

CAPTURA DE CARBONO

Mitigação de emissões de fontes estacionárias

POLUIÇÃO DO AR

Medição de monóxido de carbono em túneis

ROCHAS ORNAMENTAIS

Ensaio de resistência à abrasão





revista **IPT**

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

v.8, n.27, dezembro, 2024

Quadrimestral

Editores-chefes

Eduardo Luiz Machado

Andreia Longuinho da Silva

José Maria de Camargo Barros

Conselho Editorial

Eduardo Luiz Machado

Silas Derenzo

Assistentes Editoriais

Denís Martins Lemos

Flavio Sergio Jorge de Freitas

João Antonio Rodrigues Garcia

Mariana Mesa Varon

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

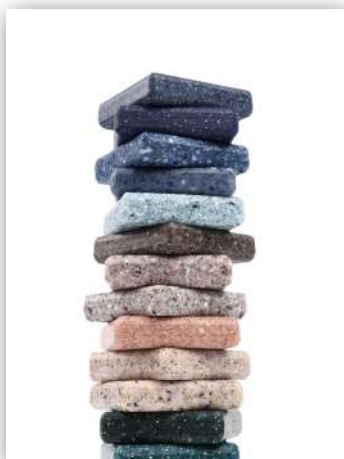
José Maria de Camargo Barros

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

#27

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 Captura de CO₂ de Fontes Estacionárias: Técnicas atuais e tendências.

Autores: Giorgio Morangueira Magri, Manoel Angelo Caldas, Thais Camila Souza do Carmo, Wagner de Assis Quintino, Silas Derenzo

30 Avaliação dos níveis de monóxido de carbono nos emboques dos Túneis Ayrton Senna e Presidente Roosevelt.

Autores: Tomnila da Costa Lacerda Motta, André Luiz Gonçalves Scabbia, Murilo Daniel de Mello Innocentini

44 Avaliação comparativa de dados de ensaios de resistência à abrasão aplicados em rochas ornamentais em granitos e mármore.

Autores: Vinicius Santiago Alface, Valdecir Angelo Quarcioni, Cristina Kanaciro, Eleno de Paula Rodrigues

64 Projeto de heliodon automatizado de pequenas dimensões e de baixo custo para uso como ferramenta educacional.

Autores: Gabriel Borelli Martins

NOVO ANO, NOVOS CONTEÚDOS

Na virada para 2025 chega aos leitores a vigésima sétima edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação' recheada de novas ideias. São quatro artigos selecionados que tratam temas técnicos tão relevantes quanto atuais nas respectivas aplicações. Confira a seguir.

Esta edição começa com artigo intitulado "Captura de CO₂ de fontes estacionárias: técnicas atuais e tendências". São seus autores Giorgio Morangueira Magri, Manoel Angelo Caldas, Thais Camila Souza do Carmo e Wagner de Assis Quintino, do Mestrado Profissional em Processos Industriais; e Silas Derenzo, Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais e pesquisador do Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas do IPT. O trabalho aborda técnicas atuais e em desenvolvimento para mitigar as emissões de CO₂ de fontes estacionárias que, embora não sejam as principais emissoras, contribuem para o aquecimento do planeta.

Em "Avaliação dos níveis de monóxido de carbono nos emboques dos túneis Ayrton Senna e Presidente Roosevelt" as medições de monóxido de carbono, entre os meses de julho e novembro de 2023, apontou que a exposição prolongada ao poluente próximo aos emboques dos túneis pode provocar efeitos tóxicos continuados no entorno. A autoria é de Tomnila da Costa Lacerda Motta (Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia) e Murilo Daniel de Mello Innocentini, ambos da USP Ribeirão do Preto/SP; e André Luiz Gonçalves Scabbia, docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia do IPT.

No artigo "Avaliação comparativa de dados de ensaios de resistência à abrasão aplicados em rochas ornamentais em granitos e mármore", apresentam-se resultado experimental de dois diferentes ensaios, aplicados em granitos e mármore de cinco tonalidades, com diferenças significativas na resistência à abrasão, tendo os granitos apresentado maior resistência ao desgaste. São seus autores Vinicius Santiago Alface, do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia; Valdecir Angelo Quarcioni, docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia e pesquisador do Laboratório de Materiais para Produtos de Construção do IPT; Cristina Kanaciro, pesquisadora do Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos do IPT; e Eleno de Paula Rodrigues, consultor da LITHOTEC - Consultoria em Granitos e Mármore.

Completa esta edição artigo de Gabriel Borelli Martins, pesquisador da Seção de Engenharia de Software e Transportes Inteligentes do IPT, intitulado "Projeto de 'heliodon' automatizado de pequenas dimensões e de baixo custo para uso como ferramenta educacional". Nele o autor apresenta projeto de um heliodon alternativo, de pequenas dimensões e de baixo custo, que pode ser utilizado pelo docente em sala de aula. É útil em disciplinas que envolvam conceitos de geometria solar. Também foi desenvolvido um software com interface gráfica para ser integrado ao dispositivo físico e o conjunto é de acesso livre.

Boa leitura!

*Eduardo
L. Machado*

Eduardo Luiz Machado
Diretor Técnico em Ensino Tecnológico



Artigo Técnico

Captura de CO₂ de Fontes Estacionárias: Técnicas atuais e tendências.

CO₂ capture from stationary sources: Current techniques and trends.

Giorgio Morangueira Magri^a, Manoel Angelo Caldas^a, Thais Camila Souza do Carmo^a, Wagner de Assis Quintino^a, Silas Derenzo^{bc*}

^a Mestrado Profissional em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^c Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas, Bionanomanufatura, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*e-mail: derenzo@ipt.br

Palavras-chave: fontes estacionárias, captura de carbono, CO₂, absorção, adsorção, membranas.

Keywords: *Production Flow; Fast Construction; Retail; Takt Production; Location Based Management System.*

Resumo

De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC -2021), é inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra. Mudanças rápidas e generalizadas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera ocorreram, como resultado das emissões de gases do efeito estufa, levando à necessidade de se estabelecer uma meta de alcançar emissões líquidas zero para dióxido de carbono (CO_2). Este trabalho aborda as técnicas atuais e as em desenvolvimento para mitigar as emissões de CO_2 de fontes estacionárias que, embora não sejam as principais fontes de emissão, contribuem para o efeito estufa. São abordadas as técnicas de combustão (pré, oxi e pós) identificando suas vantagens e considerações, bem como as técnicas de captura mais utilizadas relativas a absorção, adsorção e membranas. Nos processos de adsorção, discutem-se as configurações de operação e os adsorventes; nos processos de absorção, são abordados, além dos processos, os líquidos absorventes, enquanto que as discussões sobre as membranas recaem sobre os materiais mais utilizados e em desenvolvimento. Estimativas levantadas pelo Financial Times mostram que tecnologias como a captura e armazenagem de carbono diretamente na fonte de emissão, consideradas imprescindíveis para descarbonizar indústrias intensivas, hoje custam entre € 90 e € 120 por tonelada. Este valor, associado à taxa de captura / remoção de CO_2 de cada processo, e ao custo para implementação das tecnologias discutidas neste artigo, podem contribuir para a definição de melhor processo a ser implementado.

Abstract

It is clear that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Rapid and widespread changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred as a result of greenhouse gas emissions, leading to the need to set a target of achieving net zero emissions for carbon dioxide (CO_2). This work addresses current and developing techniques to mitigate CO_2 emissions from stationary sources which, although not the main sources of emissions, contribute to the greenhouse effect. Combustion techniques (pre, oxy and post) are covered, identifying their advantages and considerations, as well as the most used capture techniques relating to absorption, adsorption and membranes. In adsorption processes, operating configurations and adsorbents are discussed; In the absorption processes, absorbent liquids are covered in addition to the processes, while the discussions on membranes focus on the most

used and developing materials. Estimates raised by the Financial Times show that technologies such as carbon capture and storage directly at the source of emissions, considered essential to decarbonize intensive industries, currently cost between €90 and €120 per ton. This value, associated with the CO₂ capture/removal rate of each process, and the cost of implementing the technologies discussed in this article, can contribute to defining the best process to be implemented.

1 Introdução

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) divulgou no ano de 2021, um relatório contendo evidências da influência humana nas mudanças climáticas. As emissões de gases de efeito estufa foram relacionadas ao aumento de eventos climáticos graves, conduzindo a uma missão de alcançar emissões líquidas zero para CO₂. O principal objetivo na redução das emissões de gases de efeito estufa é o de auxiliar a preservação do meio ambiente. Os benefícios da redução das emissões a longo prazo devem ser superiores aos danos causados aos recursos hídricos, qualidade do ar, terra e clima. A mitigação da emissão de CO₂ deve ser acompanhada por um calendário de descarbonização nas próximas duas a três décadas para limitar os extremos climáticos (VITILLO *et al.*, 2022).

A indústria é um setor essencial para o cumprimento das metas climáticas globais. Devido ao crescimento na produção industrial, juntamente com a urgência social e a política da descarbonização, prevê-se que as tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) serão uma parte instrumental para facilitar o desenvolvimento econômico. O mercado de utilização e armazenamento de captura de carbono é estimado em 2,32 bilhões de dólares em 2024, e deverá atingir 3,84 bilhões de dólares até 2029. A produção de hidrogênio e fertilizantes, o processamento de gás natural e a geração de energia estão entre as indústrias onde o dióxido de carbono é capturado e armazenado (MCLAUGHLIN *et al.*, 2023).

2 Objetivo

O objetivo principal deste artigo é apresentar, descrever e discutir as tecnologias existentes e comumente disponíveis para captura de carbono a partir do dióxido de carbono (CO₂) na indústria.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Tecnologias emergentes e atuais para captura de carbono

Tecnologias que envolvem a captura de carbono fundamentam-se na captura do gás CO₂ proveniente da atmosfera ou de uma fonte emissora, para o armazenamento terrestre ou utilização para fins industriais. As principais abordagens para captura do gás dióxido de carbono, gerado a partir de um combustível fóssil primário (carvão, gás natural ou petróleo), biomassa e resíduos, são os processos conhecidos como Oxi-combustão, Pré-combustão e Pós-combustão. (CHAO, *et al.*, 2021; MCLAUGHLIN *et al.*, 2023)

A Oxi-combustão utiliza o gás oxigênio puro, como oxidante para a combustão. Este conceito tem sido empregado na indústria metalúrgica, onde são necessárias temperaturas de forno extremamente altas, mas recebeu atenção na utilização e armazenamento da captura de carbono, pois produz um fluxo de resíduos que consiste apenas em água e dióxido de carbono (MCLAUGHLIN *et al.*, 2023).

A Pré-combustão ou reforma ou gaseificação separa o gás dióxido de carbono antes de se iniciar a combustão. O combustível, normalmente carvão ou biomassa, reage com oxigênio ou ar, para produzir um “gás de síntese”, composto de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂) (MCLAUGHLIN *et al.*, 2023).

A Pós-combustão refere-se a tecnologias aplicadas a fontes emissoras pontuais para captura de CO₂, em gases de combustão gerados na queima de combustíveis fósseis e também de outros processos industriais. Os métodos de captura de carbono pós-combustão podem ser categorizados como adsorção, absorção e separação por membrana (MCLAUGHLIN *et al.*, 2023).

A **TABELA 1** apresenta as vantagens e considerações para as principais tecnologias para captura de carbono.

Tabela 1 - Tecnologias para captura de carbono através do CO₂

Tecnologia de captura	Método	Vantagens	Considerações
Oxi-combustão	Separação do dióxido de carbono através da queima de combustível com oxigênio puro	- Concentração de CO ₂ acima de 80%; - Fluxo de CO ₂ purificado para eliminar gases não condensáveis	- Necessita de grande quantidade de oxigênio, resultando em um processo caro; - Tecnologia menos desenvolvida
Pré-combustão	Separação do dióxido de carbono do gás de combustão utilizando ar, vapor ou oxigênio	- Concentração de CO ₂ na faixa de 15-60%; - Uso do gás hidrogênio (H ₂) como combustível	Requer um custo de investimento adicional em equipamento de captura
Pós-combustão	Separação do dióxido de carbono do gás de combustão utilizando ar	- Altamente desenvolvido - Pode ser facilmente adaptado a unidades existentes na planta industrial	- Nível de CO ₂ bastante baixo - menos de 15%; - Alto consumo de energia

Fonte: os autores, adaptado de (MCLAUGHLIN *et al.*, 2023).

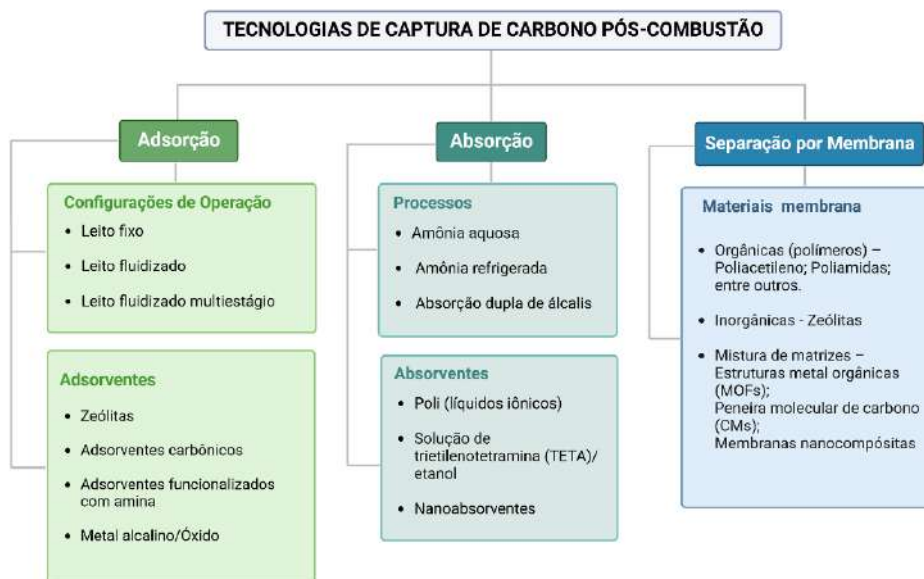
O processo de captura de carbono por Pós-combustão, principalmente por fontes emisoras industriais, quando comparada à Oxi-combustão e a pré-combustão, representa uma abordagem mais prática, devido às necessidades de infraestrutura, os riscos de corrosão e as altas despesas de manutenção associadas à combustão nos processos de captura de carbono nos dois processos citados (MCLAUGHLIN *et al.*, 2023).

3.2 Captura de carbono Pós-combustão

O processo de captura de carbono Pós-combustão, remove o CO₂ e outros gases da queima de combustíveis fósseis, com base em mecanismos físicos ou químicos. As técnicas de Pós-combustão são classificadas como adsorção, absorção e separação por membrana. (CHAO, *et al.*, 2021).

A FIGURA 1 aborda as principais tecnologias de captura de carbono no processo de Pós-combustão.

Figura 1 - Tecnologias de captura de carbono Pós-combustão



Fonte: adaptado de (CHAO, *et al.*, 2021); Created with BioRender.com

3.2.1 Adsorção

No processo de adsorção, os gases (adsorbato) são adsorvidos em uma superfície sólida (adsorvente) (RAGANATI, MICCIO, AMMENDOLA, 2021). Um sistema de contato adequado é o fator chave, pois afeta a eficiência do processo, a área ocupada e os custos gerais de captura. Outros fatores que afetam no diferencial da tecnologia, são o potencial de operação flexível e a facilidade de adaptação às centrais já existentes na indústria. Para tanto, são aplicados diferentes tipos de reatores de captura de CO₂ baseados em adsorção, incluindo leitos fixos, fluidizados e de multiestágios (DHOKE, *et al.*, 2021).

Existem diferentes configurações de operação dos processos de adsorção. A configuração de reator mais simples é a do Leito fixo, onde um gás de combustão passa através de um leito fixo de pellets adsorventes (tamanho milimétrico) ou através de embalagens estruturadas especialmente projetadas. Os revestimentos estruturais são usados para otimizar as áreas superficiais e os espaços vazios para atingir uma alta taxa de adsorção e baixa queda de pressão (HU, *et al.*, 2024).

O Leito fluidizado relaciona o tempo de ruptura (tempo de operação necessário para atingir o mínimo de concentração detectável ou máxima permitida do contaminante

para ser removido) e a perda de capacidade de adsorção durante os ciclos subsequentes. No entanto, com a elevada queda de pressão, podem ocorrer efeitos de canalização e comportamentos de fluxo não ideais (HU, *et al.*, 2024).

Já no leito fluidizado de multiestágios, o sólido flui em contracorrente ao gás, aumentando a capacidade de adsorção. Ao contrário do reator de leito fluidizado de estágio único, o de multiestágios reduz a retro mistura interna geral para introduzir um certo grau de comportamento de fluxo tampão (HU, *et al.*, 2024).

A TABELA 2 apresenta as principais vantagens e considerações para as configurações de operação de leitos para adsorção.

