

REPAE

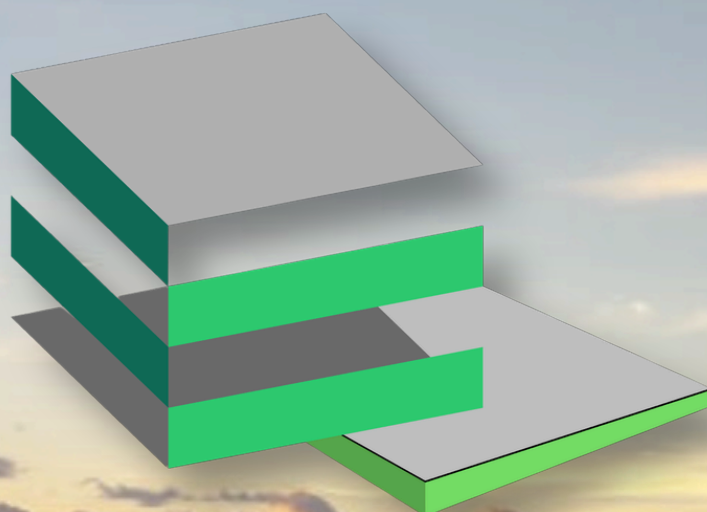
Revista Científica de Pesquisa
Aplicada à Engenharia



UnB



Volume 8, 2025 | ISSN:2595-0002



JPET
Engenharia civil

The background of the cover is a photograph of a modern cable-stayed bridge with large, white, curved arches. The bridge spans a body of water, and a small sailboat is visible in the distance. The sky is blue with scattered white clouds. The image is framed by green geometric shapes in the corners.

REPAE

Revista Científica de Pesquisa
Aplicada à Engenharia

Volume 8

ISSN:2595-0002

EDITORIAL

Por André Luís Brasil Cavalcante

Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília - UnB

Tutor do Programa de Educação Tutorial (PET)

Engenharia Civil – UnB

A Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia (REPAE) chega à edição de 2026 celebrando uma etapa marcante em sua trajetória editorial. No mais recente ciclo de avaliação da CAPES, a revista conquistou a elevação de sua classificação de B4 para B2, um reconhecimento significativo da qualidade, relevância e impacto da produção acadêmica que vem sendo promovida por autores, revisores e equipes editoriais ao longo dos últimos anos. Este avanço não é apenas um número: representa o fortalecimento da REPAE no cenário nacional da pesquisa em engenharia e reafirma sua vocação como veículo de excelência para a ciência aplicada.

Desde sua criação, a REPAE tem buscado consolidar um espaço plural, rigoroso e estimulante para a divulgação de pesquisas que dialogam diretamente com os desafios contemporâneos enfrentados pela engenharia. A adoção de revisão por pares em regime duplo-cego, a atribuição de DOI aos artigos, a diversificação de seu corpo editorial e a expansão de sua visibilidade institucional refletem um compromisso contínuo com as melhores práticas científicas e com a credibilidade acadêmica.

A edição de 2026 reforça a missão da REPAE de fomentar a pesquisa aplicada, promovendo o encontro entre a produção acadêmica e as demandas reais da sociedade. Em tempos de transformações aceleradas — tecnológicas, ambientais e sociais — a engenharia é chamada a responder com soluções criativas, sustentáveis e éticas. A revista se orgulha de ser um espaço onde tais respostas podem ser formuladas, debatidas e compartilhadas, contribuindo diretamente para a formação de profissionais e pesquisadores mais preparados para liderar processos de inovação e desenvolvimento.

Unindo tradição e perspectiva de futuro, a REPAE mantém forte ênfase na formação científica desde os níveis iniciais de trajetória acadêmica. Ao valorizar iniciativas de iniciação científica, trabalhos de conclusão de curso e colaborações interinstitucionais, a revista investe na construção de um ambiente formativo que inspira jovens pesquisadores a se engajarem com rigor e ousadia no processo de criação do conhecimento científico.

O reconhecimento da CAPES, ao elevar a revista à classificação B2, é uma conquista coletiva que celebra a excelência editorial, o engajamento científico e o impacto social da REPAE. Essa conquista pertence a todos que, com dedicação e talento, contribuíram para o crescimento da revista — autores, revisores, editores e instituições parceiras.

A trajetória editorial da REPAE é, antes de tudo, uma história de compromisso: com a qualidade, com a formação humana e técnica, e com a contribuição efetiva para o avanço das engenharias no Brasil e além. Que este reconhecimento seja um incentivo renovado a continuar ampliando horizontes, promovendo debates relevantes e inspirando a próxima geração de pesquisadores.

APRESENTAÇÃO

A Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia (REPAE) representa a concretização de um ideal. Desde o seu surgimento, tem como propósito principal atuar como elo entre os estudantes de graduação e o universo científico e acadêmico. Idealizada no âmbito do Programa de Educação Tutorial do curso de Engenharia Civil da Universidade de Brasília (PET Civil UnB), a revista nasce de um grupo pautado nos pilares do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, em consonância com a atuação universitária.

A REPAE configura-se como um espaço privilegiado para que os alunos divulguem trabalhos e artigos desenvolvidos ao longo da graduação, evidenciando suas competências e capacidades acadêmicas. Ademais, proporciona aos discentes o primeiro contato com as etapas de submissão, avaliação e publicação em periódicos científicos, contribuindo para a formação acadêmica e para a ampliação do alcance das pesquisas realizadas durante a graduação junto à comunidade científica.

Atualmente, a revista contempla sete áreas para submissão de trabalhos: Construção Civil; Ensino na Engenharia; Estruturas; Geotecnia; Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos; Transportes; e BIM e Representação Gráfica. Cada uma dessas áreas constitui uma porta de entrada para o universo da pesquisa, permitindo ao leitor acesso a estudos atuais e relevantes no campo da Engenharia.

Assim, a REPAE consolida-se como um importante meio de atualização e disseminação do conhecimento em Engenharia, além de ser uma vitrine para talentos em formação. Participe e faça parte dessa trajetória!

EXPEDIENTE

CONSELHO EDITORIAL

Editor Chefe

André Luis Brasil Cavalcante

Editor Chefe Fundador

André Pacheco de Assis

EDITORES ASSOCIADOS

Construção Civil

Michele Tereza Marques Carvalho

Estruturas

Francisco Evangelista Júnior

Geotecnia

Juan Félix Rodriguez Rebolledo

Transportes

Fabiana Serra de Arruda

Tecnologia Ambiental e
Recursos Hídricos

Saulo de Tarzo Marques
Bezerra

BIM e Representação
Gráfica

Leonardo da Silveira
Pirillo Inojosa

COMISSÃO PETIANA

Projeto Gráfico, Direção de Arte e Diagramação

Ana Beatriz Mesquita Cezário

Caio Igor Alves Lima

Fernanda de Oliveira Porto

Fernanda Ferreira Barro

Gislaine Mateus Brito Cruz

Maria Clara Melo Ramos

SUMÁRIO

11 SEÇÃO 1 - CONSTRUÇÃO CIVIL

- 12 Emprego de Aditivos Redutores de Retração Plástica e sua Influência nas Propriedades Mecânicas do Concreto

22 SEÇÃO 2 - ENSINO

- 23 Comparação de Estruturas Curriculares em Cursos de Engenharia Civil: Análise dos Projetos Pedagógicos de Curso – PPC entre as Universidades Brasileiras

32 SEÇÃO 3 - ESTRUTURAS

- 33 Desenvolvimento de uma Calculadora para Combinação de Ações em Análise Estrutural

- 40 Estudos Teóricos e Experimentais de Perfis Formados a Frio Tipo Z com Alma Enrijecida por Meio do Método da Resistência Direta: Cortante e Flexão

50 SEÇÃO 4 - GEOTECNIA

- 51 Análise Numérica da Influência Geométrica na Resposta Lateral de Estacas Longas
- 61 Estudo de Linhas de Fluxo em Compósitos Solo-Fibra

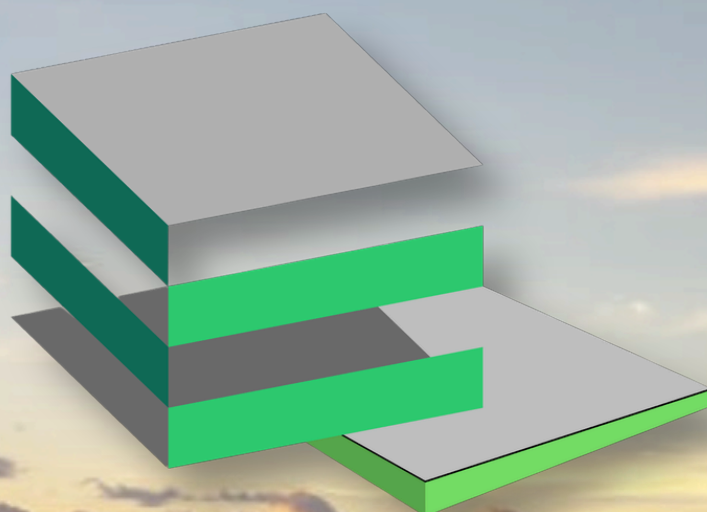
69 Estudo Inicial do Uso do Fruto de Sapindus Saponaria para Estabilização de Areia

77 Modelo Simplificado para Estudo das Propriedades Térmicas de um Solo Argiloso Durante a Exposição ao Fogo Superficial

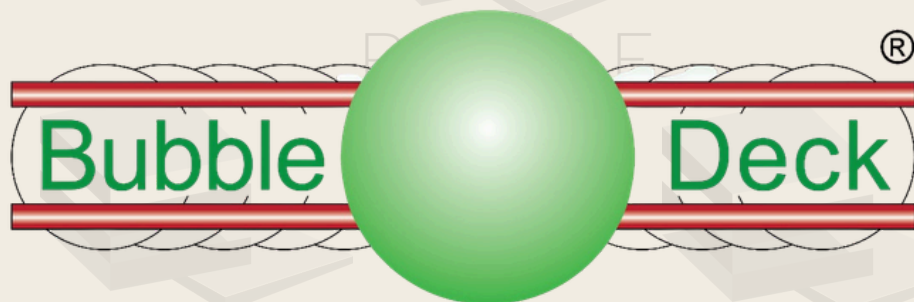
91 **SEÇÃO 4 - TRANSPORTES**

92 Proof of Concept of a Low-cost Tool for Data Collection and Traffic Conflict Identification at Crosswalks

102 **COMISSÃO EDITORIAL**



JPET
Engenharia civil

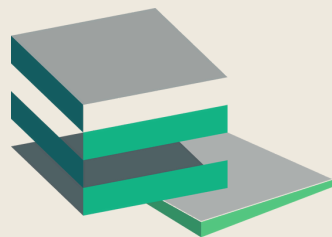


Construindo mais com menos



TECNA

CONSTRUTORA



REPAE

Revista Científica de Pesquisa
Aplicada à Engenharia

Volume 8, 2025 | ISSN:2595-0002

CONSTRUÇÃO CIVIL



Engenharia civil

EMPREGO DE ADITIVOS REDUTORES DE RETRAÇÃO PLÁSTICA E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

João Pedro de Souza Armando^a

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

Mara Monaliza Linhares Pereira^b

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

Arthur Aviz Palma e Silva^c

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

Valdirene Maria Silva Capuzzo^d

Universidade de Brasília/Departamento de Eng. Civil/Brasília/Brasil

RESUMO

O concreto é amplamente usado na construção civil por sua versatilidade, resistência e baixo custo, mas a retração durante o endurecimento pode causar fissuras que comprometem sua durabilidade e resistência final. Este estudo avaliou a influência do aditivo redutor de retração (ARR) e do superplastificante nas propriedades de estado fresco (massa específica, retração plástica e avaliação de superfície) e endurecido (resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade). Foram produzidos três traços – sem aditivos (referência), com ARR e com superplastificante – e os ensaios mostraram que ambos eliminaram a fissuração em comparação ao traço controle, embora o ARR tenha reduzido a resistência à compressão e à tração em todas as idades analisadas. Esses resultados ressaltam a importância de compreender a retração e destacam ARR e superplastificantes como ferramentas essenciais para concretos mais duráveis e resilientes.

PALAVRAS-CHAVE: Retração plástica, aditivo redutor de retração, concreto, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Concrete is widely utilized in civil construction due to its versatility, strength, and cost-effectiveness. However, shrinkage during the hardening process can lead to cracking, thereby compromising its durability and final strength. In this context, the present study aimed to evaluate the behavior of concrete considering the influence of a shrinkage-reducing admixture (SRA) and a superplasticizer on its fresh and hardened properties. Three concrete mixtures were produced: one without additives (reference mix), one with SRA, and one with a superplasticizer. The fresh-state properties and mechanical characteristics of the hardened concrete were assessed. The experimental results demonstrated the clear effectiveness of both the SRA and the superplasticizer in mitigating shrinkage, as evidenced by the absence of cracking compared to the reference mix. However, the inclusion of the SRA was observed to reduce both compressive and tensile strengths at the evaluated ages. In summary, this study not only underscores the importance of understanding and addressing shrinkage in concrete but also highlights the significant contribution of SRAs and superplasticizers as essential tools in the pursuit of more durable and resilient construction materials.

KEYWORDS: Plastic shrinkage, shrinkage-reducing admixture, concrete, mechanical properties.

^a jope.armando@gmail.com ^b maramonaliza19@gmail.com ^c eng.aviz@gmail.com ^d valdirenemaria@unb.br

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção é uma das práticas mais antigas da humanidade, remontando aos tempos pré-históricos, quando as primeiras edificações eram erguidas utilizando materiais naturais, como pedra, argila e madeira. Ao longo dos séculos, avanços técnicos e o aprimoramento de tecnologias possibilitaram a construção de estruturas cada vez mais amplas e sofisticadas.

O concreto é uma dessas tecnologias. Amplamente utilizado no âmbito da construção civil, esse material consiste na mistura de cimento, água, agregados (como areia e brita) e, em alguns casos, aditivos. Esta mistura é moldável em diversas formas antes de endurecer. No entanto, durante o processo de endurecimento, podem ocorrer fissuras nas peças de concreto. Essas fissuras resultam da movimentação da água dentro do material e da exsudação e evaporação, que podem ocorrer de forma isolada ou conjunta (Recena, 2014).

O aparecimento de fissuras, resultado da retração, é influenciado por vários fatores, dentre eles, a velocidade de retração, a rigidez do material e o nível de confinamento da peça (Rato, 2006). O processo de deformação plástica de materiais cimentícios pode ser separado em duas fases bem definidas. Primeiramente, o material se deposita de modo que água do traço tenda a ir para superfície, esse é o assentamento plástico (Shi C., Zhang, Li, Chong, Xie, 2016). Em seguida, a água do processo de exsudação começa a evaporar, criando meniscos de água entre as partículas sólidas causando um acúmulo de pressão capilar, assim, se iniciam os processos de retração plástica (Etxeberria M., Vazquez, Marí, Barra, 2007). Caso esse acúmulo de pressões atinja um nível crítico, ocorre a fissuração da peça.

A fissuração precoce tem altas chances de gerar um impacto permanente nas características mecânicas da estrutura de concreto. Além disso, essas fissuras podem aumentar durante o processo de endurecimento do concreto, permitindo a entrada de agentes agressivos, podendo ocasionar um processo de corrosão da estrutura metálica embutida e degradação precoce do componente estrutural (Bayasi, McIntyre, 2002; Swaddiwudhipong, Lu, Wee, 2003).

O uso de aditivos para o controle da retração em peças de concreto é algo extensivamente retratado na literatura. O aditivo redutor de retração (ARR) é um componente químico adicionado ao concreto para minimizar a quantidade de retração que ocorre à medida que o concreto endurece e seca. Esse aditivo

atua de diversas formas, controlando a evaporação de água, modificando as tensões internas, melhorando a coesão da matriz cimentícia (Melo Neto, Cincotto, Repette, 2007). A maior parte dos ARR's são líquidos orgânicos com base em derivados do glicol (Melo Neto, Cincotto, Repette, 2007). Bentz explica o funcionamento dos ARR's, em resumo, os aditivos redutores de retração reduzem a tensão superficial e alteram a viscosidade da água presente nos poros do concreto, isso incorre na redução da pressão capilar e, consequentemente, da retração plástica, influenciada por esse fator (Bentz, 2005; Bentz, 2006).

Além dos ARR's, outro aditivo importante é o superplastificante, que é adicionado ao concreto para melhorar a trabalhabilidade da mistura sem aumentar o teor de água/cimento. Esse aditivo contribui para a manutenção das propriedades mecânicas do traço, permitindo uma mistura mais fluida e manejável sem comprometer a resistência do concreto.

Desse modo, o presente artigo visa comparar duas adições: o aditivo redutor de retração e o aditivo superplastificante, tanto na capacidade de avaliar a retração plástica no concreto, quanto nas suas propriedades de resistência à tração e à compressão e seu módulo de elasticidade.

2. METODOLOGIA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

2.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV - ARI, de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018). Atualmente, esse tipo de cimento possui um dos maiores teores de clínquer disponíveis no mercado e, portanto, tem uma influência mínima de materiais cimentícios suplementares na mistura. A caracterização do aglomerante está apresentada na Tabela 1. A caracterização química foi obtida através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), utilizando um instrumento EX 720 da marca Shimadzu.

Tabela 1. Caracterização física e química do cimento Portland.

Propriedades	Critérios Normativos	CPV - ARI	Método de Ensaio
Tempo de Pega Inicial (min)	≥ 60	140	ABNT NBR 16607 (2018)
Tempo de Pega Final (min)	≤ 600	180	
Massa Específica (g/cm ³)	-	3,10	ABNT NBR 16605 (2017)
Diâmetro abaixo do qual estão 10% das partículas (D10) (µm)	-	1,30	Granulometria a Laser
Diâmetro abaixo do qual estão 50% das partículas (D50) (µm)		13,10	
Diâmetro abaixo do qual estão 90% das partículas (D90) (µm)		31,76	
Resistência à Compressão (MPa))	1 dia	≥ 14	ABNT NBR 7215 (2019)
	3 dias	≥ 24	
	7 dias	≥ 34	
Composição Química em Óxidos (%)	SiO ₂	-	Fluorescência de Raios-X (FRX)
	CaO	-	
	MgO	-	
	Al ₂ O ₃	-	
	Fe ₂ O ₃	-	
	K ₂ O	-	
	TiO ₂	-	
	ZnO	-	
	SO ₃	$\leq 4.5\%$	
	MnO	$\leq 6.5\%$	
Perda ao fogo (%)	$\leq 6.5\%$	6,12	

Fonte: Silva, p. 5, (2023)

2.1.2 Agregado miúdo e graúdo

O agregado miúdo utilizado na presente pesquisa foi

a areia lavada de rio, à base de quartzo, e extraída do Rio Corumbá, na região de Brasília, no Distrito Federal. A caracterização do agregado miúdo mostrou uma massa específica igual a 2,65 g/cm³ e módulo de finura de 2,36. O agregado graúdo escolhido foi obtido a partir da britagem de rochas calcíneas de calcário, com dimensão máxima de 19 mm. Os testes de caracterização para o agregado graúdo mostraram uma massa específica igual a 2,71g/cm³ e um módulo de finura igual a 3,31.

2.1.3 Aditivos

Em busca do principal objetivo da pesquisa, foram utilizados dois aditivos: o aditivo redutor de retração e o superplastificante. O aditivo redutor de retração (ARR) utilizado, de nome comercial “Eclipse”, foi produzido pela Grace Brasil. De acordo com o fabricante, o ARR utilizado é de base química glicol, não contém água, porém em doses elevadas seu volume deverá ser considerado no ajuste da água final, e sua massa específica é de 0,91 g/cm³. O aditivo superplastificante utilizado foi o Master Glenium 51, da marca Master Builders Solutions. Esse aditivo é um aditivo redutor de água tipo 2 (hiper plastificante), de pega normal, líquido e livre de cloretos. É feito à base de éter policarboxílico modificado, que possui como mecanismo de atuação reduzir consideravelmente a água necessária para dosagem do concreto, e é considerado de terceira geração. Conforme o fabricante, esse material possui uma aparência líquida branca turva, uma densidade variando de 1,067 a 1,107 g/cm³, com um pH variando de 5 a 7, um teor de sólidos igual a 28,5 a 31,5 %, e uma viscosidade menor que 150 cps.

2.2 DOSAGEM DO CONCRETO CONVENCIONAL

O método de dosagem utilizado para a produção do concreto analisado foi o chamado Método Helene & Terzian (1993). Esse método prevê um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, com base na busca de um conteúdo ideal de argamassa seca, através de um traço intermediário dos demais materiais previstos. Além disso, a mistura foi realizada com o objetivo de obter uma consistência no valor de 120 ± 20 mm. Para tal metodologia, realizou-se três misturas, utilizando um teor de argamassa fixo igual a 54% e os traços estão representados na Tabela 2.

Tabela 2. Dosagem das misturas realizadas no estudo.

CP	Materiais (kg)					
	a	b	c	d	e	f
REF	15	33,6	41,4	9	0	0
SUP	15	33,6	41,4	7,5	0,044	0
ARR	15	33,6	41,4	8,7	0	0,3

a Cimento
b Areia
c Brita
d Água
e Superplastificante
f ARR

Fonte: Autor

Conforme indicado na Tabela 2, para as misturas REF, utilizou-se uma relação água/cimento (a/c) igual a 0,6, enquanto na mistura ARR utilizou-se uma relação a/c de 0,58 devido ao aditivo redutor de retração ter sido adicionado em substituição à água, para não ultrapassar o valor da consistência desejada. Já na mistura SUP, avaliou-se a ação do superplastificante com uma relação água/cimento igual a 0,5, com o intuito de reduzir a quantidade de água na mistura sem comprometer o limite estabilidade da consistência. É importante notar que para todas as misturas foi atendido o valor de consistência estabelecido, sendo que para o traço REF foi necessário inserir mais água, já que não se utilizou nenhum tipo de aditivo químico.

2.3 ENSAIOS DE PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

2.3.1 Massa específica

A massa específica foi aferida baseando-se na ABNT NBR 13278 (2005), que consiste na medição da massa do concreto e o volume dessa massa necessário para que seja preenchido um recipiente de volume conhecido. Em seguida, calculou-se a razão entre a massa e o volume, obtendo o valor da densidade no estado fresco do material.

2.3.2 Retração Plástica

Para a avaliação da retração plástica, foi utilizado um molde de teste específico para a pesquisa, e monitoramento de fissuras por retração plástica do concreto. Conforme estabelecido pela ASTM C1579 (2013), construiu-se um molde de comprimento igual a 600 mm. Na Figura 1 está representado o molde utilizado.



Figura 1. Molde utilizado para avaliação da retração plástica.
Fonte: Autor

Para auxiliar o desenvolvimento de fissuras associadas à retração plástica utilizou-se um ventilador como estabelecido pela norma. Ajustou-se a velocidade para alcançar a velocidade mínima do vento, sendo controlado a uma velocidade de 4,7 m/s. Dessa forma, facilitou-se a evaporação de água, e consequente formação de fissuras. Além disso, a temperatura e umidade do ambiente foram controladas por meio de um termo-higrômetro digital, como representado na Figura 2.



Figura 2. Aparato de controle da umidade e temperatura.
Fonte: Autor

2.3.3 Análise das imagens por meio da Avaliação de Superfície

Segundo as diretrizes da ASTM C1579 (2013), é possível empregar uma variedade de ferramentas, como microscópios ópticos portáteis, comparadores de fissuras ou sistema de análise de imagens, para conduzir a análise de fissuras. Com base nesse princípio, adotou-se o método conhecido como Avaliação de Superfície Inteira, uma técnica de análise amplamente utilizada na caracterização de fissuras em materiais. Esse método implica na avaliação completa da amostra, utilizando documentação fotográfica para capturar uma imagem que represente todo seu aspecto.

O método de Avaliação da Superfície Inteira é uma técnica de análise amplamente utilizada na caracterização de fissuras em materiais. Essa abordagem permite uma visualização integral das fissuras presentes, possibilitando uma avaliação

abrangente de sua distribuição, tamanho e padrões (Palma e Silva, 2022). Ao capturar uma imagem que englobe toda a superfície, essa metodologia facilita a identificação de áreas críticas e a compreensão da extensão de fissuras, o que é essencial para avaliação da integridade do material, nesse caso a amostra de concreto. Além disso, essa técnica oferece a vantagem de ser relativamente rápida e de fácil implementação, sendo interessante para estudos de caracterização de fissuras em diversos contextos. Nesse estudo, realizou-se a análise de fissuras por meio da captura de fotografias em alta resolução em intervalos de 20 minutos, registrando o comportamento de toda a amostra. Em seguida, analisou-se as imagens por meio do software especializado para dimensionamento e mensuração da área das fissuras, ainda seguindo a ASTM C1579 (2013). O programa utilizado para tal análise foi o Fiji/ImageJ.

As fotografias foram consistentemente capturadas a uma distância fixa de 30 cm da amostra, com o objetivo de melhorar a precisão na avaliação do tamanho das fissuras, tornando-o mais apropriado para análises comparativas. A captura de imagens foi realizada por vinte quatro horas, garantindo a solidificação da amostra. A Figura 3 representa a amostra logo no início do ensaio.

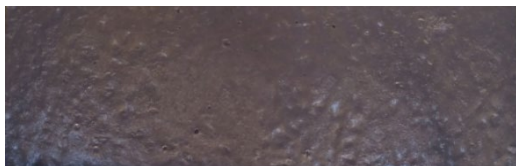


Figura 3. Superfície da amostra no início do ensaio.
Fonte: Autor

Com o objetivo de melhorar a visualização das fotografias realizadas, converteu-se a para 8-bit, retirando a coloração e transformando em preto e branco. Além disso, foi introduzido o filtro de redução de ruído não local nas imagens que está disponível como um plugin do Fiji/ImageJ. Ademais, corrigiu-se a coloração das imagens por meio da correção do histograma, ajustando as faixas de coloração cinza, como representado na Figura 4.

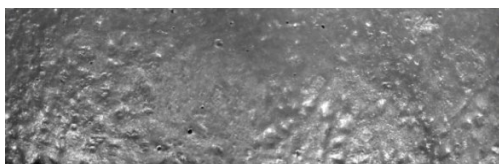


Figura 4. Superfície com ajustes de imagem.
Fonte: Autor

Para realizar a medição das fissuras, também se utilizou o software Fiji/ImageJ. Realizou-se a segmentação da imagem também por meio do plugin fornecido. Em seguida, com o objetivo de facilitar a identificação e segmentação das fissuras nas imagens, utilizou-se o plugin Trainable Weka Segmentation. Esse plugin combina a segmentação manual com algoritmos. Assim, ele oferece resultados mais precisos para reconhecimento e segmentação de fissuras. Por fim, foi possível uma visualização clara das fissuras formadas ao final do ensaio, como representado na Figura 5.



Figura 5. Representação da fissura obtida com o tratamento da imagem.
Fonte: Autor

Para os resultados da avaliação das fissuras por meio da Avaliação da Superfície Inteira, as fissuras foram quantificadas através da porcentagem da área total da amostra. Em seguida, os percentuais de área fissurada encontrados foram correlacionados com a área total da amostra em milímetros quadrados (mm^2). Assim, essa análise garantiu uma escala consistente da evolução e mensuração das fissuras.

2.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Cada valor foi obtido a partir da média do ensaio de 3 corpos de prova.

2.4.1 Ensaio de resistência à compressão simples

Para estudar a influência dos aditivos utilizados nas propriedades mecânicas do concreto, foram realizados os ensaios de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias. Para a realização do ensaio, foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensões iguais a 100 x 200 mm, seguindo as diretrizes normativas da ABNT NBR 5739 (2018). Os concretos foram curados em câmara úmida a partir do primeiro dia de desmoldagem até a idade do ensaio.

2.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Seguindo as diretrizes da NBR 7222 (2011), o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em

corpos de prova cilíndricos foi conduzido em conformidade com os procedimentos padronizados após 28 dias de cura. Assim, os corpos de prova foram cuidadosamente posicionados na máquina de ensaio, onde foram aplicadas cargas progressivas de forma uniforme até a fratura.

2.4.3 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias foi realizado seguindo as prescrições da ABNT NBR 8522 (2008). Os corpos de prova de dimensões 100 x 200 mm foram submetidos a quatro ciclos de carga e descarga, com uma velocidade controlada de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Durante esses ciclos, as deformações foram registradas com extensômetros posicionados em locais opostos. Após a obtenção dessas medidas, os corpos de prova foram novamente carregados até a ruptura, e o módulo de elasticidade foi calculado em GPa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENSAIOS DE PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

3.1.1 Massa específica

A massa específica foi determinada logo após a confecção dos concretos, em que um recipiente de volume conhecido foi preenchido com duas camadas de concreto, adensadas com vibrador, e em seguida, obteve sua massa registrada. Os resultados da massa específica de cada mistura estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de massa específica para todas as misturas.

MISTURA	REF	SUP	ARR
Massa Específica (g/cm ³)	2,39	2,42	2,38

Fonte: Autor

Observa-se a partir dos resultados que a mistura com o superplastificante apresentou a maior massa específica quando comparado com os demais traços, enquanto a mistura com ARR apresentou a menor massa específica, já o traço SUP tem uma menor relação água/aglomerante, por isso tende a apresentar uma maior massa específica. No entanto, essa flutuação é esperada em um procedimento experimental, e não foi considerada significativa.

3.1.2 Avaliação da Superfície Inteira

A avaliação da amostra de concreto por Avaliação da Superfície Inteira foi realizada por 24 horas. Observou-se que as misturas ARR e SUP não apresentaram qualquer fissuração na superfície de concreto, enquanto a mistura sem nenhum tipo de aditivo, a mistura REF, apresentou em sua superfície fissuras localizadas principalmente na região central da amostra. Para facilitar a visualização da evolução da fissuração, realizou-se um gráfico representado na Figura 6, que mostra a porcentagem da área fissurada em relação à área total da superfície do concreto, metodologia explicitada no item 2.3.3 do presente artigo.

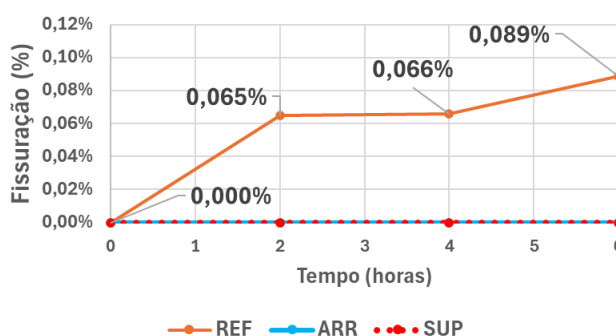


Figura 6. evolução da fissuração das misturas.

Fonte: Autor.

Observou-se que a maior evolução das fissuras do traço REF se desenvolveu durante as primeiras duas horas do experimento, passando de uma superfície não fissurada para 0,065% de fissuração, ou seja, com 78,0 mm² de área de fissura. Notou-se ainda uma estabilização das fissuras após as duas horas de duração, que aumentou de 0,065% para 0,066%, ou seja, apenas 1,2 mm² de área em duas horas. E, por fim, com seis horas de experimento apresentou 106,8 mm² de área fissurada. Observou-se que após seis horas de experimento a área fissurada não evoluiu e pode-se inferir que esse tempo representa o tempo de fim de pega do concreto presente na amostra. É importante destacar a eficácia do aditivo redutor de retração e do superplastificante. As misturas que foram adicionadas a esses aditivos não apresentaram qualquer sinal de fissuração na superfície das amostras durante a experimentação e o percentual de fissuração ficou estagnado e igual a zero.

A eficiência do ARR foi claramente observada ao longo do experimento, uma vez que a amostra em que foi utilizado não apresentou qualquer sinal de fissuração superficial, destacando sua capacidade de minimizar a retração plástica do concreto.

Para mitigar a retração plástica, a terceira estratégia adotada foi reduzir a relação água/aglomerante e utilizar o superplastificante para compensar a consistência do concreto. Observou-se que o uso dessa adição não só melhorou a trabalhabilidade, evidenciado pela facilidade do espalhamento do concreto na forma, mas também contribuiu significativamente para a redução do risco de fissuras.

3.2 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 Resistência à compressão simples

Para a avaliação das propriedades mecânicas realizou-se o ensaio de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias, e os resultados dos traços avaliados estão apresentados na Figura 7.

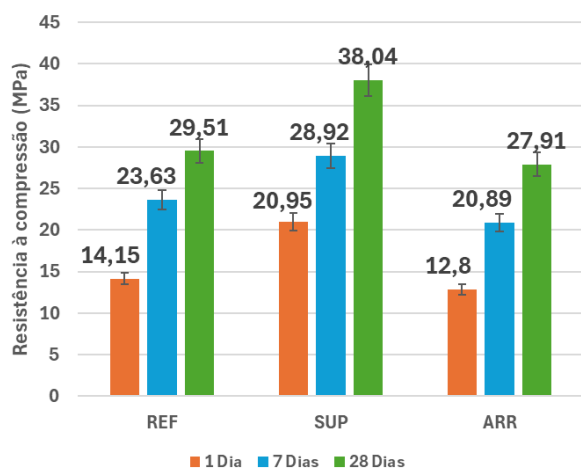


Figura 7. Resistência à compressão de cada mistura.
Fonte: Autor.

A partir do gráfico representado na Figura 7, observa-se que a presença do aditivo superplastificante aumentou a resistência à compressão, quando comparado aos demais. Quando analisada a resistência à 1 dia e aos 7 dias, os resultados apresentaram a mesma tendência de acréscimo, com valores de 48,1% e 22,4% respectivamente. Aos 28 dias, a mistura em sua presença revelou um acréscimo de 28,9% na resistência à compressão do concreto em relação ao traço de referência. Isso pode ser explicado pela presença do aditivo produzir uma hidratação mais eficaz, sendo possível reduzir a relação água/cimento, gerando uma estrutura mais homogênea que produz uma certa melhoria da resistência, além de realizar o controle da retração plástica.

Ainda com base no gráfico apresentado, observa-se que o ARR causou um decréscimo na resistência à

compressão. Quando analisada a resistência aos 7 dias, o decréscimo de resistência é ainda maior, representando uma perda de 11,6%. Aos 28 dias, enquanto a mistura REF obteve uma resistência de 29,51 MPa, a mistura ARR apresentou resistência de 27,91 MPa, o que representou uma perda de 5,4%. O aditivo redutor de retração tem como seu mecanismo de ação a redução da tensão superficial da água do poro. Conforme Brooks et al. (2020), isto faz com que ocorra um retardo da aglomeração das partículas e, consequentemente, um retardo do desenvolvimento das reações de hidratação. Esse retardo das reações aumenta a porosidade do material, e, consequentemente, provoca a diminuição da resistência mecânica da mistura.

