A **Fotografia 1** ilustra os corpos de prova sem tratamento antes de serem submetidos aos ensaios.

Fotografia 1 – Corpos de prova sem aplicação de tratamento superficial



Fonte: elaborado pelo autor

Legenda: A – Corpo de prova sem tratamento selecionado para Ensaio de determinação do índice de propagação superficial de chamas (ABNT NBR 9442) e B – Corpo de prova sem tratamento selecionado para Ensaio de determinação da densidade específica óptica de fumaça (ASTM E 662).

A seguir são detalhadas todas as situações de ensaio que integraram este estudo, abrangendo as condições sem e com tratamento. Para preservar a imparcialidade e a confidencialidade inerente às relações do IPT com seus clientes, os nomes comerciais dos produtos aplicados foram suprimidos. A correspondência dos produtos utilizados foi codificada de maneira unívoca, conforme apresentado na TABELA 2.

Tabela 2 – Tipos de tratamentos aplicados sobre madeira de Pinus

| Grupo | Produto aplicado | Características do tratamento aplicado |
|--|------------------|--|
| Sem Tratamento | st.1 | - |
| | st.2 | - |
| Verniz não intumescente | v.1 | duas demãos, consumo médio de 0,3 L/m ² |
| | v.2 | Tratamento por pulverização em três demãos, consumo médio de 0,25 L/m ² |
| | v.3 | primer, consumo médio de 0,04 L/m ² e acabamento em uma demão, consumo médio de 0,02 L/m ² |
| | v.4 | duas demãos, consumo médio de 0,1 L/m ² |
| | v.5 | duas demãos, consumo médio de 0,1 L/m ² |
| Imersão em produto retardante de chamas | i.1 | aplicado por imersão, consumo de 100 a 150 L/m ³ |
| | i.2 | aplicado por imersão, consumo de 100 a 150 L/m ³ |
| Verniz Intumescente | vi.1 | quatro demãos, consumo médio de 0,5 L/m ² |
| Tinta Intumescente | t.1 | quatro demãos, consumo médio de 0,5 L/m ² |
| | t.2 | consumo médio de 0,2 L/m ² e espessura seca de 60 µm. |
| Tratamento em Autoclave com produto retardante de chamas | a.1 | vácuo-pressão em autoclave (produto transparente) |

Fonte: elaborado pelo autor

A determinação do Índice de propagação superficial de chamas (Ip) é realizada com base na média dos resultados de quatro determinações em placas com dimensões de (150 x 460) mm. Já a determinação do Índice de densidade específica óptica de fumaça (Dm) utiliza a média dos resultados de 3 placas com dimensões de (75 x 75) mm na condição sem chama e de 3 placas com as mesmas dimensões na condição com chama.

3 Resultados e discussão

A TABELA 3 consolida os resultados dos ensaios de reação ao fogo. Ela apresenta os valores obtidos para o índice de propagação superficial de chama (Ip), conforme a ABNT NBR 9442, e a densidade óptica específica da fumaça (Dm), conforme a ASTM E 662. Adicionalmente, a Tabela indica a classe de reação ao fogo atribuída a cada material, com base nos critérios regulamentares.

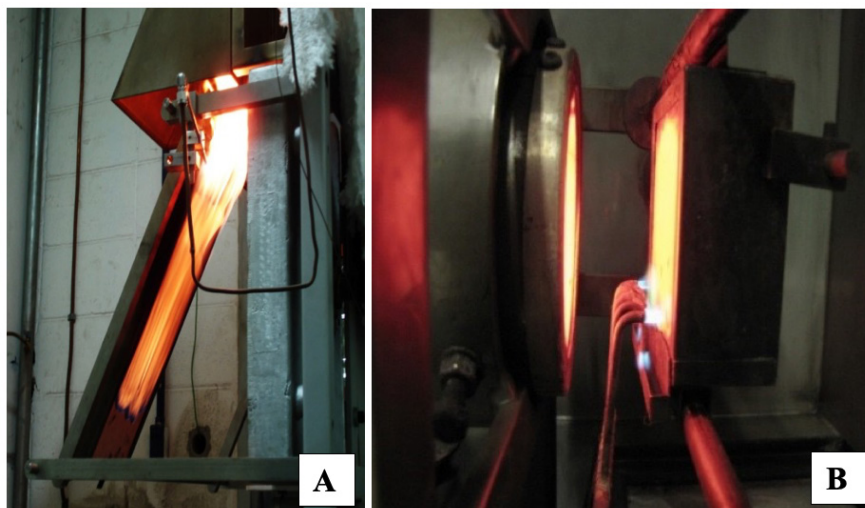
Tabela 3 – Desempenho dos tratamentos aplicados sobre madeira de Pinus

| Grupo | Produto Aplicado | Índice de Propagação Superficial de Chama (Ip) | Densidade Óptica Específica de Fumaça (Dm) | Classificação (IT n° 10 / ABNT NBR 16626) |
|--|------------------|--|--|---|
| Sem tratamento superficial | st.1 | 357 | 562 | V-B |
| | st.2 | 350 | 590 | V-B |
| Verniz não intumescente | v.1 | 305 | 592 | V-B |
| | v.2 | 100 | 334 | IV-A |
| | v.3 | 245 | 312 | V-A |
| | v.4 | 415 | 452 | VI |
| | v.5 | 305 | 469 | V-B |
| Imersão em produto retardante de chamas | i.1 | 78 | 436 | IV-A |
| | i.2 | 95 | 318 | IV-A |
| Verniz Intumescente | vi.1 | 25 | 260 | II-A |
| Tinta Intumescente | t.1 | 5 | 209 | II-A |
| | t.2 | 5 | 84 | II-A |
| Tratamento em Autoclave com produto retardante de chamas | a.1 | 3 | 200 | II-A |

Fonte: elaborado pelo autor.

A **Fotografia 3** ilustra o comportamento de um corpo de prova durante a execução dos ensaios de reação ao fogo.

Fotografia 3 – Realização dos ensaios de reação ao fogo.



Fonte: elaborado pelo autor

Legenda: A – Ensaio de determinação do índice de propagação superficial de chamas pelo método do painel radiante, conforme a norma ABNT NBR 9442 e B – Ensaio de determinação da densidade específica óptica de fumaça, conforme a norma ASTM E 662, na condição “com chama”.

A análise dos resultados demonstrou uma variação significativa de desempenho entre os diferentes tratamentos aplicados à madeira do tipo Pinus. Os corpos de prova sem tratamento exibiram o pior desempenho, com um I_p (índice de propagação de chama) médio de 355 e D_m (densidade óptica de fumaça) de 570, resultando na classificação V-B. Em relação aos vernizes não intumescentes (v.1 a v.5), verificou-se que, apesar de alguns terem promovido uma redução no I_p , a maioria não foi suficiente para reclassificar o material para a Classe II-A. Apenas o verniz v.2 conseguiu elevar a classificação para IV-A. Os demais (v.1, v.3 e v.5) mantiveram a madeira na Classe V (V-A ou V-B), indicando que não houve uma alteração significativa no desempenho de reação ao fogo.