Tabela 2 - Configurações de operação de leitos para adsorção de dióxido de carbono (CO₂)

Reator	Vantagens	Considerações
Leito fixo	Configuração simples	A grande queda de pressão resulta em uma grande perda energética
Leito fluidizado	Baixa emissão de gases do efeito estufa, devido às altas velocidades dos gases de combustão	A alta taxa de mistura resulta em um rápido tempo de ruptura resulta em uma baixa capacidade de adsorção, exigindo grande taxa de recirculação do adsorvente
Leito fluidizado de multiestágios	O vazamento de gás entre reatores é efetivamente minimizado, alta recuperação e pureza de CO ₂ podem ser alcançadas	Limitação na faixa de taxas de alimentação dos gases de combustão

Fonte: os autores, adaptado de (HU, *et al.*, 2024; RAGANATI, MICCIO, AMMENDOLA, 2021)

3.2.1.1 Tipos de adsorventes

As diferentes interações entre o adsorvente e o adsorbato classificam a adsorção em dois mecanismos, adsorção física e adsorção química. Na adsorção física ocorrem interações fracas via forças de Van der Waals, forças dipolo-dipolo e força de London. O mecanismo de adsorção química ocorre devido à forte interação química, como ligações covalentes, quelantes, formação de complexos e outras ligações químicas entre o contaminante e o adsorvente (ALLANGAWI, *et al.*, 2023).

No caso do CO₂, as moléculas gasosas estão ligadas à superfície do adsorvente. Vários adsorventes de base orgânica/inorgânica surgiram como candidatos promissores para a remoção de CO₂. Por exemplo, adsorventes à base de aminas, óxidos metálicos e materiais à base de metais alcalinos têm sido empregados para captura de carbono baseada em quimissorção. Isso é atribuído ao fato desses materiais possuírem funcionalizações diferenciadas em suas superfícies, o que facilita as interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorbato. Além disso, muitos estudos foram relatados para o sequestro de fisissorção de CO₂ por diferentes materiais porosos e mesoporosos, como zeólitas e materiais carbonáceos (ALLANGAWI, *et al.*, 2023).

A seleção de adsorventes adequados (físicos ou químicos), é um dos principais pontos a serem abordados, pois os materiais adsorventes devem satisfazer vários critérios, como: estabilidade mecânica/térmica; custos e procedimento de síntese; estabilidade multi cíclica; capacidade de adsorção do CO₂; seletividade ao CO₂; tolerância à umidade/impurezas; facilidade de regeneração e cinética de adsorção/dessorção do CO₂. Estes aspectos são discutidos na literatura (RAGANATI, MICCIO, AMMENDOLA, 2021).

Os adsorventes mais comumente utilizados na indústria incluem as zeólitas, os adsorventes carbônicos e os funcionalizados com aminas.

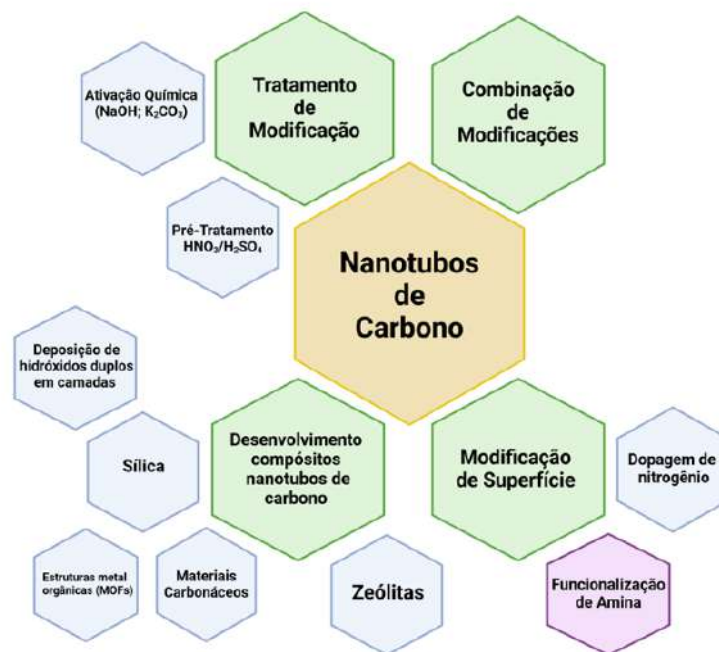
As zeólitas são materiais cristalinos microporosos altamente ordenados produzidos a partir de silício, alumínio e oxigênio. Esses materiais são muito promissores para a captura de CO₂. Pós-combustão, pois suas isotermas de adsorção do CO₂ não mostram mudanças perceptíveis, mesmo após extensos ciclos de adsorção/dessorção. Além disso, a estrutura da zeólita permite a substituição dos cátions originalmente presentes, por cátions alcalinos (sódio (Na), rubídio (Rb), lítio (Li), célio (Cs) e potássio (K)), aumentando gradativamente a capacidade de adsorção do dióxido de carbono (CO₂) (RAGANATI, MICCIO, AMMENDOLA, 2021).

Os adsorventes carbônicos são materiais carbonáceos e estão amplamente disponíveis em diferentes classes, como carvões ativados e nanomateriais de carbono (nanotubos de carbono, fulerenos, grafenos, nanofilmes de carbono e fibras). Materiais à base de carbono são normalmente acessíveis e caracterizados por uma alta área superficial específica e volume de poros:

i) Carvões ativados: adsorventes mais utilizados na indústria, são mais baratos em comparação com outros adsorventes e podem ser produzidos usando diferentes matérias-primas, como carvão, piche de coque, madeira ou fontes de biomassa (borra de café, caroço de azeitona, casca de coco, serragem, entre outros). Porém, são tipicamente caracterizados por uma menor capacidade de adsorção em relação às zeólitas (RAGANATI, MICCIO, AMMENDOLA, 2021).

ii) Nanomateriais de carbono: têm por características possuir uma boa capacidade de adsorção de CO_2 , cinética de adsorção rápida, tolerância à umidade e baixa necessidade de energia de regeneração. Além disso, nanomateriais de carbono dispõem de uma distribuição de tamanho de poro bem definida (macroporos e microporos), uma alta área superficial específica e boa estabilidade químico-física (RAGANATI, MICCIO, AMMENDOLA, 2021). Os nanotubos de carbono oferecem a possibilidade de modificar sua superfície adicionando grupos químicos. Na atualidade, muitos estudos estão abordando estratégias de modificação dos nanotubos de carbono, para o aumento da capacidade de adsorção do CO_2 . Os estudos focam principalmente em tecnologias de dopagem de nitrogênio via aminas na superfície, métodos de tratamento por agentes químicos, sílica, deposição de hidróxidos duplos em camadas ou a combinação das abordagens listadas acima. As estratégias genéricas de modificação de nanotubos de carbono e os caminhos de pesquisa são apresentadas na **FIGURA 2** (DZIEJARSKI, *et al.*, 2023).

Figura 2 - Estratégias de modificação de nanotubos de carbono



Fonte: os autores, adaptado de (DZIEJARSKI, *et al.*, 2023).

Os adsorventes funcionalizados com aminas permitem uma forte ligação entre as aminas e o CO₂, resultando na eficácia do adsorvente, tanto em condições secas como úmidas. Porém, devido a essa interação covalente, é necessária uma elevada taxa de energia para a regeneração. Adsorventes funcionalizados com aminas oferecem propriedades vantajosas, incluindo não volatilidade, estabilidade oxidativa aprimorada, superfícies altamente acessíveis e força de ligação ajustável (NGUYEN, *et al.*, 2023).

Os metais alcalinos e seus óxidos são adsorventes que podem ser preparados adicionando carbonatos de metal alcalino (sódio (Na), potássio (K), alumínio (Al) ou lítio (Li)) em suportes inorgânicos, como materiais de carbono, zircônia, cerâmica, sílica e alumina. Adsorventes baseados em metal alcalino/óxido, ganharam destaque na captura de CO₂, devido às suas características únicas, incluindo baixa energia de regeneração, baixo custo e baixas temperaturas de operação. No entanto, as características da reação de carbonatação desses adsorventes à base de metais alcalinos dependem fortemente dos materiais de suporte, da área superficial do adsorvente, das qualidades físicas dos adsorventes e da distribuição dos ingredientes ativos (ALLANGAWI, *et al.*, 2023).

A TABELA 3 apresenta as principais vantagens e considerações para os principais materiais adsorventes utilizados para a captura de CO₂ na indústria.

Tabela 3 - Diferentes tipos de adsorventes para captura de dióxido de carbono (CO₂)

Tipo	Adsorvente	Vantagens	Considerações
Físico	Zeólitas	<ul style="list-style-type: none"> alta capacidade de adsorção materiais porosos grande área de superfície alta estabilidade grande acessibilidade baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> baixa seletividade de dióxido de carbono grande diminuição na adsorção, com pequeno aumento na temperatura baixa pureza, composição química variável desempenhos de separação limitados
	Carbono ativado	<ul style="list-style-type: none"> ampla disponibilidade de precursores baixo custo grande área de superfície específica alta estabilidade térmica excelente tolerância à umidade regeneração fácil 	<ul style="list-style-type: none"> valores limitados de capacidade de adsorção de dióxido de carbono friabilidade baixa seletividade
	Adsorventes Carbônicos		
	Nano-materiais de carbono	<ul style="list-style-type: none"> distribuição bem definida do tamanho dos poros grande superfície específica alta capacidade de adsorção boa estabilidade químico-física rápida cinética de adsorção tolerância à umidade 	<ul style="list-style-type: none"> síntese complexa/alto custo seletividade limitada
Químico	Adsorvente funcionalizado com amina	<ul style="list-style-type: none"> baixa energia de regeneração materiais estáveis adsorção rápida de dióxido de carbono adsorventes multiuso 	<ul style="list-style-type: none"> material de alto custo
	Metal alcalino/óxido	<ul style="list-style-type: none"> baixa energia de regeneração custo-benefício capacidade de operar em baixas temperaturas (abaixo de 200°C) 	<ul style="list-style-type: none"> adsorventes de operação lenta, durável adsorventes irreversíveis na presença de dióxido de enxofre (SO₂) e ácido clorídrico (HCl).

Fonte: os autores, adaptado de (ALLANGAWI, *et al.*, 2023)

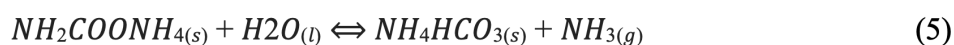
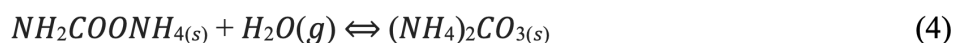
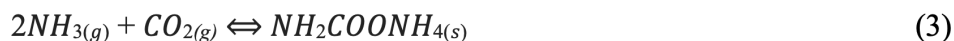
3.2.2 Absorção

O processo de absorção pode ser classificado em absorção química e absorção física. A absorção química é a abordagem mais estabelecida. Os processos de absorção química mais frequentemente utilizados na indústria incluem aminas, amônia aquosa e a absorção dupla de álcalis.

Os mais utilizados são os processos baseados, em geral, nos diversos tipos de aminas, que são compostos químicos derivados da amônia (NH₃) onde pelo menos uma molécula de hidrogênio é substituída por um composto orgânico. Assim, são normalmente absorventes alcalinos, solventes inorgânicos e orgânicos com bases amínicas, que são os compostos mais utilizados na indústria (PEU, *et al.*, 2023). Diferentes solventes de amina, como monoetanolamina e dietanolamina, têm apresentado um potencial para captura de CO₂.

A amônia aquosa é capaz de capturar o CO₂ e outros elementos coexistentes em gases de combustão como óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x). O processo de absorção com amônia aquosa pode minimizar o custo de uma planta industrial, eliminando o sistema de limpeza de gases ácidos e também gerando recursos, pois os óxidos de enxofre e de nitrogênio podem ser convertidos em fertilizantes (PEU, *et al.*, 2023).

A absorção de dióxido de carbono pela amônia é realizada seguindo as Equações (1)–(3), onde na primeira etapa a amônia (NH₃) reage com o CO₂ e produz o carbamato de amônio em condições secas (Reação (3)). Na presença de umidade, o carbonato de amônio é formado a partir do carbamato de amônio (Reação (4)) e então é convertido em bicarbonato de amônio (Reação (5)).



Uma variante do processo utiliza amônia resfriada, onde o processo de absorção do CO_2 ocorre em temperaturas muito baixas, minimizando a perda de amônia (NH_3) (menos de 6%) no solvente, em comparação com o processo convencional de amônia aquosa. Existem algumas limitações no processo de amônia resfriada, incluindo baixas taxas de absorção e a necessidade de múltiplos recipientes absorvedores (PEU, *et al.*, 2023).

Nos processos de absorção dupla de álcalis, os solventes de carbonato de metais alcalinos são uma alternativa potencial aos solventes convencionais aplicados em tecnologias de captura de CO_2 . Esses solventes à base de álcalis podem ser empregados através de processos de absorção dupla de álcalis. Existem algumas vantagens atraentes na aplicação deste processo na captura do CO_2 , incluindo menor degradação, queda nas emissões e nos custos. As limitações derivam de uma baixa taxa de transferência de massa de CO_2 e também de uma reação lenta (PEU, *et al.*, 2023).

Os diferentes tipos de materiais absorventes que podem ser utilizados na indústria incluem os poli líquidos iônicos (PILs), as soluções de trietilenotetramina (TETRA) e os Nanoabsorventes.

Os Poli (líquidos iônicos) - (PILs) formam uma classe de líquidos iônicos (ILs) que são eficazes como absorventes de CO_2 . Esses líquidos são caracterizados pela presença de múltiplos grupos iônicos na molécula, o que permite um alto nível de ligação ao CO_2 ; além disso, podem manter essa ligação em altas temperaturas. Os Poli (líquidos iônicos) são altamente seletivos para o CO_2 , o que significa que têm baixa afinidade por outros gases, como nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), o que é importante em aplicações de captura de carbono, pois permite uma maior concentração do CO_2 a ser capturado (PEU, *et al.*, 2023).

A trietilenotetramina (TETA) é um tipo de amina terciária estudada como um potencial absorvente de CO_2 . A solução TETA/etanol pode remover seletivamente o CO_2 de uma corrente de gás contendo outros gases, como nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). Além disso, a solução TETA/etanol pode ser facilmente regenerada por aquecimento, o que permite que o dióxido de carbono (CO_2) capturado seja liberado e reutilizado (PEU, *et al.*, 2023).

O processo de captura de CO_2 usando solução TETA/etanol normalmente envolve a passagem do gás de combustão através dessa solução. Um dos principais desafios na utilização da solução TETA/etanol para captura de CO_2 é o seu custo relativamente elevado. No entanto, a alta seletividade e capacidade de absorção da solução TETA/

etanol pode levar à redução de custos associados à degradação de aminas e a redução das emissões de subprodutos (PEU, *et al.*, 2023).

Os Nanoabsorventes pertencem à tecnologia inovadora e amplamente utilizada em vários sistemas de energia, sendo compostas por nanofluidos e nanoemulsões. A absorção de CO₂, através de nanofluidos, vem se destacando, devido a sua maior capacidade de absorção de CO₂. O conceito de nanofluidos foi definido como materiais de tamanho nanométrico dispersos em material de base solúvel. Diversos nanomateriais (nanobastões, nanofios, nanopartículas e nanofibras) podem ser aplicados para preparar os nanofluidos e óxidos solúveis ou não solúveis em água como óxido de alumínio (Al₂O₃), dióxido de titânio (TiO₂) e dióxido de estanho (SnO₂), podem ser empregados como materiais de base (PEU, *et al.*, 2023).

Já as nanoemulsões caracterizam uma nova classe de materiais, composta por pequenas gotículas de um líquido, suspensas em outro líquido. As pequenas gotículas na nanoemulsão têm uma grande relação entre área superficial e volume, o que lhes permite capturar o CO₂ com uma maior eficiência. Esses materiais são termodinamicamente estáveis e podem permanecer estáveis em uma ampla faixa de temperaturas e pressões. A nanoemulsão mais utilizada como absorvente de CO₂ é a nanoemulsão óleo em água (gotículas de óleo suspensas em água). As gotículas de óleo podem ser formuladas para terem alta capacidade de absorção de CO₂, e a água pode atuar como solvente para o CO₂ (PEU, *et al.*, 2023).

3.2.3 Membrana de separação

A aplicação de membranas na captura de CO₂ é uma abordagem relativamente nova. As membranas formam barreiras semipermeáveis para separar compostos através de vários efeitos de difusão, adsorção, ação de peneira molecular e transporte iônico. Algumas moléculas de gás permeiam a membrana seletiva mais facilmente do que outras (CHAO, *et al.*, 2021).

Com base nos materiais aplicados, a membrana pode ser de natureza diferente e inclui membranas orgânicas (poliméricas), inorgânicas (carbono, zeólitas, cerâmicas) e de matriz mista (CHAO, *et al.*, 2021).