Dessa forma, o aditivo superplastificante é o mais vantajoso quando se trata da resistência à compressão do concreto. A presença desse aditivo resultou em melhorias significativas na resistência mecânica do material em todos os intervalos de tempo avaliados, bem como no controle completo do aparecimento de fissuras, tanto um quanto o outro podem ser atribuídos ao fato de o aditivo superplastificante possibilitar a redução do teor água/cimento do traço.

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado aos 28 dias de idade, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7222:2011 e os resultados obtidos estão representados na Figura 8.

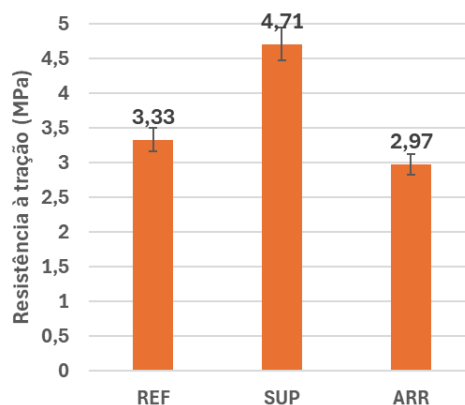


Figura 8. Resistência à tração de cada mistura.
Fonte: Autor.

Baseando-se nos dados obtidos, o traço SUP, com uma menor relação água/aglomerante, demonstrou um aumento de 42,4% na resistência à tração em relação à referência, refletindo melhorias significativas na resistência e na redução da

fissuração, enquanto se manteve a consistência do concreto. Essa tendência de melhoria também se refletiu na resistência à compressão. Por outro lado, o traço ARR exibe uma redução de 9,1% ainda em relação ao traço de referência, sugerindo uma menor resistência, o que também se observou na resistência à compressão, e uma menor capacidade de suportar cargas sem sofrer danos. Dessa forma, infere-se que o aditivo superplastificante foi o que apresentou um melhor resultado, tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração.

3.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi avaliado em três corpos de prova na idade de 28 dias e os resultados médios para os três traços realizados estão representados na Figura 9.

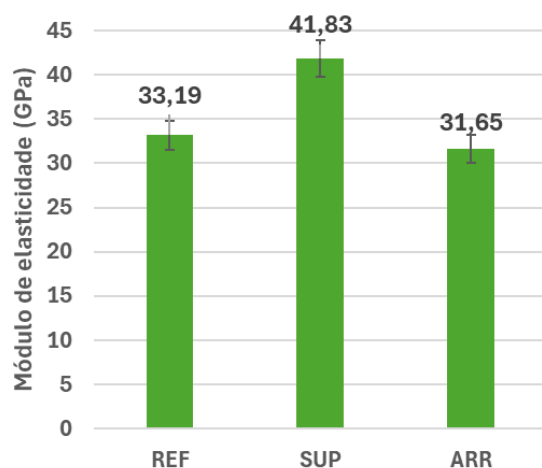


Figura 9. Módulo de elasticidade de cada mistura.
Fonte: Autor.

Ao analisar o módulo de elasticidade, verificou-se que a adição do aditivo superplastificante resultou em um aumento significativo, refletindo a redução na relação água/aglomerante. Aos 28 dias, a mistura com superplastificante apresentou um módulo de elasticidade de 41,8 GPa, comparado a 33,2 GPa da mistura de referência, o que representa um incremento de 26,0%. Esse aumento está associado à melhoria geral nas propriedades do concreto, incluindo maior resistência e menor fissuração, devido à menor quantidade de água na mistura. Verificou-se que, assim como ocorreu na resistência à compressão, a presença do aditivo redutor de retração causou uma diminuição no módulo de elasticidade, porém menos acentuada. Aos 28 dias, a mistura de referência obteve um módulo de elasticidade de 33,2 GPa, enquanto a mistura contendo o redutor de retração igual a 31,2 GPa,

representando uma perda de 4,6%. A queda do módulo de elasticidade já era esperada, haja vista que essa propriedade está relacionada com a resistência à compressão do material. Além disso, observa-se que os percentuais de perda de resistência à compressão e do módulo de elasticidade, 5,4% e 4,6%, respectivamente, estão muito próximos.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que ambos os aditivos analisados – o redutor de retração (ARR) e o superplastificante – demonstraram eficácia no controle da retração plástica, com eliminação total das fissuras nas amostras. No entanto, suas influências sobre as propriedades mecânicas foram distintas: enquanto o ARR comprometeu a resistência à compressão e à tração, o superplastificante proporcionou ganhos significativos nessas propriedades, além de um aumento no módulo de elasticidade.

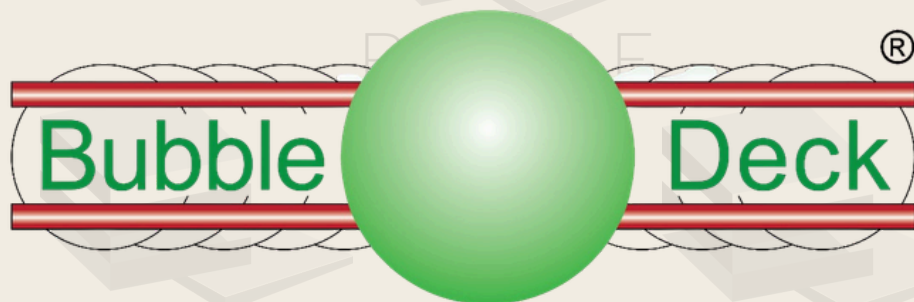
Esses achados corroboram diretamente os objetivos propostos no estudo, que buscavam avaliar os efeitos dos aditivos tanto na retração quanto no desempenho mecânico do concreto. Do ponto de vista prático, os resultados sugerem que o superplastificante é a alternativa mais vantajosa para obras em que a integridade mecânica e a durabilidade são prioritárias, especialmente sob risco de fissuração por retração plástica.

Entretanto, é importante reconhecer as limitações deste estudo. Os ensaios foram realizados com apenas uma composição para cada aditivo e em condições controladas de laboratório, o que pode não representar com precisão o desempenho em campo. Além disso, os efeitos de longo prazo dos aditivos, como a durabilidade frente a agentes agressivos, não foram investigados.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se: avaliar diferentes dosagens dos aditivos, buscando um equilíbrio entre controle da retração e resistência mecânica; investigar o comportamento dos concretos com aditivos em condições ambientais variadas e em escalas reais de aplicação; analisar o impacto desses aditivos na durabilidade e na vida útil das estruturas.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13278:2014 - Argamassa - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- ABNT. NBR 16607; Cimento Portland—Determinação dos Tempos de Pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. NBR 7215: Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT. NBR NM 53: Coarse aggregate – determination of the bulk specific gravity, apparent specific gravity and water absorption (in Portuguese), Rio de Janeiro, 2009.
- ASTM C 1579. 2013. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fibre Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert). West Conshohocken: ASTM International.
- Bayasi, Z., McIntyre, M., Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete, *ACI Mater. J.* 99 (4) (2002) 337–344.
- Bentz, D.P. Curing with Shrinkage-Reducing Admixtures: Beyond Drying Shrinkage Reduction. *Concrete International*, v.27(10), 2005, pp.55-60.
- Bentz, D.P. Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Early-Age Properties of Cement Pastes. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v.4(3), 2006, pp.423-429.
- Etxeberría, M. Vazquez, E.; Marí, A.; Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37.
- Helene, P.; Terzian, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo, p. 349, 1993.
- Melo Neto, A. A., Cincotto, M. A., & Repette, W. L. (2007). Efeito do aditivo redutor de retração (SRA) no cimento Portland de alta resistência inicial. In *Congresso Construção*.
- Palma e Silva, A. A. (2022). Microconcretos de alta resistência contendo polímero superabsorvente e metacaulim, Publicação E.DM – 01A/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.
- Rato, V. 2006. Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas.
- Ravina, D., Shalon, R. 1968. Plastic shrinkage cracking, *ACI J.* 65 (4) 282–294.
- Shi C.; Li Y.; Zhang J.; Li W.; Chong L.; Xie Z. 2016. Performance enhancement of recycled concrete aggregate; A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 112.
- Swaddiwudhipong, H.R. Lu, T.H. Wee. 2003. Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age, *Cem. Concr. Res.* 33 (12) 2077–2084.



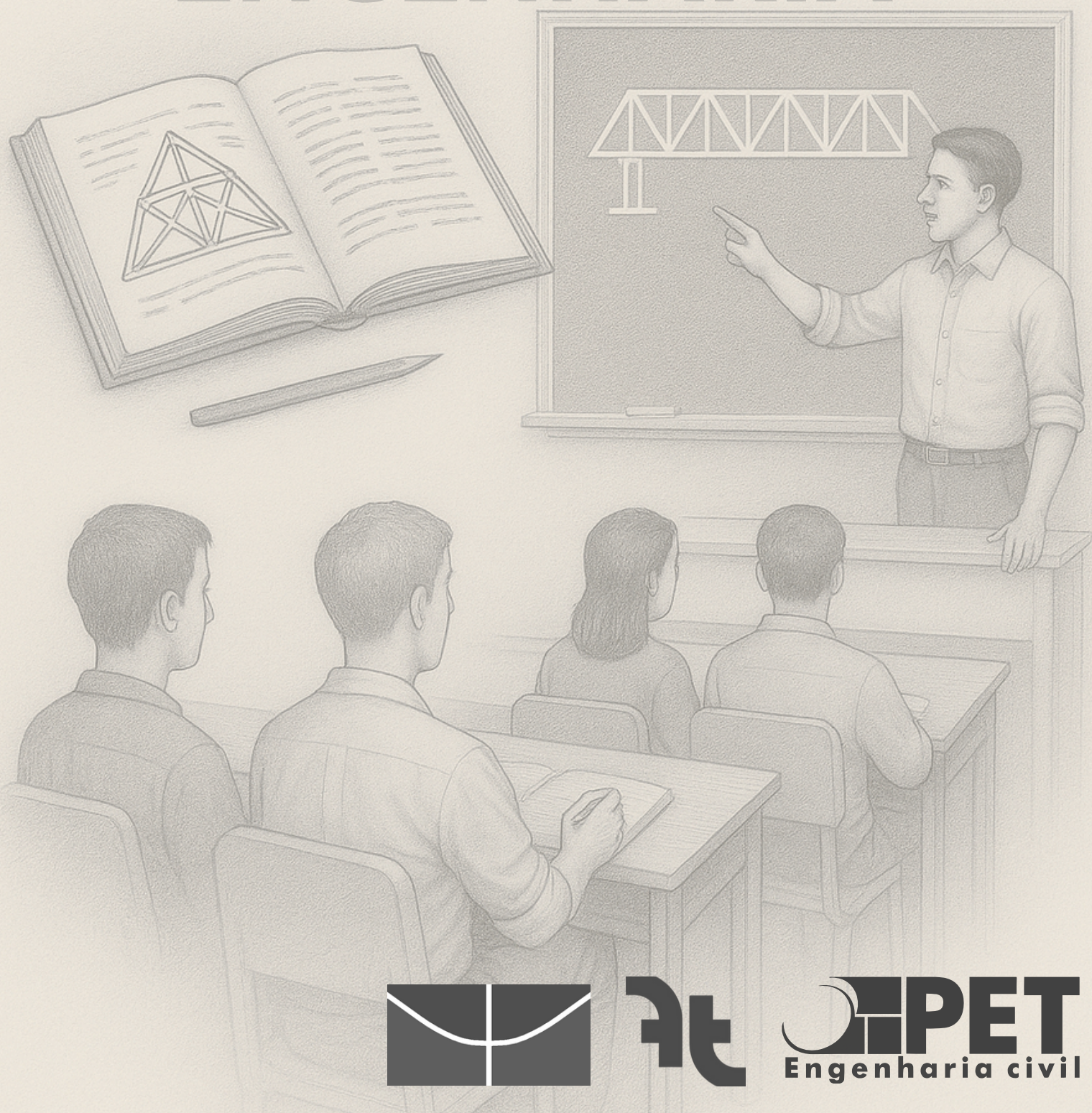
Construindo mais com menos



TECNA

CONSTRUTORA

ENSINO EM ENGENHARIA



COMPARAÇÃO DE ESTRUTURAS CURRICULARES EM CURSOS DE ENGENHARIA CIVIL: ANÁLISE DOS PROJETOS PEDAGÓGICOS DE CURSO – PPC ENTRE AS UNIVERSIDADES BRASILEIRAS

Alessandra R. V. Silva, Ana Beatriz F. Borges, Ana Clara M. Reis, Caio I. A. Lima, Davi S. Câmara, Fernanda O. Porto, Fernanda F. Barro, Isabela A. Sousa, Lameiras, R. M., Maria I. S. Rodrigues, Renan N. N. Mendes, Tiago V. Lira*

UnB/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Brasília/Brasil

RESUMO

O presente artigo apresenta uma análise comparativa das estruturas curriculares dos cursos de Engenharia Civil oferecidos por universidades brasileiras, com enfoque especial na Universidade de Brasília - UnB. Por meio de uma análise dos Projetos Pedagógicos de Curso - PPCs de seis instituições, são elas: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP-POLI, foram examinados diversos aspectos, incluindo organização das disciplinas, distribuição da carga horária, atividades de extensão, interdisciplinaridade e flexibilidade curricular. Os dados foram coletados de documentos oficiais e analisados utilizando métodos quantitativos e qualitativos para identificar padrões e diferenças. Este estudo visa contribuir para uma melhor compreensão das práticas educativas no ensino da Engenharia Civil e fornecer subsídios para possíveis melhorias curriculares segundo a nova resolução do CNE/CES nº 2/2019. Além disso, busca-se oferecer uma visão abrangente das tendências atuais e futuras no campo da engenharia civil e auxiliar na formação de engenheiros mais preparados para enfrentar os desafios do mercado de trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Análise Comparativa, Engenharia Civil, Estrutura Curricular, Projetos Pedagógicos de Curso.

ABSTRACT

This article presents a comparative analysis of the curricular structures of Civil Engineering courses offered by Brazilian universities, with a special focus on the University of Brasília - UnB. Through a analysis of the Curricular Pedagogical Projects - PPCs of six institutions, namely: Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ, Federal University of Santa Catarina - UFSC, State University of Campinas - UNICAMP, University of São Paulo and Polytechnic School of the University of São Paulo - USP-POLI, several aspects were examined, including the organization of disciplines, distribution of workload, extension activities, interdisciplinarity and curricular flexibility. The data were collected from official documents and analyzed using quantitative and qualitative methods to identify significant patterns and differences. This study aims to contribute to a better understanding of educational practices in Civil Engineering teaching and provide subsidies for possible curricular improvements according to the new CNE/CES resolution nº 2/2019. In addition, it seeks to offer a comprehensive view of current and future trends in the field of civil engineering, assisting in the training of engineers better prepared to face the challenges of the job market.

KEYWORDS: Comparative Analysis, Civil Engineering, Curricular Structure, Course Pedagogical Projects.

*Autor correspondente: petencunb@gmail.com



1. INTRODUÇÃO

O ensino de Engenharia Civil no Brasil é caracterizado por sua diversidade e complexidade, refletindo as diferentes abordagens pedagógicas adotadas pelas instituições de ensino superior (IES). Trata-se de uma das áreas mais tradicionais da engenharia, essencial para o desenvolvimento da infraestrutura e, conseqüentemente, para o crescimento econômico e social do país (CONFEA, 2024). Diante disso, a qualidade da formação dos engenheiros civis torna-se um fator decisivo para o avanço sustentável da sociedade.

Com o intuito de promover uma formação sólida, crítica e abrangente, as universidades brasileiras têm desenvolvido Projetos Pedagógicos de Curso (PPCs) que procuram atender tanto às exigências técnicas do mercado de trabalho quanto às necessidades formativas dos estudantes. O PPC é um documento institucional que orienta a concepção do curso e define sua estrutura curricular, perfil do egresso, corpo docente, infraestrutura, diretrizes de avaliação, entre outros elementos fundamentais. Segundo o Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), ele deve refletir um conjunto articulado de diretrizes organizacionais e pedagógicas, em conformidade com as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) estabelecidas pelo Ministério da Educação.

Neste contexto, as DCNs específicas para os cursos de Engenharia foram atualizadas por meio da Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019, com o objetivo de modernizar os currículos e fomentar uma formação centrada em competências como inovação, interdisciplinaridade, autonomia, atuação ética e responsabilidade social (BRASIL, 2019). Essa atualização buscou superar limitações da antiga Resolução nº 11/2002 (BRASIL, 2002), promovendo maior flexibilidade curricular, incorporação de metodologias ativas de aprendizagem, estímulo à integração entre teoria e prática, e inclusão obrigatória de atividades de extensão, pesquisa e ações voltadas ao desenvolvimento de soluções para os desafios contemporâneos.

Este estudo realiza uma análise comparativa das estruturas curriculares dos cursos de Engenharia Civil de seis instituições de ensino superior brasileiras de destaque: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ, 2017), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, 2020), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP, 2022), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP, 2018) e, com atenção especial, a

Universidade de Brasília (UNB, 2022). A análise abrange aspectos como a organização das disciplinas, a distribuição da carga horária, a presença e a forma de implementação das atividades de extensão, os mecanismos de flexibilização curricular, a interdisciplinaridade e as estratégias de acolhimento e acompanhamento acadêmico.

Ao considerar também as diretrizes estabelecidas pelas DCNs, este trabalho busca identificar convergências, lacunas e boas práticas entre os PPCs analisados, contribuindo para o aprimoramento contínuo da formação em Engenharia Civil no Brasil e para a consolidação de modelos pedagógicos alinhados às transformações sociais, ambientais e tecnológicas da atualidade.

2. METODOLOGIA

A seleção dos cursos analisados baseou-se em seu desempenho no Índice Geral de Cursos (IGC, 2023), que avalia a qualidade dos cursos de graduação ofertados pelas instituições de ensino superior brasileiras. Foram selecionadas cinco instituições públicas federais com IGC na faixa máxima (nota 5), conforme demonstrado na Tabela 2.1. Os dados foram obtidos a partir de documentos oficiais, tais como os Projetos Pedagógicos de Curso (PPCs) das instituições analisadas e as resoluções emitidas pelo Conselho Nacional de Educação (CNE).

Tabela 2.1. Informações das Universidades Analisadas.

Nome da IES	IES	UF	IGC Contínuo	IGC Faixa
Universidade de Brasília	UNB	DF	4,290	5
Universidade Federal do Rio de Janeiro	UFRJ	RJ	4,233	5
Universidade Federal de Santa Catarina	UFSC	SC	4,416	5
Universidade de São Paulo	USP-POLI	SP	4,233	5
Universidade Estadual de Campinas	UNICAMP	SP	4,640	5

Fonte: Brasil. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep). (2023). Pontuação das Faculdades – IGC 2023. Disponível em: (<https://www.gov.br/inep/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/indicadores-educacionais/indicadores-de-qualidade-da-educacao-superior>). Acesso em: abr. 2025.

A metodologia adotada combina análises quantitativas e qualitativas, a fim de identificar padrões e diferenças significativas na estrutura curricular dos cursos. Para orientar essa análise, foram definidos parâmetros organizados em duas dimensões principais – quantitativa e qualitativa – conforme apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Indicadores de Análise das Estruturas Curriculares.

Análise Quantitativa	Análise Qualitativa
Distribuição da carga horária entre disciplinas obrigatórias, optativas e atividades complementares.	A organização curricular e a progressão entre os ciclos de formação
proporção de horas dedicadas a atividades teóricas e práticas.	A oferta de disciplinas optativas e módulos livres;
Proporção de horas dedicadas a atividades teóricas e práticas.	A integração entre ensino, pesquisa e extensão;
Conformidade com a carga horária mínima exigida pelas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs), de 3.600 horas.	Estratégias pedagógicas para o desenvolvimento de competências e habilidades previstas nas DCNs
Presença e dimensionamento das atividades obrigatórias, como estágio supervisionado e atividades de extensão, conforme estabelecido pela Resolução CNE/CES nº 2/2019.	Oportunidades de internacionalização do currículo, como programas de mobilidade acadêmica e convênios com instituições estrangeiras.

As Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) para os cursos de Engenharia foram instituídas pela Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019 (BRASIL, 2019). Essa normativa estabelece os princípios, fundamentos e condições para a organização, desenvolvimento e avaliação dos cursos, com base no artigo 9º, parágrafo 2º, alínea “e”, da Lei nº 4.024, de 20 de dezembro de 1961, com a redação dada pela Lei nº 9.131, de 25 de novembro de 1995, homologado pelo Ministro da Educação (DOU, 23 abr. 2019).

As DCNs visam garantir que os cursos de Engenharia proporcionem aos seus egressos um perfil completo, humanista e crítico, capaz de absorver e desenvolver novas tecnologias, resolver problemas de engenharia e atuar com responsabilidade social e sustentabilidade. As diretrizes também promovem a interdisciplinaridade e a flexibilidade curricular, permitindo que os alunos personalizem sua formação de acordo com suas necessidades e interesses específicos.

3. RESULTADOS

3.1 Organização Curricular e Comparativo de Carga Horária

A estrutura curricular dos cursos de Engenharia Civil nas universidades analisadas é organizada ao longo de dez semestres, seguindo uma lógica comum de progressão do conhecimento, mas com particularidades que refletem as diretrizes pedagógicas de cada instituição.

De modo geral, os cursos iniciam com disciplinas de formação básica – também conhecidas como ciclo básico - que fornecem os fundamentos das ciências exatas e naturais, para posteriormente facilitar a compreensão dos conteúdos mais avançados da engenharia. A partir dos semestres intermediários, os alunos passam a cursar disciplinas de caráter mais aplicado, que fazem a transição entre teoria e prática da engenharia, até chegarem às disciplinas profissionalizantes, voltadas à atuação técnica e ao desenvolvimento de competências específicas da área.

Apesar dessa estrutura semelhante, cada universidade estabelece diferentes formas de organizar e integrar esses blocos de conhecimento. Algumas instituições adotam uma abordagem mais tradicional e sequencial, com ênfase na base teórica nos primeiros anos, enquanto outras buscam uma integração mais precoce entre teoria e prática, promovendo desde cedo o contato com a realidade da profissão por meio de projetos, estudos de caso e atividades de extensão.

Além disso, a composição da carga horária reflete o foco e os valores de cada curso. Há universidades que priorizam uma formação mais densa em conteúdos técnicos, enquanto outras valorizam a interdisciplinaridade, a flexibilidade curricular e a inserção do aluno em contextos reais de atuação. Esse modelo mais flexível permite que o estudante personalize parte de sua trajetória acadêmica por meio de disciplinas optativas e atividades de extensão

– uma abordagem que está alinhada com as diretrizes estabelecidas pelas DCNs

Essas diferenças contribuem para perfis variados de formação, permitindo que os estudantes encontrem propostas pedagógicas alinhadas com seus interesses e expectativas profissionais. A Tabela 3.1 apresenta a carga horária total dos cursos de Engenharia Civil das universidades analisadas: Universidade de Brasília (UnB), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e Universidade de São Paulo – Escola Politécnica (USP-POLI). Permitindo uma visão comparativa da distribuição da carga entre as instituições.

A Tabela 3.1 compara a carga horária total e sua distribuição nos cursos de Engenharia Civil mencionadas anteriormente.

Tabela 3.1. Carga Horária das Universidades

Universidade	Carga Horária
UnB	3.960 h
UFRJ	4.095 h
UFSC	3.825 h
UNICAMP	4.125 h
USP-POLI	4.725 h

3.2 Distribuição Entre Obrigatórias e Optativas

A organização dos componentes curriculares nos cursos de Engenharia Civil envolve, majoritariamente, disciplinas obrigatórias, mas também reserva espaço para a oferta de disciplinas optativas e atividades complementares. Essa divisão é orientada pelas Diretrizes Curriculares Nacionais (BRASIL, 2019), que propõem uma formação ampla, crítica e contextualizada, valorizando tanto o domínio técnico quanto a capacidade de adaptação a diferentes realidades profissionais.

As disciplinas obrigatórias concentram os conteúdos estruturantes da engenharia, sendo consideradas essenciais para assegurar que todos os alunos adquiram uma formação técnica sólida e homogênea (BRASIL, 2019).

Por outro lado, as disciplinas optativas assumem papel estratégico dentro da formação. Elas que possibilitam a interdisciplinaridade e a flexibilidade curricular preconizadas pelas DCNs. Ao optar por determinadas disciplinas, o estudante pode direcionar sua formação para áreas de interesse, como: estruturas, geotecnia, hidráulica e saneamento ou tecnologia da construção. Esse movimento, ao

mesmo tempo técnico e pessoal, contribui para o desenvolvimento de perfis profissionais.

Tabela 3.2. Porcentagem de Obrigatórias com Relação a Carga Horária Total do Curso

IES	OBGs. (%)	Carga Horária	Optativas (%)	Carga Horária
UNB	82,9	3283 h	17,1	677 h
UFRJ	85,0	3481 h	15,0	614 h
UFSC	76,0	2907 h	24,0	918 h
USP-POLI	75,0	3544 h	25,0	1181 h
UNICAMP	77,8	3209 h	22,2	916 h

3.3 Distribuição de Carga Horária por Áreas de Concentração

As atividades de extensão passaram a ocupar papel central na formação dos engenheiros a partir da Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019, que estabelece a obrigatoriedade da inserção da extensão nos currículos de cursos de graduação. Essa determinação está em consonância com as Diretrizes Curriculares Nacionais, que propõem uma formação integrada entre ensino, pesquisa e extensão, com foco na formação cidadã, ética e comprometida com os problemas reais da sociedade.

Nos cursos de Engenharia Civil das universidades analisadas, a extensão é implementada de maneira distinta, mas, em geral, vem sendo incorporada de forma progressiva ao longo dos semestres. Em algumas instituições, como a Universidade de Brasília (UnB), a extensão é parte integrante das disciplinas obrigatórias, sendo estruturada por meio de projetos aplicados que dialogam com demandas sociais concretas. Essa prática contribui para a formação de um engenheiro mais sensível aos contextos comunitários, capaz de aplicar seu conhecimento de maneira ética e responsável.

Outras universidades, como a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP-POLI), têm valorizado significativamente as atividades de extensão, integrando-as a projetos interdisciplinares, programas temáticos e parcerias com instituições públicas e privadas. Essa integração reforça a compreensão da extensão como componente essencial da formação acadêmica, ao promover a circulação de saberes entre universidade e sociedade. Esse diálogo contribui para um currículo mais dinâmico, responsivo e alinhado aos desafios contemporâneos.

A Tabela 3.3 apresenta em porcentagem de atividades de extensão.

Tabela 3.3. Porcentagem de Atividade de Extensão com Relação a Carga Horária Total do Curso

IES	Extensão (%)	Carga Horária Extensão
UNB	10,2	405 h
UFRJ	10,0	409 h
UFSC	9,4	360 h
USP-POLI	15,0	709 h
UNICAMP	10,2	421 h

Além das atividades de extensão, a organização curricular dos cursos de Engenharia Civil também reflete as ênfases formativas estabelecidas por cada instituição. Essas ênfases se manifestam na distribuição da carga horária entre as principais áreas de concentração da engenharia, como estruturas, geotecnia, hidráulica e saneamento, transportes e tecnologia da construção.

A Tabela 3.4 apresenta um comparativo entre as universidades analisadas quanto à carga horária destinada a cada uma dessas áreas, evidenciando as prioridades e estratégias formativas adotadas em cada curso. Essa análise permite compreender melhor os perfis profissionais que cada instituição busca desenvolver por meio de sua grade curricular.

Tabela 3.4. Comparativo Entre Carga Horária por Área de cada IES.

Área	UNB	UF RJ	UF SC	USP POLI	UNICA MP
Estruturas	540 h	480 h	420 h	420 h	540 h
Geotecnia	240 h	420 h	420 h	360 h	360 h
Hidráulica e Saneamento	300 h	300 h	240 h	240 h	840 h
Tecnol. da Construção	300 h	540 h	480 h	480 h	480 h
Transportes	180h	360h	300h	300h	300h

3.4 Interdisciplinaridade e Personalização da Formação Acadêmica

A interdisciplinaridade e a flexibilidade curricular têm se consolidado como pilares importantes na formação em Engenharia Civil, refletindo as diretrizes das DCNs (BRASIL, 2019) que incentivam uma formação mais abrangente, integrada e alinhada com as demandas contemporâneas. As universidades analisadas demonstram, em maior ou menor grau, esforços para proporcionar aos estudantes

possibilidade de personalizarem seus percursos acadêmicos e de explorarem diferentes áreas do conhecimento. A interdisciplinaridade e a flexibilidade curricular têm se consolidado como pilares importantes na formação em Engenharia Civil, refletindo as diretrizes das DCNs que incentivam uma formação mais abrangente, integrada e alinhada com as demandas contemporâneas. As universidades analisadas demonstram, em maior ou menor grau, esforços para proporcionar aos estudantes a possibilidade de personalizarem seus percursos acadêmicos e de explorarem diferentes áreas do conhecimento.

A Universidade de Brasília (UnB) proporciona aos estudantes de Engenharia Civil uma estrutura curricular flexível, composta por disciplinas obrigatórias, optativas, eletivas (módulo livre) e atividades de extensão. As disciplinas optativas são ofertadas pelo próprio departamento e se concentram nas áreas técnicas da engenharia civil incluindo Estruturas, Geotecnia, Hidráulica e Saneamento, Tecnologia da Construção e Transportes. Já o módulo livre permite ao aluno cursar até 24 créditos (360 horas) em disciplinas de outros departamentos da UnB, oferecendo maior liberdade de escolha e a possibilidade de uma formação interdisciplinar. Além disso, o curso inclui 405 horas de atividades de extensão, que podem ser cumpridas por meio de participação em eventos, projetos, empresas juniores, programas sociais e grupos de pesquisa, incentivando o envolvimento dos estudantes com a comunidade e a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos. Além disso, tanto a Universidade de Brasília (UnB) quanto a Escola Politécnica da USP adotam projetos pedagógicos que valorizam a integração entre teoria e prática. Na USP-POLI, essa proposta se reflete em uma estrutura curricular flexível, com módulos acadêmicos, optativas livres, possibilidade de formação em pesquisa e dupla formação com outros cursos, promovendo a interdisciplinaridade e a autonomia na formação dos estudantes.

As universidades brasileiras oferecem diferentes abordagens na formação de engenheiros civis, com foco em ciclos básicos, profissionalizantes e optativas. A Universidade de Brasília (UnB) destaca-se pela combinação de disciplinas fundamentais como cálculo, física e geologia, seguida por um ciclo profissionalizante que abrange estruturas, geotecnia, hidráulica, saneamento, transportes e tecnologia da construção. Além disso, oferece 17 créditos em optativas específicas e até 24 créditos em disciplinas livres, com forte ênfase em atividades extensionistas como o projeto integrador e ações comunitárias.

A USP POLI adota um modelo em que o ciclo básico é comum até o 4º semestre, com disciplinas como cálculo e física, e a partir do 5º semestre os alunos escolhem módulos especializados em áreas como estruturas e geotecnia. Oferece 24 créditos em optativas livres e a possibilidade de dupla formação com a FAU-USP (Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP). Já a UFRJ oferece um ciclo básico focado em cálculo, física e estatística, enquanto seu ciclo profissionalizante abrange áreas como transportes, recursos hídricos e tecnologia da construção, além de permitir projetos e intercâmbios que validam créditos de extensão.

A UFSC e a UNICAMP apresentam abordagens semelhantes, com ênfase em núcleos técnicos especializados. A UFSC oferece opções como Geotecnia e Obras Marítimas e promove atividades de extensão por meio de programas como o PET e Escritório Piloto (EPEC). A UNICAMP, por sua vez, apresenta um ciclo básico com cálculo e geociências, enquanto seus alunos podem se

aprofundar em temas como saneamento e sustentabilidade. Ambas as universidades se destacam pela forte integração de projetos sociais e acadêmicos com componentes extensionistas.

3.5 Análise dos PPCs das IES Selecionadas

Para possibilitar uma análise comparativa detalhada, os dados referentes aos Projetos Pedagógicos de Curso (PPCs) das Instituições de Ensino Superior (IES) selecionadas são apresentados nas Tabelas 3.5. A Tabela 3.5 reúne os parâmetros gerais dos PPCs, como a organização das cargas horárias entre atividades teóricas e práticas, a obrigatoriedade e a duração dos estágios, as diretrizes para o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), além das especificações relacionadas às atividades complementares e à articulação entre graduação e pós-graduação. Esses dados são essenciais para observar as diferentes abordagens adotadas pelas IES em sua formação de engenheiros civis.

Tabela 3.5. Dados Gerais dos PPCs.

Área	UNB	UFRJ	UFSC	UNICAMP	USP-POLI
Diferencia crédito aula teórica e prática?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Apresenta informações de estágios?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Obrigatoriedade do estágio?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Formato do TCC	Individual ou em Grupo	Individual ou em Grupo	Grupo	Individual	Individual ou em Grupo
Duração do TCC	180 h	180 h	144 h	60 h	90 h
Descreve atividades complementares?	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Apresenta lista de atividades complementares?	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
Classifica as atividades complementares com suas respectivas cargas horárias?	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
Duração das atividades complementares	60 h	-	-	60 h	-
Apresenta Diretrizes de pesquisa e extensão?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Apresenta relação entre o curso de engenharia civil e a extensão?	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Apresenta relação entre a graduação e a pós?	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM

A proposta pedagógica da UnB também enfatiza a interdisciplinaridade e a atuação prática desde os primeiros semestres. Projetos aplicados e atividades em comunidades locais compõem o núcleo de extensão, fomentando uma formação cidadã e tecnicamente robusta (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2022). A integração das atividades de extensão como parte das disciplinas obrigatórias diferencia a UnB das demais instituições analisadas, tornando a vivência com os problemas reais da sociedade parte intrínseca do processo formativo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2022). Além disso, o curso contempla ações estruturadas de acolhimento e nivelamento de estudantes ingressantes, com tutorias, oficinas e sistemas de apoio psicológico e acadêmico, medidas que têm como objetivo reduzir a evasão e melhorar o desempenho dos discentes nos primeiros semestres (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2022).