O verniz v.4 resultou na piora do desempenho, elevando o I_p para 415, e reclassificando a madeira para a classe VI, a pior categoria entre as definidas na ABNT NBR 16626. Este resultado evidencia que nem todos os produtos comercializados como “retardantes de chama” possuem, de fato, alguma eficácia e que alguns acabamentos superficiais podem inclusive comprometer a reação ao fogo da madeira, tornando seu comportamento do material ainda mais desfavorável em situação de incêndio.

Os tratamentos por imersão em produto retardante de chamas (i.1 e i.2) demonstraram um desempenho superior que os vernizes não intumescentes, com I_p inferiores a 150 e D_m dentro do limite de 450, resultando na classificação IV-A. Contudo, essa classificação ainda é insuficiente atender às exigências mais rigorosas de reação ao fogo. Por outro lado, os tratamentos utilizando verniz intumescente e tintas intumescentes (vi.1, t.1 e t.2), assim como o tratamento por autoclave (a.1), foram os únicos a alcançar a classe II-A. Estes materiais apresentaram I_p inferior a 25 e D_m inferior a 450, atendendo aos critérios normativos para uso, inclusive, em locais de reunião de público.

4 Conclusões

Este estudo evidenciou que as placas de madeira Pinus em seu estado natural não atendem aos requisitos normativos mínimos de reação ao fogo para aplicação em edificações que demandam tal exigência, sendo classificadas como V-B.

Os resultados dos ensaios demonstram que a reação ao fogo de madeiras, exemplificada pelo Pinus, pode ser significativamente aprimorada mediante a utilização de produtos adequados e técnicas de aplicação compatíveis. É importante notar que essa melhoria depende diretamente da formulação do produto, da técnica de aplicação empregada e da interação com o substrato, que neste caso foi placa de madeira maciça. A eficácia dos produtos intumescentes e do tratamento em autoclave os destaca como alternativas viáveis para aplicações seguras com madeira em edificações.

A comparação realizada entre os diferentes tratamentos evidencia que os maus resultados predominam, servindo como alerta para a necessidade de que o emprego desses produtos somente ocorra mediante comprovações que sigam a metodologia correta, estabelecida na norma ABNT NBR 16626 e, com a mesma abordagem técnica, nas regulamentações estaduais dos Corpos de Bombeiros.

Ainda, apesar do resultado do tratamento em autoclave ter se mostrado adequado para o Pinus, não se pode considerar, sem as devidas comprovações, que madeiras mais densas e com baixo teor de resina, as quais já apresentam desempenho superior ao do Pinus em estado natural, se beneficiarão igualmente desse tipo de tratamento. Isso se deve ao fato da impregnação do produto retardante nessas madeiras ser predominantemente superficial, ao contrário da impregnação profunda observada no Pinus.

5 Considerações finais

É necessário que os fabricantes e profissionais responsáveis pela aplicação de produtos retardantes tenham conhecimento sobre o comportamento ao fogo dos substratos e qual é a classe de reação ao fogo mínima necessária exigida para cada tipo de edificação, permitindo a ampliação do emprego sustentável da madeira na construção civil brasileira.

Apesar de não ter sido objeto deste estudo, destaca-se que a avaliação do comprometimento do desempenho dos tratamentos retardantes, ocasionado por ações do meio ambiente ao longo do tempo deve ser objeto de investigação e que os produtos colocados no mercado com a finalidade de melhorar o comportamento da reação ao fogo da madeira devem passar por esse tipo de avaliação, de modo que a validade do tratamento seja definida e garantida.

6 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 662 – 21a**: Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials. West Conshohocken, PA. USA, 2021. 26 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16626**: Classificação da reação ao fogo de produtos de construção. Rio de Janeiro, 2025. 43 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013. 74 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9442**: Materiais de construção — Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante. Rio de Janeiro, 2024. 25 p.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA, INSTITUTO BRASILEIRO DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 322, de 23 de julho de 2021. **Aprova a Regulamentação Técnica para Produtos para Tratamento Acústico ou Isolamento Térmico para uso na Construção Civil – Consolidado**. 2021.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 69.118, de 9 de dezembro de 2024. Institui o regulamento de segurança contra incêndios das edificações e áreas de risco no Estado de São Paulo.** Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 9 dez. 2024. Disponível em: <https://www.imprensaoficial.com.br>. Acesso em: 25 jun. 2025.

SECRETARIA DA SEGURANÇA PÚBLICA - Polícia Militar do Estado de São Paulo – Corpo de Bombeiros. **Instrução técnica nº 10 – Controle de materiais de acabamento e de revestimento.** São Paulo. 2025. 8 p.

SHIGUE, Erich Kazuo. **Difusão da construção em Madeira no Brasil: agentes, ações e produtos.** 2018. 250 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

10.29327/2774886.9.29-3



Artigo Técnico

Influência de recobrimento da superfície e da adição de fibras de PVA sobre as propriedades da matriz cimentícia

Influence of Surface Coating and PVA Fiber Addition on the Properties of the Cementitious Matrix

Vanessa Gabrielle da Silva^{a*}, Indira Teixeira Bessa de Oliveira^b, Ivone Regina de Oliveira^a

^a Laboratório de Desenvolvimento de Materiais Avançados, Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento – Universidade do Vale do Paraíba – São José dos Campos - SP, Brasil.

^b Instituto de Química de Araraquara – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Araraquara – SP, Brasil.

Palavras-chave: matriz cimentícia; fibra polimérica; recobrimento; cimento líquido; durabilidade.

Keywords: cementitious matrix; polymeric fibres; coating; liquid cement; Durability.

* e-mail: vanessa.sgabrielle@gmail.com

Resumo

A matriz cimentícia, composta por cimento e água, é a base do concreto utilizado na construção civil, adquirindo resistência e solidez por meio do processo de hidratação. Em ambientes agressivos, como nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), esse material está sujeito à biocorrosão, fenômeno induzido por microrganismos que geram ácido sulfúrico, promovendo a formação de fases expansivas como gipsita e etringita, e acelerando a degradação das estruturas. Este estudo investigou o desempenho de uma matriz cimentícia formulada com cimento Portland (CP III) e aditivada com cristalizante, cuja superfície foi tratada com um revestimento à base de cimento de aluminato de cálcio líquido (CAC-I). A proposta visou mitigar a adesão bacteriana de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* e melhorar a durabilidade do material. Ensaios de resistência à compressão e flexão, porosidade, densidade, capilaridade e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram conduzidos. Além disso, avaliou-se a incorporação de fibras de álcool polivinílico (PVA) em diferentes teores (1kg/m³ a 5kg/m³, 0,04%-v a 0,20%-v, respectivamente) como reforço, com o objetivo de absorver energia e controlar a propagação de fissuras. Os resultados *in vitro* demonstraram que o revestimento com CAC-I reduziu a viabilidade e adesão microbiana, enquanto a adição de baixos teores de fibras (0,04 e 0,08%-v) proporcionou melhor dispersão na matriz e aumento da resistência mecânica. A análise por MEV confirmou o eficiente ancoramento das fibras, indicando potencial de aplicação em ambientes altamente agressivos.