As Membranas orgânicas são feitas a partir de materiais poliméricos, tais como poliacetileno, polianilina, poliamidas, policarbonatos, entre outros. Em comparação com outros materiais, os materiais poliméricos podem ser considerados materiais ideais devido a

características de estabilidade térmica, resistência mecânica e química. Ao controlar o processo de preparação do polímero e a composição química, a permeabilidade e seletividade destas membranas podem ser facilmente ajustadas. Além disso, as membranas poliméricas são uma das melhores opções devido ao seu desenvolvimento tecnológico nas indústrias de biogás e petroquímica (IMTIAZ, *et al.*, 2023).

A maioria das membranas inorgânicas: utilizadas em estudos de investigação centra-se na utilização de materiais microporosos, como carbono e zeólitas, para beneficiar fenômenos de difusão superficial. Assim, as membranas inorgânicas microporosas proporcionam maior seletividade e permeabilidade devido à existência de microporos que melhoram o transporte transmembranar, bem como devido à rigidez da parede dos poros, que melhora a seletividade (PEU, *et al.*, 2023).

As limitações das membranas feitas de materiais poliméricos ou inorgânicos puros impedem sua utilização generalizada em processos de separação de gases. Embora as membranas poliméricas puras apresentem propriedades mecânicas excepcionais, que permitem seu fácil processamento, elas são limitadas pelo efeito de compensação que impede alcançar alta seletividade e permeabilidade. Já as membranas inorgânicas puras apresentam alta seletividade e permeabilidade, mas são espessas e frágeis e, portanto, de difícil utilização em escala real. Assim, tem sido proposta a fabricação de membranas compostas, as membranas mistas, contendo materiais orgânicos e inorgânicos com alta permeabilidade, seletividade e propriedades mecânicas aprimoradas (IMTIAZ, *et al.*, 2023).

São três as principais membranas de matrizes mistas, que podem ser utilizadas na indústria: as de estrutura metal-orgânica (MOFs), as membranas de peneira molecular de carbono (CMS) e as membranas nanocompósitas.

As estruturas metal-orgânicas (MOFs) constituem um novo tipo de materiais porosos, que são construídos a partir de ligantes orgânicos multi ramificados e de íons metálicos. As membranas baseadas em estruturas metal-orgânicas, que, geralmente, possuem espessura de micrômetros, apresentam alta estabilidade mecânica. Entretanto, apresentam baixo desempenho de separação devido às altas resistências à transferência de massa e resultam em baixas permeabilidades. Para lidar com esta desvantagem, foram propostas membranas baseadas em estruturas metal-orgânicas bidimensionais e ultrafinas, com espessura de nanômetros.

A membrana de peneira molecular de carbono (CMS) é um tipo de membrana orgânica usada para separação de gases com base no tamanho e formato das moléculas do gás.

Essas membranas são feitas de material de carbono poroso com uma estrutura de poros bem controlada que permite a separação seletiva de gases. As membranas são feitas de carbono poroso com uma estrutura de poros bem controlada que permite a separação seletiva de gases. As membranas, derivadas de peneira molecular de carbono, têm atraído a atenção para pesquisas, pois apresentam maior estabilidade química, térmica e melhor desempenho de separação de gases em comparação com membranas poliméricas. O poli (álcool furfurílico) é considerado um forte possível precursor para a fabricação de membranas de peneira molecular de carbono de alto desempenho (GKOTSIS, PELEKA, ZOUBOULIS, 2023; IMTIAZ, *et al.*, 2023).

As membranas nanocompósitas são membranas de matriz mista em que o tamanho do material inorgânico incorporado (carga) está em nanoescala. Nanocargas (geralmente entre 1 e 100 nanômetros) apresentam capacidade de peneiramento molecular, boa propriedade mecânica e estabilidade térmica. Nanocargas em membranas de matriz mista são usadas para diminuir a resistência ao transporte de gás e aumentar o espaçamento da cadeia no polímero. Além disso, aumentam a solubilidade do CO₂ em membranas de matriz mista, enquanto a capacidade de peneiração da sua estrutura porosa melhora significativamente a seletividade e a permeabilidade do gás. Exemplos de última geração de novas opções de membrana incluem membranas Polaris™ ultrafinas altamente permeáveis para captura de carbono e membranas de fibra oca (ALLANGAWI, *et al.*, 2023).

A **TABELA 4** apresenta as principais vantagens e considerações para as membranas utilizadas para captura de CO₂.

Tabela 4 - Diferentes tipos de membrana para captura de dióxido de carbono

Membrana	Material	Vantagens	Considerações
Orgânica/polimérica	Emborrachado ou vítreo, em função da temperatura de operação (polissulfona, poliimida, acetato de celulose, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Processos de fabricação e métodos de purificação convenientes • Baixo custo em comparação com membranas inorgânicas • Seletividade apreciável 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de vida curto • Baixa tolerância à degradação química e térmica, em condições severas • Suscetível a incrustações
Inorgânica	Materiais inorgânicos como vidro, sílica, ligas de paládio, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Tolerante a condições ambientais agressivas • Flexível a alta pressão • Estrutura de poros distinta e estável • Tempo de vida longa 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer custo de investimento adicional em equipamento de captura
Matriz mista	Inorgânico/ orgânica (polimérica)	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente desenvolvido • Pode ser facilmente adaptado a unidades existentes 	Nível de CO ² bastante baixo (menos de 15%) Alto consumo de energia

Fonte: adaptado de (IMTIAZ, *et al.*, 2023; VALAPPIL, GHASEM, AL-MARZOUQI, 2021)

4 Custos

O potencial de utilização dessas tecnologias está atrelado aos custos envolvidos nos diferentes processos. Com base nas informações disponíveis na literatura (LOUGHAN, *et al.*, 2023) apresenta-se na TABELA 5 uma análise de custos de produção de MOFs e outros materiais.

Tabela 5 – Análise de custos de MOFs e outros materiais

Adsorvente	Fórmula química	Solvente(s)	Reagente(s)	Custo do reagente (US\$/100g)	Límite de rendimento (%)	Custo do material (US\$/100g)	Condições de regeneração
MIL 120	Al ₄ (OH) ₈ (BTeC)	Base, água	nitrato de alumínio (III) nonahidratado	55,70	22	291,65	regenerável com calor e vácuo pelo menos três vezes
			Ácido benzeno-1,2,4,5-tetracarboxílico (BTeC)	42,60			
MEA 30% em água	MEA	Água	Monoethanolamina (MEA)	11,20	-	11,20	Regenerável a 120°C e >1 bar mas degrada com o tempo
Al-PMOF	Al ₂ (OH) ₂ (H2TCPP)	DMF, acetona, água	cloreto de alumínio (III) hexahidratado	43,70	40	37.609,37	Regenerável ≥10 vezes com 110°C oscilação de temperatura
			tetracarboxifenil porfirina (TCPP)	16.600			
Al-PyrMOF	Al ₂ (OH) ₂ (TBAPy)	Dioxano, ácido, acetona, água	nitrato de alumínio (III) nonahidratado ácido tetrabenzóico pireno (TBAPy)	55,70 13.800	28	43.939,72	Regenerável ≥10 vezes com 90°C oscilação de temperatura
CALF-20	Zn ₂ (TA) ₂ (ox)	Metanol, água	oxalato de zinco hidratado	1.296	70	1.823,38	Regenerável ≥30 vezes com 150°C oscilação de temperatura
			1,2,4-triazol (TA)	86,70			
Co-MOF-74	Co ²⁺ (DOT)	Dimetilformamida (DMF), etanol, água	nitrato cobalto (II) hexahidratado ácido 2,5-dióxido-tereftálico (DOT)	72,60 3.188	76	2.735,34	Regenerabilidade limitada devido ao "envenenamento da água"
SGU-29	Na ₂ [CuSi ₅ O ₁₂]	Água, base, ácido	silicato de sódio (27% v/v)	13,74	não relatado (assumindo 100 para cálculos)	26,33	Regenerável com 250°C oscilação de temperatura por mais de 12h
			sulfato de cobre pentahidratado	43,30			
MIL-91	Ti(OH) (H2PMP) 3H ₂ O	Água, base, ácido	oxiacetilacetato titânio	526	55	35.338,12	Não relatado
			N,N'-piperazinabis (metileno-fosfonato) (PMP)	29.700			
MIL-160	Al(OH) (fdc)	Água, base	acetato de alumínio	19,20	93	4.828,67	Regeneração a 100°C
			ácido 2,5-furanodicarboxílico (fdc)	5.500			
mmen-Mg ₂ (dobpdc)	mmen-Mg ₂ (dobpdc)	Dimetil-formamida (DMF), etanol, hexano	brometo de magnésio hexaidrato	31,12	77	5.831,06	Regenerável ≥6 vezes com 160°C oscilação de temperatura para gases de combustão secos
			N,N'-dimetiletleno-diamina (mmem)	467			
			4,4'-dióxido(1,1'-bifenil)-3,3'-dicarboxilato (dobpdc)	6.545			

Fonte: adaptado de (LOUGHRAN, *et al.*, 2023)

5 Captura de carbono na Indústria

5.1 Pesquisas e implementação

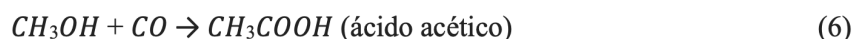
Os sistemas de bioenergia combinados com captura e armazenamento de carbono (BECCS), através do carbono biogênico, podem alcançar um resultado negativo para emissões de gases de efeito estufa. O carbono biogênico é retirado da atmosfera, a partir do crescimento da biomassa, capturado e após sua combustão, armazenado permanentemente em uma formação geológica. A necessidade de promover os sistemas de bioenergia combinados com captura de carbono e armazenamento, tem destaque para o setor sucroenergético no Brasil, no qual é possível produzir etanol combustível a um preço de custo relativamente baixo e com redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa em relação à gasolina fóssil (RESTREPO-VALENCIA, WALTER, 2023).

Um estudo recente avaliou a adoção da captura de carbono em sistemas de bioenergia integrados às usinas canavieiras brasileiras. No estudo, foi realizada a captura do carbono, através de uma unidade de captura à base de aminas, capturando o CO₂ logo após a gaseificação, em caso de pré-combustão, ou dos gases de exaustão da turbina a gás, no caso de pós-combustão. Nas condições analisadas, e comparativamente, a captura de CO₂ na rota de pré-combustão tem menor impacto na venda de eletricidade excedente, e o sistema tem maior eficiência térmica, mas a captura de CO₂ é menor. Os custos estimados de captura estão na faixa de 52-63 €/tCO₂ no caso de pós-combustão, e na faixa de 60-71 €/tCO₂ na pré-combustão. Os investimentos e custos associados à captura, são superiores aos da geração de eletricidade, o que exigem a redefinição de prioridades por parte dos empresários (RESTREPO-VALENCIA, WALTER, 2023).

5.2 Utilidades do dióxido de carbono (CO₂)

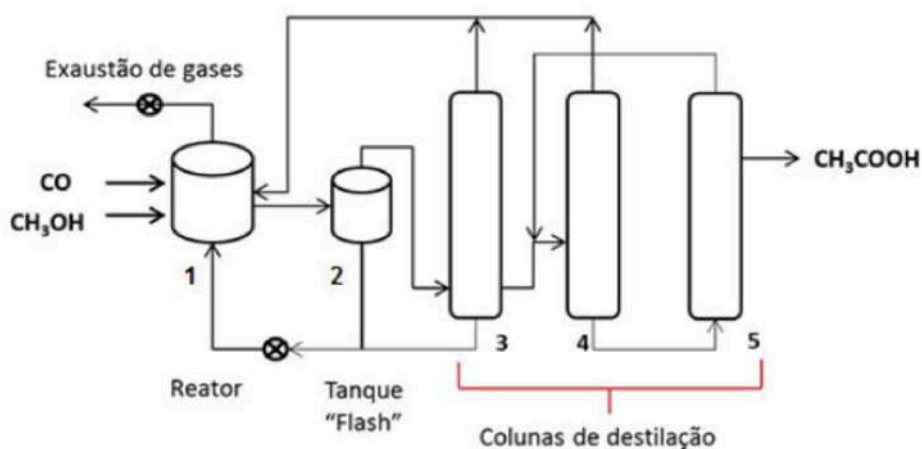
Após sequestro e compressão, o CO₂ capturado possui diversas finalidades dentro de indústrias, como por exemplo a de alimentos, na produção de refrigerantes, e como insumo para produção de ácido acético, posteriormente utilizado na obtenção de solventes ou monômeros de polímeros. O ácido acético, inicialmente destilado do vinagre no século VII, e, a partir de 1914, obtido em escala industrial a partir do acetileno, tem consumo anual de 1,7 milhões de toneladas. A partir dos anos 1970, o Grupo Monsanto® se tornou o maior responsável pela produção da maior parte do ácido acético

mundialmente consumido, através de um ciclo catalítico com o metal ródio e iodeto de metila. O iodeto de metila ataca a carbonila vizinha e induz a oxidação do metal ródio, que é o componente central da reação. Logo, a carbonila toma o lugar do metal central, e ocorre a carbonilação do metanol, cuja reação pode ser resumida a seguir, na Reação 6 (DA SILVA, DUPIM, CHAZIN, 2024).



A sequência de reações descrita acima é complexa e não só resulta em ácido acético, mas também em outros subprodutos. No reator principal (Reator 1 da FIGURA 3), ocorre a carbonilação do metanol e a formação do ácido propiônico, em menor escala em pressões entre 35 e 40 bar. O reator 2 é chamado de flash tank, onde a pressão cai, e são volatilizados os produtos mais leves, inclusive o ácido acético. O catalisador de ródio, pesado, retorna ao tanque 1, e demais seguem para destilação na coluna 3 do processo. Na coluna 4 é removida a água e na coluna 5 é removido o ácido propiônico (DA SILVA, DUPIM, CHAZIN, 2024).

Figura 3 – Diagrama de fluxo do processo da carbonilação do metanol



Fonte: os autores, adaptado de (DA SILVA, DUPIM, CHAZIN, 2024).

6 Conclusões

Muitas abordagens foram desenvolvidas para a captura de CO₂. Estratégias variam desde a utilização de gás oxigênio puro como oxidante para a combustão até a conversão química do CO₂ em produtos de valor agregado, como no exemplo exposto, ou a captura física e posterior armazenamento ou utilização. Embora cada estratégia tenha seu mérito, a implementação viável será, em última medida, regida por uma análise de custo-benefício. Para este fim, as soluções viáveis devem ser baratas, eficientes em relação ao CO₂ regenerado, com perda mínima de processo e quimicamente estáveis (LOUGHRAN, *et al.*, 2023).

Na busca por atingir as metas globais de redução de emissão de carbono, a adsorção de estado sólido por meio de redes organometálicas (MOF na sigla em inglês) tem apresentado resultados promissores com relação aos parâmetros de custo por grama de CO₂ recuperado. Assim, o custo de alguns dos adsorventes de estado sólido (MOFs) de melhor desempenho para seus parâmetros sintéticos de desempenho de absorção do CO₂ foram comparados com as de solução aquosa de monoetanolamina (MEA) a 30%, que é atualmente usada para depuração de CO₂e, portanto, foi adotada como referência.

É importante ressaltar que a validade de cada material como adsorvente de CO₂ não é dirigida apenas pelos custos de produção, mas também pelas condições necessárias para regenerar o material. O Departamento de Energia dos EUA anunciou em 2022 que até o ano 2030, os adsorventes de CO₂ deverão ser capazes de capturar 1.000 kg de CO₂ por apenas US\$ 30,48 (LOUGHRAN, *et al.*, 2023).

O preço do carbono no mercado europeu superou pela primeira vez os € 100 por tonelada – rompendo uma barreira que deve incentivar de fato a adoção de tecnologias verdes emergentes.

Nos últimos três anos, o preço no mercado regulado da União Europeia quintuplicou, em meio ao aperto das regras da região para atingir a meta de se tornar net zero até 2050.

Estimativas levantadas pelo Financial Times mostram que tecnologias como a captura e armazenagem de carbono diretamente na fonte de emissão, consideradas imprescindíveis para descarbonizar indústrias intensivas, hoje custam entre € 90 e € 120 por tonelada.

Este valor, associado à taxa de captura / remoção de CO₂ de cada processo, e ao custo para implementação das tecnologias discutidas neste artigo, podem contribuir para o direcionamento das decisões de investimento e definição de melhor processo a ser implementado.

7 Referências

ALLANGAWI, A. ; ALZAIMOOR, E. F. H. ; SHANAHAH, H. H. ; MOHAMMED, H. A. ; SAQER, H. ; EL-FATTAH, A. A. ; KAMEL, A. H. **Carbon Capture Materials in Post-Combustion: Adsorption and Absorption-Based Processes**. C – Journal of Carbon Research, Volume 9, Issue 1. 2023. <https://doi.org/10.3390/c9010017>.

CHAO, C.; DENG, Y.; DEWIL, R.; BAEYENS, J.; FAN, X. **Post-combustion carbon capture**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 138. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110490>.

DA SILVA, P. A. S.; DUPIM, M. S.; CHAZIN, E. L.; **Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos: Ácido Acético (CAS 64-19-7)**. Revista Virtual de Química, Volume 7, <<http://www.uff.br/rvq>>, Acesso em: 14 maio 2024.