Na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a estrutura curricular mantém uma abordagem mais tradicional, com forte presença de disciplinas obrigatórias, que somam 85% da carga horária total (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2017). Apesar disso, observa-se um esforço recente de modernização por meio da inserção de atividades interdisciplinares e extensão em projetos vinculados a temas como sustentabilidade urbana, acessibilidade e inovação em materiais de construção (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2017). O PPC prevê disciplinas optativas voltadas à formação complementar, como "Engenharia e Cidadania" e "Inovação Tecnológica", que, embora não estejam integradas ao núcleo obrigatório, têm sido estrategicamente utilizadas para desenvolver competências transversais nos alunos (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2017). A carga horária destinada à extensão na UFRJ é de 10%, em conformidade com a Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019. Essa carga é normalmente cumprida por meio de participação em programas temáticos, ações comunitárias e projetos interdepartamentais, os quais têm ganhado visibilidade em editais de fomento interno. Um ponto ainda em desenvolvimento refere-se ao sistema de acompanhamento de egressos. A UFRJ também não explicita no PPC diretrizes claras sobre sistemas de nivelamento para ingressantes, o que contrasta com outras instituições como a UnB e a UFSC, que já possuem programas consolidados neste aspecto (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2017; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2020).

No caso da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), um diferencial relevante é a possibilidade de o estudante obter certificados em áreas de concentração específicas, desde que cumpra uma carga mínima de créditos em disciplinas temáticas (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2022).. Essa estratégia fomenta a personalização da formação e incentiva o protagonismo discente, permitindo que os alunos construam trajetórias formativas alinhadas com suas metas profissionais (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2022)..

Além disso, a UNICAMP apresenta carga horária expressiva em Hidráulica e Saneamento (840 horas), o que revela uma aposta clara na formação de engenheiros com competência técnica aprofundada em infraestrutura hídrica, um campo com crescente demanda em função das mudanças climáticas e da urbanização acelerada (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2022)..

Por sua vez, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) se diferencia ao oferecer trilhas de formação flexíveis dentro de linhas como transportes, estruturas e saneamento (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2020). A universidade também possui o menor percentual de carga obrigatória (76%) e uma carga significativa de optativas (24%), além de um processo bem estruturado de acolhimento e integração discente (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2020). Seu PPC explicita ações voltadas à permanência estudantil, como programas de tutoria, nivelamento em disciplinas básicas e apoio à saúde mental. A carga horária destinada ao estágio supervisionado (180 horas) e ao TCC (144 horas) está em conformidade com as exigências legais, sendo o TCC desenvolvido obrigatoriamente em grupo, o que reforça o trabalho colaborativo (BRASIL, 2019).

Por fim, a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP-POLI) apresenta o PPC com a maior carga horária entre as instituições analisadas, somando 4.725 horas (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). A estrutura do curso está organizada em módulos acadêmicos com diferentes ênfases, permitindo ao aluno se especializar em uma área específica da engenharia civil ou seguir um caminho mais generalista (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). A flexibilização curricular se dá por meio da oferta de optativas a partir do quinto semestre e da possibilidade de dupla diplomação com outros cursos da universidade, como Arquitetura e Urbanismo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). A USP-POLI também se destaca pela forte inserção da inovação e da internacionalização, com programas de

intercâmbio ativos e disciplinas voltadas à formação empreendedora, como “Engenharia, Inovação e Sociedade” (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). Além disso, a instituição lidera em termos de extensão, com 15% da carga horária total dedicada a essa finalidade. As ações de extensão são integradas a laboratórios temáticos e centros de pesquisa, criando oportunidades de aprendizado que extrapolam a sala de aula e conectam os alunos com demandas reais de empresas e comunidades. A POLI apresenta ainda um sistema robusto de acompanhamento de egressos, com dados coletados por meio de plataformas institucionais e reuniões periódicas com ex-alunos, contribuindo para a avaliação contínua do curso (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018).

4. CONCLUSÃO

De forma geral, foi possível observar que os Projetos Pedagógicos de Curso (PPCs) das universidades analisadas já incorporam boa parte das diretrizes propostas pela Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019, especialmente no que diz respeito à organização em ciclos, à obrigatoriedade de estágio e TCC, e à inserção das atividades de extensão na formação dos engenheiros civis. No entanto, ainda existem pontos que necessitam de atenção e melhorias.

Entre os principais aspectos a serem adequados, destacam-se a ampliação da interdisciplinaridade, o fortalecimento das ações de acolhimento e nivelamento para ingressantes, e a criação ou aprimoramento de mecanismos de acompanhamento de egressos. Além disso, embora haja avanços no estímulo à aprendizagem ativa e à flexibilidade curricular, nem todas as instituições tratam com clareza temas como segurança e saúde no trabalho, inovação e atuação empreendedora, que são centrais nas novas DCNs.

Por outro lado, nota-se o esforço das universidades em oferecer opções de personalização da trajetória acadêmica dos estudantes, seja por meio de disciplinas optativas, módulos livres ou certificações específicas. A valorização da extensão e a conexão com a realidade social também têm ganhado espaço nos PPCs, contribuindo para uma formação mais ampla e alinhada às demandas atuais da sociedade.

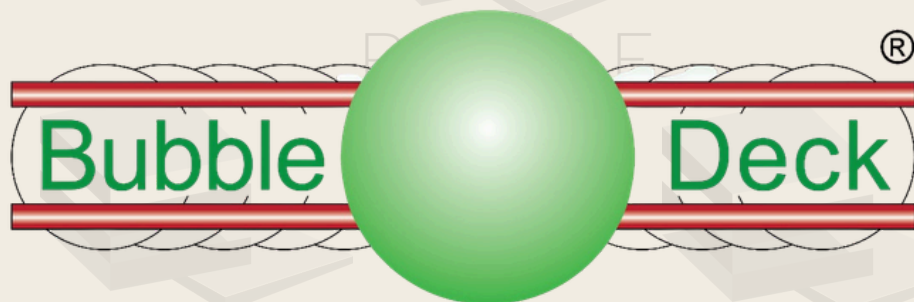
AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos, pelo suporte dado a esta pesquisa, à

Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB), ao Programa de Educação Tutorial (PET) de Engenharia Civil da UnB, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF). Agradecem, também, ao professor Rodrigo de Melo Lameiras, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB), pela orientação, suporte acadêmico e contribuições essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Brasil. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. (2019). *Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia*. Diário Oficial da União, Brasília, 23 abr. 2019, Seção 1, p. 46.
- Brasil. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. (2002). *Resolução CNE/CES nº 11, de 11 de março de 2002. Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Engenharia*. Diário Oficial da União, Brasília, 9 abr. 2002, Seção 1, p. 32.
- Brasil. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. (2024). *Resolução CNE/CP nº 2, de 2024*.
- Brasil. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. (2024). *Resolução CNE/CP nº 4, de 2024*.
- Brasil. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep). (2024). *Pontuação das Faculdades – IGC 2023*. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/indicadores-educacionais/indicadores-de-qualidade-da-educacao-superior>. Acesso em: fev. 2025.
- Confea – Conselho Federal de Engenharia e Agronomia. (2024). *Engenharia e Desenvolvimento Nacional*. Brasília: Confea.
- Universidade de Brasília (UnB). Faculdade de Tecnologia. (2022). *Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil*. Brasília: UnB.
- Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). (2022). *Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil*. Campinas: UNICAMP.
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). (2017). *Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil*. Rio de Janeiro: UFRJ.
- Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). (2020). *Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil*. Florianópolis: UFSC.
- Universidade de São Paulo (USP). Escola Politécnica. (2018). *Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil*.

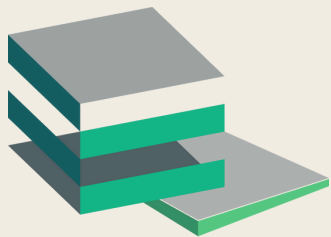


Construindo mais com menos



TECNA

CONSTRUTORA

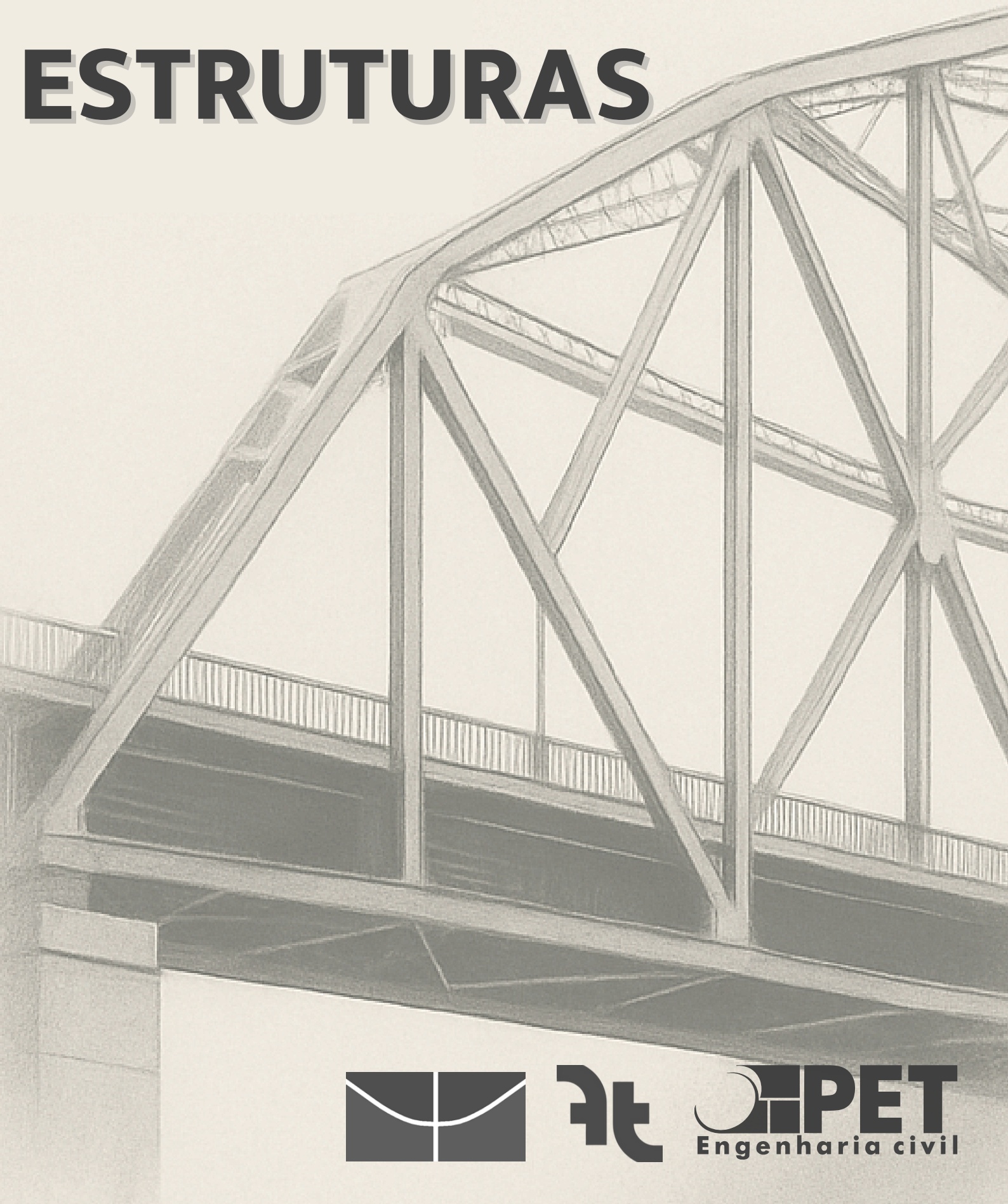


REPAE

Revista Científica de Pesquisa
Aplicada à Engenharia

Volume 8, 2025 | ISSN:2595-0002

ESTRUTURAS



DESENVOLVIMENTO DE UMA CALCULADORA PARA COMBINAÇÃO DE AÇÕES EM ANÁLISE ESTRUTURAL

Matheus C. B. Jorge*

Egresso do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental / Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT / Sinop

Albertine O. Bizio

Egresso do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental / Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT / Sinop

Italo D. Leal

Discente do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental / Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT / Sinop

Rodrigo S. Zandonadi

Docente do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental / Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT / Sinop

Everton A. P. Batelo

Docente do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental / Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT / Sinop

RESUMO

Com o avanço da tecnologia, atualmente há uma grande variedade de recursos computacionais que podem otimizar diversos processos na engenharia estrutural. Em particular, na área de análise estrutural, destacam-se softwares pagos, que geralmente oferecem funcionalidades avançadas para automatizar processos de cálculo e dimensionamento, proporcionando resultados mais rápidos e precisos. Essa automação tem se mostrado uma ferramenta eficaz para agilizar as etapas de projeto, reduzir erros humanos e aumentar a eficiência no desenvolvimento de soluções estruturais. Este trabalho trata-se do desenvolvimento de uma ferramenta computacional para automatizar o processo de combinação de ações (carregamentos) em análise estrutural, visando preencher lacunas nos processos que antecedem a análise propriamente dita. Baseado nas normas de ações e segurança, o programa foi desenvolvido na plataforma MATLAB e tem como objetivo auxiliar na verificação de projetos estruturais de maneira rápida e autônoma. A ferramenta, com interface gráfica intuitiva, permite que os usuários realizem a combinação das ações de forma eficiente e possam ainda propor diferentes cenários de carga para análise. Destina-se principalmente ao suporte didático na disciplina de Estruturas para Construções Rurais, proporcionando aos alunos a possibilidade de verificar e ajustar seus cálculos, tanto durante quanto após as aulas. Para a validação da aplicação desenvolvida, são apresentados neste artigo três exemplos cujos resultados coincidem com aqueles encontrados na literatura consultada. Destaca-se, ainda, que a utilização da calculadora em sala de aula contribuiu para a otimização do tempo e para a consolidação prática dos conceitos de análise estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: Análise estrutural, Combinação de ações, Ferramenta computacional, Automação de cálculos.

ABSTRACT

With technological advancements, there is currently a wide range of computational resources available that can optimize various processes in structural engineering. In the field of structural analysis, commercial software stands out for offering advanced functionalities that automate calculation and design procedures, delivering faster and more accurate results. This automation has proven to be an effective tool for streamlining project phases, reducing

*Autor correspondente: jorge.batista2@hotmail.com

human error, and increasing the efficiency of structural solutions. This work presents the development of a computational tool designed to automate the process of load combination in structural analysis, addressing gaps in the stages preceding the actual design process. Based on standards related to structural actions and safety, the program was developed using the MATLAB platform and aims to assist in the structural verification of projects in a fast and autonomous manner. The tool, featuring an intuitive graphical interface, allows users to efficiently perform load combinations and explore different loading scenarios. It is primarily intended as an educational aid for the course "Structures for Rural Buildings," enabling students to verify and adjust their calculations both during and after class sessions. To validate the developed application, this article presents three examples whose results are consistent with those found in the referenced literature. It is also worth noting that the use of the calculator in the classroom contributed to time optimization and the practical consolidation of structural analysis concepts.

KEYWORDS: Structural analysis, Load combination, Computational tool, Calculation automation.

1. INTRODUÇÃO

Todas as áreas da engenharia fazem uso direto de recursos computacionais para obter, monitorar e automatizar dados. A aplicação de ferramentas computacionais no desenvolvimento de projetos tornou-se quase universal, e, portanto, sua utilização também deve ser incorporada no ambiente acadêmico.

As combinações de ações são um dos aspectos essenciais na análise estrutural, pois envolvem a consideração simultânea de diferentes tipos de carregamentos que podem atuar sobre uma estrutura, como cargas permanentes, variáveis e acidentais. A correta combinação dessas ações visam garantir a segurança e o desempenho da estrutura em diversas condições de operação. As normas técnicas, como a Norma de Ações e Segurança nas Estruturas (ABNT NBR 8681:2003), fornecem diretrizes para essa combinação.

No contexto educacional, é importante que os alunos compreendam não apenas os conceitos teóricos por trás das combinações de ações, mas também a aplicação prática desses conceitos. Segundo Netto (2005), o indivíduo precisa ser criativo, participativo e capaz de se adaptar às constantes mudanças da sociedade. Nesse sentido, a incorporação de tecnologias em sala de aula, como o uso de softwares e recursos computacionais, torna-se necessária para estimular nos estudantes uma reflexão crítica sobre como, quando e por que utilizar essas ferramentas em suas atividades acadêmicas e futuras práticas profissionais.

Além disso, essa automação pode tornar o aprendizado menos massante, permitindo que os alunos se concentrem mais nos fundamentos da análise estrutural, deixando os cálculos repetitivos para o programa.

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver

uma ferramenta computacional capaz de automatizar o processo de combinação de ações (carregamentos) em análise estrutural, visando suprir lacunas nas etapas preliminares ao dimensionamento propriamente dito. A aplicação, desenvolvida na plataforma MATLAB é fundamentada na ABNT NBR 8681:2003 de ações e segurança nas estruturas.

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma: na Seção 2, apresenta-se uma revisão teórica sobre os tipos de ações atuantes nas estruturas e os princípios dos estados limites. Na Seção 3, é descrita a ferramenta computacional desenvolvida, abordando seu funcionamento, interface e lógica de cálculo. Por fim, a Seção 4 apresenta aplicações numérica com o objetivo de validar e ilustrar o uso prático da calculadora desenvolvida. Para essa validação, são discutidos três exemplos cujos resultados demonstraram concordância com aqueles encontrados na literatura.

2. COMBINAÇÃO DE AÇÕES EM ANÁLISE ESTRUTURAL

2.1 Segurança Estrutural

Uma análise estrutural cuidadosa para a concepção das estruturas empregadas na construção civil, colabora para um projeto seguro e econômico.

Ao longo dos anos foram se buscando metodologias para se avaliar e quantificar a segurança estrutural. Inicialmente, sendo estimada apenas pelos sucessos e insucessos de estruturas já concebidas e posteriormente passando a experimentos laboratoriais e introdução de coeficientes de ponderação para a amplificação das ações e a redução das resistências, de modo que os projetos possuam uma reserva de resistência e possam manter sua integridade em situações atípicas a de projeto. Nesse contexto, surge inicialmente o

método das tensões admissíveis e posteriormente o método dos estados limites.

2.1.1 Método dos Estados Limites

O dimensionamento de elementos estruturais com base no método dos Estados Limites teve origem entre os anos de 1947 e 1949. Esse método consiste em definir limites aceitáveis de resistência e utilização, garantindo que a estrutura opere de forma segura e eficiente durante sua vida útil, sem apresentar falhas ou comprometimentos em condições normais de uso (MUNAIA NETO *et al.*, 2015).

De acordo com a Norma Brasileira, ABNT NBR 8681:2003, os estados limites são classificados em duas categorias. A primeira categoria (Estados Limites Últimos) levam em consideração a falha ou colapso estrutural como ruptura ou instabilidade por deformação, enquanto a segunda categoria (Estados Limites de Serviço) está relacionada as deformações que não causam colapso, mas podem afetar às condições de uso da edificação.

Na análise estrutural, devem ser consideradas todas as ações que possam causar efeitos significativos para a segurança da estrutura em questão, levando-se em conta os possíveis estados limites últimos e de serviço (ABNT NBR 6118:2023).

As verificações de segurança das estruturas, segundo o Método dos Estados Limites, são realizadas por meio da comparação entre os valores de cálculo dos esforços atuantes (S_d) e os limites estabelecidos para cada tipo de estado limite. Esses esforços são determinados a partir das combinações de ações que representam as possíveis condições de carregamento da estrutura.

No caso do Estado Limite Último (ELU), os valores solicitantes de cálculo não podem ultrapassar a resistência de cálculo dos elementos estruturais, garantindo a integridade e a segurança da estrutura contra colapsos. Já para o Estado Limite de Serviço (ELS), é necessário assegurar que os deslocamentos permaneçam dentro de limites estabelecidos para não comprometer a funcionalidade, o conforto dos usuários ou a aparência da estrutura. Assim, a correta determinação das combinações de ações é essencial processo de concepção e dimensionamento estrutural.

Uma edificação deve ser projetada considerando diferentes combinações ponderadas de ações, de forma a garantir que os efeitos estruturais mais desfavoráveis possíveis sejam contemplados no dimensionamento (KIMURA, 2018).

As diferentes ações que atuam sobre uma estrutura possuem naturezas distintas quanto à sua ocorrência e variabilidade no tempo, exigindo, portanto, que sejam combinadas adequadamente para representar as possíveis situações de carregamento ao longo da vida útil da construção.

A ABNT NBR 8681:2003, norma que estabelece os critérios para combinações de ações em estruturas, classifica essas ações em três categorias principais, com base em sua variabilidade temporal:

- Ações permanentes: caracterizam-se por apresentar valores constantes ou com variações muito pequenas durante toda a vida útil da estrutura. Incluem o peso próprio da estrutura, dos elementos construtivos definitivos, de equipamentos fixos, além de esforços como empuxos de terra ou água. Podem ser diretas, quando se referem a pesos e pressões aplicados continuamente, ou indiretas, relacionadas a efeitos como retração, fluência e recalques diferenciais.

- Ações variáveis: são aquelas que apresentam grande variação em intensidade e frequência ao longo do tempo. Envolvem, por exemplo, sobrecargas de uso, vento e variações térmicas.

- Ações excepcionais: referem-se a eventos raros e imprevisíveis, como explosões, impactos de veículos e incêndios. Apesar da baixa probabilidade de ocorrência, essas ações são contempladas em combinações específicas para garantir a segurança da estrutura em situações extremas.

Devido à variabilidade, o valor de cálculo dessas ações deve ser ponderado por coeficientes previamente estabelecidos na própria NBR 8681:2003, onde levam em consideração a classe de combinação, o tipo de ação e seu efeito para a estrutura (desfavorável ou favorável).

Esses coeficientes têm o papel de ampliar ou reduzir a influência de cada ação no cálculo estrutural, levando em consideração o tipo de situação analisada, e varia também conforme o estado limite considerado.

Para os Estados Limites Últimos (ELU), que visam garantir a segurança estrutural, as combinações podem ser normais, de construção e raras. As combinações normais representam as condições usuais de uso da estrutura, envolvendo ações permanentes e ações variáveis com alta probabilidade de ocorrência, sendo amplamente utilizadas no dimensionamento padrão. As combinações de construção são aplicadas durante fases transitórias da obra, como montagem ou concretagem, quando a estrutura ainda não está

completamente estabilizada, exigindo critérios específicos de segurança. Já as combinações raras consideram a atuação simultânea de ações variáveis em suas intensidades máximas prováveis, sendo empregadas em análises mais conservadoras, especialmente em estruturas que exigem níveis elevados de segurança.

Para os Estados Limites de Serviço (ELS), cujo objetivo é garantir o desempenho adequado da estrutura em termos de conforto, funcionalidade e aparência ao longo do tempo, as combinações de ações são classificadas em quase permanentes, frequentes e raras. As combinações quase permanentes consideram apenas as ações que atuam durante a maior parte da vida útil da estrutura, sendo utilizadas especialmente na verificação de efeitos de longa duração, como fluência, retração e recalques diferenciais. As combinações frequentes incluem ações com ocorrência regular ao longo do tempo, sendo aplicadas em verificações relacionadas a vibrações, fissuração ou deslocamentos excessivos sob condições normais de uso. Já as combinações raras são empregadas para avaliar situações eventuais de maior intensidade, como deformações excepcionais, e garantir que os limites de serviço não sejam ultrapassados mesmo em condições menos comuns, mas ainda possíveis de ocorrer durante o uso da edificação.

3. CALCULADORA PARA COMBINAÇÃO DE AÇÕES

Neste artigo, foi desenvolvido um programa computacional em ambiente MATLAB voltado para a geração automática de combinações de ações estruturais, com foco específico no Estado Limite Último (ELU). A ferramenta foi projetada para aplicar as combinações normais, conforme estabelecido na ABNT NBR 8681:2003, levando em conta as ações permanentes e variáveis em condições típicas de uso.

O MATLAB destaca-se amplamente no campo da engenharia como um dos principais ambientes de desenvolvimento voltados à realização de cálculos científicos, análise numérica e manipulação matricial. O ambiente oferece flexibilidade ao usuário, permitindo a criação de rotinas personalizadas que podem ser executadas diretamente na plataforma ou exportadas como aplicações independentes, gerando arquivos executáveis e ampliando a aplicabilidade dos projetos desenvolvidos (CHAPMAN, 2010).

No contexto acadêmico e educacional, o MATLAB é constantemente utilizado como recurso didático para o ensino de disciplinas técnicas, como análise estrutural, processamento de sinais, entre outras. Por

meio da criação de conteúdos interativos, visualizações dinâmicas e interfaces gráficas intuitivas, é possível tornar o processo de aprendizagem mais atrativo e eficaz para os estudantes, promovendo maior engajamento e compreensão dos conceitos abordados (MARCHETTO, 2016).

O desenvolvimento do programa foi realizado utilizando o GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) do MATLAB, uma ferramenta integrada que facilita a criação de interfaces gráficas por meio de elementos visuais pré-configurados, como botões, caixas de texto, rótulos estáticos, menus e outros componentes interativos. Essa abordagem permitiu uma construção mais intuitiva da interface, tornando o uso da ferramenta mais acessível.

O algoritmo principal foi projetado para interpretar e processar a equação de combinação de ações normais para o Estado Limite Último (ELU), conforme especificado pela ABNT NBR 8681:2003 (Equação 1), realizando os cálculos automaticamente a partir dos dados inseridos pelo usuário.

$$Fd = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (1)$$

Em que:

Fd – Valores de cálculos das ações;

γ_{gi} – Coeficiente de ponderação para ações permanentes;

$F_{Gi,k}$ – Valores característicos das ações permanentes;

γ_{q1} – Coeficiente de ponderação para ações variáveis;

$F_{Q1,k}$ – Valor característico da ação variável considerada principal para combinação;

ψ – Fator de combinação para ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ – Valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal;

A programação desenvolvida para a ferramenta foi estruturada, utilizando componentes gráficos como caixas de texto (*edit text*) para entrada e exibição de dados, e botões de comando (*push buttons*) responsáveis pela execução das rotinas computacionais. Ao serem acionados, esses botões iniciam uma sequência de cálculos e interações que possibilita a determinação automática dos valores máximos e mínimos de carregamento da estrutura

analisada, com base nas combinações normais para o Estado Limite Último.

Com o intuito de tornar a utilização do software mais intuitiva, o programa foi acompanhado de um manual do usuário e mensagens de alerta para possíveis erros de entrada ou execução, garantindo maior segurança e eficiência no uso da ferramenta, especialmente para alunos em fase de aprendizado.

A estrutura funcional do programa pode ser visualizada na Figura 1.

E na Figura 2, é possível visualizar a tela principal do sistema, onde, seguindo as instruções é possível calcular as combinações de ações normais para ELU.

Vale destacar ainda que, na interface da calculadora, não foram especificadas unidades de medida, o que confere maior flexibilidade ao usuário, permitindo que sejam combinados diferentes tipos de carregamentos ou esforços solicitantes, desde que sejam utilizadas unidades compatíveis entre si, garantindo a coerência dos resultados obtidos.

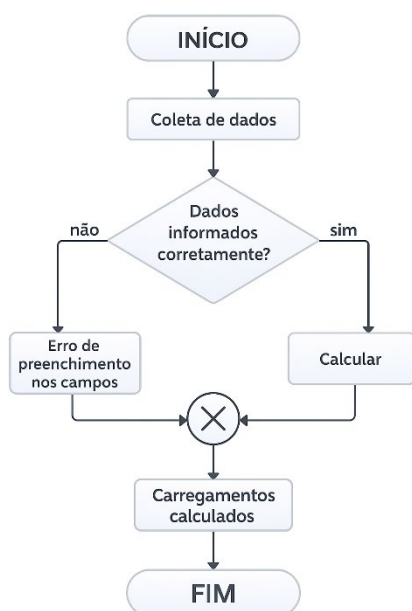


Figura 1. Fluxograma APP COMB.
Fonte: Autores.

Conforme mencionado anteriormente, o aplicativo inclui um manual para consulta, o qual pode ser acessado ao clicar no ícone de interrogação (?). Isso facilita o entendimento dos cálculos realizados.

Os campos destinados à inserção dos carregamentos e de seus respectivos coeficientes foram projetados de forma que, no momento em que o usuário solicitar o cálculo, o programa identifique automaticamente qualquer divergência entre a

quantidade de carregamentos e coeficientes informados. Nesses casos, mensagens de alerta são exibidas.

Figura 2. Tela principal do APP COMB.
Fonte: Autores.

4. EXEMPLOS NUMÉRICOS

No intuito de verificar a eficácia da ferramenta proposta, esta seção apresenta aplicações numéricas que demonstram o funcionamento da calculadora.

O primeiro exemplo é baseado no livro *Segurança nas Estruturas de Munaiar Neto et. al.* (2015). O caso abordado ilustra a utilização da combinação de ações para o Estado Limite Último (ELU), conforme os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 8681:2003. Esse exemplo tem caráter didático e serve como referência para compreender, o processo de verificação estrutural em situações típicas de carregamento.

Para a viga ilustrada na Figura 3 são consideradas as seguintes ações (valores característicos nominais):

$g=20$ kN/m (permanente): $\gamma_g=1,4$ ou $\gamma_g=1,0$
 $q_1=15$ kN/m (sobrecarga) : $\gamma_q=1,5$ e $\psi_0=0,7$
 $q_2=15$ kN/m (vento 1) ;
 $q_3=-20$ kN/m (vento 2): $\gamma_q=1,40$ e $\psi_0=0,60$

Os resultados obtidos pela calculadora pra o primeiro exemplo estão apresentados na Figura 4, enquanto o cálculo passo a passo é mostrado a seguir, detalhando cada etapa do processo.

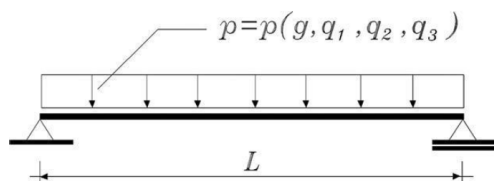


Figura 3. Viga e ações atuantes.
Fonte: MUNAIAR NETO et. al. (2015).

Figura 4. Exemplo 01 de aplicação.
Fonte: Autores.

Caso (1) : Sobrecarga como carregamento principal
 $F_d = (1,4 \times 20) + (1,5 \times 15)$

$$+ (1,4 \times 0,6 \times 15) \Rightarrow F_d = 63,1 \text{ kN/m}$$

Caso (2) : Vento de sobrepressão como carregamento principal

$$F_d = (1,4 \times 20) + (1,4 \times 15)$$

$$+ (1,5 \times 0,7 \times 15) \Rightarrow F_d = 64,75 \text{ kN/m}$$

Caso (3) : Vento de sucção como carregamento principal

$$F_d = (1,0 \times 20) + (1,4 \times -20) \Rightarrow F_d = -8 \text{ kN/m}$$

Os valores obtidos pela calculadora coincidiram com os resultados previstos na literatura, comprovando que a implementação da ferramenta reflete o procedimento de verificação estrutural.

O segundo exemplo refere-se a uma aplicação

apresentada no livro Estruturas de Aço, Dimensionamento Prático, de Walter Pfeil e Michèle Pfeil (2022). Trata-se da análise de uma diagonal de treliça de telhado submetida a esforços normais de tração (+) e compressão (-), resultantes da combinação de diferentes carregamentos:

$N_g = 1 \text{ kN}$ (permanente): $\gamma_g = 1,25$ ou $\gamma_g = 1,0$

$N_{v1} = 1,5 \text{ kN}$ (vento-sobrepressão): $\gamma_q = 1,40$ e $\psi_0 = 0,60$

$N_{v2} = -3 \text{ kN}$ (vento-sucção): $\gamma_q = 1,40$

$N_q = 0,5 \text{ kN}$ (sobrecarga): $\gamma_q = 1,5$ e $\psi_0 = 0,5$

Os resultados obtidos pela calculadora para o segundo exemplo estão apresentados na Figura 5, enquanto o cálculo passo a passo é mostrado a seguir, detalhando cada etapa do processo.

Caso (1) : Sobrecarga como carregamento principal

$$N_d = (1,25 \times 1) + (1,5 \times 0,5)$$

$$+ (1,4 \times 0,6 \times 1,5) \Rightarrow N_d = 3,26 \text{ kN}$$

Caso (2) : Vento de sobrepressão como carregamento principal

$$N_d = (1,25 \times 1) + (1,4 \times 1,5)$$

$$+ (1,5 \times 0,5 \times 0,5) \Rightarrow N_d = 3,725 \text{ kN}$$

Caso (3) : Vento de sucção como carregamento principal

$$N_d = (1,0 \times 1) + (1,4 \times -3) \Rightarrow N_d = -3,2 \text{ kN}$$

Figura 5. Exemplo 02 de aplicação.
Fonte: Autores.

O terceiro exemplo também se refere a uma aplicação apresentada no livro Estruturas de Aço, Dimensionamento Prático, de Walter Pfeil e Michèle Pfeil (2022). Trata-se da análise dos momentos fletores gerados por diferentes tipos de carregamentos em uma viga de um edifício residencial:

$M_{g1}=10$ kNm (permanente): $\gamma_g=1,25$

$M_{g2}=50$ kNm (permanente): $\gamma_g=1,50$

$M_v=20$ kNm (vento-sobrepresão): $\gamma_q=1,40$ e $\psi_0=0,60$

$M_q=30$ kNm (sobrecarga): $\gamma_q = 1,5$ e $\psi_0=0,70$

Os resultados obtidos pela calculadora pra o terceiro exemplo estão apresentados na Figura 6, enquanto o cálculo passo a passo é mostrado a seguir, detalhando cada etapa do processo.

Caso (1) : Sobrecarga como carregamento principal

$$M_d = (1,25 \times 10) + (1,5 \times 30) \\ + (1,4 \times 0,6 \times 20) \Rightarrow M_d \\ = 149,3 \text{ kNm}$$

Caso (2) : Vento de pressão como carregamento principal

$$M_d = (1,25 \times 10) + (1,4 \times 20) \\ + (1,5 \times 0,7 \times 30) \Rightarrow M_d \\ = 147,0 \text{ kNm}$$

Figura 6. Exemplo 03 de aplicação.
Fonte: Autores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de ferramentas computacionais para automatizar processos, como a combinação de ações

em análise estrutural, oferece uma abordagem mais eficiente e menos propensa a erros. A ferramenta desenvolvida neste trabalho pode ser aplicada de maneira prática no contexto educacional, proporcionando aos alunos uma experiência mais dinâmica e interativa. Ao automatizar as etapas iniciais de verificação estrutural, a ferramenta permite que os estudantes se concentrem no entendimento dos conceitos fundamentais, eliminando a necessidade de realizar cálculos repetitivos.