Abstract

*The cementitious matrix, composed of cement and water, forms the basis of concrete used in civil construction, gaining strength and solidity through the hydration process. In aggressive environments, such as sewage treatment plant (STP), this material is subject to biocorrosion a phenomenon induced by microorganisms that produce sulfuric acid, leading to the formation of expansive phases like gypsum and ettringite, and accelerating structural degradation. This study investigated the performance of a cementitious matrix formulated with Portland cement (CP III) and enhanced with a crystallizing additive, whose surface was treated with a liquid calcium aluminate cement (CAC-I) coating. The objective was to reduce bacterial adhesion of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* and to improve the material's durability. Compressive and flexural strength tests, porosity, density, capillarity, and scanning electron microscopy (SEM) analyses were performed.*

Additionally, the incorporation of polyvinyl alcohol (PVA) fibers in varying contents (1kg/m³ to 5kg/m³, 0,04%-v to 0,20%-v, respectively) was evaluated as reinforcement, aiming to absorb energy and control crack propagation. In vitro results demonstrated that the CAC-I coating reduced microbial viability and adhesion, while the addition of lower fiber contents (0,04 e 0,08%-v) resulted in better dispersion within the matrix and increased mechanical strength. SEM analysis confirmed effective fiber anchoring, indicating the material's potential for use in highly aggressive environments.

1 Introdução

Os sistemas cimentícios, uma das ferramentas mais versáteis para a construção civil tem sofrido grandes avanços tecnológicos desde a segunda metade do século XX. A velocidade das construções e a durabilidade dos sistemas podem ser consideradas as forças motrizes dos progressos técnico-científicos, sempre associadas à preocupação com o custo (CHOTOLI *et al.*, 2024).

A busca por aprimoramentos na qualidade e durabilidade dos materiais cimentícios na construção tem gerado avanços significativos na engenharia civil, especialmente no desenvolvimento de composições de matrizes cimentícias constituídas por um ligante hidráulico e água (NEVILLE *et al.*, 2013), cujas características determinam o desempenho do sistema construtivo, sobretudo em ambientes agressivos.

O ligante hidráulico mais utilizado na construção civil é o cimento Portland (PO) produzido pela moagem do clínquer, o qual quando misturado com água forma uma pasta que endurece devido a reações e processos de hidratação. O PO é composto por fases minerais como alita (C₃S), belita (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetra-cálcico (C₄AF), sendo o C₃S o principal responsável pela resistência inicial do material (ALMEIDA *et al.*, 2021).

Após a hidratação dos compostos do cimento tem-se como resultado a formação do gel de C-S-H, hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ e a etringita. O C-S-H (silicato de cálcio hidratado) representa de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta totalmente hidratada, sendo responsável por suas principais propriedades. O C₃S₂H₃ (gel de C-S-H) e o hidróxido de cálcio são os produtos da hidratação tanto do C₃S como do C₂S. A etringita é resultado da hidratação do C₃A com o gesso, adicionado na fabricação do cimento (SOUZA *et al.*, 2021).

No entanto, mesmo com uma microestrutura resistente, a matriz cimentícia pode sofrer degradações em ambientes adversos, como aqueles ricos em matéria orgânica. Nessas condições, a corrosão do concreto pode ser intensificada pela ação de microrganismos, que produzem substâncias corrosivas capazes de comprometer suas propriedades físico-químicas, sendo a intensidade do ataque microbiano dependente das espécies presentes e das condições ambientais. Esse processo, conhecido como corrosão induzida por microrganismos (CIM), causa a deterioração progressiva das peças em que se utilizam as matrizes cimentícias em contato com efluentes, reduzindo a vida útil. A atividade microbiana ocorre principalmente em biofilmes aderidos à superfície da matriz, formados por microrganismos envolvidos por materiais poliméricos extracelulares (MPE), cuja composição e espessura variam conforme o fluxo do efluente e a abrasão. Inicialmente, microrganismos aeróbicos colonizam o biofilme, consumindo o oxigênio disponível e criando condições anaeróbicas que favorecem o desenvolvimento de outras espécies. Entre os principais microrganismos envolvidos, destacam-se *Escherichia coli*, uma bactéria gram-negativa e anaeróbia facultativa, comum em águas residuárias e com crescimento ideal a pH 7,2 (HALL-STOODLEY *et al.*, 2023) e *Staphylococcus aureus*, uma bactéria gram-positiva e resistente, presente na pele humana e em alimentos, com crescimento ideal a 37 °C e pH próximo a 7 (BECKER *et al.*, 2021).

Em sistemas com efluentes, bactérias redutoras de sulfato, sob condições aeróbicas, convertem sulfato em sulfeto de hidrogênio (H_2S). Esse gás, ao se transferir para a fase gasosa, é oxidado por bactérias como *Acidithiobacillus*, (Yan *et al.*, 2021) formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), que reage com compostos da matriz cimentícia, formando produtos expansivos como gipsita e etringita, levando à fissuração e à perda de resistência fazendo-se necessária a proteção da matriz cimentícia por meio de recobrimento com cimento líquido e/ou a adição de reforço por meio da adição de fibras.

A prática de reforço de matrizes cimentícias com fibras remonta às antigas civilizações, que empregavam materiais naturais, como palha ou pelos de animais, com o intuito de melhorar a resistência de argamassas e tijolos de barro (FIGUEIREDO *et al.*, 2011). No entanto, foi apenas no século XX que a introdução de fibras poliméricas sintéticas promoveu um avanço significativo nesta tecnologia. Essas fibras atuam como elementos de reforço, absorvendo energia e restringindo a propagação de fissuras, o que resulta no aumento da durabilidade estrutural.

Entre os diversos tipos de fibras poliméricas, as produzidas a partir da resina de álcool polivinílico (PVA) vêm se destacando como alternativa de contribuição, devido às suas propriedades técnicas superiores. As fibras de PVA apresentam elevada resistência à tração e à flexão, boa aderência à matriz cimentícia por ancoragem química, estabilidade

em ambientes alcalinos, alta resistência à radiação ultravioleta, baixo peso específico e notável resistência à corrosão (LI & LEUNG, 1992). Essas características conferem às fibras de PVA um excelente desempenho como agente de reforço em compósitos cimentícios, sendo amplamente utilizadas em soluções de engenharia moderna que demandam durabilidade e desempenho mecânico aprimorado (MONTEIRO *et al.*, 2007).

Com foco em ambientes marinhos, que apresentam características únicas e desafiadoras, as quais afetam significativamente a durabilidade dos materiais de construção, especialmente dos sistemas cimentícios, exigindo soluções e estratégias específicas para garantir seu desempenho e vida útil. Este ambiente é caracterizado por condições severas, como a alta concentração de íons cloreto provenientes da água do mar, presença de umidade elevada, ciclos de molhagem e secagem, além da ação de cargas mecânicas impostas por ondas e correntes marítimas. Esses fatores criam um cenário agressivo que compromete a integridade e a vida útil dos sistemas construtivos, principalmente devido aos processos de degradação da matriz cimentícia (MONTEIRO *et al.*, 2014).