DHOKE, C.; ZAABOUT, A.; CLOETE, S.; AMINI, S. **Review on Reactor Configurations for Adsorption-Based CO₂ Capture**. Industrial & Engineering Chemistry Research, Volume 60, Issue 10. 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04547>.

DZIEJARSKI, B.; SERAFIN, J.; ANDERSSON, K.; KRZYZYNSKA R. **CO₂ capture materials: a review of current trends and future challenges**. Materials Today Sustainability, Volume 24. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100483>.

GKOTSIS, P.; PELEKA, E.; ZOUBOULIS, A. **Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO₂ Capture from Flue Gases: Recent Progress in Commonly Employed Membrane Materials**. Membranes, Volume 13. 2023. <https://doi.org/10.3390/membranes13120898>.

HU, Q.; YANG, X.; HUANG, L.; LI, Y.; HAO, L.; PEI, Q.; PEI, X. **A critical review of breakthrough models with analytical solutions in a fixed-bed column.** Journal of Water Process Engineering, Volume 59. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105065>.

IMTIAZ A.; OTHMAN, M. H. D.; JILANI, A.; KHAN, I. U.; KAMALUDIN, R.; AYUB, M.; DUSTGEER, M. R.; SAMUEL, O.; IFTIKHAR, M.; **Carbon Capture With Inorganic Membranes.** Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-93940-9.00157-2>.

LOUGHRAN, R. P.; HURLEY, T.; GŁADYSIAK, A.; CHIDAMBARAM, A.; KHIVANTSEV, K.; WALTER, E. D.; GRAHAM, T. R.; REARDON, P. ; SZANYI, J.; FAST, D. B.; MILLER, Q. R. S.; PARK, A. A.; STYLIANOU, K. C. **CO₂ capture from wet flue gas using a water-stable and cost-effective metal-organic framework.** Cell Reports Physical Science 4, 101470 July 19, 2023.

MCLAUGHLIN, H.; LITTLEFIELD A. A. ; MENEFEE, M. ; KINZER, A. ; HULL , T. ; SOVACOOOL , B. K. ; BAZILIAN, M. D. ; KIM, J. ; GRIFFITHS, S. **Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 183. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113215>.

MORDOR INTELLIGENCE. **Carbon Capture and Storage Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029).** Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/carbon-capture-and-storage-market>>. Acesso em: 26 abr. 2024.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de ácido acético glacial e análise de ações – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029).** Disponível em <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/glacial-acetic-acid-market>. Acesso em: 26 abr. 2024.

NGUYEN, T. S.; DOGAN, N. A.; LIM, H.; YAVUZ, C. T. **Amine Chemistry of Porous CO₂ Adsorbents.** Accounts of Chemical Research, Volume 56, Issue 19. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00367>.

PEU, S. D.; DAS, A.; HOSSAIN, M. S.; AKANDA, M. A. M.; AKANDA, M. M. H.; RAHMAN, M.; MIAH, M. N.; DAS, B. K. ; ISLAM, A. R. M. T.; SALAH, M. M. **A Comprehensive Review on Recent Advancements in Absorption-Based Post Combustion**

Carbon Capture Technologies to Obtain a Sustainable Energy Sector with Clean Environment. Sustainability, Volume 15. 2023. <https://doi.org/10.3390/su15075827>.

RAGANATI, F.; MICCIO, F.; AMMENDOLA, P.; Adsorption of Carbon Dioxide for Post-combustion Capture: **A Review.** Energy Fuels, Volume 35, Issue 16. 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01618>.

RESET. **Carbono supera barreira de €100/t no mercado europeu, aperto nas regras puxa cotação e incentiva adoção de tecnologias verdes.** Disponível em <https://capitalreset.uol.com.br/carbono/creditos-de-carbono/carbono-supera-barreira-e100-t-no-mercado-europeu/>; Acesso em: 14 maio 2024.

RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. **BECCS opportunities in Brazil: Comparison of pre and post-combustion capture in a typical sugarcane mill.** International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 124. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103859>.

VALAPPIL, R. S. K.; GHASEM, N.; AL-MARZOUQI, M.; **Current and future trends in polymer membrane-based gas separation technology: A comprehensive review.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Volume 98. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.030>.

VITILLO, J. G.; ELISAMAN, M. D.; ARADÓTTIR, E. S. P.; PASSARINI, F.; WANG, T.; SHEEHAN S. W. **The role of carbon capture, utilization, and storage for economic pathways that limit global warming to below 1.5°C.** iScience, Volume 25, Issue 5. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104237>.

10.29327/2152495.8.27-1



Artigo Técnico

Avaliação dos níveis de monóxido de carbono nos emboques dos Túneis Ayrton Senna e Presidente Roosevelt.

Assessment of carbon monoxide levels in the embankments of the Ayrton Senna and Presidente Roosevelt Tunnels.

Tomnila da Costa Lacerda Motta^{ac*}, André Luiz Gonçalves Scabbia^b, Murilo Daniel de Mello Innocentini^c

^a Mestre Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^c Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão do Preto-SP, Brasil.

Palavras-chave: monóxido de carbono, exposição prolongada, emboques, túnel.

Keywords: carbon monoxide, prolonged exposure, entrance of tunnel.

Resumo

A poluição do ar é uma preocupação ambiental. A atmosfera de centros urbanos é caracterizada por uma elevação nos níveis de poluentes. A dispersão dos poluentes atmosféricos é facilitada quando o tráfego de veículos ocorre em ruas abertas. Porém, na cidade de São Paulo, foram priorizadas soluções urbanísticas com o uso do espaço subterrâneo. As normas brasileiras aplicáveis aos túneis visam emergências e os sistemas operacionais previstos nestas normas estão limitados ao interior dos túneis, não havendo protocolos de monitoramento nos emboques. Este artigo apresenta as medições de monóxido de carbono realizadas em dois túneis da cidade de São Paulo, com comprimento maior que 1.000 m, entre os meses de julho e novembro de 2023. Foi possível demonstrar que, os níveis de monóxido de carbono, nos emboques com fluxo de saída de veículos dos túneis da cidade de São Paulo alcançaram níveis de monóxido de carbono de 9 a 177 ppm nos momentos de monitoramento, ultrapassando desta forma, o índice de qualidade do ar classificado como bom pela CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (0 a 9 ppm de CO). Dentro deste contexto, o presente artigo busca alertar que a exposição prolongada ao monóxido de carbono nas proximidades dos emboques dos túneis pode provocar efeitos tóxicos continuados para a população circunvizinha.

Abstract

Air pollution is an environmental concern. The atmosphere of urban centers is characterized by an increase in pollutant levels. The dispersion of air pollutants is facilitated when vehicle traffic occurs on open streets. However, in the city of São Paulo, urban solutions using underground space have been prioritized. The Brazilian standards applicable to tunnels are aimed at emergencies and the operational systems provided for in these standards are limited to the interior of the tunnels, with no monitoring protocols at the junctions. This article presents the carbon monoxide measurements carried out in two tunnels in the city of São Paulo, longer than 1,000 m, between July and November 2023. It was possible to demonstrate that the levels of carbon monoxide at the junctions where vehicles exit the tunnels in the city of São Paulo reached carbon monoxide levels of 9 to 177 ppm at the times of monitoring, thus exceeding the air quality index classified

as good by CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (0 to 9 ppm CO). In this context, this article seeks to warn that prolonged exposure to carbon monoxide in the vicinity of tunnel embankments can cause ongoing toxic effects for the surrounding population.

1 Introdução

A poluição do ar é uma preocupação ambiental, focada em sua essência nas áreas urbanas, onde a crescente expansão através dos setores industriais e de transporte tem conduzido a elevados níveis de poluição do ar. No cenário urbano, o trânsito de veículos automotores é responsável pelo lançamento de substâncias nocivas ao homem na atmosfera, em função do processo de queima dos combustíveis fósseis, atuando de forma direta ou indireta sobre a saúde das pessoas próximas à sua emissão. Na emissão de poluentes destacam-se o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados, os óxidos de nitrogênio (NOx) e os óxidos de enxofre (SOx).

Como contraponto, no espaço urbano buscam-se soluções urbanísticas que proporcionem o equilíbrio econômico, social e ecológico. Neste sentido, o uso do espaço subterrâneo, através de túneis, tem um papel importante a desempenhar, ou seja, no alcance de um desenvolvimento ambiental amigável ou na redução da poluição do ar.

No tráfego de veículos em ruas abertas, a dispersão dos poluentes atmosféricos é facilitada, principalmente quando predominam condições de instabilidade atmosférica. Nos túneis, registra-se uma acumulação progressiva dos poluentes provenientes dos veículos no seu interior, desde a entrada até a saída dos veículos.

Os condutores que atravessam um túnel urbano podem estar sujeitos a elevadas concentrações de poluentes durante um curto período. Por outro lado, a população que reside ou trabalha nas imediações dos portais poderá estar exposta, a longo prazo, a valores prejudiciais à sua saúde. (OLIVEIRA, 2020).

Em túneis urbanos, acumula-se uma grande quantidade de poluição do tráfego de veículos, que é removida pela diferença de pressão entre o efeito dos veículos em movimento e o sistema de ventilação do túnel. No Brasil, os sistemas operacionais

para túneis foram inicialmente descritos pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, a partir das normas NBR 5.181:1976 - Sistemas de iluminação de túneis e da norma NBR 15.661:2009 – Proteção contra incêndio em túneis, sendo que a segunda especifica os requisitos de segurança para prevenção e proteção contra incêndio em túneis destinados ao transporte de passageiros e/ou cargas. As disposições estabelecidas nesta norma, não se aplicam às instalações, equipamentos ou estruturas existentes ou cuja construção ou implantação tenha sido aprovada antes da data em que a norma entrou em vigor.

Em julho de 2021, a ABNT publicou a norma NBR 16.980 - Proteção contra incêndio – Túneis urbanos existentes – Requisitos de revitalização, que estabelece os requisitos de segurança contra incêndio para túneis urbanos existentes, visando à sua revitalização e atendendo às condições necessárias para a implantação dos sistemas de segurança utilizados atualmente em túneis urbanos.

Em termos práticos, as normas brasileiras têm, como foco, a operação do túnel, como atividade fim da estrutura construída, considerando que os túneis têm problemas particulares em emergências e os sistemas operacionais, previstos nestas normas, estão limitados ao interior dos túneis. As normas brasileiras não estabelecem um protocolo de monitoramento dos níveis de poluição atmosférica proveniente no emboque do túnel.

Desde a década de 1940, os resultados na literatura internacional veem aumento da incidência de doenças pulmonares crônicas em pessoas expostas continuamente a pequenas concentrações de contaminantes. A morbidade e a mortalidade dessas enfermidades são maiores em ambientes de maior contaminação do ar e atinge, invariavelmente de maneira mais acentuada, a população infantil e idosa. (OMS, 2006).

Além de provocarem efeitos na saúde da população, os problemas causados pela poluição do ar também geram impactos negativos no que se refere à perspectiva econômica e social. Aumento de custos dos sistemas de saúde e maior vulnerabilidade das populações carentes podem ser vistos como exemplos de problemas causados pela contaminação do ar. (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014)

O monóxido de carbono inibe a capacidade do sangue em trocar oxigênio com os tecidos vitais e, em concentrações extremas, provoca morte por envenenamento. Afeta principalmente o sistema cardiovascular e o sistema nervoso. Concentrações mais baixas são suscetíveis de gerar problemas cardiovasculares, principalmente

em pacientes cardiopatas. Concentrações elevadas são susceptíveis de provocar tonturas, dores de cabeça e fadiga. (COELHO, 2007).

Nessa condição, torna-se importante determinar a concentração de monóxido de carbono proveniente do tráfego de veículos no emboque dos túneis, com recurso de ferramentas de medição, que possam alertar a população circunvizinha.

2 Procedimento metodológico

Realizou-se a medição da concentração de monóxido de carbono nos emboques dos 2 túneis da cidade de São Paulo com comprimento superior a 1.000 m, utilizando o equipamento AKROM KR1000. Os túneis com comprimento superior a 1.000 m selecionados foram os Túneis do Complexo Ayrton Senna (1.950 e 1.700 m) e o Túnel Presidente Roosevelt (1.120 m).

As leituras foram realizadas em 3 posições: a primeira cinco metros antes do limite da projeção do túnel (P1), a segunda no limite da projeção do túnel (P2), a terceira cinco metros após o limite da projeção do túnel (P3). Para convenção das leituras, foram adotadas as siglas P1, P2 e P3, respectivamente.

2.1 Complexo Viário Ayrton Senna

O Complexo Viário Ayrton Senna é composto por duas galerias: i) Túnel Ayrton Senna I, sentido único para o bairro, com duas faixas de rolamento, faz a ligação entre as Avenidas Vinte e Três de Maio e Antônio Joaquim de Moura Andrade; ii) Túnel Ayrton Senna II, sentido único para o centro, com duas faixas de rolamento, liga a Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade à Rua Sena Madureira/Avenida Professor Ascendino Reis. Os túneis possuem sistema de ventilação transversal e estão localizados no distrito do Itaim Bibi, que possui densidade demográfica de 9.351 hab./km².

Segundo dados da CET (Companhia de Engenharia de Tráfego), a Avenida Vinte e Três de Maio, no trecho do Viaduto Tutóia é a via mais carregada da cidade de

São Paulo na hora de pico da manhã, com 10.199 veículos e na hora de pico da tarde, com 8.844 veículos.

Os túneis possuem 4 emboques, conforme ilustra a **FIGURA 1**: Túnel Ayrton Senna I – Emboque 1B – fluxo de saída de veículos pela Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade; Emboque 2 – fluxo de entrada de veículos pela Avenida 23 de Maio; Túnel Ayrton Senna II – Emboque 1A – fluxo de entrada de veículos pela Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade; Emboque 3 – fluxo de saída de veículos pela Avenida Professor Ascendino Reis.

Figura 1 – Localização dos Emboques dos Túneis do Complexo Ayrton Senna



Fonte: Google Earth, (2024)

2.2 Túnel Presidente Roosevelt

O túnel Presidente Roosevelt está localizado no distrito de República, com densidade demográfica de 26.715hab./km². Ele é desprovido de sistema de ventilação e o seu gabarito vertical tem 4,40 m.

O túnel tem tráfego intenso, considerando que é a via da cidade de São Paulo que conecta a Radial Leste ao Elevado Presidente João Goulart (Minhocão), ou seja, sendo uma das conexões que formam o Corredor Leste-Oeste. Dados da CET (Companhia de Engenharia de Tráfego), para esta região apontam que, na hora de pico da manhã há um fluxo de 8.817 veículos e na hora de pico da tarde 8.637 veículos.

O túnel possui 4 emboques, conforme ilustra a **FIGURA 2**, sendo: Emboque 1 – provido de 2 faixas de rolamento, com sentido unidirecional de veículos, com acesso à passagem subterrânea pela Rua da Consolação; Emboque 2 – provido de 8 faixas de rolamento, sendo: 4 faixas com sentido bidirecional de veículos, como acesso à Rua Amaral Gurgel; 4 faixas com sentido bidirecional de veículos, com acesso ao Elevado João Goulart (Minhocão); Emboque 3 – provido de 8 faixas de rolamento, com sentido bidirecional de veículos, como acesso à Radial Leste; Emboque 4 – provido de 3 faixas de rolamento, com sentido unidirecional para saída de veículos e acesso à Praça Presidente Roosevelt.

Figura 2 – Localização dos Emboques do Túnel Presidente Roosevelt



Fonte: Google Earth, (2024)

3 Resultados e discussão

3.1 Complexo Viário Ayrton Senna

Os emboques 1A e 2 representam o fluxo de entrada de veículos, não registrando a presença de monóxido de carbono nas leituras. Os emboques 1B e 3 representam o fluxo de saída de veículos. O emboque 1B não possui retenção semafórica próxima, porém, representa o fluxo de veículos proveniente da Avenida Vinte e Três de Maio, ou seja, a via mais carregada da cidade de São Paulo na hora de pico da manhã e da tarde.

Foram realizadas 7 leituras de concentração de monóxido de carbono nos Túneis do Complexo Viário Ayrton Senna, em cada um dos emboques: 1 leitura em agosto/2023, 2 leituras em setembro/2023, 1 em outubro/2023 e 3 leituras em novembro/2023 e os resultados obtidos são mostrados nas **TABELA 1**.

Tabela 1 - Concentrações de monóxido de carbono no Túnel Ayrton Senna

Dia/Mês/Ano	Emboque 1B			Emboque 3		
	P1 (ppm)	P2 (ppm)	P3 (ppm)	P1 (ppm)	P2 (ppm)	P3 (ppm)
22/08/2023	6	6	3	3	2	0
16/09/2023	6	6	3	0	0	0
29/09/2023	6	6	3	3	2	0
02/10/2023	6	6	3	2	0	0
15/11/2023	6	6	3	0	0	0
17/11/2023	3	0	0	2	0	0

Fonte: elaborado pelos autores

3.2 Túnel Presidente Roosevelt

O túnel Presidente Roosevelt possui tráfego em dois sentidos, configurado em galeria única. Com esta configuração, a exaustão e ventilação são prejudicadas, pois há a recirculação do movimento do ar em função do sentido do tráfego dos veículos.