A validação da ferramenta, apresentou resultados consistentes. No entanto, é importante ressaltar que, embora o programa seja eficiente na resolução deste tipo de problema, a visão crítica do engenheiro continua sendo essencial para a interpretação dos dados gerados e a tomada de decisões mais assertivas.

Como sugestões para futuras melhorias, propõe-se a criação de abas adicionais para a resolução de outros tipos de cálculos estruturais, além da geração automática de memoriais de cálculo. Outra possibilidade seria a migração da ferramenta para o ambiente Python, o que tornaria o aplicativo mais acessível e integrável com outras tecnologias amplamente utilizadas na área da engenharia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelo apoio acadêmico durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118. (2023). *Projeto de estruturas de concreto*, Rio de Janeiro, 242 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8681. (2003). *Ações e Segurança nas estruturas – Procedimento*, Rio de Janeiro, 15 p.
- Chapman, S.J. (2010). *Programação em MATLAB para engenheiros*, Cengage Learning, São Paulo, 432 p.
- Kimura, A. (2018). *Informática aplicada a estruturas de concreto armado*, 2ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, 416 p.
- Pfeil, W., e Pfeil, M. (2022). *Estruturas de aço: Dimensionamento Prático*, 9ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 360 p.
- Marchetto, R. (2016). *Utilização de software MATLAB como recurso tecnológico de aprendizagem na transformação de matrizes em imagens*, Revista Revemat, Vol. 11, p. 118-130.
- Munaiar Neto, J., SALES, J. J., Malite, M. (2015). *Segurança nas estruturas*, 2ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 136p.
- Netto, A. A. O. (2005). *Novas tecnologias & universidade: da didática tradicionalista à inteligência artificial: desafios e armadilhas*. 1ª ed., Vozes, Petrópolis, 248 p.

ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DE PERFIS FORMADOS A FRIO TIPO Z COM ALMA ENRIJECIDA POR MEIO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA: CORTANTE E FLEXÃO

Alessandra Roma Vieira da Silva*

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Brasília/Brasil

Almir Benedito de Lima Júnior

Universidade de Brasília/ Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil/Brasília/Brasil

Guilherme Santana Alencar

Universidade de Brasília/ Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil/Brasília/Brasil

RESUMO

Perfis formados a frio são muito utilizados em construções metálicas, mas devido a sua esbeltez sofrem instabilidade estrutural. A fim de melhorar o desempenho contra flambagem, uma nova seção com geometria melhorada por enrijecedores de borda e de alma foi lançada no mercado brasileiro, a ZPRO da Isoeste Metálica®. Entretanto, há pouco conhecimento sobre dimensionamento na literatura técnica. Esse trabalho de pesquisa tem como objetivo a análise do comportamento da terça submetida a esforços de cisalhamento e momento fletor através de ensaios experimentais e numéricos, utilizando o Método da Resistência Direta previsto na norma AISI S100 (2016) e o software Thin-Wall-2 para Método Semi-Analítico das Faixas Finitas (MSAFF), com foco na flambagem local. Ensaios de três pontos com três alturas de terças foram conduzidos em setup que preveniu flambagens globais e distorcionais, por meio de cantoneiras e posicionamento das terças. O resultado da pesquisa foi satisfatório, ressaltando a importância do estudo da interação momento-cortante e indicando uma norma conservadora.

PALAVRAS-CHAVE: Seção Z Perfil Formado a Frio, Flambagem Local Elástica, Método da Resistência Direta, Método das Faixas Finitas Semi-analítico, Cisalhamento e Flexão.

ABSTRACT

Cold-formed steel profiles are widely used in steel structures; however, due to their slenderness, they are susceptible to structural instability. In order to improve buckling performance, a new section with enhanced geometry through edge and web stiffeners was introduced to the Brazilian market, the ZPRO section by Isoeste Metálica®. Nevertheless, there is limited knowledge in the technical literature regarding its design. This research aims to analyze the behavior of purlins subjected to shear force and bending moment through experimental and numerical studies, using the Direct Strength Method prescribed by AISI S100 (2016) and the Thin-Wall-2 software based on the Semi-Analytical Finite Strip Method (SAFSM), with emphasis on local buckling. Three-point bending tests were carried out on purlins with three different depths, using a test setup that prevented global and distortional buckling through the use of angle braces and appropriate purlin positioning. The results were satisfactory, highlighting the importance of studying the moment-shear interaction and indicating that the design standard provides conservative predictions.

KEYWORDS: Cold-Formed Z Section, Local Buckling, Direct Strength Method, Semi-Analytical Finite Strip Method, Shear and Bending

*Alessandra: alessandrromacivil@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As terças são elementos metálicos e amplamente utilizados em coberturas para suportar cargas e transferi-las à estrutura principal, garantindo estabilidade, especialmente em grandes vãos como galpões e estádios. O processo de produção de terças de perfil formado a frio que envolve o processo de dobras, no qual é realizado por meio de prensas, ou pelo processo de perfiladeira, que envolve um processo contínuo em que a chapa de aço passa por uma série de cilindros até a seção original.

Ao longo das últimas décadas, a engenharia demanda a otimização de materiais para um uso mais consciente e econômico em que mantém a segurança e a estabilidade (Wei-Wen Yu, Helen Chen, 2020). Dessa forma, os perfis formados a frio (Figura 1.1) alavancaram a sua significância na área devido às características físicas, como leveza e esbeltez, e estruturais, por exemplo alta relação resistência/peso e capacidade de vencer grandes vãos (Silva, Edson Lubas; Pierin; Pignatta, 2014).



Figura 1.1. Perfis formados a frio.
Fonte: Juliana Santos Wagner, 2019.

Não obstante, a precoce instabilidade estrutural de perfis formados a frio não permite a plastificação total da seção, em razão à geometria do elemento (Silva, Edson Lubas; Pierin; Pignatta, 2014). A fim de melhorar o desempenho, a indústria vem desenvolvendo perfis Z com geometria complexa (com enrijecedores de borda e alma), de forma que o ganho da inércia ocorre pela forma da seção transversal, como a ZPRO® da Isoeste Metálica (Figura 1.2). O uso de enrijecedores de alma é uma prática consagrada e prevista na norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010), por contribuir para o aumento da eficiência estrutural. Contudo, os métodos e critérios específicos para seu dimensionamento ainda são pouco explorados na literatura técnica e a norma brasileira não aborda como obter a flambagem por cisalhamento para perfis com geometria complexa (Benedito et al., 2024).



Figura 1.2. Terça com geometria complexa ZPRO®.
Fonte: Isoeste Metálica

A fim de compreender o comportamento e a resistência de perfis formados a frio é utilizado o Método da Resistência Direta (MRD), que, a partir de estudos sobre instabilidade, oferece previsões mais precisas. Esse método foi incorporado ao American Iron and Steel Institute na norma AISI S100 para prever a resistência de terças submetidas à flexão e compressão, em 2004, como um método alternativo ao tradicional Método da Largura Efetiva (MLE), tornando-se um elemento-chave nos projetos de estruturas de aço.

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

Avaliar o comportamento estrutural de terças formadas a frio de seção Z com alma enrijecida submetida a esforços combinados de cisalhamento e momento fletor, com foco na resistência última e nos modos de flambagem local e por cisalhamento da alma, por meio de ensaios experimentais e comparação com as predições normativas.

Objetivo específico:

- Utilização da terça ZPRO® como corpo de prova a fim de propor um procedimento padronizado para o cálculo da resistência nominal ao cisalhamento aplicável ao projeto estrutural;
- Avaliar a precisão das previsões fornecidas pelo método normativo (MRD) em comparação aos resultados experimentais;
- Preencher a lacuna de seções Z com alma enrijecida na literatura técnica, oferecendo dados e modelos confiáveis que possam subsidiar futuras normas e aplicações estruturais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Diversos estudos investigaram terças Z de aço formado a frio. Yu e Schafer, (2005, 2003) evidenciaram que as resistências previstas no AISI não eram precisas como o Método da Resistência Direta (MRD), que apresentou previsões confiáveis. Pham et al. (2014) evidenciaram a importância da interação flexão-cisalhamento e o efeito positivo de travamentos na mesa comprimida em relação à rigidez e resistência. Ademais, Hui et al. (2016) avaliaram redistribuição de momentos em vigas contínuas, propondo o uso de conceitos de teoria plástica e o fator de redução (α) que considera esbeltez e razão vão/altura, aplicável ao ZPRO devido

a similaridade com o estudo dele na Zeta I. Mais recentemente, Almatrafi et al. (2021); Li & Young, 2023 e Silva & Malite, 2020 confirmaram que enrijecedores aumentam a resistência à flambagem, especialmente ao cisalhamento, e alteram os modos de falha, reforçando que o MRD é mais adequado que a largura efetiva e permitindo ajustes nas curvas para interações locais, como no caso de seções com cantoneiras que evitam flambagem distorcional.

2.1 Análise de estabilidade elástica

As espessuras delgadas das terças formadas a frio resultam em diversos modos de instabilidade estrutural, as quais são identificadas a partir da análise de estabilidade elástica de um perfil, que determina as tensões críticas. Nesse contexto, cada modo apresenta uma forma de deformação e um comprimento de meia onda característico associados, o que indica a ocorrência de flambagem local, distorcional ou global (Figura 2.1).

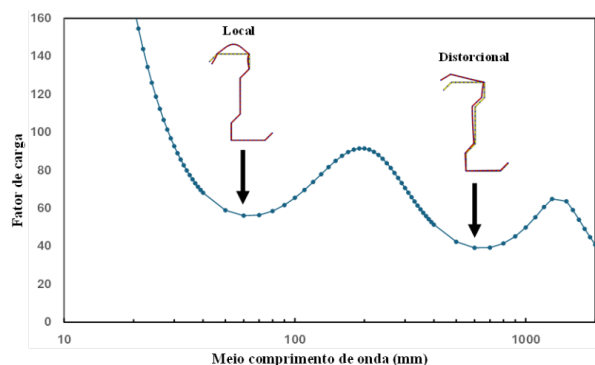


Figura 2.1. Curva de assinatura elástica
Fonte: relatório técnico Isoeste Metálica

Associada ao primeiro vale da curva de assinatura, a flambagem local ocorre em barras de menores comprimentos, em geral com ordem de grandeza da largura da alma (Silva, 2018). Ela ocorre sem translação ou mudança nos ângulos entre os elementos da terça, e é caracterizada por deslocamentos na direção normal ao plano da chapa. Em contrapartida, a distorcional ocorre em barras de comprimento intermediário, caracterizando-se pela rotação e translação do conjunto formado pela mesa comprimida e seu enrijecedor em relação à alma (Silva, 2018). Os modos de flambagem podem atuar em combinação, mas métodos como o de faixas finitas permitem separá-los. Além disso, as condições de contorno influenciam o comportamento estrutural, podendo resultar em momentos críticos mais conservadores (Trahair, 2018).

2.2 Método da Resistência Direta (MRD)

O Método da Resistência Direta é uma abordagem moderna para dimensionamento de PFF, a qual supera limitações do Método da Largura Efetiva (MLE) (Schafer, 2008). Baseia-se na determinação das tensões críticas de flambagem elástica e do momento de início escoamento da seção completa (M_y). Diferente do MLE, o MRD considera a interação entre elementos da seção, oferecendo maior precisão e depende de análises computacionais, como o Método das Faixas Finitas (MFF) e Método dos Elementos Finitos (MEF).

Conforme a AISI S100 (2016), o MRD calcula a resistência nominal à flexão usando a seção transversal bruta completa, com equações específicas para flambagem local e distorcional, sem processos iterativos. Para membros sem furos, a resistência à flambagem local é definida a partir da esbelteza reduzida (λ), considerando a razão entre o momento de flambagem global lateral-torção (M_{ne}) e o momento crítico elástico local (M_{crl}) conforme a equação:

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{M_{ne}}{M_{crl}}\right)} \quad (1)$$

A resistência nominal (M_{nl}) é então obtida da seguinte forma:

- Para membros com baixa esbelteza local ($\lambda \leq 0,776$):

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (2)$$

Assim, a flambagem local não é crítica, e a flambagem global limita a resistência da seção.

- Para membros com alta esbelteza local ($\lambda > 0,776$):

$$M_{nl} = \left[1 - 0,15 \cdot \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0,4}\right] \cdot \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0,4} \cdot M_{ne} \quad (3)$$

Ou seja, a resistência nominal reduz à medida que aumenta a esbelteza local do perfil, levando em conta a perda de capacidade resistente provocada pela instabilidade elástica da seção.

2.2 Resistência ao cortante de PFF

Quando a alma apresenta baixa razão h/t , o dimensionamento ao cisalhamento é governado pelo escoamento do material. Para almas sem enrijecedores e com alta razão h/t , a limitação ocorre por flambagem elástica. Já em almas com razão intermediária, a resistência é definida pela flambagem inelástica ao cisalhamento.

A resistência nominal ao cisalhamento (V_n) de membros fletidos é obtida a partir de dois parâmetros principais: a força crítica de flambagem elástica (V_{cr}) e a resistência ao escoamento da seção (V_y). De acordo com AISI S100 (2016), é possível calcular V_n da seguinte forma:

- Para $\lambda_v \leq 0,815$:

$$V_n = V_y = 0,6 A_w F_y \quad (4)$$

$$A_w = h_w$$

- Para $0,815 < \lambda_v \leq 1,227$:

$$V_n = 0,815 \cdot \sqrt{V_{cr} \cdot V_y} \quad (5)$$

- Para $\lambda_v > 1,227$:

$$V_n = V_{cr} = 0,904 E k_v \frac{t^3}{h} \quad (6)$$

Em que $\lambda_v = \sqrt{\frac{V_y}{V_{cr}}}$, E é o módulo de elasticidade do aço, h é a altura da porção plana da alma, t é a espessura da alma e k_v é o coeficiente de flambagem por cisalhamento de qualquer seção de PFF aberta com apenas uma alma e uma mesa comprimida com enrijecedor de borda. Para geometrias complexas, é necessário recorrer à métodos numéricos.

Para os que estão sujeitos a flexão e possuem enrijecedores transversais de alma (que o espaçamento não exceda o dobro da altura da alma), a resistência nominal ao cortante é determinada por:

- Para $\lambda_v \leq 0,776$:

$$V_n = V_y \quad (7)$$

- Para $\lambda_v \geq 0,776$:

$$V_n = \left[1 - 0,15 \cdot \left(\frac{V_{cr}}{V_y} \right)^{0,4} \right] \cdot \left(\frac{V_{cr}}{V_y} \right)^{0,4} \cdot V_y \quad (8)$$

3. METODOLOGIA

3.1 Análise numérica de estabilidade elástica de viga sujeita a cortante

As fórmulas analíticas da norma AISI S100 (2016) não atende a geometria complexa da ZPRO. Assim, recorre-se a métodos numéricos para determinar força crítica de flambagem elástica ao cisalhamento (V_{cr}). Neste trabalho, adota-se Método Semi-Analítico das Faixas Finitas (MSAFF), considerando extremidades simplesmente apoiadas. Implementou-se as propriedades geométricas no software THIN-WALL-2, desenvolvido na Universidade de Sydney, o qual já foi aplicado em estudos de resistência ao cisalhamento pelo MRD em perfis U e Z enrijecidos e permite análises elásticas de flambagem de seções arbitrárias sob cortante uniforme.

Para este trabalho, adotou-se coeficiente de Poisson igual a 0,3 e módulo de elasticidade do aço de 200.000 MPa. Para representar a espessura real sem galvanização, foi considerado um desconto de 0,05 mm em relação à espessura nominal. As análises numéricas de flambagem elástica foram realizadas com aproximadamente 38 faixas finitas, conforme ilustrado na Figura 3.1.

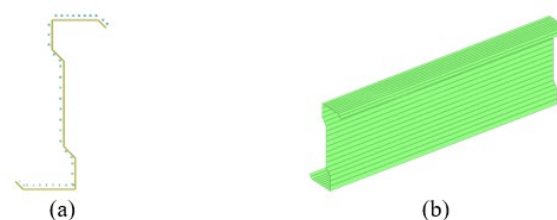


Figura 3.1. (a) Malha das faixas finitas de todas as seções ZPRO no THIN_WALL-2; (b) vista em perspectiva do elemento gerado no software

3.2 Idealização e montagem dos ensaios de flexão em três pontos

Para o ensaio experimental, utilizou-se duas vigas apoiadas com suportes nas duas extremidades e uma força concentrada no centro do vão (a qual maximiza as forças de cortante nas vigas distribuída entre as duas terças por uma viga. A distância entre as linhas de parafuso sob o carregamento e os pontos de suporte define o vão de cisalhamento. A fim de prevenir flambagem global lateral, as mesas inferiores das terças são voltadas para dentro, e para prevenir a flambagem distorcional, parafusou-se cantoneiras às mesas. Observar Figura 3.2.1.

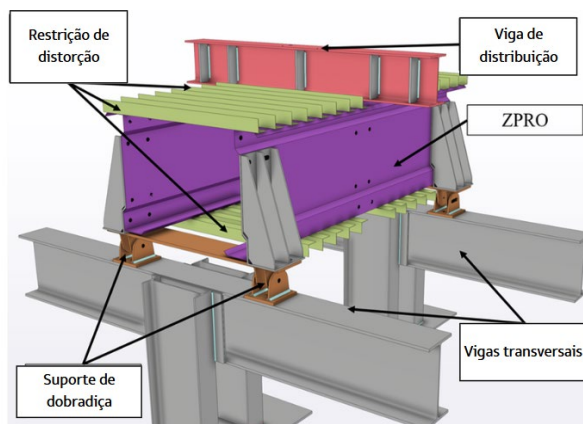


Figura 3.2.1. Setup experimental

Ademais, a carga foi aplicada um braço hidráulico ENERPAC® (capacidade máxima de 294,2 kN e curso de 600 mm) e medida por uma célula de carga C50T (Alfa Instrumentos Ltda.), posicionada entre rótulas esféricas, devidamente alinhada antes de cada ensaio (Figura 3.2.2) e calibrada por empresa certificada pelo INMETRO (Competec–Anápolis/GO). Além disso, réguas potenciométricas posicionadas ao meio do vão nas mesas inferiores da terças para medição do deslocamento durante a aplicação da carga, a qual foi transferida dos suportes diretamente para a alma por meio de ligação parafusada para evitar falha por esmagamento ou enrugamento da alma. Além disso, a fim de verificar as deformações na alma, utilizou-se, no ensaio da ZPRO300, extensômetros elétricos do tipo roseta (capaz de medir tanto axial, longitudinal e vertical quanto inclinado a 45°) a um quarto do vão.



Figura 3.2.2. Posicionamento e montagem do sistema de carregamento

Apoios, cantoneiras, vigas de apoio e viga de distribuição foram fabricados pela ISOESTE Metálica, com suportes inclinados para aplicação das cargas e reação diretamente nas almas das terças. As vigas de apoio foram fixadas em cavaletes metálicos e ancoradas à pista de concreto armado (previamente

dimensionada para suportar tais cargas elevadas), devidamente niveladas e alinhadas. As terças ZPRO foram parafusadas com duas linhas de parafusos por conexão, pré-apertadas e torqueadas, seguida da aplicação de uma pré-carga de 2 kN para assentamento. Após isso, o carregamento monotônico foi aplicado até a falha do corpo de prova, com registros contínuos das cargas.

3.3 Geometria dos corpos de prova utilizados no ensaio

Para o ensaio, utilizou-se três alturas diferentes da terça ZPRO®: 200, 300 e 500. A Tabela 1 apresenta todas as dimensões medidas dos espécimes reais fabricadas e ensaiadas de acordo com a simbologia da Figura 3.3.

Tabela 1. Dimensões medidas das terças ensaiadas.
Unidade em milímetros.

Amostra	ZPRO200	ZPRO300	ZPRO500
Z	204,00	300,00	500,00
h1	38,00	53,00	71,00
h2	46,00	55,00	79,00
h3	81,00	148,00	310,00
b1	75,00	82,00	98,00
b2	82,00	89,00	105,00
e1	16,00	19,00	23,00
e2	16,00	19,00	23,00
da1	29,50	21,00	29,50
da2	29,50	21,00	29,50

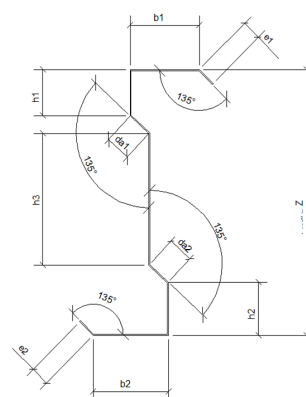


Figura 3.3. ZPRO e definição dos símbolos

Para cada ensaio, adotou-se um rótulo para identificação definido pelo modelo da seção, altura, espessura e série. Por exemplo, 'ZPRO200-2,70-1' indica a terça ZPRO com altura de 200mm e 2,70mm de espessura nominal (incluído revestimento galvanizado) e '1' representa o número da série de repetição do modelo. A Tabela 2 apresenta a

dimensão dos ensaios realizados para flambagem local, todos com aço ZAR400.

Tabela 2. Dimensão dos ensaios.

Designação da amostra	N. de ensaio	a (mm)	a/h	Vão teórico - L (mm)
ZPRO200-1,25	2	315	1,58	700
ZPRO300-1,25	1	465	1,55	1000
ZPRO300-1,55	1	465	1,55	1000
ZPRO500-1,70	2	694	1,39	1500

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cargas atuantes no sistema

A análise experimental forneceu a carga última associada ao modo de falha de cada amostra. Na Tabela 3, apresenta-se a carga máxima (P_u) considerando tanto a carga aplicada quanto o peso próprio do aparato e dos perfis. Cada ensaio envolveu duas terças; assim, para obter a carga concentrada em cada perfil, os valores devem ser divididos por 2. Para determinar a reação em cada suporte da viga simplesmente apoiada com carga central, divide-se o valor obtido novamente por 2.

Tabela 3. Resultado das cargas máximas do ensaio de flexão em 3 pontos

Espécime	P_u (kN)
ZPRO200-1,25-1	86,56
ZPRO200-1,25-2	87,76
ZPRO300-1,25-1	106,74
ZPRO300-1,55-1	141,96
ZPRO500-1,70-1	202,81
ZPRO500-1,70-2	203,56

4.2 Análises de estabilidade elástica e MRD

Os resultados da análise de flambagem elástica ao cortante de todas as terças indicaram flambagem local da alma. Ademias, no Thin-Wall-2, assumiu-se perfis simplesmente apoiados nas extremidades em todos os casos. A Tabela 4 apresenta os valores da força crítica de flambagem elástica para cada terça e seu comprimento de cisalhamento respectivo e idêntico ao ensaio. Além disso, as Figuras 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 representam a área de altas tensões (sempre concentradas na alma demonstrando a flambagem local) e a curva de assinatura de flambagem elástica das terças na mesma ordem apresentada na tabela.

Tabela 4. Resultado da análise de flambagem elástica ao cortante

Terça	V_{cr} (kN)	Comprimento do cisalhamento
ZPRO200-1,25	71,20	315
ZPRO300-1,25	44,13	465
ZPRO300-1,55	75,01	465
ZPRO500-1,70	37,07	694

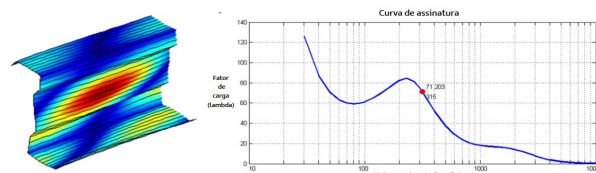


Figura 4.2.1. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante-ZPRO200-1,25 para comprimento de cisalhamento de 315mm

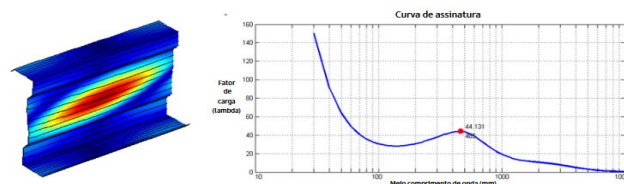


Figura 4.2.2. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante-ZPRO300-1,25 para comprimento de cisalhamento de 465mm

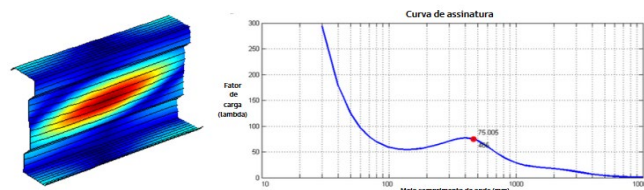


Figura 4.2.3. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante-ZPRO300-1,55 para comprimento de cisalhamento de 465mm

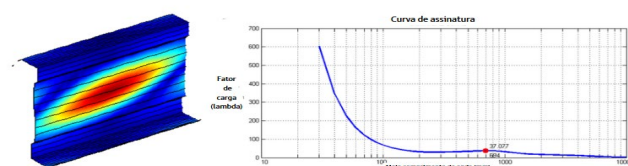


Figura 4.2.4. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante-ZPRO500-1,70 para comprimento de cisalhamento de 694mm

Para avaliar os resultados experimentais e compará-los com a resistência ao cisalhamento

prevista pelo AISI, adota-se como referência as V_{cr} indicadas na Tabela 4. Devido a restrição completa das mesas à flambagem distorcional e do enrijecimento proporcionado pelos suportes (posição com menos de duas vezes a altura), considera-se o mesmo vão de cisalhamento dos ensaios para o MRD. A Tabela 5 expõe os valores obtidos de acordo com AISI S100 (2016), em que $V_{n,tf}$ representa a resistência nominal ao cisalhamento de terças considerando o efeito benéfico do campo de tração.

Tabela 5. Cálculo de acordo com AISI S100 (2016)

Amostra	ZPRO200 -1,25	ZPRO300 -1,25	ZPRO300 -1,55	ZPRO500 -1,70
a(mm)	315	465	465	694
V_y (kN)	56,22	85,02	105,84	195,39
V_{cr} (kN)	71,20	44,13	75,01	37,07
λ_v	0,89	1,39	1,19	2,30
V_n (kN)	52,34	40,75	69,81	37,07
$V_{n,tf}$ (kN)	51,60	57,85	80,17	92,74
M_{nl} (kNm)	8,23	13,88	19,68	45,18

4.3 Resultados experimentais

Durante o experimento, as terças obtiveram modo de falha de flambagem local das mesas com instabilidade local da alma dos ensaios, com deformação por cortante excessiva, que está evidente nas fotografias na Figura 4.3.1. A Figura 4.3.2 apresenta gráficos força versus deslocamento para o centro do vão nos ensaios. Os atrasos iniciais nos registros de deslocamento devem-se ao assentamento do setup experimental e ao pequeno gap necessário para garantir contato contínuo e estável do sensor.



Figura 4.3.1. Modo de falha, respectivamente, da ZPRO200-1,25-1; ZPRO200-1,25-2; ZPRO300-1,25-1; ZPRO300-1,55-1; e ZPRO500-1,70-1.

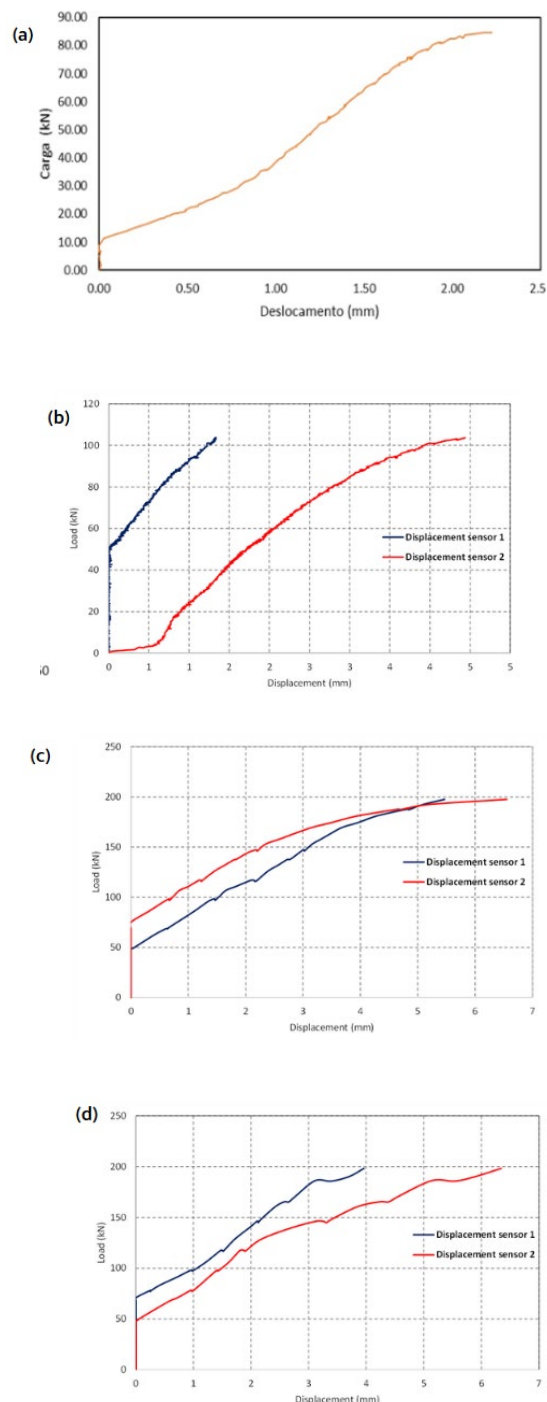


Figura 4.3.2. Gráfico força versus deslocamento das terças (a) ZPRO200-1,25-1 (b) ZPRO300-1,25-1 (c) ZPRO500-1,70-1 (d) ZPRO500-1,70-2

A Tabelas 6 apresenta, para cada amostra, o cortante último experimental ($V_u = P_u/4$) e o momento fletor último por terça ($M_u = P_u \cdot L/8$), calculados a partir de P_u (força máxima na célula de carga somada ao peso próprio dos elementos e aparatos) obtido na Tabela 3 e dos dados da Tabela 2.

Tabela 6. Cálculo de acordo com AISI S100 (2016)

	Vu (kN)	Mu (kNm)
ZPRO200-1,25-1	21,64	7,57
ZPRO200-1,25-2	21,94	7,68
ZPRO300-1,25-1	26,69	13,34
ZPRO300-1,55-1	35,49	17,75
ZPRO500-1,70-1	50,70	38,03
ZPRO500-1,70-2	50,89	38,17

4.3 Interação momento-cortante AISI S100 (2016)

Eficiência de interação é calculado por:

$$E.i. = \left[\left(\frac{M_{exp}}{M_{nl}} \right)^2 + \left(\frac{V_{exp}}{V_{nl}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Tabela 7. Interação momento fletor e esforço cortante com coeficiente mínimo e sem coeficiente de segurança, com flexão restringida.

	Vexp/Vn,t f	Mexp/Mn l	Eficiência de Interação
ZPRO200-1,25-1	0,42	0,92	1,01
ZPRO200-1,25-2	0,42	0,93	1,02
ZPRO300-1,25-1	0,46	0,96	1,07
ZPRO300-1,55-1	0,44	0,90	1,00
ZPRO500-1,70-1	0,55	0,84	1,00
ZPRO500-1,70-2	0,55	0,84	1,01

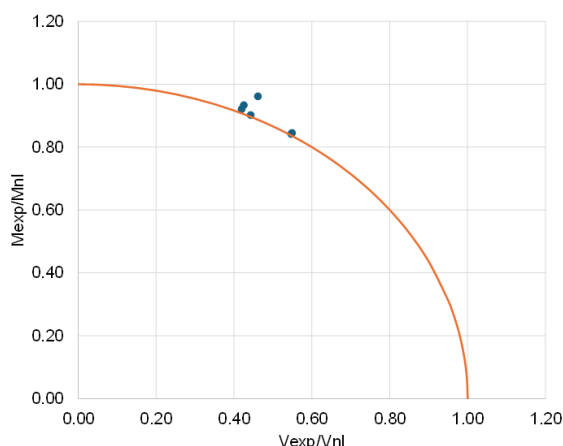


Figura 4.4. Interação momento fletor e cortante (MRD/ AISI S100 2016)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS / CONCLUSÃO

Essa pesquisa objetivou a investigação comportamental de uma terça Z com alma enrijecida submetida à flexão e cortante. Visando a compreensão da resistência estrutural, realizou-se

ensaios experimentais com a terça ZPRO da Isoeste Metálica, a modelagem no software de faixas finitas Thin-Wall-2 e cálculos com Método da Resistência Direta baseados na AISI S100 (2016).

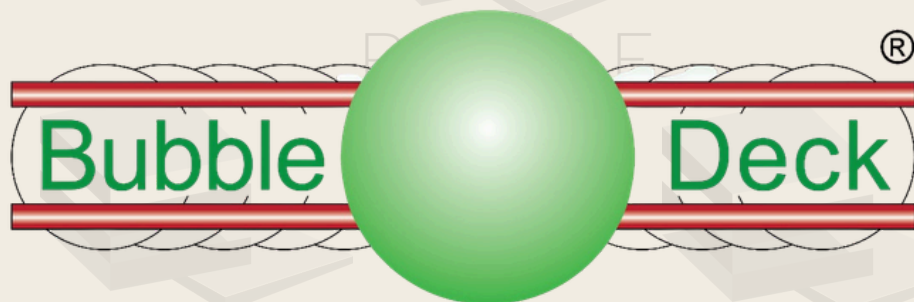
Os ensaios experimentais mostraram flambagem local da mesa com instabilidade da alma, enquanto o software apresentou flambagem local da alma. Logo, ao observar as fotos dos ensaios e as do programa computacional, é possível perceber semelhanças da concentração das forças e deformações, apesar de o software não apresentar deformação na mesa da terça. Ademais, os resultados numéricos das três formas foram satisfatórios. Demonstrou-se relevante também as condições de apoio e imperfeições, dado que a diferença numérica é coerente com a consideração da terça ser simplesmente apoiada no Thin-Wall-2.

Percebe-se que tanto a razão Vexp/Vn,t quanto a Mexp/Mnl obtiveram resultados inferiores a um. Dessarte, não haveria falha de apenas cortante ou apenas flexão. Entretanto, quando há a combinação dos dois, obtém-se um número superior a um, manifestando a falha da terça. Isso indica a importância do estudo da interação momento-cortante. Além disso, perfis de maior altura e espessura da alma apresentaram maior valor de interação, demonstrando como a ação combinada dos esforços provoca uma redução mútua da capacidade de resistência. No gráfico relacionado à combinação, é perceptível que não há nenhum ponto abaixo da linha limite, o que nos garante que a norma utilizada é conservadora.