Assim, este trabalho foi dividido em duas partes: a primeira, avaliando o efeito do recobrimento da superfície; a segunda, refere-se à análise da incorporação das fibras de PVA na matriz cimentícia. Uma suspensão com reatividade controlada, à base de cimento de aluminato de cálcio líquido (CAC-L) foi aplicada sobre a superfície da matriz para avaliar seu desempenho como barreira contra a adesão dos microrganismos *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. As amostras foram caracterizadas por meio de ensaios de resistência mecânica à compressão e à flexão, densidade real, porosidade aparente, viabilidade e ensaios de adesão bacteriana por Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, diferentes teores de fibra de álcool polivinílico (PVA, 0,04 - 0,2%-v) foram adicionados à matriz cimentícia avaliando as propriedades como resistência mecânica à compressão uniaxial, resistência mecânica à flexão, densidade real, porosidade aparente, absorção de água por capilaridade e análise de microestrutura por MEV.

2 Procedimento metodológico

O sistema de matriz cimentícia estudado neste trabalho foi um sistema de referência comercial (PO) preparado com cimento Portland (CPIII da Votorantim) e 1%-p de cristalizante (ADMIX da Penetron). A pasta obtida pela adição de água à matriz cimentícia foi vertida em moldes cilíndricos (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura), em formato de barras (75 mm de comprimento x 12,5 mm de altura x 12,5 mm de largura), em formato quadrado (20 mm de comprimento x 20 mm de largura x 4 mm de espessura) e em formato de pastilhas (6 mm diâmetro x 3 mm altura) sob uma mesa vibratória.

Após a moldagem, os moldes permaneceram ao ambiente durante 24 horas seguido de desmoldagem das amostras. As amostras foram adicionadas em solução saturada de cal (hidróxido de cálcio) a temperatura ambiente. Após a cura por 28 dias, parte das amostras receberam recobrimento com cimento de aluminato de cálcio líquido (CAC-l) seguindo recomendações do fabricante (Kerneos, Aluminato technologies), sendo denominadas (PO-R), caracterizando a primeira parte do estudo. As amostras, sem e com recobrimento foram caracterizadas por meio de ensaios de resistência mecânica à compressão e à flexão, porosidade aparente, densidade real, viabilidade e ensaios de adesão dos microrganismos *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* por Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Na segunda parte deste estudo, a matriz recebeu a incorporação de fibras de PVA (Kuraray) em proporções de 0,04%-v a 0,20%-v. As fibras foram incorporadas ao pó da matriz cimentícia referência seguido por um processo de homogeneização à seco, seguido da adição de água, com moldagem direta em moldes de diferentes formatos e cura por 28 dias, sendo a cura em solução saturada de cal a temperatura ambiente.

Após o processo de cura, as amostras foram caracterizadas por meio de ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial, resistência mecânica à flexão, porosidade aparente, densidade real, absorção de água por capilaridade e análise de microestrutura por MEV.

Todos os resultados foram submetidos à análise de ANOVA com valor $p \leq 0,05$ com confiabilidade de 95%.

2.1 Ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial e à flexão

O ensaio mecânico de resistência à compressão uniaxial foi realizado em amostras em formato cilíndrico (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura) usando uma máquina de ensaios mecânicos DL 10000, da marca EMIC, obedecendo à norma ABNT NBR 7215 de 1996 com uma velocidade de 0,15 mm/min. A tensão de ruptura σ_r (MPa) foi calculada de acordo com a **EQUAÇÃO 1**:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (1)$$

Onde:

P = carga máxima exercida em N

D = diâmetro médio em mm

Quanto ao ensaio mecânico de resistência à flexão foi realizado em amostras em formato de barras retangulares (75 mm de comprimento x 12,5 mm de altura x 12,5 mm de largura), obedecendo à norma ASTM C674 de 2006 com a velocidade de 0,5 mm/min, com a utilização da mesma máquina. Para o cálculo da tensão de ruptura (σ_r) foi empregada a **EQUAÇÃO 2**:

$$\sigma_r = \frac{3Fl}{2bd^2} \quad (2)$$

Onde:

F = força máxima da fratura em N

l = distância entre os apoios em mm

d = largura em mm

b = espessura em mm

2.2 Ensaio de porosidade aparente e densidade real

O ensaio de porosidade aparente foi realizado em amostras em formato cilíndrico (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura). Estas foram mantidas em 110 °C em estufa por 24 horas, sendo pesadas a seco (M_s) e após 1 hora de imersão em querosene sob vácuo, as amostras foram novamente pesadas e imersas no líquido (M_l) e úmidas (M_u), em triplicata. Nesse ensaio foi usado o princípio de Arquimedes, de acordo com a ABNT NBR 6220 de 2011. Assim, a porosidade aparente é calculada pela massa de líquido retida em seus poros abertos como apresentado pela **EQUAÇÃO 3**:

$$PA = \frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_l)} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

Mu = massa úmida em g

Ms = massa a seco em g

Mi = massa imersa em g

2.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados de acordo com a norma NBR 9779 (ABNT, 2012): após determinação da massa seca, as amostras em formato cilíndrico (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura) foram inseridas em um recipiente, que era preenchido com água até o nível estar (5 ± 1) mm acima de sua face inferior. Em intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 h (contadas a partir do contato com a água) foram determinadas as massas saturadas. Para cada um desses intervalos, foi calculado o coeficiente de absorção de água por capilaridade (C , em g/cm^2), por meio da EQUAÇÃO 4.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{A} \quad (4)$$

Onde:

m_{sat} = massa saturadas em g

m_s = massa seca em g

A = área da seção transversal em cm

2.4 Ensaio acelerado de ataque de cloreto

O programa experimental considerou a execução do ensaio acelerado com cloreto de sódio, cujo intuito é simular a degradação da matriz cimentícia após o contato com o ambiente que simula o ambiente marinho. Esse ensaio consistiu na imersão parcial dos CDP's cilíndricos (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura), em solução de cloreto de sódio 3%, devido a sua proximidade com a concentração salina média dos mares e períodos de secagem. Os ciclos e os períodos de imersão/secagem foram de 3 dias para imersão e de 4 dias para secagem. É válido ressaltar que a secagem foi realizada em estufa a $50^\circ C$. Esse ensaio está de acordo com a norma ASTM C1760 de 2021.

2.5 Ensaio de viabilidade e de adesão de microrganismo *E.coli* e *S.aureus*

Para os ensaios de viabilidade de adesão de microrganismos, foram utilizadas as amostras em formato de pastilhas. As cepas usadas foram de referência ATCC – “American Type Culture Collection” de *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) e *Escherichia coli* (ATCC 25922)

Primeiramente, as cepas foram cultivadas em meio ágar não seletivo para crescimento das colônias. Após crescimento das mesmas, estas foram alçadas e suspensas em caldo Luria Bertani (LB) que é tipicamente composto por triptona (10 g/L), extrato de levedura (5 g/L) e cloreto de sódio (5 g/L) em água, resultando em um pH final de cerca de 7,0 para quantificação com o auxílio de espectrofotômetro 50 Bio da Cary, sendo realizadas as leituras com comprimentos de onda de 490 nm e 590 nm, referentes às cepas *S. aureus* e *E. coli*, respectivamente. Posteriormente, utilizou-se a solução tampão para obtenção de uma absorvância correspondente a 1.10^6 células. mL⁻¹, sendo transferido 20 µL para uma placa de 24 poços. Em seguida, as pastilhas foram inseridas nos poços e submetidas a agitação constante em incubadora (6420 Touch, Thoth Equipamentos) a 37 °C por 24 horas. Após o período de incubação, o meio de cada grupo experimental foi transferido para placa de 96 poços e realizada a leitura de densidade óptica com auxílio de espectrofotômetro (DASGIP OD4) para os ensaios de viabilidade. Os poços contendo somente meio e cultura foram usados como controle.