Foram realizadas 10 leituras de concentração de monóxido de carbono no túnel Presidente Roosevelt: 1 leitura no mês de julho, 3 leituras em agosto/2023, 2 leituras em setembro/2023, 1 em outubro/2023 e 3 leituras em novembro/2023, os resultados obtidos foram registrados na **TABELA 2**.

Tabela 2 – Concentrações de monóxido de carbono no Túnel Presidente Roosevelt

Dia/Mês/Ano	Emboque 2			Emboque 3			Emboque 4		
	P1 (ppm)	P2 (ppm)	P3 (ppm)	P1 (ppm)	P2 (ppm)	P3 (ppm)	P1 (ppm)	P2 (ppm)	P3 (ppm)
29/07/2023	-	-	-	8	8	8	177	177	171
10/08/2023	5	4	3	8	8	6	-	-	-
15/08/2023	6	4	3	8	7	5	-	-	-
22/08/2023	8	4	4	9	4	2	135	122	90
16/09/2023	8	4	3	9	6	5	168	150	145
29/09/2023	7	4	2	8	7	6	135	122	90
02/10/2023	5	2	0	8	9	7	90	87	82
15/11/2023	0	0	0	0	0	0	8	8	0
17/11/2023	2	0	0	0	0	0	16	16	6

Fonte: elaborado pelos autores

O Elevado Presidente João Goulart tem funcionamento restrito, de segunda a sexta, das 7:00 às 20:00. O que redireciona o fluxo de saída de veículos pelo acesso pela Praça Roosevelt, ou seja, pelo Emboque 4.

No dia 29/07/2023 não foram realizadas leituras no Emboque 2, pois o fluxo de veículos havia sido interditado na saída para o Elevado João Goulart. Da mesma forma, não foram realizadas leituras nos dias 10/08/2023 e 15/08/2023 no Emboque 4, pois o fluxo de veículos havia sido interrompido para manutenção da via. A ausência de leituras não prejudicou as análises realizadas. A ausência de leituras apenas registra as manobras de trânsito realizadas pela CET (Companhia de Engenharia de Tráfego).

Observa-se em campo que a condição topográfica do túnel desfavorece a dispersão de poluente, pois denota-se um desnível do túnel em relação ao entorno. O túnel encontra-se numa cota inferior ao sistema viário adjacente. Um semáforo está localizado

a menos de 300 m do emboque 4 do túnel Presidente Roosevelt, o que provoca uma retenção veicular e conseqüentemente os maiores valores de monóxido de carbono do túnel, conforme ilustra a FIGURA 3

Figura 3 – Emboque 4 do Túnel Presidente Roosevelt



Fonte: elaborado pelos autores

3.3 Discussão

O sistema de monitoramento da CETESB define a qualidade do ar através dos índices de monóxido de carbono, como boa, quando compreendida entre 0 e 9 ppm, como moderada, entre 9 e 11 ppm, como ruim, entre 11 e 13 ppm, como muito ruim, entre 13 e 15 ppm, e como péssima, quando maior que 15 ppm.

Nos momentos de realização das leituras nos Túneis Ayrton Senna, as leituras de monóxido de carbono chegaram ao valor máximo de 6 ppm, no emboque 1B, podendo a qualidade do ar ser classificada como boa, segundo o parâmetro da CETESB.

Nos momentos de realização das leituras no túnel Presidente Roosevelt, as leituras de monóxido de carbono chegaram no valor máximo de 8 ppm, no emboque 2, 9 ppm no emboque 3 e 177 ppm no emboque 4.

Seguindo a norma OSHAS 18001, o teor de monóxido de carbono da atmosfera em uma sala, edifício, veículo, vagão ou qualquer espaço fechado deve ser mantido a não mais de 50 partes por milhão (ppm) (0,0039%) como um nível de exposição média

de oito horas. Esta norma estabelece que empregados devem ser removidos a partir do espaço fechado, se a concentração de monóxido de carbono exceder um limite máximo de 100 ppm (0,01%).

4 Conclusão

Este trabalho realizou medições de monóxido de carbono nos emboques de 2 túneis com mais de 1.000 m de comprimento, localizados na cidade de São Paulo, através das leituras realizadas entre julho e novembro de 2023, sendo possível concluir que:

- a) Os túneis que estão numa cota inferior ao sistema viário adjacente denotam a presença de monóxido de carbono nos emboques com fluxo de saída de veículos;
- b) Os emboques que atuam como fluxo entrada de veículos não apresentaram nível detectável de monóxido de carbono nos momentos de realização das medições; e
- c) A presença de retenção semafórica colabora para a presença de monóxido de carbono nos emboque dos túneis, como no caso do emboque 4 do túnel Presidente Roosevelt (2 a 177 ppm).

Como base nas conclusões apresentadas neste trabalho, são apresentadas as seguintes sugestões de melhorias no ambiente urbano próximo aos túneis:

- a) Implantação de sistema de ventilação no túnel Presidente Roosevelt;
- b) Retirada das retenções semafóricas próximas aos emboques de túneis com fluxo de saída de veículos: emboque 4 do túnel Presidente Roosevelt;
- c) Instalação de sensor para medição de monóxido de carbono e outros poluentes em um raio de até 5m do emboque dos túneis: Presidente Roosevelt e Complexo Ayrton Senna;
- d) Compartilhamento de dados dos sensores dos emboques dos túneis com a rede de monitoramento automático da CETESB;

- e) Instalação de painel de mensagem variável próximo ao emboque dos túneis, comunicando a população circunvizinha sobre a qualidade do ar; e
- f) Aplicação de procedimento de retenção de tráfego quando atingidos níveis de alerta.

As normativas do Brasil e de outros países são aplicadas aos túneis na forma de um conjunto mínimo de requisitos de segurança a serem implantados. A compilação do conhecimento aplicado às normas técnicas exige pesquisas de longo prazo, incluindo situações excepcionais, como acidentes ou incêndios. Neste sentido, este trabalho propõe que a aplicação de requisitos mínimos com vistas ao controle e monitoramento ambiental seja incluída nas normas técnicas.

5 Agradecimentos

Homenagem especial ao Prof. Dr. André Luiz Gonçalves Scabbia, que infelizmente veio a falecer antes da submissão de deste artigo.

6 Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Proteção contra incêndio – Túneis urbanos existentes – Requisitos de revitalização. NBR 16.980, Rio de Janeiro, 2021.

_____. Sistemas de iluminação de túneis. NBR 5.181, Rio de Janeiro, 2013

_____. Proteção contra incêndio em túneis. NBR 15.661, Rio de Janeiro, 2009.

_____. Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Ensaios, comissionamento e inspeções. NBR 15.775, Rio de Janeiro, 2009.

_____. Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Sistemas de sinalização e de comunicação de emergência em túneis. NBR 15.981, Rio de Janeiro, 2019.

_____. Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos. NBR 17.240, Rio de Janeiro, 2010.

_____. Sistemas de sinalização de emergência – Projeto, requisitos e métodos de ensaios. NBR 16.820, Rio de Janeiro, 2022.

_____. Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos – Operação de emergência em túneis rodoviários e urbanos – Requisitos. NBR 16.736, Rio de Janeiro, 2004.

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego. **Mobilidade no Sistema Viário Principal – Volumes e Velocidades**, 2020

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2020

_____. **Boletim mensal da qualidade do ar para o Estado de São Paulo**. Ano 3, Número 8, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2022

_____. **Classificação expedita da representatividade espacial das estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB no Estado de São Paulo.** Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2016

COELHO, S. Z. S. M. **Uma análise estatística com vistas a previsibilidade de internações por doenças respiratórias em função de condições meteorológicas na cidade de São Paulo.** 2007. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

Instituto De Energia e Meio Ambiente. **1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil.** 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 20 ago. 2023

OLIVEIRA, Daniela Maria da Costa Santos. **Estudo da poluição do ar na envolvente de um túnel rodoviário.** 2020. 85 f. Tese (Doutorado) – Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020.

OMS – ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD. **Las directrices sobre la calidad del aire en la protección de la salud pública: actualización mundial.** Nota descriptiva, nº 313, outubro de 2006.

OSHA, Occupational Safety and Health Administration. **NIOSH recommendations to CO₂, VOCs and MP.** Disponível em: <https://www.osha.gov/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

10.29327/2152495.8.27-2



Artigo Técnico

^a Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, São Paulo-SP, Brasil.

^b Docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, São Paulo-SP, Brasil.

^c Pesquisador do Laboratório de Materiais para Produtos de Construção - LMPC, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, São Paulo-SP, Brasil.

^d Pesquisadora do Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos - LTDC, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, São Paulo-SP, Brasil.

^e Consultor da LITHOTEC - Consultoria em Granitos e Mármore.

*e-mail: viniciusalface94@gmail.com

Avaliação comparativa de dados de ensaios de resistência à abrasão aplicados em rochas ornamentais em granitos e mármore.

Comparative evaluation of data from abrasion resistance tests applied to granite and marble ornamental rocks.

Vinicius Santiago Alface^{a*}, Valdecir Angelo Quarcioni^{b,c}, Cristina Kanaciro^d, Eleno de Paula Rodrigues^e

Palavras-chave: Ensaio tecnológico; Granito; Mármore; Resistência à abrasão; Rocha ornamental.

Keywords: *Technological test; Granite; Marble; Abrasion resistance; Ornamental rock.*

Resumo

A normativa brasileira de rochas ornamentais apresenta deficiências na sua abrangência e abordagem, em particular em relação ao parâmetro resistência à abrasão. Verifica-se carência de normas técnicas nacionais específicas de abrasão para rochas ornamentais. Este estudo experimental envolveu dois diferentes ensaios de resistência à abrasão, aplicando-se em granitos e em mármore de cinco distintas tonalidades. Esses ensaios originalmente foram desenvolvidos e/ou aplicados nas áreas de concreto e cerâmicas, embora sendo empregados pelo mercado de rochas ornamentais. Os ensaios realizados demonstraram diferenças significativas na resistência à abrasão entre os mármore e granitos analisados, com os granitos apresentando, em média, maior resistência ao desgaste em ambos os métodos avaliados. Essas diferenças foram particularmente evidentes nos dados de volume removido e redução de espessura, confirmando a superioridade dos granitos em aplicações que demandam maior durabilidade. Os resultados também evidenciaram que, embora os métodos AMSLER e de abrasão profunda apresentem algumas limitações em relação à comparação direta, suas medidas são complementares para caracterizar a resistência ao desgaste de rochas ornamentais.

Abstract

The Brazilian normative for ornamental rocks has deficiencies in its scope and approach, particularly regarding the abrasion resistance parameter. There is a lack of specific national technical standards for the abrasion resistance of ornamental rocks. This experimental study involved two different abrasion resistance tests applied to granite and marble in five distinct color variations. These tests were originally developed and/or applied in the concrete and ceramic fields, although they are currently employed in the ornamental rock market. The tests revealed significant differences in abrasion resistance between the analyzed marbles and granites, with granites generally exhibiting greater resistance to wear in both evaluated methods. These differences were particularly notable in the values of material volume removed and thickness reduction, confirming the superior durability of granites in demanding applications. The results also showed that, although the AMSLER and deep abrasion methods have some limitations for direct comparison, their measures are complementary for characterizing the wear resistance of ornamental rocks.

1 Introdução

Devido ao aumento da utilização de rochas ornamentais na construção civil e das exigências do mercado consumidor, visando a segurança e a durabilidade dos materiais utilizados, verifica-se o crescimento da necessidade de se caracterizar adequadamente as propriedades tecnológicas das rochas para o revestimento das edificações (SOSSAI, 2006). Uma das propriedades importantes da utilização de rochas ornamentais é a resistência a abrasão, que está ligada ao desgaste abrasivo (QUITETE, 2002). A abrasão é uma propriedade determinada principalmente quando a rocha é utilizada como revestimento de piso.

Pode-se notar, assim, uma alta demanda na construção civil por revestimentos com elevada vida útil e baixa manutenção. Desse modo, é importante estabelecer orientações comparativas entre diferentes ensaios de resistência à abrasão em rochas, visando fornecer melhores informações de resistência ao desgaste para a adequada especificação do material.

O ensaio mais utilizado para avaliar o desgaste de rochas ornamentais é o ensaio AMSLER (ABNT NBR 12042), que mede a redução da espessura da camada superficial da amostra após a realização do ensaio. Esse método pode ser comparado ao ensaio de abrasão profunda (ABNT NBR ISO 10545-6), que é menos conhecido no mercado de rochas ornamentais. Ambos os ensaios permitem que os resultados sejam expressos em termos de volume de material removido, proporcionando uma base comum para análise comparativa.

Assim sendo, será possível fornecer orientações comparativas com dados de dois ensaios de resistência à abrasão aplicados em rochas, como subsídio aos especificadores de rochas para o mercado, e pela disponibilização de opções desses ensaios tecnológicos para o desgaste de rochas.

Segundo Chiodi e Rodrigues (2009), a especificação de duas rochas de resistência à abrasão distintas para pisos de alto tráfego é um erro grave, pois as rochas sofrerão desgastes de maneira diferente ao longo de sua vida útil, prejudicando a estética e a funcionalidade do local. Outro exemplo de especificação incorreta são os mármore utilizados em degraus de escadas com alto tráfego, pois poderão sofrer o desgaste superficial no centro, já que haverá maior desgaste abrasivo nesta condição, acarretando riscos de graves quedas, devido a diferença de níveis entre as peças de piso.

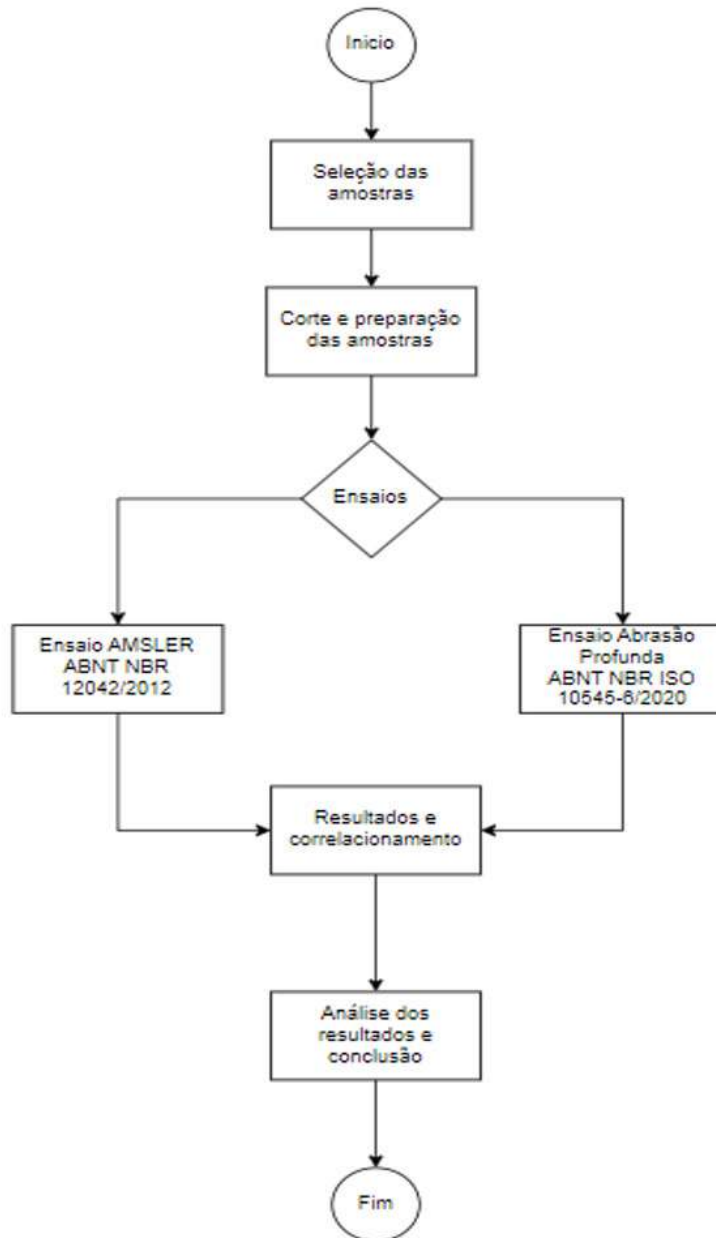
Um exemplo significativo de especificação inadequada de rochas ornamentais pode ser observado nos pisos do saguão de check-in do Aeroporto de Congonhas, um dos maiores do Brasil. Há uma discrepância evidente no comportamento ao desgaste entre as placas de Mármore Branco Espírito Santo e de Granito Preto São Gabriel, materiais com resistência ao desgaste consideravelmente diferentes. Essa disparidade resulta em degradação desigual das superfícies, como formação de desníveis e deformações localizadas no mármore, comprometendo tanto a funcionalidade quanto a segurança do piso. Essa especificação incorreta exige a implementação de um controle de manutenção mais frequente e rigoroso para mitigar riscos de acidentes e preservar a integridade da estrutura.