REFERÊNCIAS

- AISI S100. AISI S100-16: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. [s. l.], p. 505, 2016. .
- ALMATRAFI, M.; THEOFANOUS, M.; DIRAR, S.; GKANTOU, M. Structural response of cold-formed lipped Z purlins – Part 1: Experimental investigation. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 161, no. January, p. 107452, 2021. DOI 10.1016/j.tws.2021.107452. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107452>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço construídas por perfis formados a frio**. [S. l.: s. n.], 2010.
- BENEDITO, A.; FERNANDES, D.; ALENCAR, G. S.; LUÍS, J.; BRITO, V. De. Web shear buckling capacity of a stiffened Z-purlin : reporting of experimental tests. [s. l.], 2024. .
- HUI, C.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Moment redistribution in cold-formed steel continuous beams. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 98, p. 465–477, 2016.

- DOI 10.1016/j.tws.2015.10.009. Available at:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.009>.
- LI, Q.-Y.; YOUNG, B. Experimental and numerical investigation on cold-formed steel zed section beams with complex edge stiffeners. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 194, p. 111315, Jan. 2023. DOI 10.1016/j.tws.2023.111315. Available at:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823123007930>.
- PHAM, C. H.; DAVIS, A. F.; EMMETT, B. R. Numerical investigation of cold-formed lapped Z purlins under combined bending and shear. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], vol. 95, p. 116–125, 2014. DOI 10.1016/j.jcsr.2013.11.015. Available at:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.11.015>.
- SCHAFER, B. W. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], vol. 64, no. 7–8, p. 766–778, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.022>.
- SILVA, E. L.; PIERIN, I.; PIGNATTA, V. **MANUAL - Estruturas Compostas por Perfis Formados a Frio - Dimensionamento pelo Método das Larguras Efetivas e Aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT 6355:2012**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2014.
- SILVA, J. M. M. **Terças de aço em perfis formados a frio com alma enrijecida: ênfase na força cortante e na interação momento fletor - força cortante**. 2018. 144 f. 2018.
- SILVA, J. M. M.; MALITE, M. Longitudinally stiffened web purlins under shear and bending moment. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 148, no. December 2019, p. 106616, 2020. DOI 10.1016/j.tws.2020.106616. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106616>.
- TRAHAIR, N. S. Non-linear biaxial bending of steel Z-beams. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 129, no. October 2017, p. 317–326, 2018. DOI 10.1016/j.tws.2018.04.012. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.012>.
- WEI-WEN YU, HELEN CHEN, and R. A. L. **Cold-Formed Steel Design**. 5th ed. [S. l.: s. n.], 2020.
- YU, C.; SCHAFER, B. W. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. **Seventeenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**, [s. l.], no. April, p. 19–45, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2006\)132:4\(515\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:4(515)).
- YU, C.; SCHAFER, B. W. Local Buckling Tests on Cold-Formed Steel Beams. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], vol. 129, no. 12, p. 1596–1606, Dec. 2003. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1596). Available at:
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282003%29129%3A12%281596%29>.



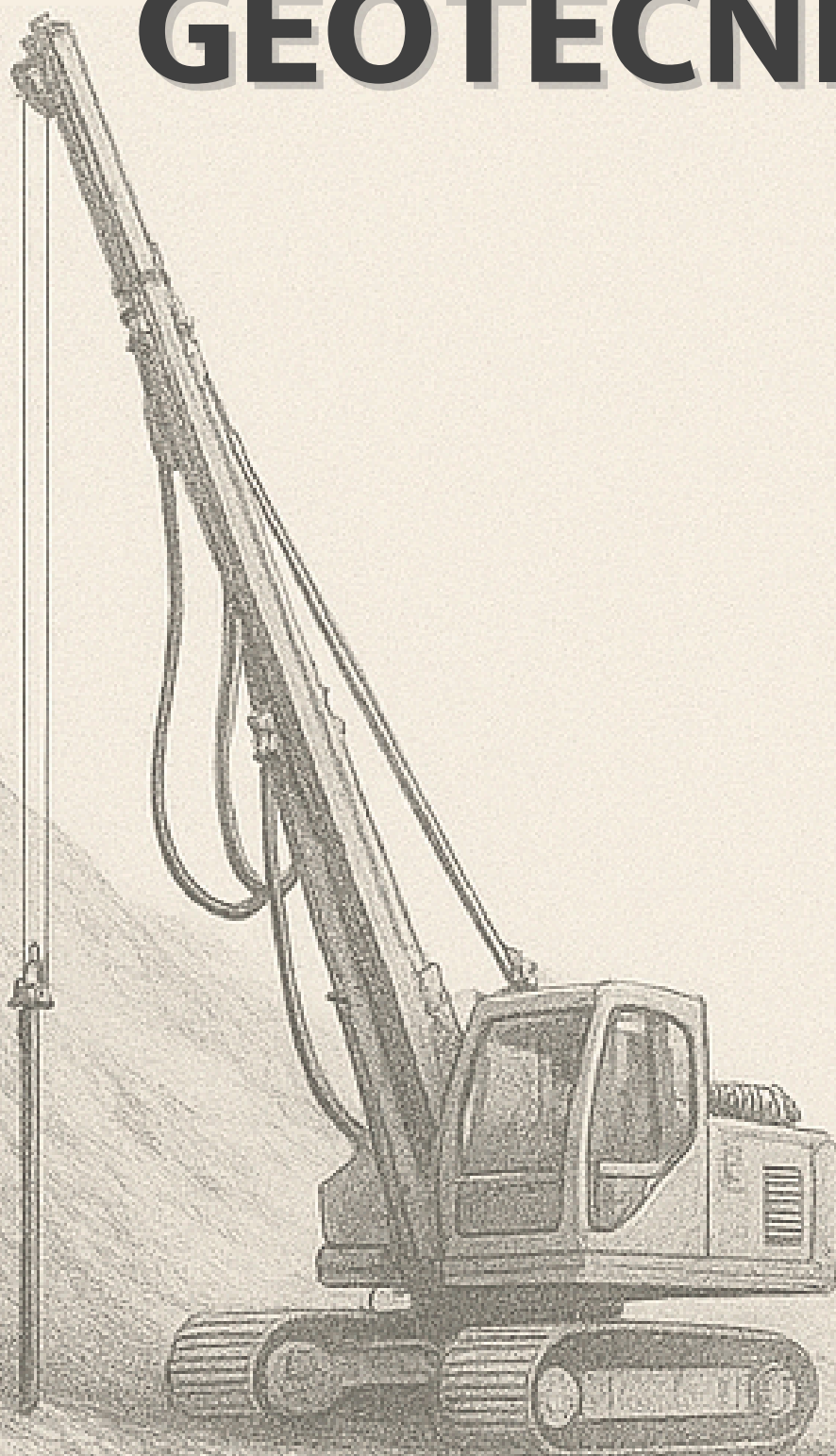
Construindo mais com menos



TECNA

CONSTRUTORA

GEOTECNIA



ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA NA RESPOSTA LATERAL DE ESTACAS LONGAS

Davi Martins de Aragão*

Aluno de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF

RESUMO

Este estudo investiga o comportamento de estacas longas submetidas a carregamento lateral, utilizando o solo de Brasília como meio receptor. O objetivo principal foi analisar a resposta das estacas quando submetidas a um deslocamento horizontal correspondente a 3% do seu diâmetro. Utilizando o modelo Hardening Soil, foram coletados parâmetros geotécnicos do solo no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB. Estacas com diferentes dimensões foram modeladas no software Plaxis 3D para avaliar a influência de suas proporções (altura/diâmetro) na resistência ao deslocamento horizontal. Os resultados mostraram que os deslocamentos horizontais se concentram no terço superior das estacas longas e na metade superior das estacas curtas, podendo haver deslocamentos na base de estacas curtas devido à possibilidade de rotação do conjunto. A curva de força horizontal versus deslocamento exibiu um comportamento logístico, com crescimento inicial rápido e convergência para valores constantes. Observou-se uma descontinuidade para a relação H/D de 4, atribuída ao início de fluxo plástico do solo ao redor da estaca. A resistência lateral das estacas é diretamente influenciada pelos parâmetros geotécnicos do solo e pelas dimensões das estacas, conforme corroborado por estudos anteriores.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Longa, Carregamento Lateral, Deslocamento Lateral, Hardening Soil.

ABSTRACT

This study investigates the behavior of deep piles subjected to lateral loading, using the soil of Brasília as the receiving place. The main objective was to analyze the response of the piles when subjected to a horizontal displacement corresponding to 3% of their diameter. Using the Hardening Soil model, geotechnical parameters of the soil were collected at the Experimental Field of the Graduate Program in Geotechnics at UnB. Piles with different dimensions were modeled in the Plaxis 3D software to evaluate the influence of their proportions (height/diameter) on the resistance to horizontal displacement. The results showed that horizontal displacements concentrate in the upper third of long piles and in the upper half of short piles, with possible displacements at the base of short piles due to the possibility of rotation of the set. The horizontal force versus displacement curve exhibited a logistic behavior, with initial rapid growth and convergence to constant values. A discontinuity was observed for the H/D ratio of 4, attributed to the onset of plastic flow of the soil around the pile. The lateral resistance of the piles is directly influenced by the geotechnical parameters of the soil and the dimensions of the piles, as corroborated by previous studies.

KEYWORDS: Deep Pile, Side Loading, Side Displacement, Hardening Soil.

1. INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão são obras de grande porte essenciais para o abastecimento de energia elétrica nacional, visto que ligam uma unidade geradora de energia a uma unidade de distribuição e cuja demanda é crescente pelo aumento do consumo populacional e industrial de energia (Jung, 2009).

O projeto de linhas de transmissão de energia e postes de iluminação devem considerar a presença de carregamento lateral devido a ações do vento e a propagação de esforços entre as unidades pelos cabos de energia. A estabilidade de cada unidade estrutural é extremamente importante para o conjunto, podendo afetar a transmissão de energia na ocorrência de ruptura ou demais patologias

*Autor correspondente: dvmartins05@gmail.com

(Lautenschläger, 2010).

Nesse contexto, este trabalho estuda a influência de um carregamento lateral atribuído a estacas longas de diferentes dimensões, considerando o solo de Brasília como o solo receptor da fundação e seus parâmetros de estabilidade e resistência obtidos pelo modelo Hardening Soil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa investigou o comportamento de estacas submetidas a deslocamento horizontal, focando em como diferentes parâmetros das estacas influenciam essa resposta. O objetivo principal é compreender o comportamento das estacas quando um deslocamento horizontal correspondente a 3% do seu diâmetro é aplicado.

Inicialmente, foram coletados parâmetros geotécnicos do solo do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB com base na proposta de Rebolledo, León e Camapum de Carvalho (2019). Esses parâmetros incluem propriedades do modelo Hardening Soil. Também foram definidos parâmetros geométricos e materiais da estaca, incluindo comprimento, diâmetro, material e suas propriedades mecânicas.

Além disso, são avaliadas as relações entre o comprimento e o diâmetro da estaca para entender sua influência no comportamento sob carga horizontal, determinando quais proporções de altura/diâmetro proporcionam maior resistência ao deslocamento horizontal.

Na etapa seguinte, aplicou-se um deslocamento horizontal de 3% do diâmetro da estaca. A força horizontal necessária para alcançar o deslocamento aplicado foi medida, permitindo a determinação da resistência lateral da estaca e sua variação com os diferentes parâmetros da estaca.

Por fim, foi verificado o comportamento dos campos de deslocamento atuantes no solo e na estaca. A Figura 1 apresenta um fluxograma resumo.



Figura 1. Fluxograma de pesquisa.

Toda a modelagem foi feita no programa Plaxis 3D, software que calcula estruturas geotécnicas por meio do método de elementos finitos. Foi adotado um valor de 0,3 para o fator de aspereza da estaca e 0,5 para o solo. Esse fator indica a granularidade da malha de elementos finitos, onde um valor menor resulta em uma malha mais fina e detalhada. A Figura 2 mostra a modelagem do conjunto solo estaca. A estaca foi desenvolvida na metade da sua seção pelas condições de simetria.

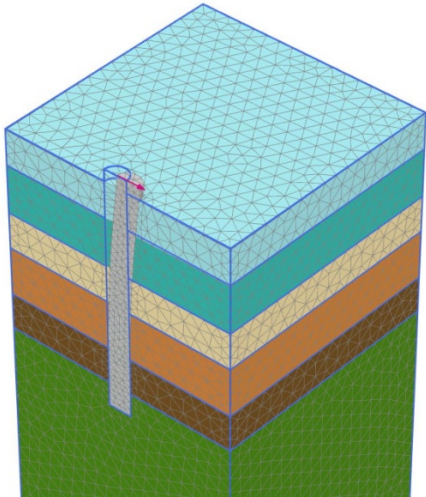


Figura 2. Modelagem do conjunto solo-estaca.

2.1 Modelagem da estaca

A estaca foi modelada com quatro relações de altura por diâmetro (H/D) conforme Lautenschläger (2010), com simulação pelo modelo elástico linear do Plaxis 3D. Foi considerado um concreto armado de resistência característica à compressão de 25 MPa.

Procurou-se definir valores de deflexão de 3% do diâmetro da estaca, no intuito de verificar a força horizontal necessária para que ocorresse o deslocamento em cada caso. Os parâmetros da estaca podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da estaca.					
γ (kN/m ³)	E (GPa)	H (m)	D (m)	Rela- ção H/D	Defle- ção (m)
25	24	10	1	10	0,03
		10	0,5	20	0,015
		4	1	4	0,03
		4	0,5	8	0,015

Foram medidas as forças horizontais em dois pontos, mostrados na Figura 3. O Ponto A está no local onde foi aplicada a carga e o Ponto B está imediatamente acima do solo, no lado oposto ao Ponto A.

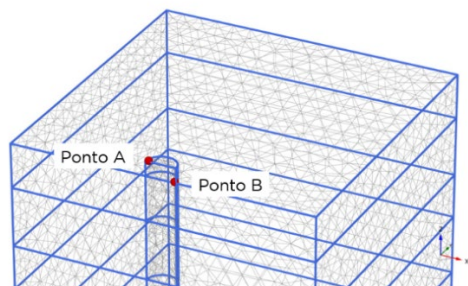


Figura 3. Localização dos pontos para medição da força horizontal e deslocamento.

A modelagem foi dividida em três etapas, sendo a etapa inicial apenas a disposição das camadas de solo, a segunda etapa a alocação da estaca no solo, e a terceira etapa a aplicação da deflexão na ponta da estaca. Esta foi definida com 0,5 m acima do solo para todas as simulações.

2.2 Estratigrafia do solo e modelo Hardening Soil

A estratigrafia do solo utilizada é a proposta por Rebolledo, León e Camapum de Carvalho (2019), onde são descritas seis camadas de solo do Campo Experimental de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB para o modelo Hardening Soil, presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Proposta de modelo do solo de Rebolledo, León e Camapum de Carvalho (2019).

Parâmetros	Número da camada					
	1	2	3	4	5	6
	Argila arenosa porosa			Solo laterítico residual		Solo saprolítico
H (m)	0 - 1,5	1,5 - 3,5	3,5 - 5,0	5,0 - 7,0	7,0 - 8,5	8,5 - 20,0
γ (kN/m ³)	13,1	12,8	13,9	14,3	16,0	18,2
c' (kPa)	5	5	5	20	75	20
φ' (°)	25	25	26	32	20	22
ψ (°)	0	0	0	0	0	0
E_{50}^{ref} (MPa)	3,2	2,5	4,0	12,0	13,2	12,2
E_{oed}^{ref} (MPa)	4,9	1,45	2,2	6,9	7,0	5,7
E_{ur}^{ref} (MPa)	14,0	14,0	36,9	37,5	54,0	54,0
m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7
ν_{ur}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
p^{ref} (kPa)	100	100	100	100	100	100
R_f	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8
POP (kPa)	65,7	31,8	0	31,4	0	0
K_0^{nc}	0,58	0,58	0,56	0,47	0,66	0,63
K_0	1,37	0,77	0,56	0,56	0,66	0,63

Onde:

H = altura da camada de solo;

γ = peso específico aparente;

φ' = ângulo de atrito efetivo;

c' = coesão efetiva;

ψ = ângulo de dilatância;

E_{50}^{ref} = módulo secante de rigidez para o ensaio triaxial CD;

E_{oed}^{ref} = módulo tangente de rigidez de referência para o carregamento primário no ensaio oedométrico;

E_{ur}^{ref} = módulo de rigidez de referência para descarregamento/recarregamento;

m = expoente que define a dependência da deformação pelo estado de tensão;

ν_{ur} = coeficiente de Poisson para descarregamento/recarregamento;

p^{ref} = tensão isotrópica de referência;

R_f = razão de ruptura;
POP = pressão de pré-sobrecarga;
 K_0^{nc} = coeficiente de empuxo no repouso para solo normalmente adensado;
 K_0 = coeficiente de empuxo no repouso.

No modelo Hardening Soil, as deformações totais são calculadas usando um módulo de rigidez dependente da tensão, diferente para o carregamento e descarregamento. Assume-se endurecimento isotrópico e dependente das deformações plásticas de cisalhamento e deformações volumétricas (Surarak *et al.*, 2012).

Schanz *et al.* (1999) explicam a formulação e verificação do modelo a partir dos parâmetros de entrada presentes na Tabela 2 e é assumida a relação tensão-deformação como uma curva hiperbólica. Esta função hiperbólica é apresentada por Kondner (1963) para o ensaio triaxial drenado (CD) como:

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \frac{q}{q_a - q}, \text{ para } q < q_f \quad (1)$$

onde ε_1 é a deformação axial e q é a tensão desviatória. A tensão desviatória final q_f pode ser definida como:

$$q_f = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} (\sigma_3' + c' \cot \phi') \quad (2)$$

que é derivada da envoltória de Mohr-Coulomb envolvendo os parâmetros de c' e ϕ' . O valor assintótico da resistência ao cisalhamento q_a é expresso como:

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (3)$$

No caso de $q_a = q_f$ (Razão de ruptura = 1), a envoltória de ruptura é atingida e ocorre escoamento perfeitamente plástico. A Figura 4 mostra a relação hiperbólica de tensão-deformação para carregamento primário.

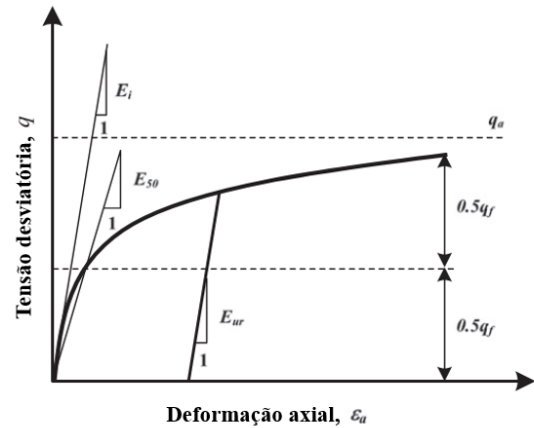


Figura 4. Relação hiperbólica de tensão-deformação (adaptado de Schanz *et al.*, 1999).

O comportamento tensão-deformação para carregamento primário é altamente não linear. O parâmetro E_{50} é um módulo de rigidez dependente da tensão confinante para carregamento primário, dado como:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' - p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (4)$$

onde E_{50}^{ref} é um módulo de rigidez de referência correspondente à tensão de referência p^{ref} . A rigidez real depende de σ_3' que é a pressão confinante efetiva em um teste triaxial.

Para o programa Plaxis, σ_3' é negativa em compressão. A dependência da tensão é dada pela potência (m). Para simular uma dependência de tensão logarítmica, a variável deve estar entre 0,5 e 1 (Soos von, 2001).

O módulo de rigidez dependente da tensão de descarregamento e recarga é calculado como:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' - p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (5)$$

onde E_{ur}^{ref} é o módulo de referência para descarregamento e recarga, que corresponde à pressão de referência p^{ref} . A função da superfície de endurecimento por cisalhamento (f_s) é dada como:

$$f_s = \underline{f} - \gamma^p \quad (6)$$

$$\underline{f} = \frac{q_a}{E_{50}} \left\{ \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{q_a - (\sigma'_1 - \sigma'_3)} \right\} - \frac{2(\sigma'_1 - \sigma'_2)}{E_{ur}} \quad (7)$$

onde σ'_1 e σ'_3 são as tensões principais efetivas, E_{50} é o módulo de rigidez secante de 50%, e γ^p é a deformação plástica por cisalhamento, e pode ser aproximada como:

$$\gamma^p \approx \varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p = 2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p \approx 2\varepsilon_1^p \quad (8)$$

onde ε_1^p , ε_2^p e ε_3^p são as deformações plásticas e ε_v^p é a deformação volumétrica plástica.

Os módulos triaxiais E_{50}^{ref} e E_{ur}^{ref} são parâmetros que controlam as superfícies de endurecimento ao cisalhamento. As superfícies de escoamento também são estudadas no modelo, e estão relacionadas à deformação volumétrica plástica medida na condição de compressão isotrópica. A Figura 5 mostra as superfícies de endurecimento ao cisalhamento e de escoamento para solo sem coesão.

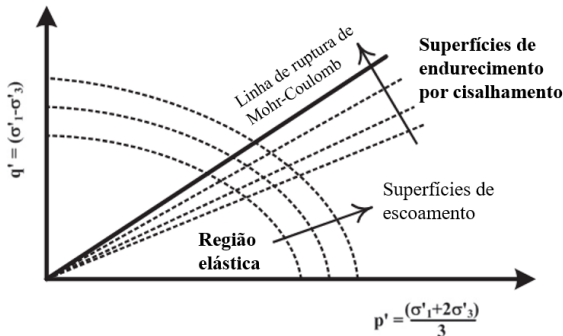


Figura 5. Endurecimento por cisalhamento e superfícies de escoamento no Modelo Hardening Soil (adaptado de Schanz et al., 1999).

O módulo de referência oedométrico E_{oed}^{ref} é usado para controlar a magnitude das deformações volumétricas plásticas ε_v^{pc} que se originam da superfície de escoamento. De maneira semelhante aos módulos triaxiais, o módulo oedométrico E_{oed} é expresso como:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma'_3 \sin \phi'}{c' \cos \phi' - p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (9)$$

A função da superfície de escoamento pode ser dada por:

$$f^c = \frac{q^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2 \quad (10)$$

onde, α é um parâmetro auxiliar do modelo relacionado ao K_0^{nc} . Os parâmetros p e q são expressos como:

$$p = \frac{-(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (11)$$

$$\underline{q}^2 = \sigma_1 + (\delta - 1)\sigma_2 - \sigma_3 \quad (12)$$

onde:

$$\delta = \frac{(3 + \sin \phi')}{(3 - \sin \phi')} \quad (13)$$

$\underline{q}$ é a medida especial de tensão para tensões desviadoras. No caso do ensaio triaxial, reduz-se a $\underline{q} = -\delta(\sigma_1 - \sigma_3)$.

O tamanho da superfície de escoamento é determinado pela tensão de pré-adensamento isotrópica p_p . Relaciona-se a pressão de pré-adensamento p_p à deformação volumétrica da superfície de escoamento ε_v^{pc} por:

$$\varepsilon_v^{pc} = \frac{\beta}{1 - m} \left(\frac{p_p}{p^{ref}} \right)^{1-m} \quad (14)$$

onde ε_v^{pc} representa a deformação volumétrica plástica em compressão isotrópica. Tanto α quanto β são parâmetros da superfície de escoamento. Suas relações podem ser expressas como:

$$\alpha = K_0^{nc} = 1 - \sin \phi' \quad (15)$$

$$\beta = E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref} \quad (16)$$

de tal forma que K_0^{nc} e E_{oed}^{ref} podem ser usados como parâmetros de entrada que determinam a magnitude de α e β , respectivamente (Surarak et al., 2012). A Figura 5 mostra a superfície de escoamento no plano p' - q' .

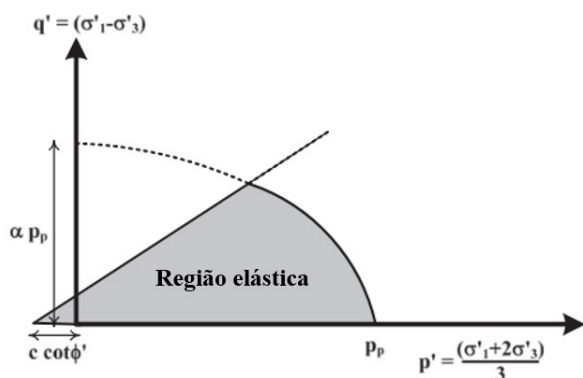


Figura 6. Superfície de escoamento do modelo Hardening Soil no plano p' - q (adaptado de Schanz et al., 1999).

3. RESULTADOS

Os resultados da pesquisa abrangem a apresentação do comportamento solo-estaca por meio de imagens extraídas das análises do Plaxis 3D. Inicialmente nas Figuras 7 a 10, são apresentados os campos de isovalores de deslocamentos dada a deflexão inicial.

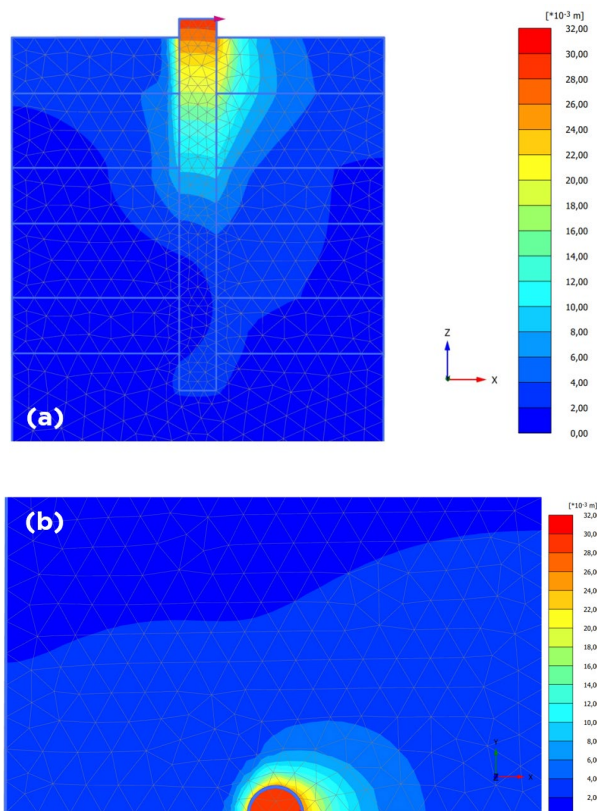


Figura 7. (a) Vista frontal do deslocamento para relação H/D de 10. (b) Vista superior do deslocamento para relação H/D de 10.

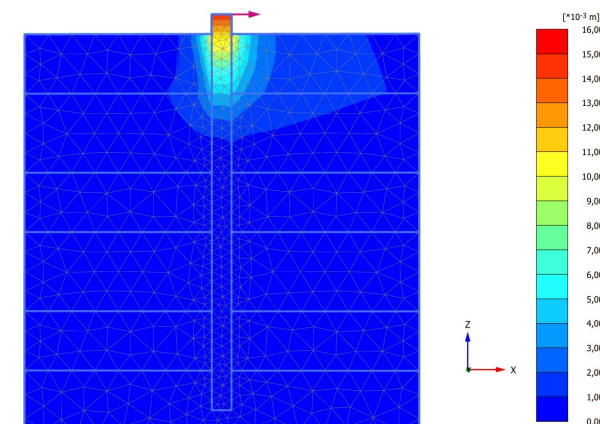


Figura 8. Deslocamento para relação H/D de 20.

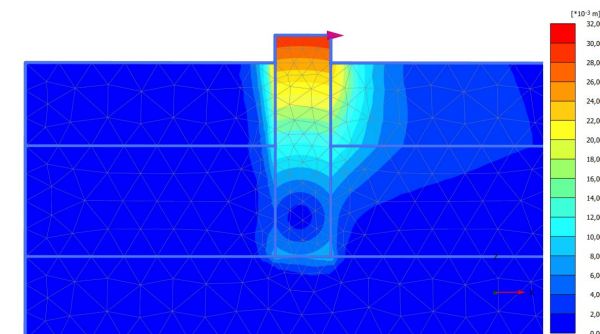


Figura 9. Deslocamento para relação H/D de 4.

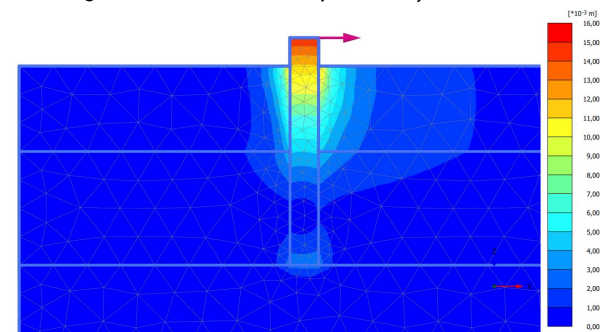


Figura 10. Deslocamento para relação H/D de 8.

Evidencia-se que os deslocamentos horizontais se concentram no terço superior da estaca para as estacas longas das Figuras 7 e 8. No caso das estacas curtas nas Figuras 9 e 10, houveram deslocamentos expressivos também no fundo, e os máximos deslocamentos se concentraram na metade superior. Na Figura 7(b), mostra-se a influência dos deslocamentos em vista superior, onde é notável que os deslocamentos são propagados a aproximadamente três vezes o diâmetro da estaca. O mesmo ocorreu de maneira semelhante para todos os casos.

Os resultados dos deslocamentos estão em acordo com o método de Broms (1965), que separa a análise de estacas submetidas a carregamentos laterais em estacas longas e curtas, fixas (no topo) e livres, em solos com e sem coesão. Para estacas

curtas, livres e em solo coesivo, os momentos máximos se encontram na metade superior da estaca. Para estacas longas na mesma condição, estão no terço superior, conforme Figuras 11 e 12.

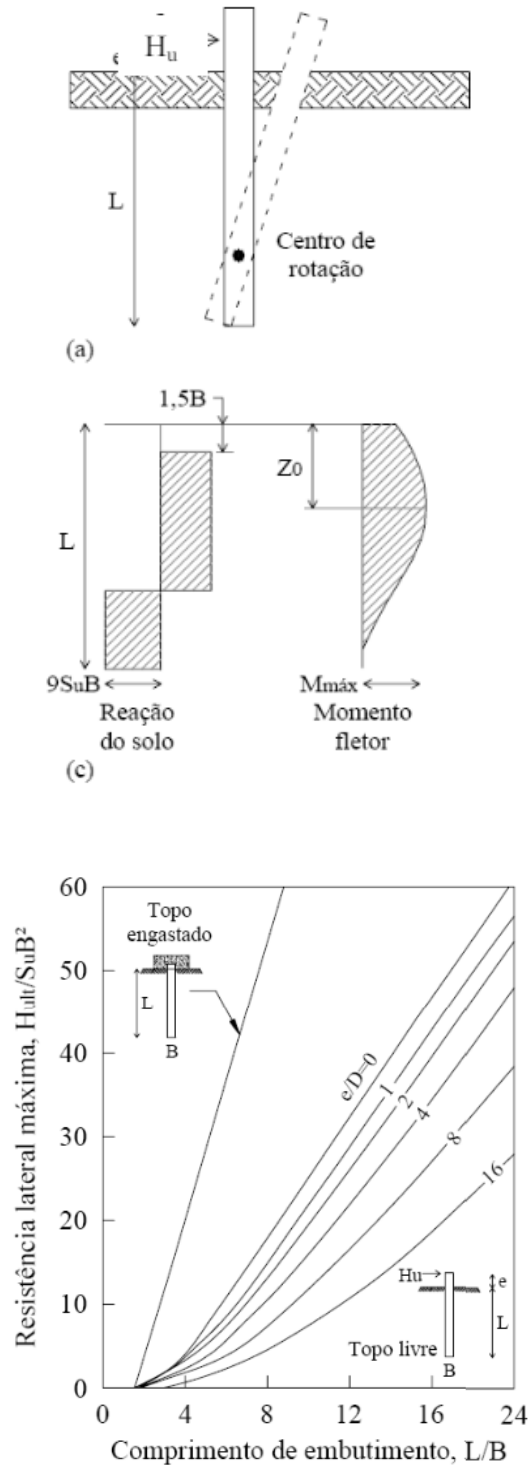


Figura 11. Mecanismo de ruptura do sistema e solução gráfica para estacas curtas em solo coesivo (Lautenschläger, 2010).

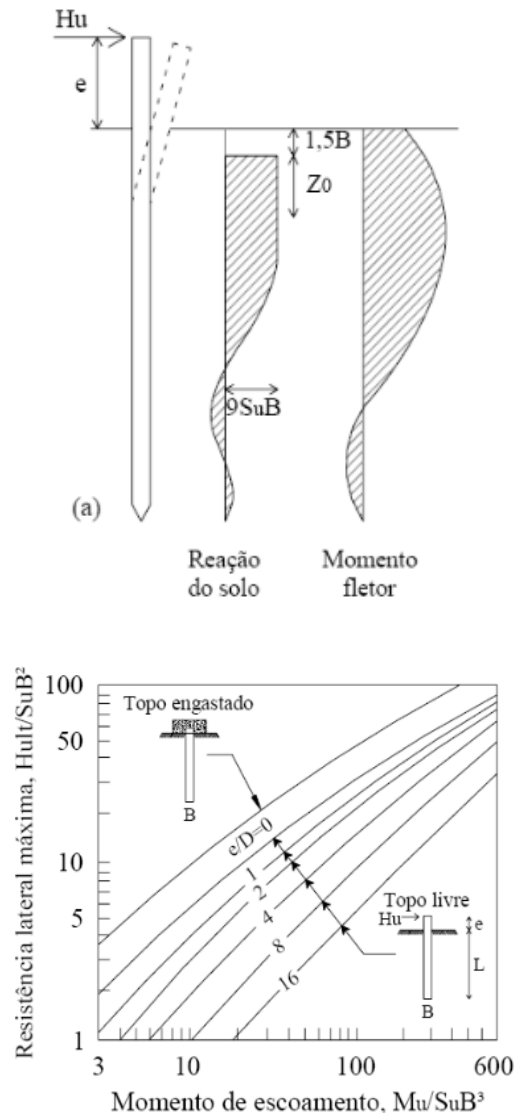


Figura 12. Mecanismo de ruptura do sistema e solução gráfica para estacas longas em solo coesivo (Lautenschläger, 2010).