Após os ensaios de viabilidade as pastilhas foram lavadas com diferentes concentrações de 10% a 90% gradualmente de etanol para fixação dos microrganismos aderidos e, posteriormente, foram avaliadas as imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (EVO-MA10, Zeiss).

3 Resultados e discussão

3.1 Influência de recobrimento da superfície sobre as propriedades da matriz cimentícia

Cada etapa do processo de produção das matrizes cimentícias tem um papel importante nas propriedades do material após a hidratação, e as fases de moldagem e secagem merecem destaque por sua influência direta na estrutura da matriz. Na **FIGURA 1**, são apresentados os resultados da caracterização físico-química das amostras de cimento

Portland (PO), incluindo resistência à flexão e à compressão, porosidade aparente e densidade, antes e depois da aplicação de um recobrimento com cimento líquido (PO-R).

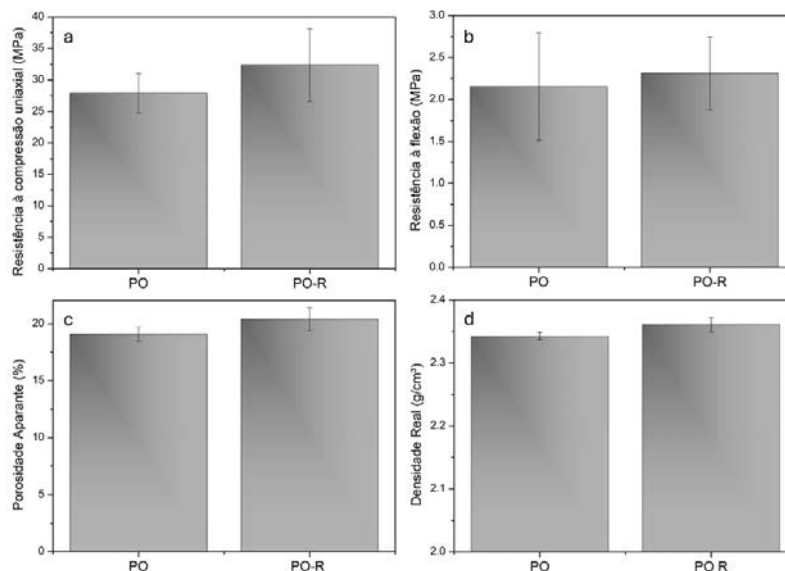
O cimento líquido utilizado nesse recobrimento contém sílica em sua composição, conforme informado pelo fabricante. Esse detalhe é particularmente interessante, já que a sílica desempenha um papel essencial em matrizes cimentícias: ela atua como um ligante eficiente, especialmente na presença de alumínio (Al) e oxigênio (O), formando ligações químicas rápidas e estáveis. Na prática, isso significa que o material seca de forma mais eficiente e tende a apresentar menor porosidade ainda na fase inicial de cura.

Além disso, a sílica pode contribuir com as reações pozolânicas, promovendo a formação de compostos que ajudam a tornar a microestrutura mais densa e resistente. Esses efeitos explicam, em grande parte, o melhor desempenho observado nas amostras recobertas, tanto do ponto de vista mecânico quanto estrutural. Dessa forma, o uso do cimento líquido com sílica não só melhora a interface da matriz, como também traz benefícios visíveis na qualidade e durabilidade do material final.

As amostras recobertas com cimento líquido apresentaram propriedades mecânicas superiores em comparação àquelas sem recobrimento (**Figuras 1a e 1b**). O cimento líquido demonstrou boa aderência à matriz cimentícia, sendo compatível com a sua superfície e promovendo uma interface coesa. Essa compatibilidade contribuiu para o melhor desempenho mecânico observado, indicando o potencial do revestimento como agente de reforço estrutural.

A caracterização física das matrizes cimentícias é fundamental para a compreensão do seu comportamento frente a agentes agressivos, especialmente no que diz respeito à durabilidade, resistência mecânica e permeabilidade. Dentre os parâmetros analisados, destacam-se a porosidade aparente (**FIGURA 1c**) e a densidade real (**FIGURA 1d**), que fornecem informações complementares sobre a estrutura interna do material.

Figura 1 – Ensaio de resistência mecânica à compressão uniaxial (a), à flexão (b), porosidade aparente (c) e densidade real (d).



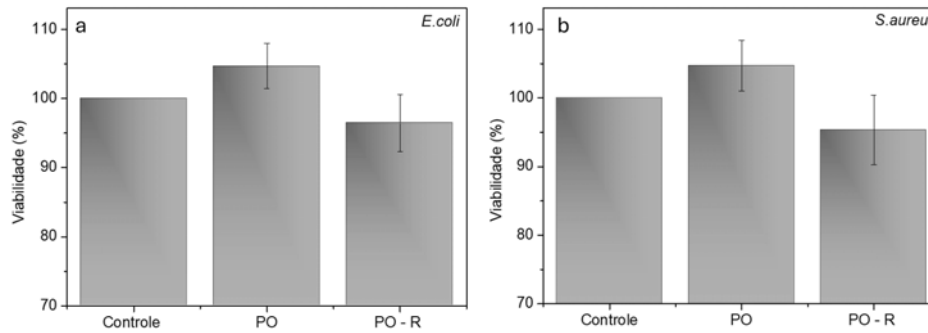
Fonte: elaborado pelas autoras

A densidade real, definida como a razão entre a massa da fase sólida e o volume efetivamente ocupado por essa fase, desconsiderando qualquer tipo de porosidade, inclusive microscópica, foi determinada por técnicas baseadas em deslocamento de gás. Os resultados indicaram que as amostras com recobrimento apresentaram densidade real superior em relação às amostras não recobertas. Esse aumento pode ser atribuído à redução da porosidade superficial e ao preenchimento de micro poros possibilitados pelo cimento líquido, que atua como um selante. Esse preenchimento favorece o empacotamento das partículas na interface e reduz a permeabilidade, resultando em uma estrutura mais densa e homogênea, com potencial incremento na durabilidade da matriz.

Entretanto, de forma aparentemente contraditória, observou-se um aumento da porosidade aparente nas amostras com recobrimento, em comparação as sem recobrimento. Esse comportamento pode estar associado a múltiplos fatores, como a formação de microfissuras internas durante o processo de aplicação e secagem do revestimento, ou ainda a uma infiltração parcial do cimento líquido. Embora o recobrimento promova preenchimento superficial, ele pode também induzir redistribuições de tensão e modificações na estrutura interna, aumentando a conectividade entre os poros. Esses resultados indicam que a influência do cimento líquido sobre a microestrutura da matriz cimentícia é complexa e multifacetada, demandando investigações adicionais, como análises microscópicas ou ensaios de permeabilidade, para uma compreensão mais abrangente de seus efeitos.