2 Programa Experimental de estudo

Verificou-se a oportunidade de poder contribuir para ampliar o conhecimento do comportamento de rochas ornamentais, especificamente quanto à abrasão, como suporte ao mercado nacional. Dessa forma, definiu-se um programa específico com aplicação de dois tipos de ensaios nacionais normatizados para avaliar a resistência à abrasão em granitos e mármore. Os ensaios de resistência à abrasão selecionados para este estudo estão relacionados a seguir e ilustrados na figura 1:

- A – Determinação do desgaste por abrasão – ABNT NBR 12042/2012. Este ensaio é também conhecido no meio técnico por Ensaio AMSLER;
- B – Determinação da resistência à abrasão profunda ABNT NBR ISO 10545-6/2017.

Figura 01 - Fluxograma do programa experimental de ensaios de abrasão.



Fonte: autoria própria (2021).

3 Amostras utilizadas no estudo

Para a seleção das amostras de mármore e granitos utilizados na construção civil e adequados a este estudo, foi realizada uma pesquisa de mercado abrangente. Foram conduzidas entrevistas em depósitos fornecedores de chapas de rochas da cidade de São Paulo, consultores especializados em rochas ornamentais e construtoras que frequentemente adquirem esses materiais. O objetivo foi identificar os materiais com maior demanda no mercado, considerando-se as tonalidades de cor mais comercializadas. As amostras selecionadas foram cedidas em chapas polidas pelas principais marmorarias da região de São Paulo, em uma iniciativa de apoio ao desenvolvimento tecnológico do setor de rochas ornamentais, reforçando a colaboração entre os agentes do mercado e a área de pesquisa e desenvolvimento. Dessa forma, foram selecionados os materiais descritos na **TABELA 1**.

Tabela 1 - Rochas ornamentais selecionadas para o estudo.

Rochas selecionadas	Nomenclatura comercial
Mármore Branco	Mármore Branco Espírito Santo (Rajado)
	Mármore Branco Pighês
	Mármore Branco Espírito Santo (P.V)
Granito Branco	Granito Branco Ceará
	Granito Branco Fortaleza
	Granito Branco Alpha
Mármore Preto	Mármore Nero Marquina Espanhol
	Mármore Nero Marquina Chinês
	Mármore Silver Portoro
Granito Preto	Granito Preto Via Láctea
	Granito Preto São Gabriel
	Granito Preto Absoluto
Mármore Cinzas	Mármore Carrara
	Mármore Gris Armani
	Mármore Paraná
Granito Cinzas	Granito Dallas
	Granito Arabesco
	Basalto Cinza
Mármore Beges	Mármore Crema Marfil
	Mármore Travertino Romano
	Mármore Travertino Nacional
Granito Beges	Granito Branco Siena
	Granito Branco Itaúnas
	Granito Aqualux
Mármore Marrons e Vermelhos	Mármore Bronze Armani
	Mármore Marrom Imperial
	Mármore Rosso Verona
Granito Marrons e Vermelhos	Granito Capão Bonito
	Granito Café Imperial
	Granito Marrom Guaíba

Fonte: autoria própria (2021).

Para este estudo, é importante destacar que, devido a questões de mercado, a composição mineralógica dos materiais nem sempre corresponde à nomenclatura comercial utilizada. Apesar disso, prevalece o uso das denominações 'mármore' para rochas carbonáticas e 'granito' para rochas silicáticas, refletindo assim uma prática consolidada no setor.

4 Métodos de determinação da abrasão em rochas

São detalhados e ilustrados, a seguir, os dois métodos de ensaio normalizados que são aplicados em rochas neste estudo.

4.1 Ensaio AMSLER – NBR 12.042/2012

Chiodi e Rodrigues (2009) apontam que existem vários ensaios de resistência à abrasão para rochas ornamentais, porém o mais conhecido e normatizado pela ABNT é o ensaio conhecido como AMSLER, que consiste em dois corpos de prova friccionados em areia quartzosa selecionada, como descrito a seguir.

Segundo a norma ABNT 12.042 (2012), os corpos de prova devem ter a forma de um paralelepípedo regular, com base medindo aproximadamente 70 mm e com altura entre 25 mm e 50 mm. Os dois funis devem ser providos de areia seca nº 50, conforme ABNT NBR 7214, e o aparato deve disponibilizar a regulagem da vazão.

Após o posicionamento das amostras no equipamento AMSLER (Foto 2), deve ser aplicada uma carga de 66N sobre cada amostra. O resultado do ensaio é obtido medindo-se a redução de espessura do corpo de prova (em milímetros), determinada após 500 e 1000 giros da roda de fixação dos corpos-de-prova no equipamento.

Figura 2 - Equipamento AMSLER para determinação do desgaste por abrasão.



Fonte: Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos – LTDC/IPT.

4.2 Ensaio de abrasão profunda – NBR ISO 10.545-6/2020

O ensaio, conforme especifica a ABNT NBR ISO 10.545-6/2020, é realizado em um aparelho denominado abrasímetro (FIGURA 3), o qual é composto por um disco rotativo de aço, uma caixa de armazenagem de material abrasivo, um funil de escoamento para saída do material abrasivo, um suporte para o corpo de prova e um contrapeso.

Figura 3 - Máquina para a determinação do desgaste por abrasão profunda.



Fonte: Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos – LTDC/IPT.

Moreiras e Paraguassú (2012) destacam que esse ensaio foi inicialmente desenvolvido para a determinação da resistência à abrasão profunda de peças cerâmicas não esmaltadas para revestimento de piso, no entanto, atualmente, é utilizado em rochas ornamentais.

Para a realização do ensaio, depois de lavadas e secas, as amostras são posicionadas no equipamento, de forma que o disco rotativo fique na perpendicular. Quando o maquinário é ligado, a velocidade de rotação é de 75 ± 5 rpm, e o abrasivo é ajustado de maneira a $100 \pm 0,05$ g cair uniformemente a cada 100 ± 5 rotações. O ensaio encerra após 150 rotações e a amostra é retirada. O volume do material removido (depressão) é obtido pelas equações 1 e 2.

Após a realização do ensaio, procede-se então a avaliação da amostra e calcula-se o volume correspondente.

O resultado do ensaio é expresso pelo volume de material retirado da amostra e obtido por meio da seguinte expressão:

$$v = \left(\frac{\pi \times \alpha}{180} - \text{sen}\alpha \right) \times \left(\frac{h \times d^2}{8} \right) (\text{mm}^3) \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

$$\text{sen}\alpha = \frac{2 \times C_{\text{cav}}}{d} \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo:

v = volume de material removido, em mm³;

d = diâmetro do disco rotativo, em mm;

h = espessura do disco rotativo, em mm;

α = ângulo correspondente ao centro do disco até a cavidade, em graus;

C_{cav} = comprimento da cavidade, em mm.

Fonte: ABNT NBR ISO 10.545-6/2020

5 Resultados dos ensaios de abrasão

5.1 Resultados do ensaio AMSLER

A TABELA 2, a seguir, refere-se aos resultados obtidos após a realização do ensaio AMSLER. As medidas foram tomadas em dois intervalos distintos, após 500 giros e após 1000 giros do equipamento.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios AMSLER

Amostras de rochas ensaiadas	Desgaste após 500 giros, em mm	Desgaste após 1000 giros, em mm
Basalto Cinza	0,41	0,84
Granito Aqualux	0,37	0,79
Granito Arabesco	0,35	0,79
Granito Branco Alpha	0,33	0,75
Granito Branco Ceará	0,30	0,64
Granito Branco Fortaleza	0,38	0,82
Granito Branco Itaúnas	0,47	0,94
Granito Branco Siena	0,40	0,82
Granito Capão Bonito	0,31	0,65
Granito Dallas	0,40	0,82
Granito Marrom Guaíba	0,52	1,01
Granito Preto Absoluto	0,32	0,78
Granito Preto São Gabriel	0,59	1,45
Granito Via Láctea	0,57	1,26
Mármore Branco ES - PV	4,29	6,84
Mármore Branco ES - RJ	3,56	7,07
Mármore Branco Paraná	1,28	2,62
Mármore Branco Pighês	2,10	4,40
Mármore Carrara	2,75	5,00
Mármore Crema Marfil	1,84	3,74
Mármore Gris Armani	1,35	2,79
Mármore Marrom Imperial	1,43	2,86
Mármore Nero Marquina Chinês	0,91	2,08
Mármore Nero Marquina Espanhol	1,58	3,23
Mármore Rosso Verona	1,22	2,52
Mármore Silver Portoro	1,49	2,94
Mármore Travertino Nacional	0,87	1,75
Mármore Travertino Romano	3,28	7,18
Mármore Bronze Armani	1,26	2,47
Granito Café Imperial	0,69	1,52

Fonte: elaborada pelos autores

As rochas que apresentaram o maior desgaste no ensaio AMSLER foram os mármore, conforme a expectativa preliminar: Mármore Travertino Romano, Mármore Espírito Santo (Rajado) e Mármore Espírito Santo (Pinta Verde). Por sua vez, verifica-se que as rochas que apresentaram o menor desgaste no ensaio AMSLER foram o Granito Branco Ceará, Granito Capão Bonito e Granito Branco Alpha.

Figura 4 – Ensaio AMSLER em execução com amostra de Granito Preto São Gabriel.



Fonte: Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos – LTDC/IPT.

5.2 Resultados do ensaio de Abrasão Profunda

Os resultados apresentados na TABELA 3 são referentes ao ensaio de abrasão profunda, conforme ABNT NBR ISO 10545-6/2017.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de Abrasão Profunda.

Amostras de rochas ensaiadas	Volume removido, em mm ³
Basalto Cinza	96
Granito Aqualux	101
Granito Arabesco	111
Granito Branco Alpha	116
Granito Branco Ceará	97
Granito Branco Fortaleza	103
Granito Branco Itaúnas	113
Granito Branco Siena	132
Granito Capão Bonito	92
Granito Dallas	96
Granito Marrom Guaíba	108
Granito Preto Absoluto	85
Granito Preto São Gabriel	153
Granito Via Láctea	141
Mármore Branco ES - PV	428
Mármore Branco ES - RJ	467
Mármore Branco Paraná	312
Mármore Branco Pighês	473
Mármore Carrara	300
Mármore Crema Marfil	355
Mármore Gris Armani	246
Mármore Marrom Imperial	224
Mármore Nero Marquina Chinês	211
Mármore Nero Marquina Espanhol	279
Mármore Rosso Verona	211
Mármore Silver Portoro	269
Mármore Travertino Nacional	167
Mármore Travertino Romano	297
Mármore Bronze Armani	234
Granito Café Imperial	181

Fonte: elaborada pelos autores

Conforme tabela acima, as rochas em que foram verificados os maiores desgastes no ensaio de abrasão profunda foram: Mármore Branco Pighês, Mármore Branco Espírito Santo (Rajado) e Mármore Branco Espírito Santo (Pinta Verde). As rochas que apresentaram os menores desgastes foram o Granito Preto Absoluto, Granito Capão Bonito e o Basalto Cinza.

Figura 5 – Ensaio de Abrasão Profunda CAP em execução com amostra de Granito Branco Dallas.

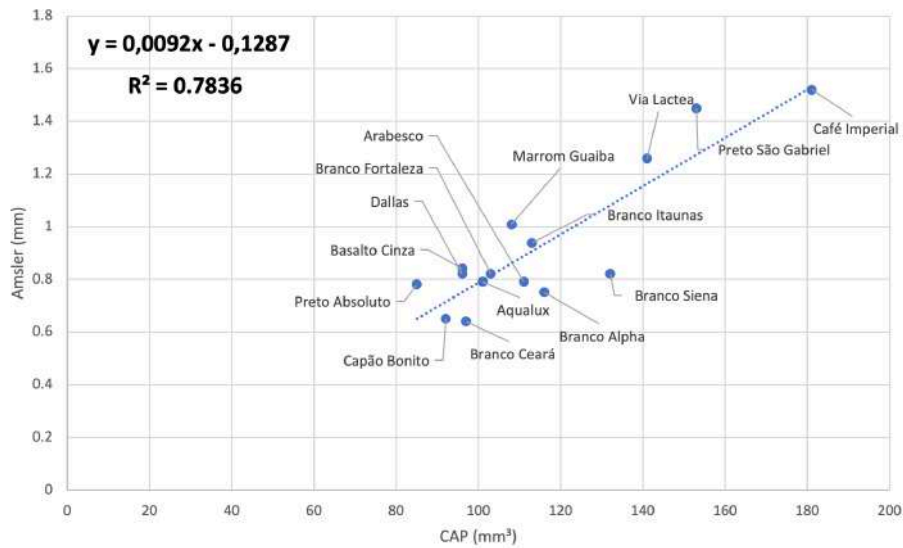


Fonte: Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos – LTDC/IPT.

6 Análise dos ensaios AMSLER e Abrasão Profunda

Os gráficos (Figuras 6 a 8) mostram os resultados do ensaio AMSLER (ABNT NBR 12.042/2012) correlacionados com os do ensaio de Abrasão Profunda (ABNT NBR ISO 10.545-6/2020).

Figura 6 - AMSLER Versus Abrasão Profunda em Granitos.

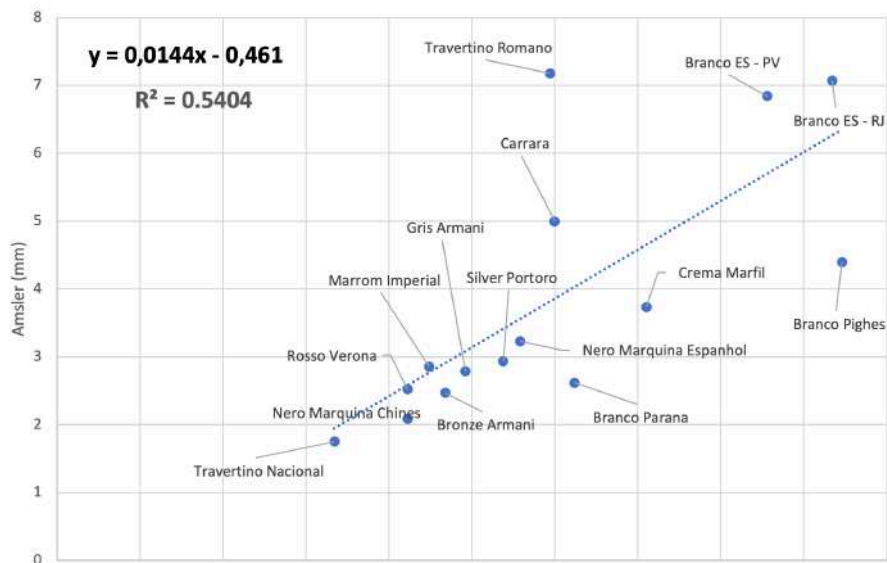


Fonte: autores

Os ensaios AMSLER e Abrasão Profunda para granitos tiveram uma correlação de $R^2 = 0,78$, o que demonstra a boa correlação dos dados obtidos pelos dois métodos. Nesse cruzamento, foi analisado o material retirado da rocha após serem submetidos aos ensaios de abrasão. Assim sendo, os granitos posicionados no quadrante inferior esquerdo são os que obtiveram a melhor resultado de resistência ao desgaste pois tiveram removida a menor quantidade de material.

Na análise realizada, os granitos Capão Bonito, Preto Absoluto, Branco Ceará e Basalto Cinza tiveram maior resistência. Já os Granitos Café Imperial, Preto São Gabriel e Via Láctea foram os que tiveram as menores resistências ao desgaste, uma vez que, em média, obteve-se maiores volumes de material retirado, caracterizando desgastes elevados.

Figura 7 - AMSLER Versus Abrasão Profunda (CAP) em Mármorees.

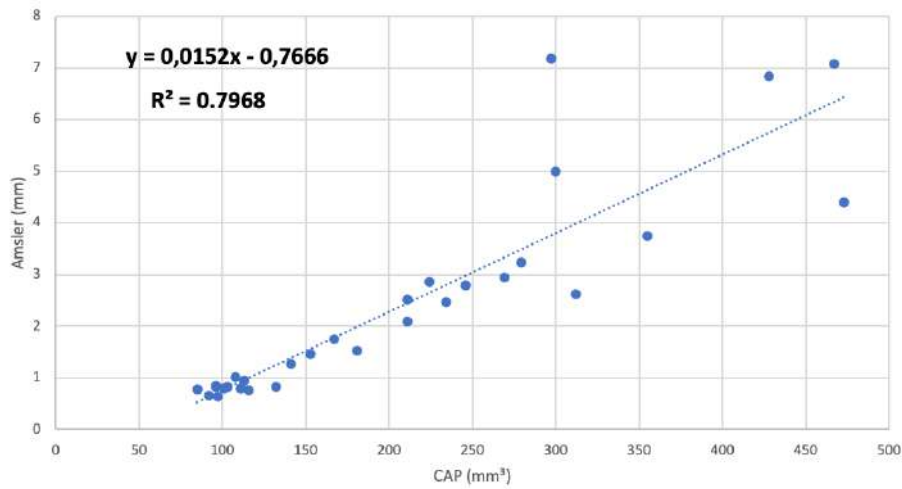


Fonte: autores

Na análise dos mármorees, observa-se uma menor correlação entre os dois ensaios, com um valor de $R^2 = 0,54$. Essa menor correlação, em comparação com a observada nos granitos, pode ser atribuída às amplitudes de grandeza significativamente diferentes dos ensaios AMSLER e de Abrasão Profunda quando aplicados a mármorees, o que pode sugerir maior imprecisão nos resultados. Apesar disso, a correlação obtida é considerada boa, indicando que os dois métodos são complementares para a avaliação da resistência à abrasão.