Outrossim, ocorrem deslocamentos na base das estacas curtas pela ocorrência de rotação em relação a uma seção transversal crítica, com ruptura da massa de solo. Em estacas longas, a ruptura ocorre com a plastificação do material no local de momento máximo (Broms, 1965).

Com base nas deflexões aplicadas para as quatro simulações foi possível obter a força horizontal necessária para o deslocamento de 3% do diâmetro da estaca. Nas Figuras 13 a 16, a curva azul indica a força horizontal e deslocamento no Ponto A, enquanto a curva laranja, as mesmas variáveis no Ponto B, pontos determinados na Figura 3.

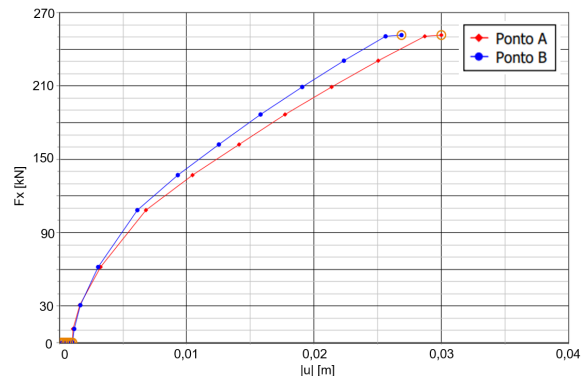


Figura 13. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 10.

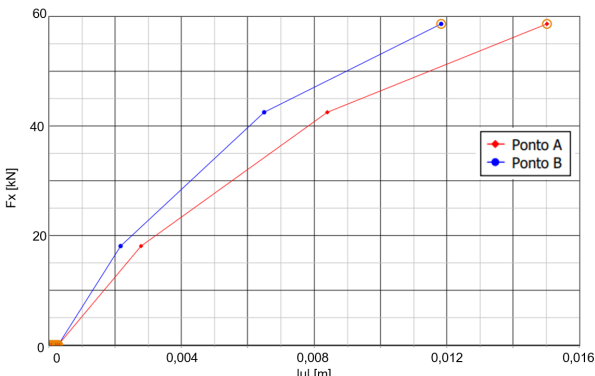


Figura 14. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 20.

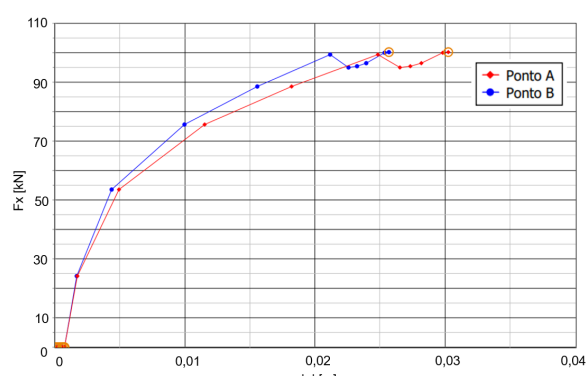


Figura 15. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 4.

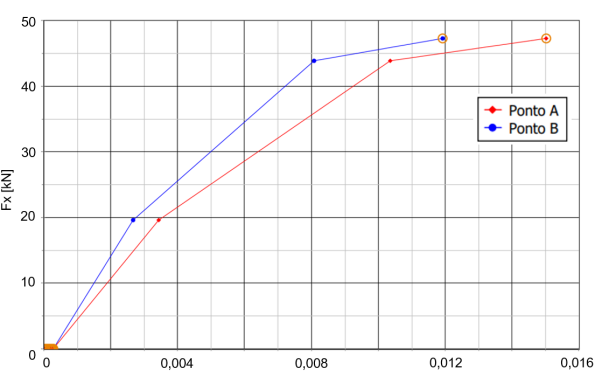


Figura 16. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 8.

Relata-se que o ponto B recebe 3 mm a menos do deslocamento imposto ao ponto A. Também é perceptível que as curvas se assemelham a curvas logísticas, com aparente crescimento exponencial inicial e convergência para um valor final constante. Na Figura 15, entretanto, os valores da força horizontal apresentam uma descontinuidade, que pode ser explicada por um nível de deslocamento onde o solo ao redor começa a fluir plasticamente, causando uma redução temporária na resistência horizontal antes de estabilizar novamente.

Na Figura 17 e Tabela 3 são comparados os resultados para todos os casos. A estaca com diâmetro de 1 m e altura de 10 m teve o melhor resultado de resistência. Já as estacas de 0,5 m de diâmetro obtiveram valores finais próximos, para as duas alturas definidas.

A estaca de 1 m de diâmetro e altura de 4 m, entretanto, apresentou valores consideravelmente menores que a primeira estaca citada de mesmo diâmetro.

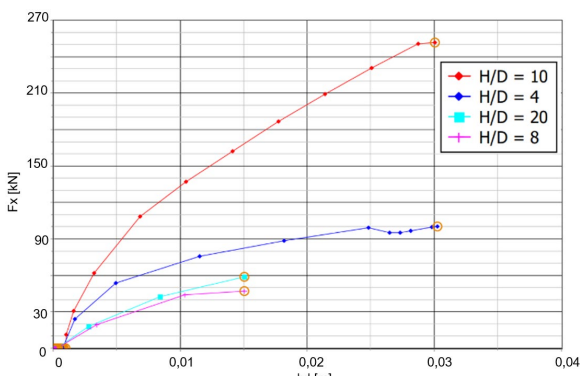


Figura 17. Comparação das forças horizontais e deslocamentos no Ponto A para todas as relações.

Tabela 3. Forças horizontais máximas e deslocamentos finais.

Relação H/D	Força (kN)	Deslocamento A (m)	Deslocamento B (m)
10	251,73	0,03	0,027
4	85,085	0,03	0,027
20	58,664	0,015	0,012
8	47,222	0,015	0,012

Lautenschläger (2010) atribui o fenômeno a uma profundidade crítica até onde o carregamento lateral influencia o solo, podendo ainda ocorrer empuxo

passivo devido à tendência de rotação caso a estaca não ultrapasse essa profundidade crítica. Essa propriedade recebe a hipótese de estar diretamente relacionada a parâmetros geotécnicos do solo e ao diâmetro da estaca.

Em seu estudo com estaca de módulo de elasticidade E de 250 MPa (próxima a definida neste trabalho) e solo de coesão de 60 kPa, Lautenschläger (2010) apresentou que para as relações de H/L de 4 e 10, os valores de resistência foram similares, enquanto para coesão de 2 kPa, houve redução significativa entre os dois casos, conforme Figuras 18 e 19. Considerando que o substrato extraído do PPGG possui coesão de 5 kPa nos 5 m de profundidade iniciais, os resultados corroboram para a mesma hipótese inicial.

Estudos internacionais, como o de Surarak et al. (2012), evidenciaram que a variação de E_{50} e c' tem impacto direto na resposta lateral de estacas modeladas com o Hardening Soil. Em comparação com os solos de Bangkok, os solos tropicais brasileiros apresentaram rigidez inicial inferior nas primeiras camadas, o que contribuiu para maiores deslocamentos próximos à superfície. Tais semelhanças indicam que o modelo se comporta de forma coerente entre diferentes tipos de solo, respeitadas suas propriedades geotécnicas.

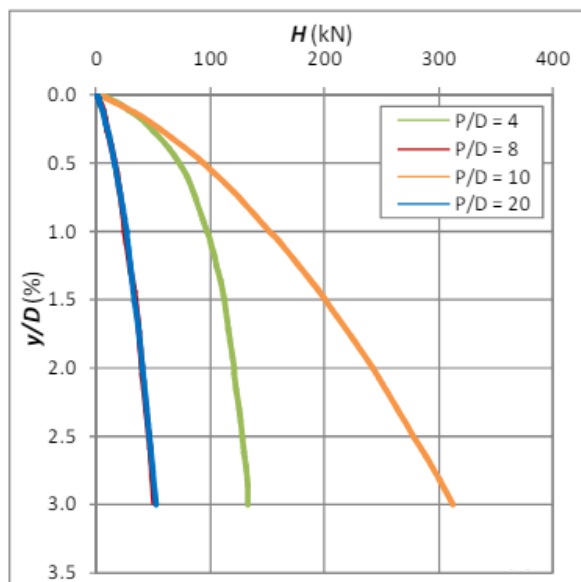


Figura 18. Comportamento força horizontal x deflexão de 3% para $E = 250$ MPa: (a) $c' = 2$ kPa (Lautenschläger, 2010).

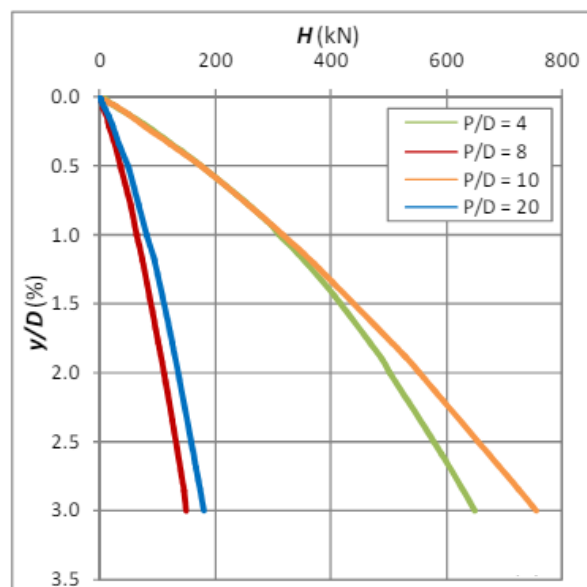


Figura 19. Comportamento força horizontal x deflexão de 3% para $E = 250$ MPa: $c' = 60$ kPa (Lautenschläger, 2010).

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir das análises realizadas com Plaxis 3D permitiram a compreensão do comportamento solo-estaca sob diferentes relações H/D para o solo modelado pelo modelo HS a partir de parâmetros do substrato de Brasília. Os deslocamentos horizontais, conforme evidenciado nas figuras, se concentram no terço superior das estacas longas e na metade superior das estacas curtas. Esse comportamento está em conformidade com o método de Broms (1965), indicando a validade das simulações.

As curvas de força horizontal versus deslocamento apresentaram comportamento logístico, com crescimento inicial rápido e convergência para valores constantes. Uma descontinuidade observada para a relação H/D de 4 foi atribuída ao início de fluxo plástico do solo ao redor da estaca. Os resultados mostram que a estaca com diâmetro de 1 m e altura de 10 m exibiu a melhor resistência horizontal, enquanto estacas de diâmetros menores tiveram resistências similares.

A análise também sugere que a resistência horizontal está diretamente relacionada às propriedades geotécnicas do solo e ao diâmetro da estaca, conforme corroborado por Lautenschläger (2010).

Cabe destacar que os resultados obtidos são condicionados ao perfil de solo estudado. Assim, a extrapolação para outras condições geotécnicas, como solos colapsíveis, solos saturados ou

fundações com diferentes condições de apoio (como engastamento), deve ser feita com cautela, sendo recomendável a realização de calibração numérica ou ensaios experimentais adicionais.

Do ponto de vista prático, os resultados reforçam a importância de considerar a interação entre geometria da estaca e os parâmetros específicos dos solos tropicais no dimensionamento de fundações submetidas a carregamentos laterais. Em especial, a presença de solos com coesão reduzida nas camadas superficiais pode afetar a eficiência da estaca curta, enquanto o comportamento das estacas longas tende a ser mais previsível devido à concentração de deslocamentos no terço superior.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se explorar o comportamento de estacas longas sob condições mais realistas de carregamento, como ações cíclicas (vento, tráfego ou eventos sísmicos), bem como a inclusão de condições de engastamento da cabeça da estaca. Além disso, estudos com instrumentação in situ permitiriam validar os modelos numéricos e aprimorar a calibração dos parâmetros do solo, elevando a confiabilidade dos projetos geotécnicos em ambientes tropicais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Juan Felix Rodriguez Rebolledo pela disponibilização do software Plaxis 3D e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pela possibilidade de realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Broms, B. (1965). Design of Laterally Loaded Piles. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 91 (SM3), 77-99.
- Jung, J. G. (2009). Fundações superficiais de linhas de transmissão submetidas a esforços de tração: comparação entre métodos de previsão de capacidade de carga. *Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil pp. 60.
- Kondner, R.L. (1963). Hyperbolic stress-strain response cohesive soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE 89, pp. 115-143.
- Lautenschläger, C. E. R., 2010, Modelagem Numérica do Comportamento de Fundações Profundas Submetidas a Carregamento Lateral, *Dissertação (mestrado)* - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, pp. 1-181.
- Oliveira, B. C., Sales, M. M., Angelin R. R., Junior, L. C. G. (2022). Modelagem Numérica de uma Estaca Prensada e Concretada in situ Instalada em um Perfil de Solo Tropical. *XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Campinas, São Paulo, Brasil, pp. 7888-7895.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P., Camapum de Carvalho, J. (2019). Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*, 42(1), São Paulo, Brasil, pp. 61-74. doi:10.28927/sr.421061.
- Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1999). The hardening soil model: formulation and verification, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema, Rotterdam.
- Soos von, P. (2001). Properties of Soil and Rock (in German), *Grundbautaschenbuch*, vol. 1, 6th Ed., Ernst and Son, Berlin, pp. 117-201.
- Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., Guan, H. (2012). Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society*, pp. 682-697.

ESTUDO DE LINHAS DE FLUXO EM COMPÓSITOS SOLO-FIBRA DE AÇAÍ

Kauã da Silva Gomes*

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental /Brasília/Brasil

Augusto Barbosa Silva

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental /Brasília/Brasil

André Luís Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental /Brasília/Brasil

RESUMO

Diante da crescente preocupação com a correta destinação de resíduos e sua reutilização, surge a oportunidade de pesquisas que atendam essas demandas de forma eficiente. Na geotecnia, o uso de fibras naturais como reforço de solos destaca-se como uma alternativa viável tanto para a destinação de resíduos orgânicos quanto para o aprimoramento das propriedades mecânicas dos solos, com estudos frequentes sobre o impacto dessas fibras na resistência dos materiais. No entanto, as alterações nas propriedades hidráulicas decorrentes da adição de fibras ainda são pouco exploradas. Este estudo investigou o comportamento hidráulico de um compósito solo-fibra, composto por solo arenoso reforçado com fibras de açaí (*Euterpe oleracea*). Foi realizada uma abordagem experimental que incluiu ensaios de permeabilidade e observação direta das linhas de fluxo utilizando um modelo físico em laboratório. As fibras foram incorporadas ao solo em uma concentração de 1%, e a dinâmica do fluxo de água foi analisada por meio da saturação do compósito e captura de imagens. Paralelamente, uma simulação teórica foi realizada utilizando o software SEEP/W, permitindo a comparação com o comportamento do solo sem fibras. Os resultados mostraram que a adição de fibras de açaí ao solo não alterou significativamente as trajetórias das linhas de fluxo, mantendo a condutividade hidráulica dentro da mesma ordem de grandeza observada no solo puro. A ausência de variações no comportamento hidráulico indica que o uso de fibras de açaí pode ser uma solução viável em projetos que busquem melhorar a resistência mecânica do solo sem comprometer suas propriedades hidráulicas. Este estudo reforça a aplicação de materiais naturais e sustentáveis em soluções geotécnicas, especialmente em regiões onde esses recursos são abundantes e de baixo custo.

PALAVRAS-CHAVE: Linhas de Fluxo, Solos Reforçados, Modelo Reduzido.

ABSTRACT

*In light of the growing concern over the proper disposal of waste and its reuse, there is an emerging opportunity for research that addresses these demands efficiently. In geotechnics, the use of natural fibers as soil reinforcement stands out as a viable alternative for both the disposal of organic waste and the enhancement of soil's mechanical properties, with frequent studies focusing on the impact of these fibers on material strength. However, changes in hydraulic properties resulting from fiber addition remain underexplored. This study investigated the hydraulic behavior of a soil-fiber composite, consisting of sandy soil reinforced with açai fibers (*Euterpe oleracea*). An experimental approach was undertaken, including permeability tests and direct observation of flow lines using a physical model in the laboratory. The fibers were incorporated into the soil at a concentration of 1%, and the water flow dynamics were analyzed through composite saturation and image capture. In parallel, a theoretical simulation was conducted using SEEP/W software, allowing comparison with the behavior of soil without fibers. The results showed that the addition of açai fibers to the soil did not significantly alter the flow line trajectories, maintaining hydraulic conductivity within the same order of magnitude as observed in pure soil. The absence of variations in*

*Autor correspondente: kauagomes555@gmail.com

hydraulic behavior indicates that the use of açai fibers may be a viable solution in projects seeking to improve the soil's mechanical strength without compromising its hydraulic properties. This study reinforces the application of natural and sustainable materials in geotechnical solutions, especially in regions where these resources are abundant and low-cost.

KEYWORDS: Flow Lines, Reinforced Soils, Small-Scale Model.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia tem enfrentado desafios cada vez maiores, especialmente em projetos de grande porte, devido às crescentes demandas da sociedade. No campo da geotecnia, esses desafios são ainda mais pronunciados pelas limitações nas propriedades de resistência dos solos. Uma solução eficaz e cada vez mais utilizada para superar essas dificuldades é a adição de fibras naturais como reforço, o que contribui significativamente para o aumento da resistência dos solos.

Embora estudos demonstrem que a adição de fibras altera as propriedades mecânicas do solo, ainda são escassos os trabalhos que se dedicam a investigar a influência desse reforço na variação dos caminhos preferenciais da água durante a percolação no compósito. Este parâmetro é fundamental para ser controlado, pois pode ocasionar processos de erosão interna e piping.

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo verificar, por meio de um experimento físico utilizando linhas de fluxo, se a adição de fibras em um solo arenoso pode modificar as trajetórias preferenciais de percolação da água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos Reforçados

Na engenharia, quando um material apresenta propriedades mecânicas insatisfatórias, é comum buscar soluções para incrementá-las sempre que possível. O mesmo princípio se aplica à geotecnia. Quando um solo apresenta resistência insuficiente para atender às exigências do projeto, recorre-se à utilização de reforços. Segundo Castro (2020), o reforço de solos é o processo de introdução de elementos ao maciço terroso que possam resistir à tração.

Um material amplamente utilizado para o reforço de solos são as fibras vegetais, que, quando adicionadas ao solo, proporcionam maior rigidez e resistência. Além disso, em alguns casos, as fibras podem controlar a abertura e o espaçamento de fissuras, reduzindo a possibilidade de fluxos de água

indesejados através dessas aberturas (Gomes, 2018; Faustino, 2022).

As propriedades mecânicas do compósito solo-fibra dependem das características das fibras adicionadas, como sua porcentagem, comprimento e peso, além das propriedades físicas e mecânicas do solo a ser reforçado. Esses fatores influenciam diretamente no comportamento do compósito resultante (Curcio, 2008; Silveira, 2018). Além disso, o comportamento hidráulico do solo também pode ser afetado pela adição de fibras. Em muitos casos, observa-se um aumento na condutividade hidráulica com o incremento do teor de fibras, uma vez que as fibras podem criar caminhos preferenciais para o fluxo de água no compósito (Curcio, 2008; Faustino, 2022; Isaías, 2022).

2.2 Linhas de Fluxo

No solo, a água pode estar presente nos espaços vazios, ocupando parcial ou totalmente esses poros. Quando submetida a uma diferença de potencial hidráulico, essa água começa a se deslocar no interior do solo (Pinto, 2011). Compreender a dinâmica desse movimento é fundamental para várias aplicações na geotecnia, como a análise de estabilidade de encostas e fundações.

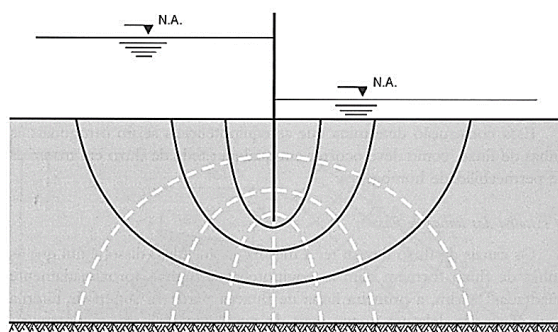


Figura 1. Rede de fluxo (modificado de Pinto, 2011).

Uma forma de entender esse fenômeno é por meio das linhas de fluxo. Segundo Massad (2003), essas linhas representam o caminho que a água percorre através de um meio saturado. Admite-se o regime de escoamento laminar, onde as linhas de fluxo não podem se cruzar. Quando as linhas de fluxo se intersectam ortogonalmente com as linhas

equipotenciais – que são linhas de igual carga hidráulica –, forma-se uma rede de fluxo (Figura 1).

O estudo das linhas de fluxo permite avaliar a influência do movimento da água na estabilidade do maciço e identificar a possibilidade de ocorrência de fenômenos como o carreamento de partículas, erosão e piping.

Existem vários métodos para entender as redes de fluxo, como métodos analíticos, analógicos, gráficos, numéricos e modelos físicos (Leão, 2018). Os modelos físicos são conduzidos em laboratórios, onde se busca reproduzir as condições, os parâmetros e as geometrias de problemas reais. Esses experimentos geralmente são realizados em caixas com faces de vidro, utilizando corantes para visualizar as linhas de fluxo (Oliveira et al., 2018; Moreira, Cavalcante e Costa, 2022; Mathede e Reginatto, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho baseou-se em uma abordagem experimental para investigar o efeito da adição de fibras de açaí nas linhas de fluxo do compósito solo-fibra. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física e hidráulica tanto do solo natural quanto do solo reforçado com fibras.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado foi uma areia lavada (Figura 2), obtida comercialmente em Brasília, amplamente empregada em ensaios geotécnicos devido à sua disponibilidade e propriedades adequadas para o estudo proposto.



Figura 2. Amostra de areia lavada.

3.1.2 Fibras

Neste estudo, foram utilizadas fibras naturais (Figura 3) provenientes do caroço do açaí (*Euterpe oleracea*) para reforçar o solo. Essas fibras resultam da produção comercial da fruta do açaí, sendo extraídas após a remoção da polpa, e foram adquiridas de uma empresa que comercializa biomassa de fibras de açaí.

As características físicas das fibras utilizadas estão dispostas e quantificadas na Tabela 1. Esses dados são oriundos de ensaios anteriores conduzidos pelo grupo de pesquisa GeoFluxo (Silva et al, 2024) e fazem parte de uma pesquisa de doutorado em andamento.



Figura 3. Amostra de fibras de açaí.

Tabela 1. Características físicas das fibras de açaí

Densidade (g/cm ³)	Área da seção transversal (mm ²)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
0,89	0,15	10,11	0,14

3.2 Métodos

O programa experimental foi realizado com o objetivo de obter os parâmetros de compactação relativa da areia e a condutividade hidráulica do compósito areia-fibra. Os ensaios foram conduzidos em conformidade com as normas vigentes.

3.2.1 Caracterização física do solo

Para a caracterização física do solo, foram realizados ensaios de granulometria, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), utilizando peneiras de diferentes aberturas para determinar a distribuição granulométrica, seguido de ensaio de sedimentação para as frações mais finas. A determinação da massa específica dos grãos foi realizada seguindo a NBR 6458 (ABNT, 2016), utilizando picnômetros.

3.2.2 Determinação dos índices de vazios

Os índices de vazios mínimo e máximo foram determinados de acordo com os procedimentos das normas NBR 16843 (ABNT, 2020) e NBR 16840 (ABNT, 2020), respectivamente. Utilizou-se um molde para determinar tanto o estado mais fofo alcançável pelo solo quanto o seu estado mais compacto.

3.2.3 Preparação das amostras

Os índices de vazios mínimo e máximo são parâmetros essenciais nos cálculos da massa do corpo de prova, considerando a compacidade relativa adotada. Neste trabalho, foi utilizada uma compacidade relativa de 70% para o solo puro e para os compósitos, para garantir uma maior estabilidade das amostras. Além disso, foi adotada uma umidade inicial de 10% para garantir melhor aderência das fibras à areia, conforme realizado por Carvalho, Monteiro e Casagrande (2023).

Além das amostras de areia pura, foi adicionada uma concentração de 1% de fibras de açaí, aleatoriamente dispersas na produção dos compósitos. Essa concentração foi escolhida com base na pesquisa de doutorado citada anteriormente (Silva et al, 2024), que indicou, por meio de ensaios mecânicos, que essa era a porcentagem ótima para o reforço com esse tipo de material.

3.2.4 Ensaio de permeabilidade

Devido à baixa permeabilidade apresentada pelas amostras ensaiadas e à dificuldade de determinação desse parâmetro por meio do permeâmetro de carga constante, foi utilizado o permeâmetro de carga variável, conforme a NBR 14545 (ABNT, 2021), em duas condições distintas: com e sem adição de fibras. Esse ensaio avalia a facilidade com que a água permeia o solo, um parâmetro fundamental para entender o movimento da água no solo. Esse conhecimento é essencial em aplicações como a construção de barragens, onde uma alta permeabilidade pode levar à erosão interna e, consequentemente, ao piping.

3.2.5 Preparação, montagem e execução do modelo reduzido

Para simular as linhas de fluxo, foi escolhido um modelo que representasse a percolação de água na fundação de uma barragem de concreto. O experimento utilizou um aquário de vidro com

dimensões internas de 58 cm x 24 cm x 25 cm e um protótipo de barragem em acrílico (Figura 4). O interior da barragem foi preenchido com pedregulho para aumentar o peso da estrutura, simulando uma barragem de gravidade.

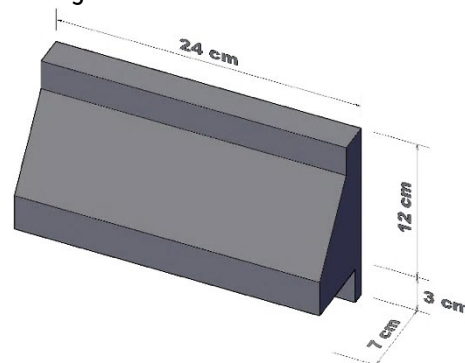


Figura 4. Geometria e dimensões da barragem escolhida para simulação

A montagem do modelo para o compósito solo-fibra foi realizada em seis camadas de 2,5 cm de altura cada, garantindo a homogeneidade e a compacidade relativa adotada. Nas duas últimas camadas, a montagem exigiu maior cautela, dado o posicionamento do protótipo da barragem. Foi fundamental assegurar que a fundação mantivesse sua homogeneidade, como mostrado na Figura 5.

Após a montagem, iniciou-se o processo de saturação, realizado com o auxílio de um equipo – dispositivo utilizado na área da saúde que permite a infusão controlada de líquidos - conectado a um reservatório de água. A saturação foi conduzida de maneira lenta e gradual, com o objetivo de evitar o aprisionamento de bolhas de ar no compósito solo-fibra. O processo teve duração de aproximadamente 24 horas.

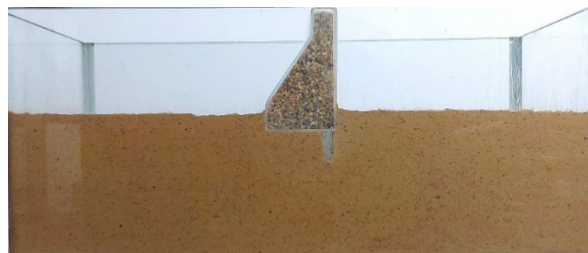


Figura 5. Vista lateral do modelo físico montado.

Com o solo saturado, o nível da água a montante foi elevado em 9 cm, deixando uma borda livre de 1 cm na barragem. A jusante, o nível foi mantido a 1 cm, criando um gradiente hidráulico que simula uma barragem convencional. Após a estabilização dos níveis de água, iniciou-se a inserção de tinta a montante, no contato fundação-vidro, para permitir a visualização das linhas de fluxo. A tinta foi aplicada

em três pontos igualmente espaçados, conforme ilustrado na Figura 6.

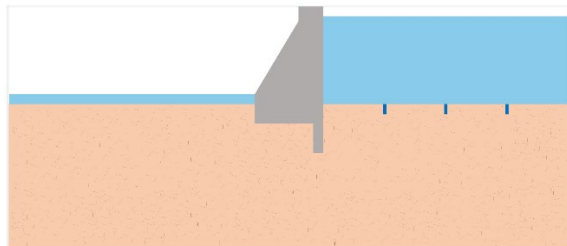


Figura 6. Detalhe da vista lateral do modelo físico com os pontos de aplicação do corante.

Todo o processo foi documentado por uma câmera fotográfica de alta resolução, com registros realizados ao longo de uma semana, entre 8h e 18h, para acompanhar a formação das linhas de fluxo no compósito solo-fibra.

Os resultados dessa etapa serviram como base para uma análise comparativa com a simulação das linhas de fluxo em solo puro, utilizando o software SEEP/W. Para o modelo computacional, foram inseridos dados de permeabilidade do solo puro e as cotas hidráulicas a montante e jusante da barragem, permitindo a geração das linhas de fluxo pelo software.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do solo

A distribuição granulométrica do solo utilizado é apresentada no Gráfico 1. O solo é composto por 2% de argila (<0,002 mm), 20% de silte (entre 0,002 e 0,06 mm) e 78% de areia, sendo este percentual dividido em 55% de areia fina, 19% de areia média e 4% de areia grossa (Figura 7). De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo foi classificado como uma areia siltosa (SM).

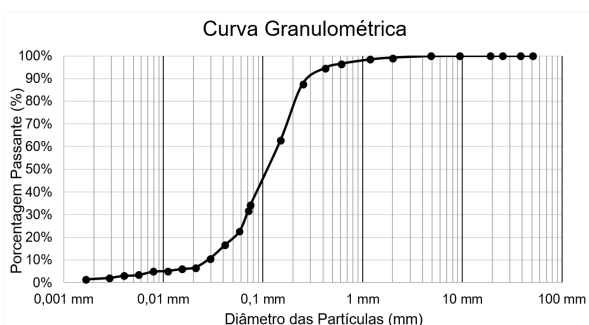


Figura 7. Curva de distribuição granulométrica do solo.

Além disso, o solo apresentou uma massa específica real dos grãos e coeficientes de uniformidade (C_u) e curvatura (C_c), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Índices físicos do solo.

Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,63
Coef. de Uniformidade (C_u)	5,4
Coef. de Curvatura (C_c)	1,3

4.2 Índices de vazios mínimo e máximo

Os índices de vazios obtidos foram de 0,64 para o índice mínimo e 1,10 para o índice máximo, valores essenciais para a compreensão da estrutura granular do solo em estudo. Esses índices, junto com a compacidade relativa adotada, foram utilizados para calcular a massa dos corpos de prova nos ensaios de permeabilidade, com um valor aproximado de 1487 g. O solo utilizado na execução do modelo reduzido foi quantificado em aproximadamente 31 kg.

4.3 Ensaios de permeabilidade

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados de permeabilidade do solo natural e do solo reforçado com fibras de açai. Observa-se uma pequena diferença numérica entre os materiais, com ambos mantendo a mesma ordem de grandeza da condutividade hidráulica (10^{-6} m/s).

Tabela 3. Permeabilidades do solo sem e com a presença das fibras.

Permeabilidade sem fibras (m/s)	$3,14 \times 10^{-6}$
Permeabilidade com fibras (m/s)	$3,92 \times 10^{-6}$

A adição de fibras ao solo tende a criar caminhos preferenciais, o que pode contribuir para um leve aumento na permeabilidade. Faustino (2022) documentou um aumento de até 31% na condutividade hidráulica de compósitos solo-fibra, apesar de a ordem de grandeza permanecer constante.

Neste estudo, embora tenha havido um aumento numérico na permeabilidade após a adição de fibras, a ordem de grandeza permaneceu inalterada. Assim, pode-se inferir que o comportamento hidráulico dos materiais não foi significativamente alterado para as características das fibras adotadas neste estudo. Alterações na morfologia e no teor de fibras, assim como em diferentes cenários geotécnicos, podem provocar variações mais expressivas nos valores de permeabilidade.

No entanto, é importante ressaltar que a permeabilidade isoladamente não define a criação de caminhos preferenciais, o que justificou a realização da análise das linhas de fluxo.

4.4 Análise de linhas de fluxo

Após a adição da tinta, as linhas de fluxo começaram a se formar, e as imagens do fenômeno foram capturadas, conforme mostrado na Figura 8.

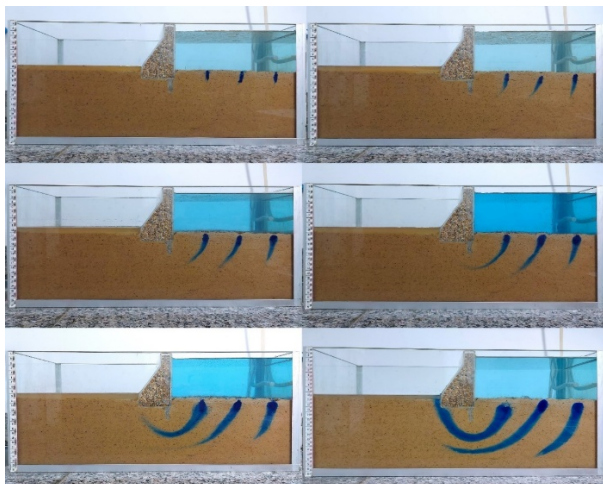


Figura 8. Avanço das linhas de fluxo ao longo do ensaio.

As imagens permitiram visualizar o processo de formação das linhas de fluxo ao longo do tempo. Observou-se que a linha de fluxo mais próxima à barragem foi a única a completar toda a trajetória, indo de montante a jusante, devido aos valores mais altos de gradiente hidráulico. Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Moreira, Cavalcante e Costa (2022). Para que todas as linhas de fluxo completassem suas trajetórias, seria necessário prolongar a duração do ensaio, uma vez que o meio apresenta permeabilidade e gradiente hidráulico baixos.

No software SEEP/W (GeoStudio), foi realizada uma simulação completa das linhas de fluxo para o solo sem adição de fibras, conforme ilustrado na Figura 9.

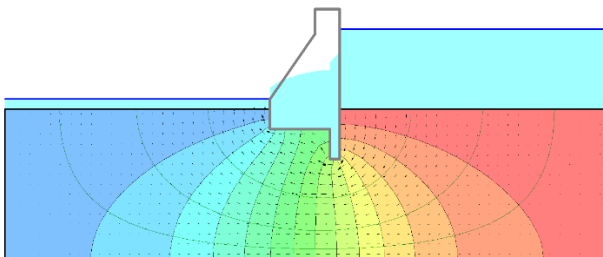


Figura 9. Simulação das linhas de fluxo no SEEP/W

A simulação teórica mostra os padrões de movimento da água no interior do solo de fundação da barragem. As setas indicam a percolação da água, enquanto as linhas verdes representam as linhas de fluxo, e as linhas pretas que cruzam as linhas de fluxo são as equipotenciais.