Com auxílio de espectrofotômetro 50 Bio da Cary, foram realizadas as leituras com comprimentos de onda de 590 nm e 490 nm, referentes às cepas *E.coli* e *S.aureus*, respectivamente (FIGURA 2). Foi analisada a viabilidade porcentual dos microrganismos após o contato com a amostra de matriz cimentícia (PO e PO-R). Considerando o microrganismo *E.coli* (100%), gram-negativa em contato com as amostras de PO ocorreu um aumento de 4,69% enquanto em contato com PO-R teve um decréscimo de 3,33%. Com a utilização do microrganismo *S.aureus* (100%) também ocorreu o aumento de 4,74% e o decréscimo 4,7%.

Figura 2 – Viabilidade da *E.coli* (a) e da *S.aureus* (b) em contato com a matriz cimentícia

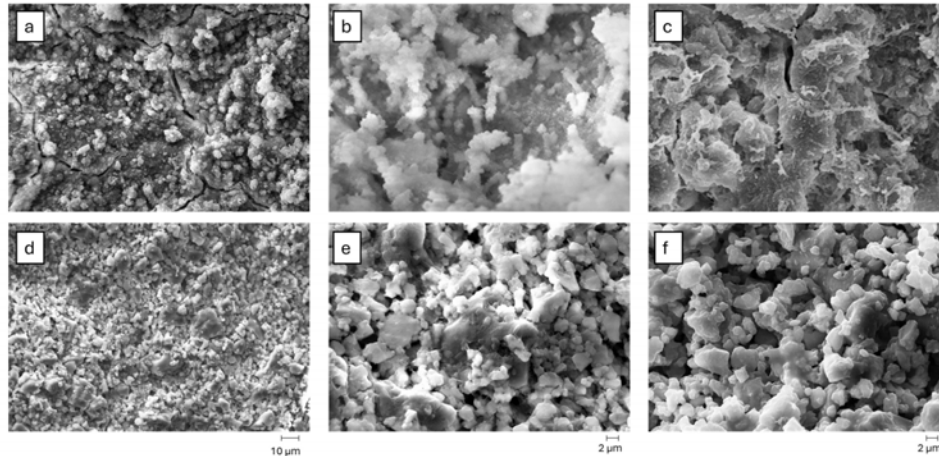


Fonte: elaborado pelas autoras

Dessa forma, a matriz cimentícia com o recobrimento mostrou-se capaz de inibir a adesão dos microrganismos e com a atividade microbiana principalmente acerca da *S.aureus*. Como anteriormente citado, o ácido sulfúrico gerado pela ação de microrganismos ataca a superfície da matriz reagindo com o hidróxido de cálcio e com o silicato de cálcio hidratado formado nas reações de hidratação do cimento Portland presente na matriz cimentícia de referência. Por outro lado, a matriz PO-R mostra a ausência dessas fases e inibe a degradação da estrutura pelo ataque de microrganismos.

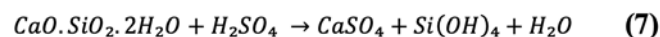
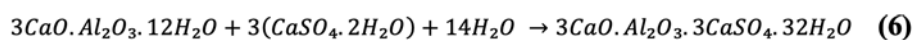
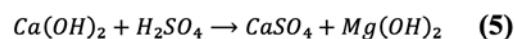
Para uma análise óptica, foram utilizadas microscopias eletrônicas de varredura (MEV) como mostra a FIGURA 3. Essa análise evidenciou uma maior adesão dos microrganismos na superfície das amostras, tanto no caso das bactérias gram-positivas quanto nas gram-negativas, dificultando a identificação do substrato, em comparação à matriz que foi revestida de cimento líquido que apresentou uma diminuição significativa em ambos experimentos, observando-se a camada do substrato.

Figura 3– Microscopias eletrônicas de varredura das amostras PO (a,b,c) e PO-R (d,e,f), em meio Luria Bertani, após contato com *E.coli*, e após contato com *S.aureus* respectivamente



Fonte: elaborado pelas autoras

As composições revestidas com CAC líquido mostraram uma significativa resistência à adesão de microrganismos na superfície da matriz cimentícia. Observou-se que as bactérias apresentaram menor viabilidade em contato com o CAC líquido principalmente a *E.coli*. A degradação do sistema com cimento PO decorre em consequência da diminuição do pH da superfície do material, que reagiu com o pH do meio. Nesse caso, a matriz cimentícia reage formando gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como composto intermediário e a etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) como produto final da reação. A pasta de cimento começa a perder resistência porque o cálcio para promover a formação da etringita, advém da descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de acordo com as equações a seguir. As fissuras ocorrem pela pressão expansiva da etringita, de dentro para fora.

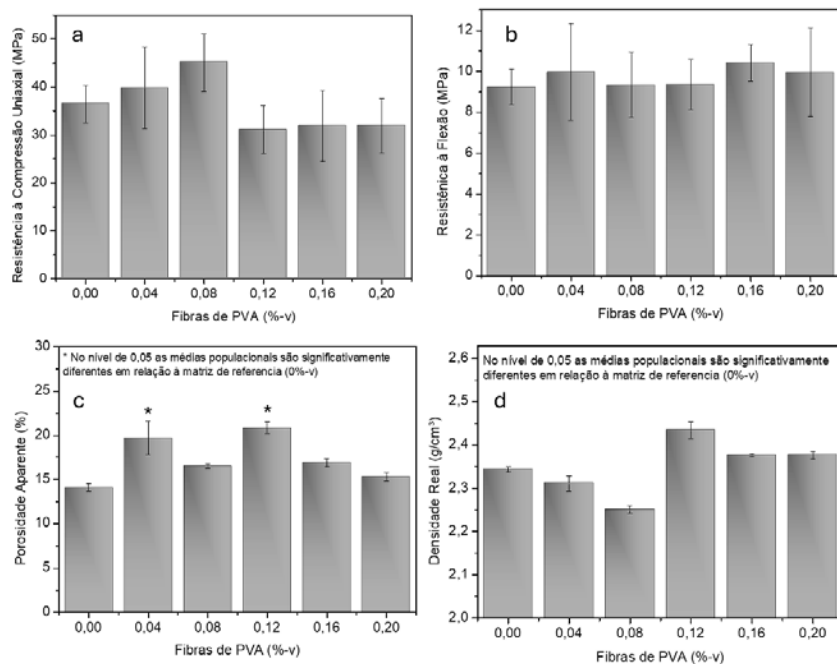


3.2 Influência da adição de fibras de PVA sobre as propriedades da matriz cimentícia

Cada etapa do processo de produção das matrizes cimentícias tem um papel importante nas propriedades finais do material. As fases de moldagem e secagem merecem destaque por sua influência direta na estrutura da matriz. A FIGURA 4 apresenta os resultados

obtidos nos diferentes ensaios físicos e mecânicos realizados. Em relação a resistência à compressão na **FIGURA 4a** verifica-se que a incorporação de fibras de PVA em teores de 0,04%-v e 0,08%-v resultou em desempenho mecânico superior à amostra de referência, indicando um efeito positivo da adição de fibras nesses teores. Contudo, observou-se que um aumento maior do teor de fibras compromete as propriedades mecânicas do compósito, possivelmente devido à aglomeração das fibras e à sua má dispersão na matriz cimentícia, o que prejudica a homogeneidade do material. No ensaio de flexão na **FIGURA 4b**, os resultados não demonstraram variações significativas entre as amostras, não sendo identificado um padrão estatisticamente relevante que permitisse estabelecer conclusões claras sobre o efeito da incorporação de fibras nesse parâmetro.