Com tais considerações em vista, as rochas que apresentaram menor perda de material foram os Mármorees Travertino Nacional, Nero Marquina Chinês e Rosso Verona. Os mármorees que apresentaram maiores perdas de materiais foram o Branco ES – PV, Branco ES – RJ e Branco Pighês, sendo considerados, por isso, menos resistentes.

Figura 8 – Dados gerais de Abrasão Profunda Vs AMSLER em Mármore e Granitos



Fonte: autores

Quando analisados em conjunto, mármore e granito apresentaram correlação mais elevada entre os ensaios AMSLER e de Abrasão Profunda, com um coeficiente de correlação de $R^2 = 0,79$. Essa correlação reforça a complementaridade dos métodos, indicando que os resultados obtidos no ensaio de Abrasão Profunda estão alinhados aos do ensaio AMSLER.

Apesar das diferenças de grandeza entre os dois métodos, especialmente no caso dos mármore, ambos se mostram consistentes para caracterizar a resistência ao desgaste. Além disso, os resultados evidenciaram que os granito, em média, apresentam maior resistência à abrasão, destacando-se como a opção mais durável para aplicações em pisos de alto tráfego ou que demandam maior resistência abrasiva.

Essa análise confirma a viabilidade em se utilizar os dois ensaios como ferramentas complementares para embasar especificações técnicas mais precisas no setor de rochas ornamentais.

7 Considerações finais

A partir dos resultados dos ensaios, ou seja, parâmetros de volume removido e espessuras de desgaste das amostras, e também das correlações obtidas a partir destes dados,

pode-se considerar que os ensaios AMSLER e Abrasão Profunda são correlacionáveis, uma vez que foi obtida uma correlação elevada com $R^2 = 0,79$ para o conjunto total das rochas ensaiadas, mármore e granitos (FIGURA 8).

O presente estudo evidencia a necessidade de desenvolver uma norma técnica específica para avaliar a resistência à abrasão de rochas ornamentais no Brasil. A ampla utilização de rochas em pisos e revestimentos, especialmente em obras de grande porte como aeroportos, shopping centers e edifícios comerciais, demanda parâmetros técnicos claros e adequados para garantir a durabilidade e segurança desses materiais. Atualmente, a falta de uma norma específica obriga o setor a adaptar metodologias originalmente estabelecidas para outros materiais, como concreto e cerâmica, o que pode levar a inconsistências na caracterização e especificação das rochas ornamentais.

Este estudo demonstrou que os dados dos ensaios AMSLER e de Abrasão Profunda apresentam proporcionalidade e complementaridade e, mesmo concebidos originalmente para diferentes materiais, podem servir como base para uma norma técnica nacional. A disponibilização de uma norma técnica dedicada às rochas ornamentais deve proporcionar maior confiabilidade na seleção desses materiais e uma contribuição para o desenvolvimento tecnológico e competitivo do setor.

8 Agradecimentos

Este projeto de pesquisa envolveu um robusto programa experimental nos laboratórios do IPT, cujas estruturas e experiências de atuação com rochas ornamentais, de longa data, foram determinantes para o êxito deste estudo. O nosso reconhecimento à equipe técnica destas áreas do IPT, pela colaboração, compartilhamento da experiência e disponibilização da infraestrutura laboratorial. Neste contexto, os autores registram especiais agradecimentos aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMPC: Nilson de Paula, Vandir Correa dos Santos e Guilherme Pereira Marques; e aos técnicos do Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos – LTDC: Adilson Darico e Fernando Cordeiro dos Santos.

Ao IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, no âmbito do Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia, pelo apoio ao projeto de pesquisa realizado, cuja dissertação é condição necessária para a obtenção do título de Mestre em Habitação.

9 Referências

ABIROCHAS EM NOTÍCIA. Brasília, Df: Abirochas, v. 5, 2016. Disponível em: <https://abirochas.com.br/biblioteca/informes-abirochas/> . Acesso em: 17 dez 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10545-6:** Placas cerâmicas - Parte 6: Determinação da resistência à abrasão profunda para placas não esmaltadas. Rio de Janeiro: Moderna, 2017. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042:** Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro: Moderna, 2012. 5p.

ARTUR, Antônio Carlos *et al.* **Perda de lustro em rochas ornamentais durante abrasão progressiva: principais fatores condicionantes.** n°3, 2002, Recife. Anais. Recife: FAPESP, 2002. p. 1-14. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1430/3/4.pdf>. Acesso em: 17 dez 2024.

BALANÇO DAS EXPORTAÇÕES E IMPORTAÇÕES BRASILEIRAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM 2021. Brasília, Df: Abirochas, 2021. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Informe-01_2022-Exportacoes-2021.pdf. Acesso em: 17 dez 2024.

CHIODI FILHO, Cid., RODRIGUES, Eleno de Paula. **Guia de Aplicação de revestimentos em Rochas.** São Paulo: Abirochas, 2009. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Livro_Guia_de_Aplicacao_de_Rochas_14_04_2019_compressed.pdf . Acesso em: 17 dez 2024.

CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K. **O setor de rochas ornamentais no Brasil. In: Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Cap.10, p.495-527. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1739/1/CCL00180014Cap10LivroRochas.pdf>. Acesso em: 17 dez 2024.

MOREIRAS, Sergio Trajano Franco.; PARAGUASSÚ, Antenor Braga Paraguassú. Viabilidade do uso de placas de granito como lajes em edificações. **Ambiente Construído,** Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 25-36. 2012. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambiente-construido/article/view/24057/23730>. Acesso em: 17 dez 2024.

SOSSAI, Fabiano Jerônimo Moreira. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais.** 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. Disponível em: Microsoft Word - Dissertação Fabiano_Rev final.doc. Acesso em:17 dez 2024.

QUITETE, E.B. **Dureza knoop em rochas para revestimento: metodologia e correlação com desgaste abrasivo.** 2002. 83 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: Dureza knoop em rochas para revestimento: metodologia e correlação com desgaste ... Acesso em:17 dez 2024.

10.29327/2152495.8.27-3



Artigo Técnico

^a Seção de Engenharia de Software e Transportes Inteligentes, Tecnologias Digitais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

Projeto de heliodon automatizado de pequenas dimensões e de baixo custo para uso como ferramenta educacional.

Design of a small-scale, low-cost, automated heliodon to be applied as an educational tool.

Gabriel Borelli Martins^{a*}

Palavras-chave: heliodon; estudos de insolação; geometria solar; conforto térmico.

Keywords: heliodon; solar studies; solar geometry, thermal comfort.

*e-mail: gborelli@ipt.br

Resumo

Estudos de insolação em projetos arquitetônicos são fundamentais sob o aspecto de sustentabilidade. Um estudo adequado permite aproveitar a iluminação natural da melhor forma possível, além de ser importante nas avaliações de conforto térmico, melhorando a eficiência energética do projeto como um todo. Estes estudos envolvem conceitos de geometria solar, que são ensinados nas escolas de Arquitetura e de Engenharia Civil. O ensino de geometria solar é um desafio, já que demanda dos alunos certo nível de abstração, com a compreensão da movimentação aparente do sol para um observador na Terra e de projeções em diagramas solares. Dispositivos como heliodons são ferramentas educacionais úteis, que facilitam o trabalho do docente, bem como a compreensão dos estudantes, principalmente daqueles que estão tendo o primeiro contato com geometria solar. Contudo, nem sempre as escolas de arquitetura e de engenharia dispõem de recursos e do espaço físico necessário para a construção de um laboratório com um heliodon. Neste trabalho é apresentado o projeto de um heliodon alternativo de pequenas dimensões e de baixo custo que pode ser utilizado pelo docente em sala de aula. Ademais, foi desenvolvido um software com interface gráfica para ser integrado ao dispositivo físico. O conjunto é de acesso livre e serve como ferramenta educacional nas disciplinas que envolvem conceitos de geometria solar.

Abstract

Solar studies in architectural projects are essential from a sustainability perspective. An appropriate study allows for the optimal use of daylight and is crucial for thermal comfort evaluations, enhancing the overall energy efficiency of the project. These studies involve concepts of solar geometry, which are taught in schools of Architecture and Civil Engineering. Teaching solar geometry presents a challenge, as it requires students to possess a certain level of abstraction, including an understanding of the apparent movement of the sun, as well as projections in solar diagrams. Devices such as heliodons are valuable educational tools that facilitate the instructor's work and enhance students' comprehension, particularly for those encountering solar geometry for the first time. However, not all architecture and engineering schools have the resources or physical space required to build a laboratory equipped with a heliodon. This paper presents the design of an alternative, small-scale, low-cost

heliodon that can be used by instructors in the classroom. Additionally, software with a graphical interface has been developed to integrate with the physical device. Both the hardware and the software are open-source and serve as educational tools in subjects involving solar geometry concepts.

1 Introdução

O uso de diagramas solares e de ferramentas computacionais de geometria solar em projetos arquitetônicos é uma prática cada vez mais relevante, considerando o adensamento dos centros urbanos e a necessidade de se encontrar soluções que sejam eficientes sob o aspecto energético. A redução do tempo de uso de iluminação artificial, bem como a otimização do tempo de uso de sistemas de ar condicionado e de aquecimento, são fatores importantes na busca por edifícios zero carbono.

Vale ressaltar que o ensino de geometria solar nos cursos de Arquitetura e de Engenharia Civil pode ser bastante desafiador, conforme mencionado por Pajek *et al.* (2018), uma vez que envolve noções do movimento solar aparente para um observador na Terra e sua projeção na forma de diagrama, ou seja, requer certa abstração por parte do estudante. O heliodon é um dispositivo mecânico utilizado para simular a posição solar em determinado horário e posição geográfica com o objetivo de estudar os padrões de sombra formados por modelos reduzidos (CONRADO *et al.*, 2022). Embora existam ferramentas de design mais precisas, o heliodon continua sendo extremamente útil no ensino (PAJEK *et al.*, 2018), sobretudo para os alunos que estão tendo o primeiro contato com geometria solar.

Na literatura são encontrados vários dispositivos de características mecânicas distintas. Fernandes e Cunha (2011) fazem um compilado desses dispositivos, apresentando suas vantagens e desvantagens, em termos de intuição no uso, facilidade de operação, manutenção, fabricação, custo, fixação das maquetes e dimensão.

A dimensão costuma estar diretamente associada à precisão requerida, sendo desejável utilizar modelos em escalas não muito pequenas. Devido à distância entre o sol e a Terra, os raios solares atingem a superfície terrestre aproximadamente paralelos (FERNANDES, GRZYBOWSKI, RIBEIRO, 2013). Para conseguir esse efeito com uma fonte luminosa fixa (lâmpada), pode-se utilizar lentes colimadoras ou limitar

a região ocupada do modelo reduzido, de modo que os efeitos de divergência dos raios estejam dentro do limite tolerável para a aplicação.

Os dispositivos com fonte luminosa fixa têm a vantagem de poder utilizar uma fonte luminosa bastante distante do modelo, reduzindo as distorções geradas pela incidência dos raios luminosos. O próprio sol pode ser utilizado como fonte luminosa, como é o caso do dispositivo portátil desenvolvido pelo MIT, mostrado na **FIGURA 1**. Neste caso, o posicionamento do modelo em relação à fonte luminosa é feito por meio de uma mesa com três graus de liberdade. Embora o dispositivo possa ser mais compacto, do ponto de vista educacional a abordagem adiciona uma camada de abstração, tornando-o menos intuitivo para o estudante.

Figura 1 - Heliodon portátil com fonte luminosa fixa (sol) desenvolvido pelo MIT.



Fonte: Andersen et al. (2007).

Alguns dispositivos apresentam a fonte luminosa presa a uma haste. Podem ser projetados com mesa móvel ou com mesa fixa. No caso de mesas móveis, há a desvantagem de serem pouco intuitivos, a exemplo do heliodon mostrado na **FIGURA 1**. Mais comuns, e com certa variabilidade de design, são os heliodons de arcos. Podem apresentar um arco, múltiplos arcos, mesa móvel, mesa fixa e diversos níveis de automatização. Um exemplo é o heliodon do Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, mostrado na **FIGURA 2**. No geral, são dispositivos que demandam de espaços maiores para instalação e podem apresentar custo elevado, dependendo dos materiais utilizados e do grau de automatização. Contudo, tendem a ser mais intuitivos para os estudantes, sobretudo os de mesa fixa.

Figura 2 - Heliodon de arcos fixos com mesa móvel do Laboratório de Conforto Ambiental da USP.



Fonte: Laboratório de Conforto Ambiental - USP

Neste artigo é proposto um dispositivo de fácil construção, utilizando métodos de manufatura aditiva convencionais, bastante acessíveis nos dias de hoje, tanto para professores quanto para alunos, que possa ser facilmente transportado, automatizado e que, além da indicação física da posição solar, indique ao estudante o diagrama solar correspondente, por meio de um software integrado ao sistema mecânico. Como o objetivo principal é o de atender a uma demanda educacional, especialmente pensando naqueles que estão tendo o primeiro contato com geometria solar, a precisão da sombra gerada não foi um

aspecto primordial de design. Tanto software quanto hardware são abertos e mantidos no repositório do projeto <https://github.com/gborelli89/mini-heliodon> (MARTINS, 2024).

Nas pesquisas que foram realizadas, o autor não encontrou um outro dispositivo intuitivo que aliasse versatilidade, facilidade de manufatura, automatização e integração com um software que mostre o diagrama solar correspondente à posição da fonte luminosa. Peña *et al.* (2020) apresenta o projeto de um equipamento portátil e de baixo custo para uso educacional, que pode vir a ser automatizado, mas sem mostrar resultados de aplicação. Além disso, o software que menciona em seu artigo (não implementado e sem detalhes adicionais) tem como objetivo único a automatização do dispositivo, diferentemente do que é proposto neste trabalho em que, além da automatização, é proposta a projeção simultânea do diagrama solar correspondente, estratégia interessante sob o aspecto educacional.

2 Procedimento metodológico

O projeto foi dividido em três etapas: elaboração do dispositivo mecânico, automação e desenvolvimento de software básico.

2.1 Dispositivo mecânico

Para o projeto do dispositivo mecânico, foram consideradas as diversas possibilidades encontradas na literatura. Neste trabalho foram priorizados: a utilização de um esquema de movimentação intuitivo e de fácil interpretação pelo estudante, a praticidade no transporte, o material e o método de manufatura.

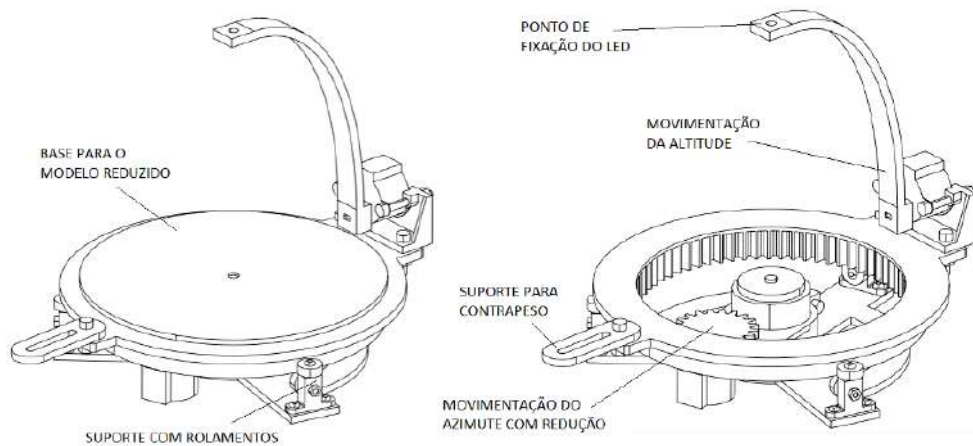
Pensando em aliar o aspecto intuitivo ao desenvolvimento de um dispositivo compacto e de fácil transporte, foi adotado o esquema de uma fonte luminosa presa a uma haste. A altitude pode ser controlada facilmente com a movimentação angular da haste, de modo que a mesa não precise se inclinar, o que dificultaria a interpretação do estudante. Contudo, para que seja possível simular várias latitudes, longitudes, dias e horários, é necessário que o movimento angular da haste seja combinado com a rotação da mesa. Para que o dispositivo permaneça intuitivo e interessante sob o aspecto didático, pode-se marcar os pontos cardeais diretamente na mesa.