As imagens do experimento mostraram padrões de fluxo bem definidos, com curvas e trajetórias relativamente uniformes. Da mesma forma, a simulação no SEEP/W revelou um padrão regular, com linhas de fluxo e equipotenciais que seguem o comportamento esperado de um solo homogêneo, sem grandes desvios ou trajetórias preferenciais.

Em ambos os casos, os resultados indicaram que a condutividade isotrópica garantiu um fluxo previsível e uniforme, sem grandes variações ou desvios ao longo das trajetórias. Portanto, a adição das fibras de açaí não foi suficiente para modificar o padrão regular do fluxo de água no interior do maciço.

A ausência de alterações significativas nos padrões de fluxo de água, juntamente com a manutenção da condutividade hidráulica do solo arenoso reforçado, evidenciada pelos ensaios de permeabilidade, representa um aspecto positivo para projetos em que o controle da permeabilidade é crucial, como sistemas de drenagem, barreiras hidráulicas e aterros. Isso indica que o solo manteve suas características iniciais de condução de água, mesmo com a adição de fibras.

O fato de as fibras de açaí não interferirem no fluxo da água também sugere que o solo reforçado mantém um comportamento previsível em termos de estabilidade hidráulica. Essa estabilidade é crucial em situações onde mudanças abruptas nos padrões de fluxo poderiam causar erosão interna ou carreamento de partículas, especialmente em barragens. Além disso, a constatação de que as fibras não alteram significativamente o fluxo de água é vantajosa para projetos em que o solo precisa suportar maiores cargas mecânicas, sem comprometer suas propriedades hidráulicas.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a variabilidade das propriedades físicas das fibras utilizadas, por se tratar de um material de origem natural pode haver variações nas características a depender da origem e do processamento realizado. E, para aplicações reais na qual são utilizados grandes volumes de material, garantir a homogeneidade do compósito solo-fibra pode ser um desafio que deve ser levado em consideração, uma vez que essas alterações podem influenciar as propriedades hidromecânicas do compósito.

5 CONCLUSÃO

A construção do modelo físico com a adição de fibras permitiu a observação das linhas de fluxo e da percolação da água no interior do compósito solo-fibra, conforme proposto neste estudo. Observou-se que a adição de fibras de açaí ao solo arenoso não influenciou significativamente a trajetória e a dinâmica das linhas de fluxo, mantendo o comportamento hidráulico amplamente conhecido para solos arenosos.

Esse comportamento pode ser explicado pela natureza das fibras de açaí e sua interação com o solo arenoso. Embora seja constatado na literatura que as fibras de açaí contribuam para o aumento da resistência ao cisalhamento do compósito, elas não possuem características que alterem significativamente as propriedades hidráulicas do solo, como absorção de água. Além disso, a porcentagem de fibras adicionada ao solo foi insuficiente para modificar as características de percolação.

As fibras de açaí, ao serem incorporadas à areia, tendem a se distribuir entre os grãos sem formar barreiras significativas que alterem o fluxo de água. O espaçamento entre as partículas de areia continua a dominar o comportamento hidráulico, mantendo as trajetórias das linhas de fluxo inalteradas.

Embora a adição de fibras naturais ao solo tenda a melhorar suas propriedades mecânicas, o impacto sobre o comportamento hidráulico ainda é pouco estudado. Este estudo demonstrou que, para o uso de fibras de açaí como reforço em uma matriz arenosa, nas proporções e condições de compactação adotadas, não há alterações no comportamento hidráulico em relação ao solo puro.

A principal conclusão deste estudo é que o reforço com fibras de açaí pode ser uma solução viável em situações em que se busca aumentar a resistência ao cisalhamento e melhorar o comportamento mecânico do solo, sem comprometer suas propriedades hidráulicas. Isso abre a possibilidade de utilização de materiais naturais, como as fibras de açaí, em soluções sustentáveis de engenharia, especialmente em regiões onde esses recursos são abundantes e de baixo custo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

pela bolsa de pesquisa que foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, e ao Grupo de Pesquisa Inovações e Tecnologias Aplicadas em Geotecnia Ambiental (GeoFluxo), por todo apoio e infraestrutura fornecidos ao longo de toda a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 48 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16843: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16840: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021.
- CARVALHO, L. M. C. D., MONTEIRO, F. F., CASAGRANDE, M. D. T. (2023). Large-scale direct shear testing in coir fibers reinforced sand. *Soils and Rocks*, 46, e2023002822.
- CASTRO, C. L. de. (2020). Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- CURCIO, D. S. (2008). Comportamento Hidromecânico de Compósito Solo-fibra. Dissertação (Mestrado) – COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- FAUSTINO, O. W. C. (2022). Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
- GEO-SLOPE INTERNATIONAL. (2012). Seepage Modeling with SEEP/W. Version 8.15.
- GOMES, N. C. (2018). Comportamento Hidromecânico de Solos Reforçados com Fibras PET para Aplicação em Barreiras de Contenção de Resíduos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- ISAIAS, A. F. (2022). Permeabilidade de misturas de solo argiloso e fibras de polipropileno. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- LEÃO, M. F. (2018). Fundamentos da mecânica dos solos. Londrina/PR: Ed. E Dist. Educacional S.A.

- MASSAD, F. (2003). Obras de terra, curso básico de geotecnia. 216 p. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de textos.
- MATHEDE, L. S. S., REGINATTO, M. C. (2023). Análise comparativa entre valores de poropressões obtidas com base em redes de fluxo e por meio de ensaio em tanque para estudo de permeabilidade. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.
- MOREIRA, G.R., CAVALCANTE, A.L.B., COSTA, K.R.C.B. (2022). Estudos laboratoriais para a análise do fenômeno de erosão interna. Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia, Brasília, 2022.
- OLIVEIRA, T. C. F. et al. (2018). Avaliação de modelos físicos reduzidos construídos em laboratório para o estudo da percolação de Água em duas barragens homogêneas de terra. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018.
- PINTO, C.S. (2011). Curso básico de mecânica dos solos. 3 ed. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil.
- SILVA, A.B. et al. (2024). Ecoengenharia em geotecnia: utilização de fibras de açaí da Amazônia (euterpe oleracea) no melhoramento de solos arenosos. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2024.
- SILVEIRA, M. V. (2018). Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá e Sisal. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ESTUDO INICIAL DO USO DO FRUTO DE *Sapindus Saponaria* PARA ESTABILIZAÇÃO DE AREIA

Bruno Rocha Nunes

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

Gabriella Melo de Deus Vieira

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

José Wilson dos Santos Ferreira

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

RESUMO

O estudo de novos estabilizantes de solo se torna cada vez mais relevante, considerando a necessidade de equilibrar critérios de sustentabilidade, desempenho, custo e redução de impactos ambientais. Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso do fruto da planta *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico em matriz de areia. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física da areia, ensaios mecânicos de compactação com 20 e 30% de adição do fruto, resistência à compressão simples (RCS) para diversos períodos de cura, ensaios não destrutivos de ultrassom, além da microscopia eletrônica de varredura (MEV). A adição do estabilizante possibilita a compactação da areia, e a elevação do teor de incorporação reduz a densidade máxima seca e aumenta o teor de umidade ótimo. De maneira geral, observou-se aumentos significativos da RCS com os períodos de cura para ambos teores, devido ao efeito de aglutinação promovido pelo estabilizante e presença de substância química preenchendo os vazios, conforme observado na MEV. A aplicação de deformações antes da cura dos corpos de prova (CPs) mostrou pouca influência na RCS quando comparado com o teor de umidade. A correlação entre os resultados de ultrassom e RCS apresentou baixa eficiência, devido a variabilidade do estabilizante natural. A partir dos resultados obtidos, evidencia-se o potencial técnico e ambiental do uso da planta *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico para fins geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilizante, areia, fruto, *Sapindus saponaria*.

ABSTRACT

*The study of new soil stabilizers is becoming increasingly relevant, considering the need to balance sustainability, performance, cost, and environmental impact reduction criteria. This work aims to evaluate the use of the fruit of the *Sapindus saponaria* plant as an organic stabilizer in a sand matrix. For this purpose, physical characterization tests of the sand were carried out, mechanical compaction tests with 20% and 30% fruit addition, unconfined compressive strength (UCS) tests for different curing periods, non-destructive ultrasonic tests, and scanning electron microscopy (SEM) analyses. The addition of the stabilizer enabled the compaction of the sand, and increasing the incorporation content reduced the maximum dry density while increasing the optimum moisture content. Overall, significant increases in UCS were observed with curing time for both addition levels, due to the agglutination effect promoted by the stabilizer and the presence of a chemical substance filling the voids, as observed in SEM analyses. The application of deformations before curing the specimens (CPs) showed little influence on UCS when compared to the influence of moisture content. The correlation between ultrasonic test results and UCS showed low efficiency due to the variability of the natural stabilizer. Based on the results obtained, the technical and environmental potential of using the *Sapindus saponaria* plant as an organic stabilizer for geotechnical purposes is evidenced.*

KEYWORDS: Stabilizer, sand, fruit, *Sapindus saponaria*.

*Autor correspondente: autor@e-mail.com



<http://dx.doi.org>
ISSN: 2595-0002

1. INTRODUÇÃO

A expansão urbana e o crescimento das infraestruturas demandam melhorias nas condições do solo para diversas obras geotécnicas, como contenção de encostas, aterros e pavimentação. Esse cenário impulsiona a necessidade de materiais de construção, como estabilizantes de solo, que contribuem para a adequação do terreno às condições locais (TAVARES, 2024). Com a crescente necessidade de vias mais duráveis e resistentes, setores como a construção civil e obras de infraestrutura têm adotado cada vez mais a estabilização de solos como uma solução eficaz para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade de terrenos inadequados. Entre as técnicas de estabilização química mais comuns, destacam-se o uso de cal, cimento e cinza volante, cada uma com características específicas. A estabilização com cal, por exemplo, é amplamente aplicada em solos argilosos e siltosos. A cal reage quimicamente com os minerais do solo, promovendo um aumento significativo da resistência, além de reduzir a plasticidade e a tendência à expansão. Esse processo envolve a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, resultando em um solo mais estável e com maior capacidade de suporte, resistente tanto a variações climáticas quanto à carga estrutural (AZEVEDO, 2010). Além da estabilização com cal, outra técnica amplamente empregada é o solo cimento, que consiste na mistura de solo, cimento e água, seguida de compactação e cura. A reação do cimento com a água e os minerais do solo forma compostos que aumentam a resistência do material, além de reduzir sua plasticidade e compressibilidade, sendo especialmente eficaz em solos granulares, onde a coesão, oriunda da cimentação entre as partículas é fundamental para a resistência da estrutura. Além das reações de hidratação e endurecimento do cimento, nas partículas finas do solo, o cimento provoca a flocculação ao redor das partículas, unindo o solo por meio do processo de cimentação (GARCIA; SANTOS; RIBEIRO, 2011). Por fim, a cinza volante, um resíduo da queima de carvão em usinas termoeletricas, apresenta-se como uma alternativa viável para estabilizar solos com alto teor de cálcio. A cinza volante geopolimerizada atua como aglutinante, imobilizando as partículas de cálcio e prevenindo a formação de compostos prejudiciais, como gesso e etringita, que podem causar fissuras. Isso resulta em uma microestrutura mais compacta e resistente, tornando o solo mais adequado para

aplicações de grande impacto, como rodovias (BRITO; PARANHOS, 2017). No entanto, a produção de cimento envolve processos de combustão química e térmica, que são grandes responsáveis pela emissão de dióxido de carbono (CO₂). Estima-se que mais de 4 bilhões de toneladas de cimento sejam produzidas anualmente, contribuindo com cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (LEHNE; PRESTON, 2018). Diante desse impacto ambiental, torna-se fundamental buscar alternativas mais sustentáveis. Algumas dessas soluções incluem o uso de resíduos industriais reciclados, como micro-PET, para aumentar a durabilidade de materiais como o concreto asfáltico (HMA) (FERREIRA et al., 2022). Além disso, o uso de fibras naturais como reforço de solos tem ganhado destaque por sua menor pegada ambiental. Um exemplo é o emprego da fibra de coco, que, em proporções de 1,5%, resultou em aumento de 60% no ISC (Índice de Suporte Califórnia) em comparação com o mesmo solo sem fibras (MACHADO et al., 2024). Embora já existam estudos sobre o uso de diversos estabilizantes naturais, há uma lacuna significativa na literatura no que diz respeito ao uso do fruto triturado da *Sapindus saponaria* como estabilizante. A *Sapindus saponaria* é uma planta nativa com ocorrência confirmada em várias regiões da América Central. No Brasil, possui avistamentos na Bahia, Ceará, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás e Distrito Federal (EMBRAPA; CARVALHO, 2014). Neste último, foram feitos avistamentos em Brasília, Samambaia, Gama e Santa Maria. Especificamente em Santa Maria, foram avistados 119 exemplares frutificando. O fruto da *Sapindus saponaria* é utilizado como sabão e remédio para tratar diversas condições, incluindo úlceras, sarna, dores nas articulações, inflamações e lesões de pele causadas por fungos (TSUZUKI et al., 2007). Assim, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais de misturas de solo estabilizadas com *Sapindus saponaria*, propondo essa solução como alternativa sustentável para a engenharia.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

A escolha do material recaiu sobre a areia, após resultados de teste indicarem maior eficiência em comparação à argila. A areia utilizada, vendida como

areia fina, foi adquirida de distribuidores localizados em Brasília. Os frutos foram colhidos de algumas das árvores avistadas logo antes do período chuvoso, visando estocá-los em seu menor estado de umidade. Em seguida, a noz foi separada da semente e triturada. O material triturado foi então passado por uma peneira de 2 mm para padronizar o tamanho das fibras do fruto que foram utilizadas no solo (Figura 1).



Figura 1. (A) cacho colhido da árvore, (B) Frutos separados para triturar, (C) casca do fruto triturada e peineirada.

2.2 Caracterização da areia

Para a caracterização física da areia utilizada na moldagem dos CPs, foram realizados a análise granulométrica, conforme a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7181 (2025), e a determinação da massa específica dos grãos, segundo a NBR 17212 (2025). Os ensaios de granulometria foram realizados com o objetivo de identificar a distribuição das dimensões das partículas constituintes do solo e determinar a proporção de diferentes faixas granulométricas. Os ensaios foram conduzidos utilizando uma amostra de 1000g de areia, inicialmente passada pela peneira de 2mm. O material retido foi lavado para remoção dos finos e, em seguida, levado à estufa para secagem. Do material passante, foram separados 120g para o ensaio de sedimentação, que consistiu na imersão em uma solução de hexametáfosfato de sódio, e posterior agitação mecânica por meio de um dispersor. Após a dispersão, o material sedimentado foi transferido para uma proveta de 1000cm³, completada com água destilada. A proveta foi então agitada e, em ambiente de temperatura controlada realizaram-se as leituras do densímetro calibrado e da temperatura em intervalos de tempo pré-estabelecidos, conforme o procedimento normativo. Para o ensaio de determinação da massa específica dos grãos do solo, foram utilizados três picnômetros de 500 mL devidamente calibrados. Inicialmente, 60 g de solo,

previamente imerso em água por mais de 12 horas, foram colocados no dispersor mecânico por 15 minutos. Após o processo de dispersão, o material foi transferido completamente para os picnômetros. Estes foram, então, aquecidos e, após 15 minutos, submetidos a uma válvula de vácuo, com o objetivo de remover o ar dissolvido na água e nos vazios entre os grãos. Decorridos mais 15 minutos, os picnômetros foram preenchidos com água destilada até aproximadamente 2 cm abaixo da marca de calibração e colocados em ambiente de temperatura controlada para repouso. Após 24 horas, os picnômetros foram preenchidos até a marca de calibração e pesados. Com o peso total do conjunto e com a curva de calibração de massa do picnômetro em função da temperatura, foi possível calcular a massa específica dos grãos do solo.

2.3 Compactação

Os teores de casca escolhidos para o ensaio de compactação segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2025) foram de 20% e 30% em relação a massa seca de areia. Os teores foram escolhidos após verificar certa estabilidade de eficiência nessas proporções em testes preliminares. Utilizou-se um cilindro grande (ISC) e a energia aplicada foi normal. O ensaio foi realizado com o reaproveitamento do material, iniciado a aproximadamente 6% de umidade. As cascas foram inicialmente misturadas à areia na forma seca e, em seguida, a água foi adicionada, promovendo uma nova homogeneização. O material foi disposto em cinco camadas, sendo executados 12 golpes por camada com um soquete grande. Os parâmetros de compactação, i.e., teor de umidade ótima e massa específica seca máxima, obtidos nesse ensaio foram utilizados nos ensaios subsequentes. A Figura 2 contém uma foto da mistura compactada no último ponto do ensaio de compactação do teor de 30% de casca.

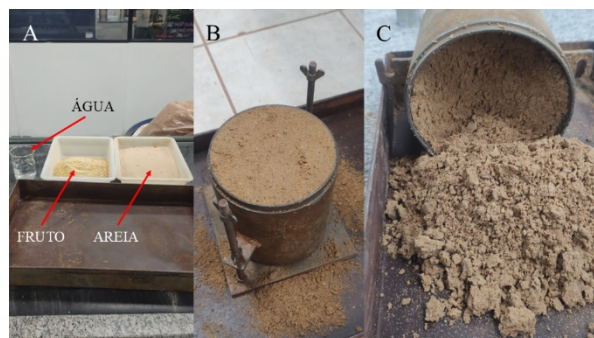


Figura 2. (A) material separado para mistura,

(B)compósito compactado, (C) textura do compósito.

2.4 Comportamento mecânico e Microscopia

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado em triplicata conforme a norma NBR 1227 (ABNT,2016), para tempos de cura seca ao ar de 14, 21 e 28 dias. Os corpos de prova, com dimensões de 50,1mm de diâmetro e 100,0mm de altura, foram moldados a partir de compactador miniatura. Durante a moldagem, foram aplicados 5 golpes com o soquete pequeno em uma camada (DER-ME 228, 1994). A aplicação da carga axial foi conduzida a uma velocidade de 1,00 mm/min, submetendo os corpos de prova a deformações de até 10%, exceto os CPs de 14 dias de cura, que foram submetidos a deformações menores para não danificar irreversivelmente a estrutura e inviabilizar o teste descrito a seguir. Os CPs com 14 dias de cura foram submetidos a deformações , e, nas fissuras resultantes, aplicou-se água para promover reidratação. Após esse processo, os CPs foram colocados em estufa a 40 °C para desidratação durante mais 14 dias. O objetivo desse experimento foi investigar uma possível propriedade regenerativa da resistência dos corpos de prova devido ao processo de reidratação. Foi medido também a massa e o tempo para a passagem de ondas ultrassônicas longitudinais com frequência de 60Hz emitido pelo equipamento Ultrasonic tester E46Controls, com tensão de emissão de 2,5 kV em intervalos ao longo de 28 dias de um corpo de prova com 30% de teor de casca a fim de obter o módulo de elasticidade a pequenas deformações. Com os dados de ultrassom e o comprimento do corpo de prova, foi possível calcular a velocidade da onda que atravessa o CP e entender o como ocorre o aumento de rigidez do material no intervalo estudado. A velocidade de uma onda sonora pode ser calculada pela fórmula $v = d/t$, onde v representa a velocidade, d é a altura do CP e t é o tempo gasto para percorrer essa distância. Posteriormente, os dados foram plotados em um gráfico, e uma nova regressão foi realizada com o objetivo de verificar o valor de R^2 , ou seja, avaliar a correlação entre o tempo de cura e a velocidade da onda.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas a partir de uma pequena amostra fina, moldada sobre uma cápsula e submetida a secagem em estufa a 40°C por 24 horas, visando garantir a completa remoção de umidade do material.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização da areia

No ensaio de determinação da massa específica dos grãos, obteve-se um valor de 2,66 g/cm³ para o solo puro. Para o ensaio de granulometria, onde se observa a distribuição dos tamanhos de grãos, foi obtida a curva apresentada na Figura 3.

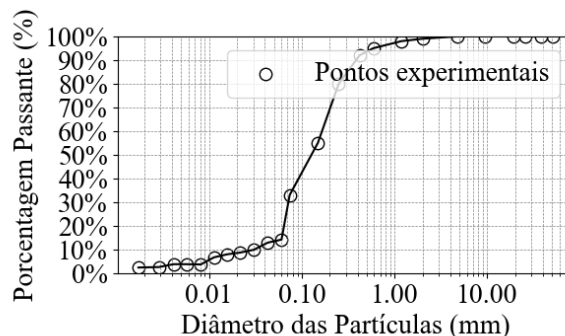


Figura 3. Distribuição granulométrica.

Os valores do coeficiente de uniformidade e do coeficiente de curvatura, conforme a Tabela 1, indicam que o material apresenta uma distribuição granulométrica mal graduada. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo em questão é classificado como arenoso de granulação grossa. Por ser areia, ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) não foram realizados, impedindo a grassificação real do material pela SUCS. Contudo, com base no comportamento observado e na análise granulométrica, o solo pode ser interpretado como uma areia siltosa (SM).

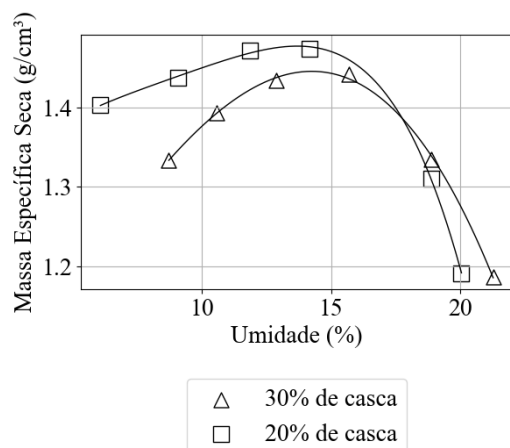
Tabela 1. Dados da análise

d10 (mm)	d30 (mm)	d60 (mm)	Cu	Cc
0,031	0,072	0,169	5,45	0,03

3.2 Parâmetros de compactação dos compósitos

Embora não seja possível construir a curva de compactação da areia pura, a adição do estabilizante permitiu a construção das curvas para os compósitos com 20 e 30% de adição. Esse comportamento pode ser atribuído à alta quantidade de material orgânico inserido na amostra, o que conferiu maior coesão ao material.

A Figura 4 ilustra um aumento do teor de umidade ótima acompanhado de uma diminuição da massa



específica seca máxima à medida que o teor de adição aumenta.

Figura 4. Curvas de compactação.

Esse aumento da umidade ótima pode ser explicado pela maior quantidade de fruto que demanda mais água para ser hidratada e atingir o ponto ótimo. A redução da massa específica, por sua vez, é causada pela baixa densidade do fruto, que ao ocupar um volume maior, diminui a densidade global da amostra. A tabela 2 indica os pontos de umidade ótima e densidade seca máxima para ambos os teores. A amostra com 20% de fibra apresentou menor variação no ramo seco em comparação à amostra com 30%, o que era esperado, uma vez que maiores concentrações de material vegetal impacta de forma mais expressiva o processo de compactação.

Tabela 2. Dados das propriedades dos materiais

20%		30%	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Wmax	13,7%	Wmax	14,3%
γd	1,48 g/cm³	γd	1,45 g/cm³

3.3 Comportamento mecânico e Microestrutural

Nos ensaios de resistência à compressão não confinada realizados com 14 dias de cura, todos demonstraram comportamento plástico em baixas deformações, com um rompimento amortecido. Entre eles, os CPs compósitos com 20% de fibra apresentaram os melhores resultados mais satisfatórios em termos de resistência à compressão, superando aqueles com 30%, como evidenciado na

Figura 5. Após 21 dias de cura, houve uma melhora significativa da RCS para ambos os teores de fruto em relação aos resultados de 14 dias. Embora, em média, os CPs com 20% tenham mostrado melhor desempenho, para condição particular com 30% de fibra demonstrou a maior resistência isolada, como mostrado na Figura 6. Para os corpos de prova de 28 dias, os resultados foram ainda mais favoráveis, com os CPs contendo 20% de fibra alcançando a maior resistência à compressão não confinada (Figura 8). O rompimento antes suave presente até os CPs de 28 dias se torna mais abrupto nos corpos de prova reidratados na fissura e submetidos a estufa por 14 dias o que proporcionou resistência de pico ainda maiores para todos os CPs.

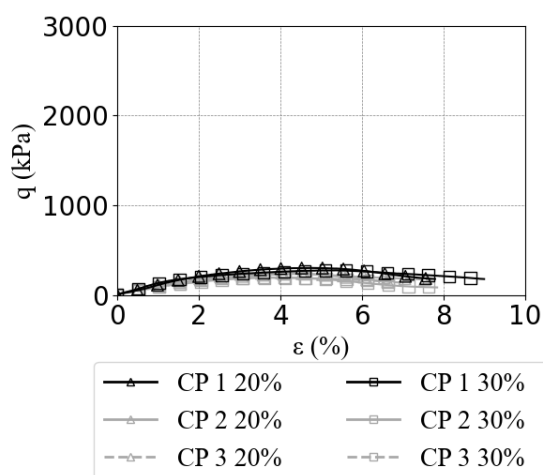


Figura 5. Curvas tensão-deformação das misturas de 14 dias de cura

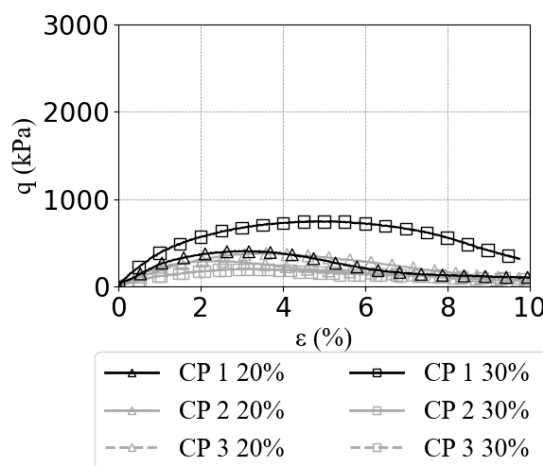


Figura 6. Curvas tensão-deformação das misturas de 21 dias de cura

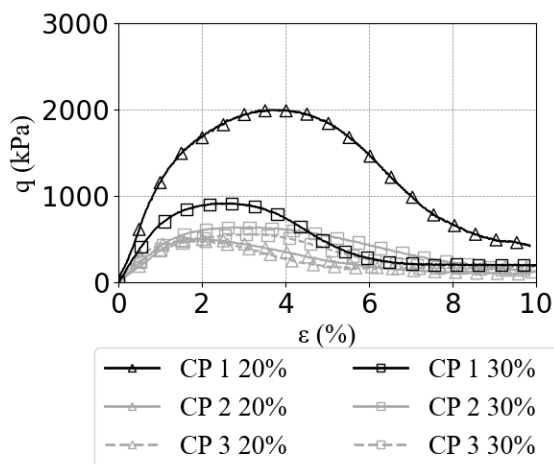


Figura 7. Curvas tensão-deformação das misturas de 28 dias de cura

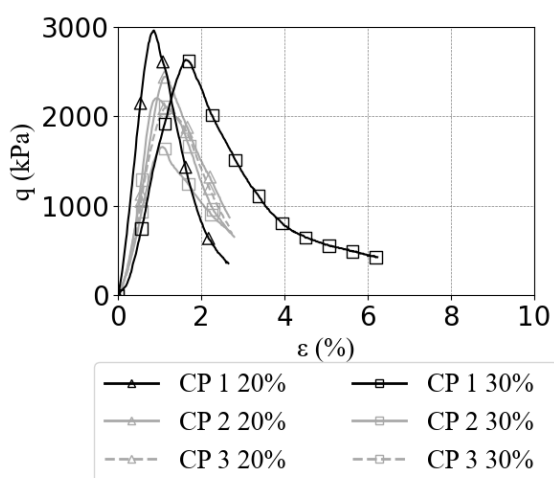


Figura 8. Curvas tensão-deformação das misturas de 14 dias de cura secos em estufa

Ao longo de todos os teores de fibra e tempos de cura avaliados, observou-se uma alta variabilidade nos resultados dos CPs. A figura 9 mostra o valor médio e a dispersão entre as triplicatas das resistências máximas à compressão simples (RCS).

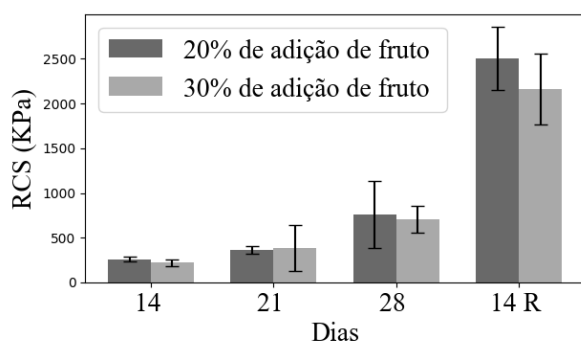


Figura 9. RCS médio e desvio entre as triplicatas, o termo "R" significa que ele foi submetido à recompressão.

Na Figura 10, foi correlacionada a velocidade de passagem da onda com o tempo de cura. Uma regressão linear indica um R^2 de 0,89, o que evidencia um bom ajuste, ou seja, uma boa correlação entre a velocidade da onda ultrassônica e o tempo de cura.

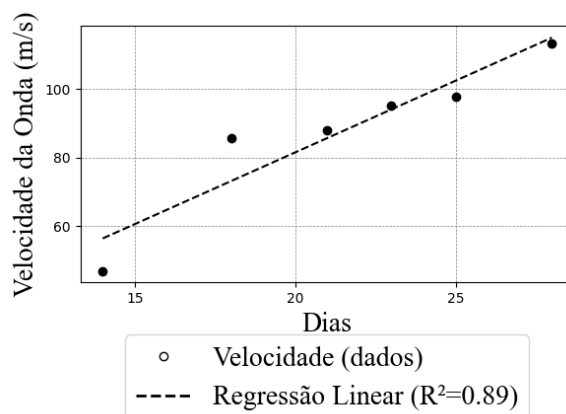


Figura 10. Variação da velocidade da onda ao longo do tempo de cura

A Figura 11, obtidas pelo MEV, revela a presença de uma substância, que ocupa os espaços vazios entre os grãos. A Figura 12 evidencia a aglutinação das partículas, enquanto a Figura 13 ilustra o efeito desse processo de aglutinação em ampliações maiores.

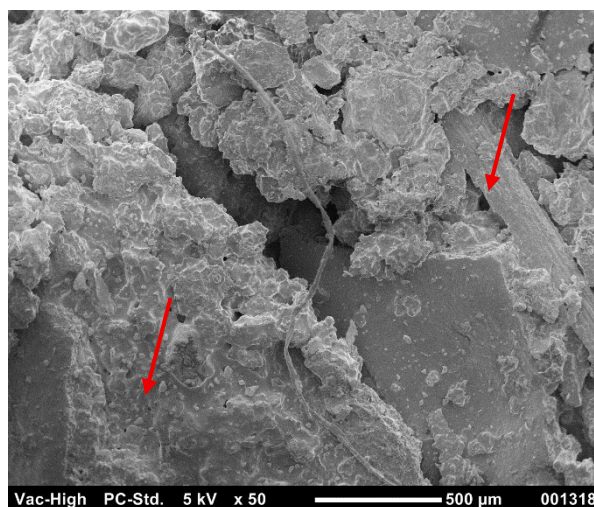


Figura 11. Imagens de microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 50x.

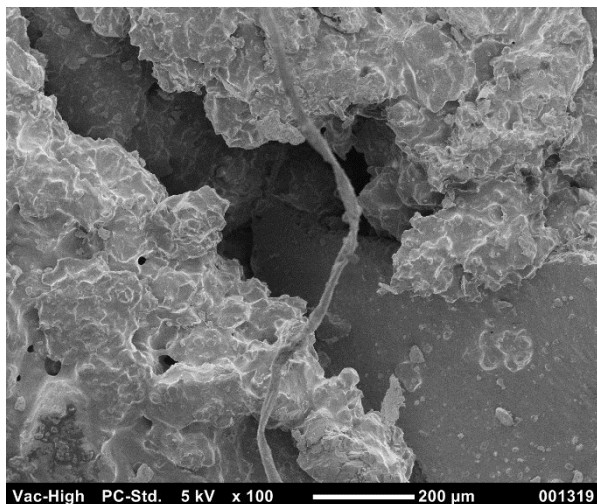


Figura 12. Imagens de microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 100x

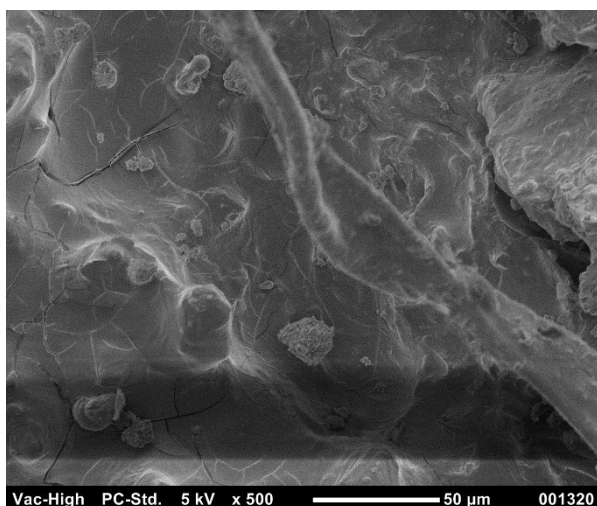


Figura 13. Imagens de microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 200x

4 CONCLUSÕES

A utilização da planta *Sapindus saponaria* como agente de estabilização em areia demonstrou resultados promissores. Os compósitos estabilizados com o material vegetal apresentaram um aumento significativo na resistência à compressão, especialmente após períodos de cura, o que corrobora a viabilidade de seu uso em processos de estabilização de curto prazo em cura ao ar. Os ensaios de compactação mostraram que a adição de fibra vegetal alterou significativamente as propriedades do solo. O aumento no teor de fibra elevou a umidade ótima e reduziu a massa específica do solo, conforme esperado, devido à baixa densidade da fibra. Os ensaios de resistência à compressão indicaram que os corpos de prova com 20% de fibra

tiveram o melhor comportamento mecânico, superando os compósitos com 30% de fruta. A resistência aumentou com o tempo de cura, sendo que os compósitos com 28 dias de cura apresentaram os resultados mais satisfatórios. Os resultados da recompressão dos CPs de 14 dias fissurados foram inconclusivos pois apesar de ter apresentado as maiores resistências de pico, não se pode afirmar que tenha sido devido a regeneração da área fissurada, porém se percebe que a resistência à compressão simples poderia ter fornecido resultados ainda melhores caso fosse fornecido mais tempo de cura. Dado a esse aumento gradual de resistência à compressão simples e pela alta variabilidade dos resultados entre os CPs, se espera que a resistência à compressão simples esteja mais ligada ao teor de umidade do CP que ao tempo fornecido para cura. Por fim, as imagens de microscopia eletrônica de varredura mostraram a presença de substâncias nos espaços vazios entre os grãos e a aglutinação das partículas, evidenciando o efeito de aglutinação dos grãos do solo pelas fibras. Esses resultados reforçam o potencial do uso do frutona estabilização de solos arenosos.