Figura 4 – Ensaio de resistência mecânica à compressão uniaxial (a), à flexão (b), porosidade aparente (c) e densidade real (d) com adição de Fibras de PVA.



Fonte: elaborado pelas autoras

Quanto à porosidade aparente apresentada na **FIGURA 4c**, constatou-se um aumento dos valores nas composições com 0,04%-v e 0,12%-v de PVA, sugerindo que a presença de fibras favorece a formação de vazios na matriz. Por outro lado, nos ensaios de densidade real na **FIGURA 4d**, observou-se uma redução nos valores para as amostras com 0,04%-v e 0,08%-v de PVA, em comparação com a amostra de referência. Esse comportamento é coerente com a literatura, uma vez que a redução da densidade real está associada ao

aumento da porosidade do material, refletindo uma maior fração de vazios incorporados na matriz cimentícia. Em particular, na amostra com 0,04%-v, a correlação entre o aumento da porosidade e a consequente redução da densidade real reforça a tendência de que a adição de fibras, ao alterar a microestrutura do compósito, aumenta o volume de vazios e reduz a compactação da matriz.

No ensaio de absorção de água por capilaridade na **FIGURA 5a**, foi identificado um aumento na taxa de absorção nas amostras com incorporação de fibras de PVA, especialmente ao longo das primeiras horas de ensaio. Esse comportamento é consistente com os resultados descritos por (Bentz *et al.* – 2001), que apontam que a presença de fibras poliméricas pode modificar a estrutura porosa da matriz, promovendo maior conectividade entre poros capilares e a formação de microfissuras adjacentes à interface matriz-fibra. Isso resulta em um aumento da permeabilidade, favorecendo o transporte de fluidos por ação capilar.

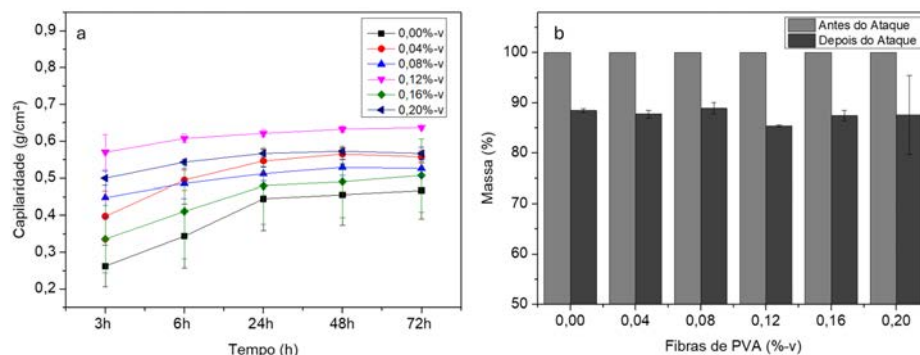
O mecanismo envolvido nesse processo é governado pelas forças de tensão superficial e adesão entre a água e a parede dos poros, sendo descrito por Washburn que estabelece uma relação direta entre a altura da coluna líquida absorvida e a raiz quadrada do tempo. Em materiais cimentícios, a cinética desse transporte está diretamente relacionada à porosidade, ao diâmetro dos poros e à presença de zonas de transição interfacial mais porosas ao redor das fibras (MONTEIRO *et al.*, 2014). Portanto, a maior absorção observada pode ser atribuída à estrutura porosa mais conectada promovida pelas fibras, o que apesar de favorecer a absorção inicial, pode comprometer a durabilidade a longo prazo se não houver uma barreira à progressão de agentes agressivos.

No ensaio de ataque de cloretos acelerado na **FIGURA 5b**, conduzido por imersão parcial em solução de NaCl a 3% por 3 dias, foi verificado que a amostra com 0,04%-v de PVA apresentou a menor perda de massa (11%), em comparação à amostra de referência e às demais formulações, que apresentaram uma média de perda de 12,6%. O transporte de íons cloreto na matriz ocorre predominantemente por difusão e permeação capilar, sendo ativado em regiões com maior porosidade e conectividade dos poros. Contudo, em baixos teores de fibras, é possível que a dispersão mais homogênea contribua para a formação de uma rede de microfissuras menos conectada, reduzindo a profundidade de penetração dos cloretos (SARASWATHY *et al.*, 2007).

Adicionalmente, a interface matriz-fibra pode atuar como uma barreira à mobilidade iônica, em razão da formação de zonas de transição com distintas características de empacotamento e estados de hidratação. Evidências reportadas por Andrade (1993), e atualizadas por Henriques (2023), indicam que a presença de fases de menor permeabilidade contribui para a mitigação da penetração de íons agressivos, uma vez que dificulta a continuidade

dos trajetos preferenciais de difusão no interior da matriz cimentícia. Assim, embora a absorção inicial de água por capilaridade seja favorecida, o mecanismo de ataque por cloretos depende também da microestrutura interna e da natureza da interação entre os poros, e não apenas da porosidade total. Isso explica a melhor resistência da amostra com (0,08%-v) de fibras, sugerindo que há um limite ótimo de incorporação para equilibrar permeabilidade e durabilidade.

Figura 5 – Ensaios de Capilaridade (a), Ataque de cloreto acelerado (b), com adição de Fibras de PVA.



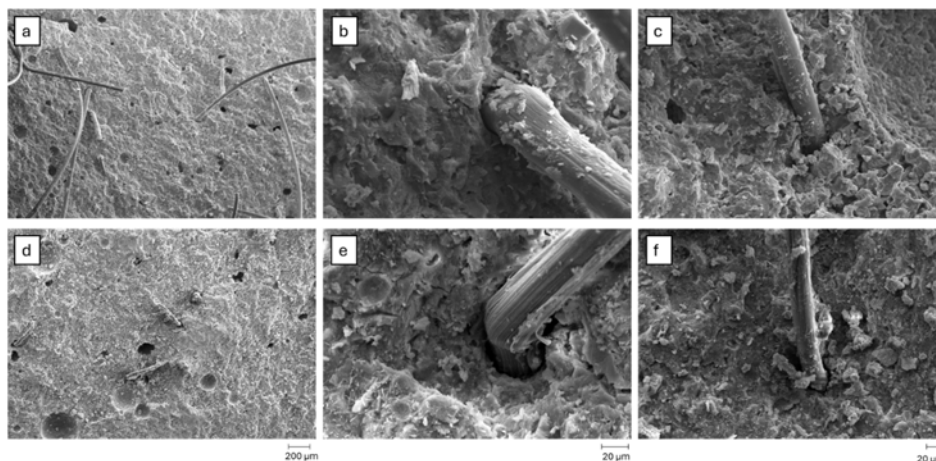
Fonte: elaborado pelas autoras

Por conseguinte, mesmo diante do aumento na capilaridade ao longo do tempo, a resistência ao ataque de cloretos pode ser mantida ou até melhorada, desde que o teor de PVA seja controlado, evidenciando a complexa relação entre permeabilidade, transporte de água e resistência química em compósitos cimentícios.