Foi utilizada manufatura aditiva com PLA, material comumente empregado nas impressoras 3D de filamento de uso doméstico. Outros materiais comuns, como ABS, podem ser adotados. Nada impede que o projeto seja adaptado para outros métodos de manufatura e materiais, como corte a laser de MDF ou de acrílico. Isso permitiria a construção de dispositivos maiores (desde que haja compatibilização dos motores de passo e drivers) e mais precisos, mas penalizaria a facilidade no transporte e montagem.

A estrutura foi separada em duas partes, uma fixa e uma móvel. A parte móvel fica apoiada sobre rolamentos do tipo 623ZZ. A movimentação do azimute é feita por meio de um motor de passo e de um sistema redutor. Já a movimentação da altitude é feita diretamente por meio de uma haste fixada a um segundo motor de passo, parafusado na parte móvel da estrutura. Trata-se, portanto, de um sistema de dois graus de liberdade, cujo desenho esquemático é mostrado na **FIGURA 3**.

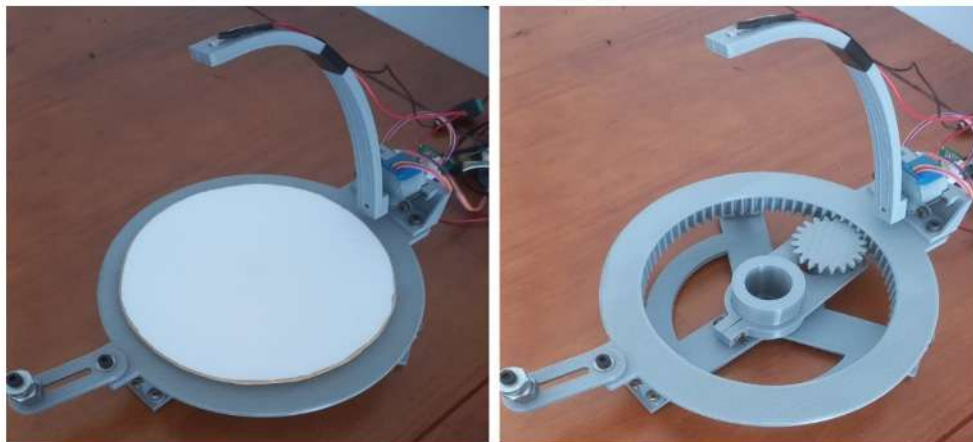
Como a parte móvel da estrutura fica apenas apoiada nos rolamentos, foi necessária a inclusão de um contrapeso, cujo suporte é indicado na **FIGURA 3**, para equilibrar o peso do motor de passo responsável pela movimentação da altitude, com o seu suporte e haste. O sistema mecânico montado, conforme apresentado na **FIGURA 4**, propicia a simulação de qualquer latitude, longitude, dia e horário.

Figura 3 – Representação esquemática do heliodon projetado.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4 - Heliodon montado.

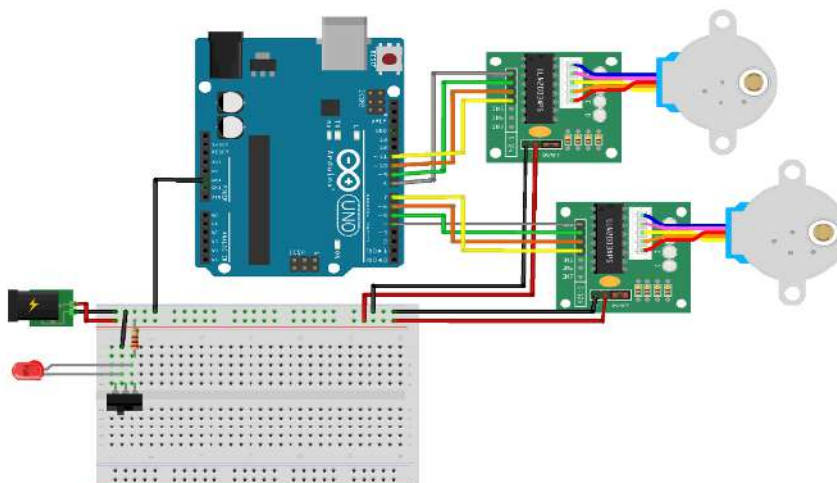


Fonte: elaborado pelo autor.

2.2 Automatização da posição da fonte luminosa e software de controle

Para a automatização do sistema mecânico foi empregado um Arduino Uno para controle dos dois motores de passo simultaneamente, conforme indicado na **FIGURA 5**. O acionamento da fonte luminosa (LED) foi feito mecanicamente, por meio de uma chave liga/desliga. Pequenas mudanças podem ser feitas para que o acionamento seja feito via software. A fonte luminosa deve ser posicionada diretamente na haste fixada ao motor de passo responsável pela movimentação da altitude (vide **FIGURA 3**).

Figura 5 - Esquema eletrônico.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a determinação da posição relativa do sol (posição da fonte luminosa no dispositivo mecânico desenvolvido), foi utilizada a biblioteca Pysolar (STAFFORD et al., 2023). O posicionamento é feito com o acionamento dos dois motores de passo simultaneamente. Foram implementadas três simulações básicas em Python, que são brevemente descritas no **Quadro 1**.

Quadro 1 – Simulações básicas implementadas no software.

Nome do comando	Descrição
<code>onepoint_sim</code>	Simulação de uma posição solar, dada latitude, longitude, data e horário.
<code>oneday_sim</code>	Simulação da posição solar em um dia completo, hora a hora, dada latitude, longitude e data.
<code>month_sim</code>	Simulação da posição solar mês a mês, para a mesma posição geográfica (latitude e longitude), ano, dia e hora.

Fonte: elaborado pelo autor.

As simulações podem ser executadas diretamente por linha de comando, e retornam os valores de altitude e de azimute do sol. Os valores de altitude e de azimute são argumentos da função `move`, que é responsável pela movimentação da fonte luminosa do heliodon. Por se tratar de software aberto, o usuário tem bastante flexibilidade para criar as próprias funções e simulações na linguagem Python. A documentação mostrando como importar as bibliotecas necessárias, conectar o dispositivo e realizar uma simulação simples via linha de comando é dada no repositório do projeto.

Para facilitar o uso da ferramenta por professores e estudantes, foi criada uma interface gráfica (GUI) que projeta o diagrama solar simultaneamente à movimentação da fonte luminosa do heliodon. Neste diagrama, há a possibilidade de plotar linhas auxiliares, como as linhas dos solstícios, dos equinócios, do caminho do sol no dia escolhido (simulação `oneday_sim`) e do caminho do sol durante o ano para o mesmo dia e horário em cada mês (simulação `month_sim`).

2.3 Materiais

A lista básica de materiais para a construção do dispositivo mecânico proposto é apresentada na **TABELA 1**. Na data em que foram comprados, os materiais utilizados para a confecção do projeto somaram, aproximadamente, R\$200,00. Pode haver uma variação significativa neste valor, a depender, principalmente, da data e do local de compra dos componentes eletrônicos. Por esse motivo, os valores não são apresentados individualmente na **TABELA 1**. Cerca de metade dos custos, para um dispositivo com essas dimensões e manufaturado com uma impressora 3D de filamento, está na placa de desenvolvimento (Arduino Uno) e nos motores de passo com drivers e fonte chaveada.

Tabela 1 – Principais materiais necessários para a construção do heliodon.

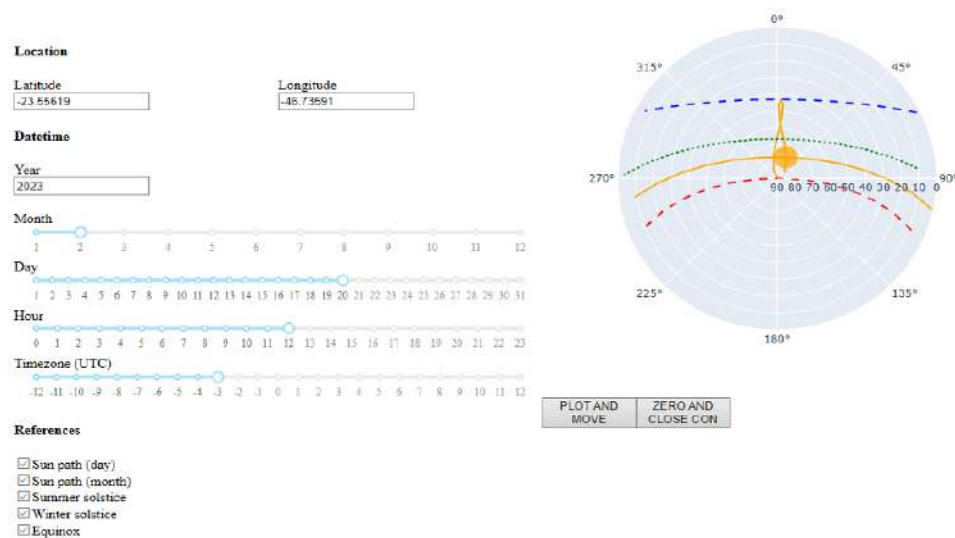
Descrição	Quantidade
Motor de passo 28BYJ-48	2
Driver de motor de passo ULN2003	2
LED branco de alto brilho 5 mm	1
Resistor 100 Ω	1
Chave liga/desliga	1
Fonte chaveada 5 V 1 A e conector	1
Arduino Uno	1
Rolamento 623ZZ	6
Parafuso M4 x 12 mm	2
Parafuso M4 x 20 mm	5
Parafuso M4 x 30 mm	2
Porca M4	9
Arruela M4	13
Parafuso M3 x 10 mm	9
Parafuso M3 x 16 mm	3
Porca M3	12
Chapa revestimento branco \varnothing 150 mm x 3 mm	1
Filamento PLA	Aprox. 150 g

Fonte: elaborado pelo autor.

3 Resultados e discussão

A junção do dispositivo físico com a representação gráfica de diagramas solares é bastante interessante sob o aspecto educacional. A **FIGURA 6** mostra a interface gráfica do software desenvolvido. O diagrama à direita foi gerado considerando as coordenadas geográficas, a data e o horário indicados nos campos à esquerda. O círculo em amarelo corresponde à posição da fonte luminosa. Conforme indicado, podem ser plotadas as seguintes linhas de referência: do solstício de inverno em azul tracejado, do solstício de verão em vermelho tracejado, do equinócio em verde pontilhado, do caminho do sol em amarelo contínuo (exemplo do dia 20/02/2023 e do ano de 2023 para os dias 20 de todos os meses, às 12 horas).

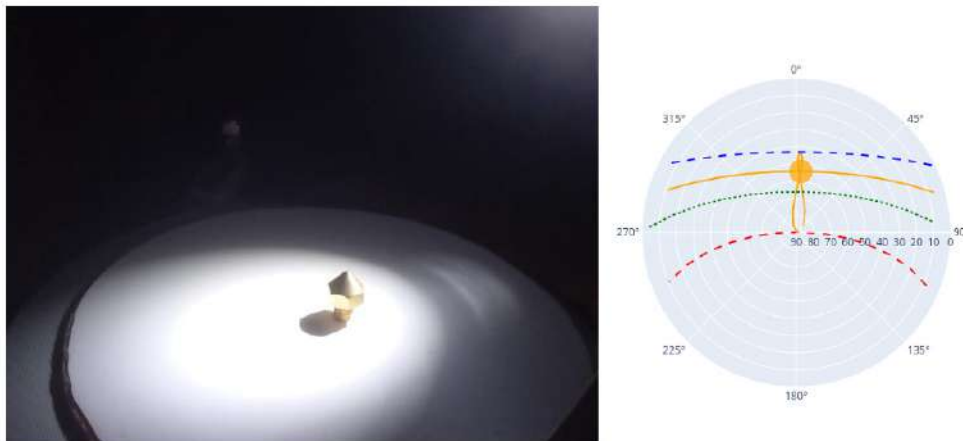
Figura 6 – Exemplo de diagrama solar.



Fonte: elaborado pelo autor.

A **FIGURA 7**, por sua vez, traz um exemplo da integração do software com o dispositivo mecânico construído. À esquerda temos a projeção da sombra de um elemento dourado, posicionado no centro da mesa do heliodon, ao passo que à direita temos o diagrama solar correspondente. Dada a dimensão do heliodon e a sua função educacional, deve-se privilegiar o uso de elementos de geometria simples.

Figura 7 – Sombra de modelo de geometria simples (esq.) com respectivo diagrama solar (dir.).



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme mencionado anteriormente, o dispositivo proposto tem baixo custo, é pequeno e de manufatura simples. Isso permite que professores o utilizem em sala de aula para a realização de experimentos de baixa complexidade, prendendo a atenção do aluno e ajudando com a interpretação das projeções apresentadas nos diagramas solares. Ademais, os estudantes podem construir o dispositivo e explorá-lo por conta própria, fixando ainda mais conceitos fundamentais e desenvolvendo uma série de habilidades adicionais.

Trata-se de um projeto aberto. Nada impede que o design seja melhorado, que as soluções mecânicas apresentadas sejam empregadas como inspiração para o desenvolvimento de dispositivos maiores, que o software seja adaptado para um dispositivo automatizado já existente ou até mesmo utilizado à parte, sem qualquer mecanismo físico de apoio. No caso da manufatura de um dispositivo maior, a flexibilidade do transporte e do uso em sala de aula poderia ser perdida, com um ganho no que diz respeito à precisão das sombras formadas e do tamanho e complexidade dos modelos reduzidos utilizados.

3.1 Melhorias e trabalhos futuros

O projeto é aberto para melhorias, seja do dispositivo mecânico em si, seja do software proposto. Uma possibilidade futura, de simples implementação, é a adoção de sensores de fim de curso para evitar a perda de referência dos motores de passo.

O próximo passo essencial é o de testar o dispositivo em sala de aula. Com isso será possível compreender melhor se o dispositivo de fato facilita o aprendizado e quais são os pontos que precisam ser melhorados.

4 Conclusões

O heliodon desenvolvido foi pensado para ser utilizado como ferramenta educacional nos cursos de Arquitetura e de Engenharia Civil. A manufatura simples e o custo reduzido fazem com que o dispositivo seja acessível a professores e a estudantes de geometria solar. A automação e a interface gráfica, com a apresentação simultânea dos diagramas solares correspondentes ao posicionamento da fonte luminosa no dispositivo mecânico, têm o potencial de facilitar a compreensão e de desenvolver aspectos cognitivos de visão espacial nos estudantes.

Por se tratar de um projeto completamente aberto, o dispositivo permite grande flexibilidade, seja de alteração dos elementos mecânicos, com o objetivo de melhorar o projeto para as necessidades do usuário, seja de implementação de novas simulações. As sugestões de melhorias, bem como novas ferramentas implementadas podem ser submetidas no repositório GitHub do projeto.

5 Referências

ANDERSEN, M. *et al.* **The Heliodome project**: an innovative approach in assessing solar-optical properties of light-redirecting materials in combination with sun course simulations. In: CISBAT 2007 – RENEWABLES IN A CHANGING CLIMATE: INNOVATION IN THE BUILT ENVIRONMENT, 2007.

CONRADO, L. S. *et al.* Review of heliodon developments and computational tools for building shadow analysis. **Buildings**, v.12, n.5, p. 627, 2022.

FERNANDES, L. C.; CUNHA, E. Ensino de geometria solar: Proposta de heliodon alternativo In: XI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011, Búzios.

FERNANDES, L. C.; GRZYBOWSKI, J. M. V.; RIBEIRO, A. A. G. A. Desenvolvimento, execução e teste de simulador de trajetória solar aparente. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e VIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL. Instituto de arquitetura e urbanismo da Universidade de São Paulo. Heliodon. Consulta geral a homepage. Disponível em <<https://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/heliodon-2>> s.d. Acesso em 20 de novembro de 2024.

MARTINS, G. B. Mini-heliodon. **Consulta geral a homepage**. Disponível em <https://github.com/gborelli89/mini-heliodon>. 2024. Acesso em 29 fev. 2024.

PAJEK, L.; POTOČNIK, J.; DOVJAK, M.; BOŽIČEK, D.; ŠUBIC, N.; KUNIČ, R.; KOŠIR, M. Using heliodon for solar building design education in the age of computer simulations. In: EUROSUN 2018 CONFERENCE PROCEEDINGS, 2018.

PEÑA, J. M. *et al.* Design of a portable, low-cost, heliodon prototype for the teaching of solar geometry and irradiance in bioclimatic architecture. **Journal of Physics Conference Series**. IOP Publishing, 2020.

STAFFORD, B. *et al.* Pysolar. **Consulta geral a homepage**. Disponível em <https://github.com/pingswept/pysolar>. Versão. 0.11, 25 jul. 2023. Acesso em 29 fev. 2024.

SZOKOLAY, S. Solar geometry. In: PLEA NOTES: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, University of Queensland, 2ª edição revisada, 2007.

10.29327/2152495.8.27-4



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>



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