Após a realização do ensaio de resistência mecânica, as amostras fraturadas foram submetidas a um processo de secagem em estufa a 50 °C. Em seguida, essas amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme ilustrado na **FIGURA 6**, com o objetivo de caracterizar a morfologia da fratura e avaliar a interface matriz-fibra.

Nas **Figuras 6a e 6d**, obtidas com aumento de 95x, é possível observar regiões com vazios alongados que indicam a possível extração de fibras de PVA, sugerindo baixa aderência entre a matriz cimentícia e o reforço polimérico em determinadas áreas. Ainda nessas imagens, nota-se a presença de fibras seccionadas transversalmente, o que indica ruptura por cisalhamento interno, e não tração, comprovando que o rompimento ocorreu na própria fibra e não na interface. Esse comportamento sugere que, em alguns pontos, a resistência de ligação na interface matriz-fibra supera a resistência mecânica do próprio reforço, caracterizando o reforço como o elemento estrutural mais frágil do compósito.

FIGURA 6 – Microscopias eletrônicas de varredura das amostras após ensaio de Flexão (a,b,c) e amostras após o ensaio de compressão uniaxial (d,e,f), com adição de Fibras de PVA.



Fonte: elaborado pelas autoras

Nas **Figuras 6b, 6e**, com aumento de 1300x, é possível identificar uma camada contínua de matriz aderida à superfície da fibra, mostrando boa compatibilidade química entre os componentes. Essa aderência superficial reforça a suposição de que há interações eficazes entre a matriz cimentícia e o PVA. No entanto, nota-se também a presença de um espaço vazio cercado parcialmente a fibra, indicando que, apesar da aderência pontual, podem ocorrer regiões de descontinuidade que comprometam a transferência eficiente de tensões.

4 Conclusões

O recobrimento das matrizes cimentícias com cimento líquido contendo sílica promoveu melhorias significativas em suas propriedades físico-químicas, estruturais e biológicas. O aumento da resistência mecânica e da densidade real observados nas amostras recobertas está associado ao preenchimento superficial e ao fechamento dos micro poros pela fase cimentícia líquida, favorecendo o empacotamento das partículas e a conexão interfacial. Apesar do aumento da porosidade aparente, possivelmente ligado a efeitos secundários da aplicação do revestimento, como tensões internas e redistribuição de poros, a estrutura apresentou maior homogeneidade e potencial de durabilidade. Do ponto de vista

microbiológico, as amostras recobertas apresentaram menor adesão de microrganismos e diminuição da atividade antimicrobiana, comprovando a eficácia do recobrimento como estratégia de proteção superficial.

O reforço com fibras de PVA em matrizes cimentícias impacta significativamente suas propriedades mecânicas, físicas e microestruturais. A incorporação dos teores (0,04%-v a 0,08%-v) promoveu ganhos na resistência à compressão, confirmando uma atuação ativa das fibras na redistribuição de tensões e no controle de microfissuras. Entretanto, teores mais elevados resultaram em perda de performance, possivelmente devido à agrupamento de fibras e à formação de vazios, afetando a coesão da matriz. Ensaios de capilaridade mostraram que a presença das fibras aumenta a conectividade porosa, elevando a absorção inicial de água por ação capilar. Apesar disso, o comportamento frente ao ataque acelerado por cloretos revelou que baixos teores de PVA (0,08%-v) favorecem a resistência química, reduzindo a perda de massa e indicando uma barreira eficaz à penetração iônica. A análise por MEV mostrou uma boa adesão da matriz à superfície das fibras e, em muitos casos, ruptura do próprio reforço, o que sugere que a interface matriz-fibra é robusta e quimicamente compatível. No entanto, também foram observadas regiões com descontinuidades e vazios, indicando que o sucesso do reforço depende fortemente da homogeneidade na dispersão e do teor de fibras.

5 Agradecimentos

À Universidade do Vale do Paraíba pelo suporte e infraestrutura e ao PIBIC-CNPq pelo apoio financeiro, permitindo a elaboração deste projeto.

6 Referências

CHOTOLI, Fabiano Ferreira. **Construções de concreto na era digital**. (Editorial). *Concreto e Construções*, v. 52, n.114, p.5-7, abr.jun., 2024.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ALMEIDA, F. J. **Estudo da decomposição da alita em cimentos Portland brasileiros**. *Revista Matéria*, v. 26, e12678, 2021.

SOUZA, L. M. **Comportamento reológico de concretos autoadensáveis produzidos no Brasil**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 14, n. 1, p. 123–134, 2021.

HALL-STOODLEY, L. *et al.* **Bacterial biofilms**: from the natural environment to infectious diseases. Nature Reviews Microbiology, v. 21, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

BECKER, K. **Emerging resistance in Staphylococcus aureus**: diagnostics and surveillance. Frontiers in Microbiology, v. 12, 2021.

YAN, L. **Advances in testing methods for microbially induced corrosion**. Construction and Building Materials, v. 278, 2021.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BOLDMAN, P.; LATZ, M. **Ceramic membranes and their application in food and beverage processing**. Filtration & Separation, v. 37, p. 36-38, 2000. Apud SCHNEIDER, R. P.; TSUTYA, M. Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso. São Paulo: ABES, 2001

MOURA, C. A. M.; RESENDE, J. A. L. C.; SOUZA, K. C. **Caracterização de pastas de cimento Portland com adição de sílica visando a imobilização de Cr(VI)**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Barra do Garças, MT, 2023.

10.29327/2774886.9.29-4



Para obter mais informações
sobre os mestrados profissionais

Entre em contato com Adilson ou Mary pelo e-mail
mestrado@ipt.br
ou ligue para (11) 3767.4673

Sobre os cursos de especialização,
curta duração e educação corporativa


Entre em contato com Andrea pelo e-mail
cursos@ipt.br
ou ligue para (11) 3767-4226

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - São Paulo - SP
CEP 05508-901 - Brasil

Central de Relacionamento com o Cliente
(11) 3767-4102 / 4456 / 4091

Ensino Tecnológico
(11) 3767-4673 | mestrado@ipt.br

 <https://www.instagram.com/iptensinotecnologico/>

 <https://bit.ly/FacebookEnsinoTecnologicoIPT>

 <https://bit.ly/LinkedinEnsinoTecnologicoIPT>

 <https://www.youtube.com/@cursosipt>

ipt⁺
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS
ENSINO TECNOLÓGICO



sapiens.ipt.br

revista IPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Confira em nosso site todas as edições da revista

<https://bit.ly/revistaIPT>



ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS
ENSINO TECNOLÓGICO