5 REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. L. C. Estabilização de solos com adição de cal. um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 11 2010. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/bitstreams/39d14354-87df-40d0-8f4c-87807366b00a/download>>. 2
- BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. Estabilização de solos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 1, p. 425–438, 9 2017. ISSN 2448-0959. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estabilizacao>>. 2
- EMBRAPA; CARVALHO, P. E. R. Sabão-de-soldado. In: . [s.n.], 2014. v. 5, p. 489–496. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/232181/1/Especies-Arboreas-Brasileiras-vol-5-Sabao-de-Soldado.pdf>>. 3
- FERREIRA, J. W. dos S. et al. The feasibility of recycled micro polyethylene terephthalate (pet) replacing natural sand in hot-mix asphalt. Construction and Building Materials, v. 330, p. 127276, 5 2022. ISSN 09500618. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822000618>>.

61822009564>. 2

GARCIA, G. C. R.; SANTOS, E. M. B.; RIBEIRO, S. Efeito do tempo de cura na rigidez de argamassas produzidas com cimento portland. *Cerâmica*, v. 57, p. 94–99, 3 2011. ISSN 0366-6913. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/Kyr9ySPNHJNV7XbWWRrvgsC/>>. 2

MACHADO, A. F. de S. M. R. et al. Análise da capacidade de suporte de um solo reforçado com fibra de coco. 2024. Disponível em: <<https://cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados/naintegra/64>>. 2

TAVARES, J. C. Trajetórias da infraestrutura no brasil. concepções, operacionalizações e marcos conceituais em perspectiva. *Cadernos MetrÓpole*, v. 26, p. 443–464, 5 2024. ISSN 2236-9996. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cm/a/tJMv9yGYZMTTLjzT7hDMqqx/>>. 2

TSUZUKI, J. K. et al. Antifungal activity of the extracts and saponins from *sapindus saponaria* l. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 79, p. 577–583, 12 2007. ISSN 0001-3765.

MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTUDO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UM SOLO ARGILOSO DURANTE A EXPOSIÇÃO AO FOGO SUPERFICIAL

João Henrique Corrêa Pinto*

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil

André Luís Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil

RESUMO

O artigo apresenta um estudo experimental sobre o comportamento da condutividade térmica de um solo argiloso do Distrito Federal (DF), submetido a gradientes de temperatura em profundidade, com o objetivo de contribuir para a compreensão dos efeitos térmicos provocados por incêndios superficiais no solo. Amostras de solo foram coletadas no Parque Ecológico do Paranoá, preparadas por compactação e expostas a um fluxo de calor transiente. Para monitorar o comportamento térmico, termopares foram instalados em diferentes profundidades das amostras, permitindo o registro contínuo da evolução da temperatura durante as fases de aquecimento e resfriamento. Os resultados revelaram variações significativas na condutividade térmica ao longo do tempo, associadas aos efeitos da redistribuição da umidade interna. Durante o aquecimento, a migração da umidade para regiões mais frias reduziu a condutividade térmica, enquanto o retorno da umidade ao centro do corpo de prova, durante o resfriamento, promoveu o aumento da condutividade. Os dados obtidos demonstram a relevância de se considerar os efeitos térmicos e a dinâmica da umidade na caracterização da condutividade térmica de solos expostos a incêndios superficiais.

PALAVRAS-CHAVE: Condutibilidade térmica, Difusividade térmica, Incêndio florestal superficial, Umidade induzida.

ABSTRACT

This article presents an experimental study on the thermal conductivity behavior of a clay soil from the Federal District (DF), subjected to temperature gradients in depth, aiming to contribute to the understanding of the thermal effects caused by surface fires on the soil. Soil samples were collected from the Paranoá Ecological Park, prepared through compaction, and exposed to a transient heat flux. Thermocouples were installed at different depths within the samples to continuously monitor temperature evolution during heating and cooling phases. The results revealed significant variations in thermal conductivity over time, associated with the effects of internal moisture redistribution. During heating, the migration of moisture to cooler regions reduced thermal conductivity, while the return of moisture to the center of the sample during cooling promoted an increase in conductivity. The data obtained highlight the importance of considering thermal effects and moisture dynamics when characterizing the thermal conductivity of soils exposed to surface fires.

KEYWORDS: Thermal conductivity, Thermal diffusivity, Surface forest fire, Induced moisture.

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais podem ocorrer de forma espontânea ou devido a ações ou omissões humanas (DCERJ, 2024), sendo classificados como desastres naturais frequentemente associados à redução significativa das precipitações hídricas

(CASTRO, 2003).

Os incêndios em vegetação podem ser classificados de acordo com o comportamento do fogo, sendo denominados incêndios florestais quando não controlados pelo homem e caracterizados por seu elevado poder destrutivo (TORRES et al., 2020). Diferenciam-se do fogo

*Autor correspondente: jhfisica@gmail.com

utilizado de forma planejada para diversos fins, como controle de pragas, redução de material combustível, prevenção de grandes desastres ou fins científicos, desde que devidamente planejado, denominado queima controlada (BRASIL, 2024).

Quando o fogo está fora de controle, ele pode se propagar de maneira superficial, subterrânea ou de copa. Segundo Soares e Batista (2007), os incêndios superficiais ocorrem a partir do piso florestal, propagando-se pelo material combustível até uma altura de 1,80 m. Esses incêndios são comumente associados às origens de grandes incêndios, sendo também os mais frequentemente observados devido à facilidade de detecção (SETZER e FERREIRA, 2023).

Por outro lado, os incêndios subterrâneos ocorrem abaixo da superfície, em solos com grande acúmulo de matéria orgânica, húmus ou turfas – material comumente presente em áreas alagadiças, brejos, manguezais e pântanos (TORRES et al., 2020). Esses incêndios são difíceis de detectar, produzem pouca fumaça e são desafiadores para combater, causando grandes danos às raízes e à fauna do solo (SOARES e BATISTA, 2007).

Finalmente, os incêndios de copa atingem combustíveis florestais acima de 1,80 m e normalmente se originam de incêndios superficiais, exceto em casos de descargas atmosféricas ou falhas em sistemas elétricos (SCHUMACHER e SCHUMACHER, 2018). A propagação desses incêndios é influenciada pelos ventos e pela continuidade vertical dos combustíveis e horizontal das copas das árvores (SOARES e BATISTA, 2007).

Os incêndios superficiais são capazes de promover alterações nas propriedades do solo devido à exposição a altas temperaturas, resultando em aumento da repelência à água e diminuição da capacidade de infiltração (ALMEIDA et al., 2016).

A movimentação de brigadistas em áreas alagadiças é lenta, dificultando as atividades de combate e aumentando o risco de acidentes, que podem ser fatais em alguns casos (G1, 2019). Além disso, viaturas de combate a incêndios, devido ao seu peso, podem ter sua mobilidade limitada em determinados solos, tornando-se suscetíveis a danos, como observado em um caso relatado pelo G1 (2015), em que viaturas do CBMDF foram consumidas pelo fogo durante um atolamento em uma região de incêndio florestal.

A forma e a intensidade com que os solos do DF variam sua temperatura em camadas inferiores à superfície quando expostos a incêndios florestais

são parâmetros importantes para prever alterações em suas propriedades hidráulicas, microbiológicas, mineralógicas e, especialmente, em sua resistência mecânica e térmica.

Os solos são considerados meios trifásicos, combinando frações de material mineral com espaços vazios preenchidos por gases e água (PINTO, 2006). Essas características levam a uma propagação dinâmica da energia térmica, influenciada por diversas configurações de solo. Assim, observou-se que os solos do Distrito Federal são ainda pouco estudados sob o ponto de vista térmico quando submetidos a incêndios florestais superficiais – lacuna que este trabalho pretende explorar.

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo geral investigar o comportamento da condutividade térmica de um solo natural do Distrito Federal (DF) submetido a um gradiente de temperatura em profundidade, simulando a passagem de incêndios superficiais.

De forma específica, busca-se:

- caracterizar as propriedades térmicas de uma amostra de solo natural do DF, a partir de gradientes de temperatura em profundidade sob fluxo de calor transiente;
- identificar o comportamento da condutividade térmica do solo durante os períodos de aquecimento e resfriamento;
- avaliar a conformidade dos resultados experimentais obtidos com valores descritos na literatura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Influência do fogo em solos

O fogo superficial interage de diversas formas com as camadas do solo, onde sua intensidade pode afetar a fração orgânica, a porosidade e a taxa de infiltração, aumentando, assim, a suscetibilidade da região à erosão hídrica (CASSOL et al., 2004), um processo caracterizado pelo transporte de sedimentos de matrizes coesas de solo a jusante (MINELLA et al., 2017).

Outros impactos negativos associados aos incêndios em camadas superficiais do solo incluem a destruição da cobertura vegetal protetora em áreas florestais, uma perda significativa de carbono e nitrogênio, além da redução na capacidade de infiltração, o que pode desencadear deslizamentos de terra, colapsos e erosões causadas tanto pelo vento quanto pela água, resultando em aumento do

escoamento superficial e transporte de sedimentos para corpos d'água adjacentes (ERICKSON e WHITE, 2008).

Em condições de estresse hídrico, Montagnoli et al. (2017) evidenciaram o deslocamento do crescimento de raízes finas (menores que 2 mm) da espécie *Fagus sylvatica* L. em florestas de *Pinus* na Europa para camadas mais profundas, bem como a perda dessas raízes em camadas superficiais, devido à passagem de incêndios florestais, em busca de maior disponibilidade de nutrientes.

Pivelo e Coutinho (1992) estimaram que o tempo de reposição dos nutrientes perdidos durante queimadas varia conforme o mineral em questão. O estudo mostrou que, em média, para os teores de fósforo (P), enxofre (S), cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg), um intervalo de três anos entre as queimadas seria adequado para iniciar a reciclagem de nutrientes, evitando o empobrecimento crítico do solo e garantindo a manutenção do ecossistema.

Outra área de estudo importante em solos afetados por incêndios é a sua resposta hidráulica. Pesquisas indicam que os incêndios florestais reduzem a quantidade de matéria orgânica nas camadas mais superficiais, alterando a proporção de argila e silte (STOOF, 2011), o que resulta em uma menor retenção de água em comparação a solos não atingidos por incêndios (ALMEIDA et al., 2016).

2.2 Comportamento térmico do solo em profundidade

No âmbito das propriedades físicas dos materiais, as constantes térmicas desempenham um papel essencial na resposta à energia incidente de fontes externas, por meio de processos de absorção, condução e irradiação de calor, resultando em variações de temperatura nos materiais analisados (OLIVEIRA, 2015).

Os solos são caracterizados como meios trifásicos, compostos por frações de sólidos, ar e água (PINTO, 2006), e essas três fases, quando combinadas, são determinantes para as suas propriedades físicas (SILVA, 2012). A condutividade térmica, a difusividade térmica e a capacidade calorífica específica são as propriedades mais relevantes para o estudo do comportamento térmico dos solos quando submetidos a gradientes de temperatura (SANTOS, 2010).

Alguns estudos buscaram estimar o comportamento térmico dos solos a partir de uma

fonte de calor ambiental, considerando variações temporais associadas ao movimento da Terra. Zimmer (2017) caracterizou as variações de temperatura em diversos tipos de solo nos primeiros 15 cm de profundidade ao longo de um ano, observando um comportamento periódico, com máximos e mínimos de temperatura dependentes das estações do ano.

Foi identificado que o atingimento desses extremos térmicos ao longo da profundidade do solo está associado a uma inércia térmica entre diferentes regiões. A difusividade térmica, que caracteriza essa latência, pode ser definida conforme a equação a seguir (DUARTE, 2004):

$$D = \frac{K}{c_v} = \frac{K}{c_g \cdot \rho_d}, \quad (1)$$

onde, D é a difusividade térmica (m^2/s) e K é a condutividade térmica do solo ($W.m^{-1}.K^{-1}$), c_v é o calor específico volumétrico ($J.m^{-3}.K^{-1}$), c_g é o calor específico gravimétrico ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$) e ρ_d é a densidade do solo natural ($Kg.m^{-3}$).

Considerando que o solo é um meio poroso trifásico, o calor específico volumétrico é influenciado pelas frações gravimétricas dessas três fases: sólida, líquida e gasosa (PREVEDELLO e ARMINDO, 2015). Devries e Van Qijk (1963) propuseram uma estimativa para o calor específico volumétrico, considerando as contribuições dessas três fases, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} c_{v(solo)} &= c_{g,m} \cdot f_{g,m} \cdot \rho_{g,m} + c_{g,ag} \cdot f_{g,ag} \cdot \rho_{ag} \\ &+ c_{g,ar} \cdot f_{g,ar} \cdot \rho_{ar}, \end{aligned} \quad (2)$$

onde, c_v é o calor específico volumétrico do solo ($J.m^{-3}.K^{-1}$), $c_{g,m}$, $c_{g,ag}$ e $c_{g,ar}$ são os calores específicos gravimétricos ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), ρ_{gm} , ρ_{ag} e ρ_{ar} são, respectivamente, as massas específicas das partículas minerais, das partículas, da água e do ar do solo ($Kg.m^{-3}$); e $f_{g,m}$, $f_{g,ag}$ e $f_{g,ar}$ são, respectivamente, as frações volumétricas das partículas minerais, da água e do ar do solo ($m^3.m^{-3}$). Na Tabela 1 (Anexo), apresentam-se valores típicos do calor específico, da condutividade e da difusividade térmica de alguns materiais.

Assim, a capacidade calorífica é uma propriedade dependente da origem mineralógica dos constituintes do solo, combinada com o teor de umidade, a macro e microestrutura dos poros, e o estado de agregação e compactação do solo

(BRADY e WEIL, 2008).

A transmissão de calor no solo por unidade de área ocorre predominantemente por condução, sendo fortemente influenciada pela umidade do solo (PREVEDELLO e ARMINDO, 2015), e pode ser modelada pela equação de Fourier, que é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura em função da variação espacial, por meio de uma constante denominada condutividade térmica:

$$\phi = -K \cdot \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

onde, ϕ é o fluxo de calor no solo por unidade de área (W.m^{-2}), K é a condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T é a temperatura (K) e z é a profundidade da superfície do solo (m).

O sinal negativo indica que o fluxo de calor se dá do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura (HORTON e WIERENGA, 1984).

Para a estimativa dessas propriedades físicas do solo, diversos métodos já foram utilizados por pesquisadores, sendo a maioria fundamentada em condições naturais e ambientais.

2.3 Métodos numéricos para solução da equação do calor

O método das diferenças finitas centradas no ponto médio é uma técnica amplamente utilizada na resolução numérica de equações diferenciais parciais (EDPs), especialmente na modelagem de problemas de propagação de calor. Esse método consiste em discretizar as derivadas de uma variável contínua, aproximando o comportamento de sistemas físicos, como o fluxo de calor, em uma malha de pontos discretos.

De acordo com Burden e Faires (2011), o método das diferenças finitas é uma ferramenta robusta para a solução numérica da equação do calor, que é governada pela equação diferencial parcial:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

onde, T é a temperatura, x é a posição, e α é a difusividade térmica do material. A aproximação da segunda derivada da temperatura em relação à posição pode ser feita utilizando a formulação centrada no ponto médio. Segundo Chapra (2018), a aproximação das diferenças finitas para a segunda derivada, no ponto i , é dada por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (5)$$

Nesse esquema, a equação é aproximada utilizando os pontos adjacentes à posição i , proporcionando uma solução mais estável e precisa para o cálculo do gradiente de temperatura.

Segundo Patankar (1980), o uso da formulação centrada no ponto médio para resolver a equação do calor é particularmente vantajoso em problemas com condições de contorno bem definidas, pois garante precisão de segunda ordem tanto no tempo quanto no espaço. Isso significa que, à medida que o espaçamento da malha Δx e o passo de tempo Δt se tornam menores, o erro da solução numérica diminui de forma quadrática, assegurando que a solução se aproxime da solução exata.

Dessa forma, a aplicação do método das diferenças finitas centrada no ponto médio para a solução da equação de condução de calor em meios contínuos demonstra-se eficaz na modelagem de problemas complexos relacionados à propagação térmica. Autores como Incropera e DeWitt (2014) destacam que esse método é uma das abordagens numéricas mais utilizadas em modelagens de transferência de calor, permitindo a obtenção de soluções iterativas, estáveis e precisas para uma ampla variedade de materiais e condições de contorno.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os materiais e métodos utilizados para determinar os gradientes de temperatura em profundidade, a partir de uma fonte superficial de calor, em três corpos de solo compactados.

3.1 Área de estudo

A área selecionada para a análise das propriedades térmicas do solo foi uma localidade dentro do Parque Ecológico do Pinheiral, situado na região administrativa do Paranoá-DF (Figura 1). Essa área é caracterizada pelo cultivo de uma floresta não nativa de *Pinus* e está localizada nas coordenadas geográficas de 15,764548° S de latitude e 47,771703° O de longitude.

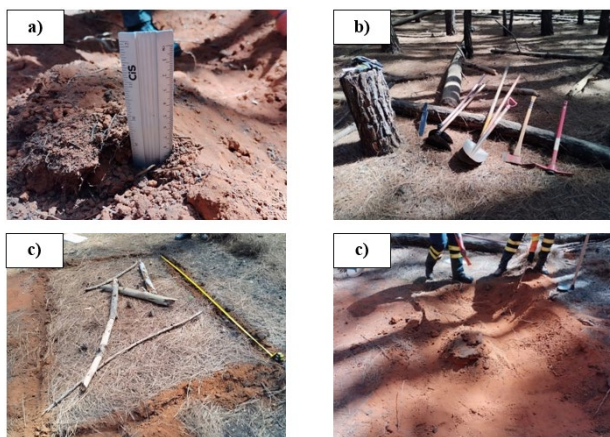


Figura 1 – Caracterização da área de estudo: a) marcação de nível de 20 cm de profundidade, b) ferramentas utilizadas, c) delimitação da área de estudo (3x2m), d) escavação para retirada das amostras deformadas.

Fonte: Os autores.

A área delimitada para a retirada das amostras deformadas foi uma região frequentemente acometida por incêndios florestais, onde se observou uma grande quantidade de árvores tombadas com diversas marcas de queima em suas estruturas.

3.2 Sensores térmicos utilizados

Os termopares utilizados são compostos por condutores unidos por meio de soldas que, a partir da diferença de temperatura, geram uma diferença de potencial entre os condutores. Com base nas propriedades conhecidas desses elementos, essa diferença de potencial é proporcional à temperatura. Os dados coletados foram processados por um receptor de dados, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2 – Receptor de dados para registro de temperatura.

Fonte: Os autores.

Os registros de temperatura realizados pelo equipamento ilustrado anteriormente apresentaram um erro instrumental de 10^{-5} °C, conferindo alta sensibilidade à carga térmica prescrita.

3.3 Ensaios geotécnicos realizados

Para a caracterização da amostra analisada, bem como a confecção dos corpos de prova a serem submetidos à ação do fogo a partir de uma fonte térmica prescrita, foram realizados os seguintes ensaios:

- NBR 6458 (ABNT, 2017) – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.
- NBR 7182 (ABNT, 2016) – Solo – Ensaio de compactação.

Os ensaios acima listados tiveram como objetivo determinar a massa específica do solo, a densidade dos grãos, e identificar a umidade ótima para compactação normal, fornecendo subsídios para a confecção dos corpos de prova que seriam submetidos às fontes térmicas.

3.4 Simulação – exposição dos CPs a gradientes térmicos

O ensaio consistiu em submeter três corpos de prova de solo compactado, com uma umidade de 24%, referente as condições in situ, de brasas alimentadas por comburente (ar atmosférico) na face superior. Foram instalados 5 termopares em cada corpo de prova, localizados na superfície e a 2, 4, 6 e 8 centímetros de profundidade, alinhados ao centro do corpo de prova (Figura 3). O experimento foi conduzido por 4 horas e 26 minutos.



Figura 3 – Amostras submetidas a cargas térmicas. Fonte: Os autores.

Para capturar de maneira mais precisa as variações de temperatura ao longo dos corpos de prova, a inclusão de um número maior de sensores de temperatura em diferentes profundidades seria

recomendada. Embora os termopares tenham sido instalados em intervalos estratégicos, a distribuição de um maior número de sensores permitiria uma análise mais detalhada da propagação do calor ao longo do tempo e da profundidade.

As temperaturas foram registradas a cada 1 segundo durante a fase de aquecimento, seguida por um período de resfriamento, no qual as fontes de calor prescritas foram removidas. Durante o ensaio, observou-se que a base das amostras sofreu desconfigurações ao longo do tempo.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Caracterização do solo estudado

O ensaio NBR 7182 (ABNT, 2016) foi utilizado para determinar a massa específica natural (ρ_N) máxima do solo analisado, e os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.

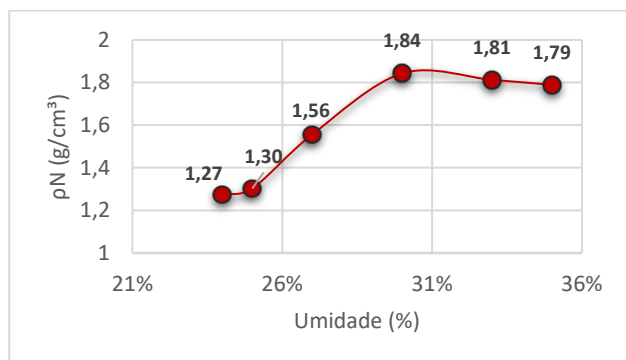


Figura 4 – Curva de Compactação.
Fonte: Os autores.

O ensaio de compactação foi realizado conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando soquete de 2,5 kg e compactação normal com 26 golpes por camada. O teste revelou uma relação clara entre a umidade e a massa específica seca do solo (ρ_d). Os resultados indicaram que a massa específica natural máxima ocorre com uma umidade de 30,88%, atingindo o valor de 1,86 g/cm³.

Esse comportamento reflete o ponto ótimo de compactação, onde o solo alcança sua maior resistência e menor porosidade. A tabela a seguir traz os valores encontrados no ensaio de compactação utilizados para subsidiar a confecção das amostras de solos compactados.

Tabela 1 – Parâmetros para curva de compactação

Referência	ρ_N (g/cm³)	ρ_d (g/cm³)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
Ponto 1	1,274	1,029	1,485	41,106
Ponto 2	1,303	1,044	1,449	43,791
Ponto 3	1,556	1,222	1,092	63,934
Ponto 4	1,843	1,420	0,801	95,052
Ponto 5	1,812	1,361	0,878	96,414
Ponto 6	1,789	1,329	0,924	95,724

Adicionalmente, o ensaio NBR 6458 (ABNT, 2017) foi utilizado para estimar a massa específica dos grãos, resultando em um valor de 2,558 g/cm³. O solo analisado apresentou boa capacidade de compactação nas condições do ensaio, com uma densidade natural elevada em relação ao material particulado, indicando uma eficiência no processo de compactação – características típicas de solos argilosos.

A construção da curva de compactação permitiu também, definir a massa específica natural do solo (ρ_N), no teor de umidade de 24%, parâmetros estes necessários para a confecção dos corpos de provas alinhadas as condições naturais do solo *in situ*.

Os autores reconhecem que a variabilidade das amostras de solo pode influenciar os resultados. Para mitigar essa questão, adotou-se uma metodologia rigorosa de compactação com controle de umidade e densidade das amostras, embora a heterogeneidade natural do solo tenha sido um fator limitante. Sugere-se, para estudos futuros, a utilização de técnicas mais avançadas de preparação e compactação das amostras, como o uso de amostras reconstituídas sob condições controladas, para garantir maior uniformidade entre os corpos de prova.

Durante a alimentação das brasas combustíveis, foi observado que houve dificuldade em manter a temperatura constante. O fluxo de ar não foi uniforme, o que tornou desafiador manter a combustão e o fluxo de calor constantes na superfície das amostras. Na Figura 3 é apresentado o gráfico da variação de temperatura em função do tempo para os sensores posicionados nas superfícies superiores dos corpos de prova.

4.2 Comportamento térmico da fonte de calor

As temperaturas foram registradas a cada 1 segundo durante a fase de aquecimento, que teve uma duração de 3 horas, seguida por um período de

resfriamento de 1 hora e 26 minutos nas amostras analisadas.

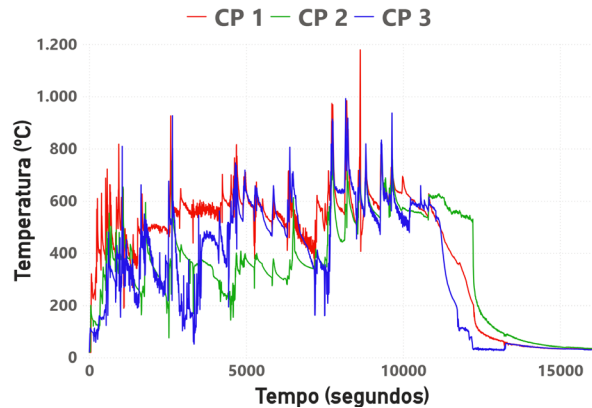


Figura 5 – Variação da temperatura em função do tempo (z = 0 cm). Fonte: Os autores.

Na Tabela 2, apresentam-se as médias e os desvios das temperaturas registradas durante a fase de aquecimento, que teve uma duração aproximada de 3 horas.

Tabela 2 – Temperaturas prescritas médias e desvios padrão (z = 0 cm)

Amostra	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
CP 1	552,43	104,75
CP 2	407,34	133,55
CP 3	460,63	168,01

4.3 Respostas térmicas no solo em profundidade

As temperaturas máximas nas diferentes profundidades foram registradas (Figura 6) durante o período analisado, com os valores máximos observados nos momentos descritos na Tabela 3.

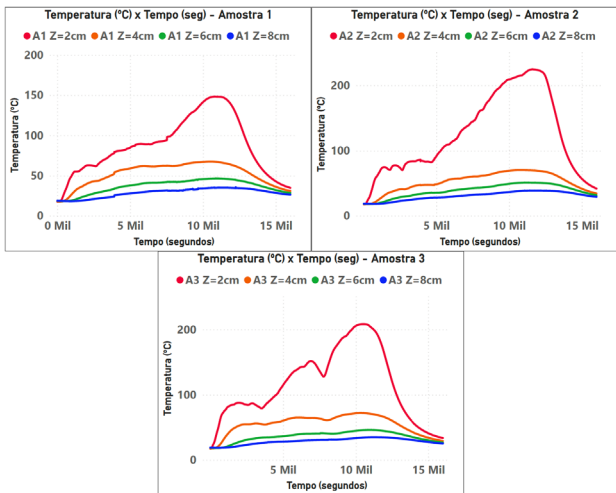


Figura 6 – Temperatura e função do tempo nas diferentes profundidades. Fonte: Os autores.

Tabela 3 – Estatísticas de temperaturas nas amostras.

Profundidade (cm)	Temp. Máxima (°C)	Período (min)	Média (°C)	Desvio (°C)
Amostra 1				
2	148,1	180,9	87,2	35,2
4	67,46	175,16	52,0	13,8
6	46,49	180,23	36,5	8,3
8	35,49	204,2	28,5	5,4
Amostra 2				
2	224,7	193,3	124,6	60,9
4	70,26	179,9	52,1	14,4
6	51,00	186,3	38,6	9,6
8	38,61	196,1	30,5	6,3
Amostra 3				
2	208,5	175,0	115,1	53,9
4	71,94	171,4	54,7	14,2
6	45,98	183,1	35,8	7,6
8	34,90	187,6	28,5	4,7

Houve dificuldade em estabilizar o fluxo de calor transiente nas amostras, assim como em obter corpos de prova com camadas compactadas de maneira completamente uniforme. Este fato contribuiu para comportamentos e respostas diferenciados às variações de temperatura nas seções analisadas.

Embora este estudo tenha se concentrado nas propriedades térmicas do solo, é importante ressaltar que as variações de temperatura também podem afetar suas propriedades mecânicas, especialmente em solos argilosos, onde o teor de umidade exerce um papel crucial. Futuras investigações poderiam focar na análise integrada entre as propriedades térmicas e mecânicas, avaliando como as mudanças no teor de umidade afetam a resistência e a estabilidade do solo.

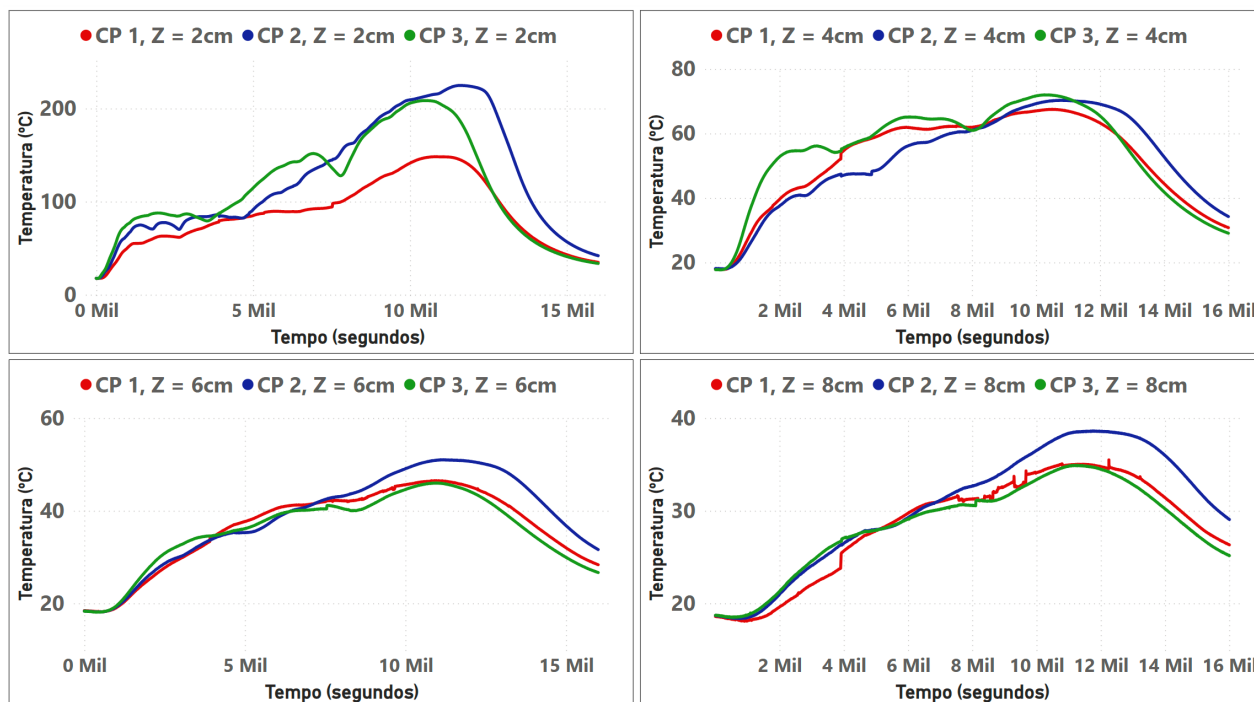


Figura 7 – Comparação da variação de temperaturas entres as amostras. Fonte: Os autores.

Diante dos dados da figura acima, observou-se uma maior correlação entre o comportamento da temperatura em função do tempo nos CPs 1 e 3. Com exceção da temperatura na base da fonte de calor, as correlações foram superiores a 0,9499, indicando uma consistência nos resultados entre essas duas amostras.

Tabela 4 – Correlação do comportamento da temperatura em profundidade.

Correl.	z=0cm	z=2cm	z=4cm	z=6cm	z=8cm
CP (1 e 2)	0,786	0,960	0,928	0,959	0,975
CP (1 e 3)	0,868	0,949	0,954	0,984	0,983
CP (2 e 3)	0,738	0,872	0,843	0,933	0,963

Fonte: Os autores.

Durante os ensaios, as condições ambientais, como a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente, não foram controladas rigorosamente, o que pode ter influenciado os resultados obtidos, especialmente nas variações térmicas e no comportamento da umidade. Recomenda-se que futuros experimentos sejam realizados em câmaras ambientais controladas, onde esses fatores possam ser ajustados para minimizar suas influências nos resultados.

4.4 Aplicação do método de diferenças finitas

Para estimar as constantes térmicas do solo submetido ao ensaio de calor, utilizou-se o método

das diferenças finitas para dois momentos distintos de análise: aquecimento e resfriamento.

O método consistiu em estimar numericamente, para cada intervalo de tempo, a constante de difusividade térmica com base na variação da temperatura ao longo do tempo, bem como nas temperaturas registradas nas profundidades de 2, 4, 6 e 8 centímetros, durante os períodos de aquecimento e resfriamento, conforme as Eqs. 4 e 5.

Durante a análise dos dados, valores negativos de difusividade térmica foram observados, provavelmente devido à sensibilidade dos termopares e à variabilidade do fluxo de calor. Esses valores foram filtrados para focar nos resultados positivos. Futuras pesquisas podem investigar mais detalhadamente a origem desses valores anômalos, utilizando técnicas avançadas de filtragem e controle do fluxo térmico para minimizar ruídos nos dados.

Com o auxílio da Eq. 1, foi possível estimar a constante de condutividade térmica para cada instante durante os períodos de aquecimento e resfriamento das amostras de solo. A massa específica natural das amostras foi estimada em 1300 kg/m³, correspondente à umidade de compactação do ensaio, que foi de 24%. Utilizou-se um valor típico de calor específico para solos argilosos de 731 J/kg/K, tabela em Anexo. Os resultados da condutividade térmica são apresentados na Figura 8, considerando a aplicação

do método das diferenças finitas centrado nas profundidades médias de 4 e 6 centímetros. Os resultados abaixo foram calculados a partir da

combinação das equações 1, 4 e 5.

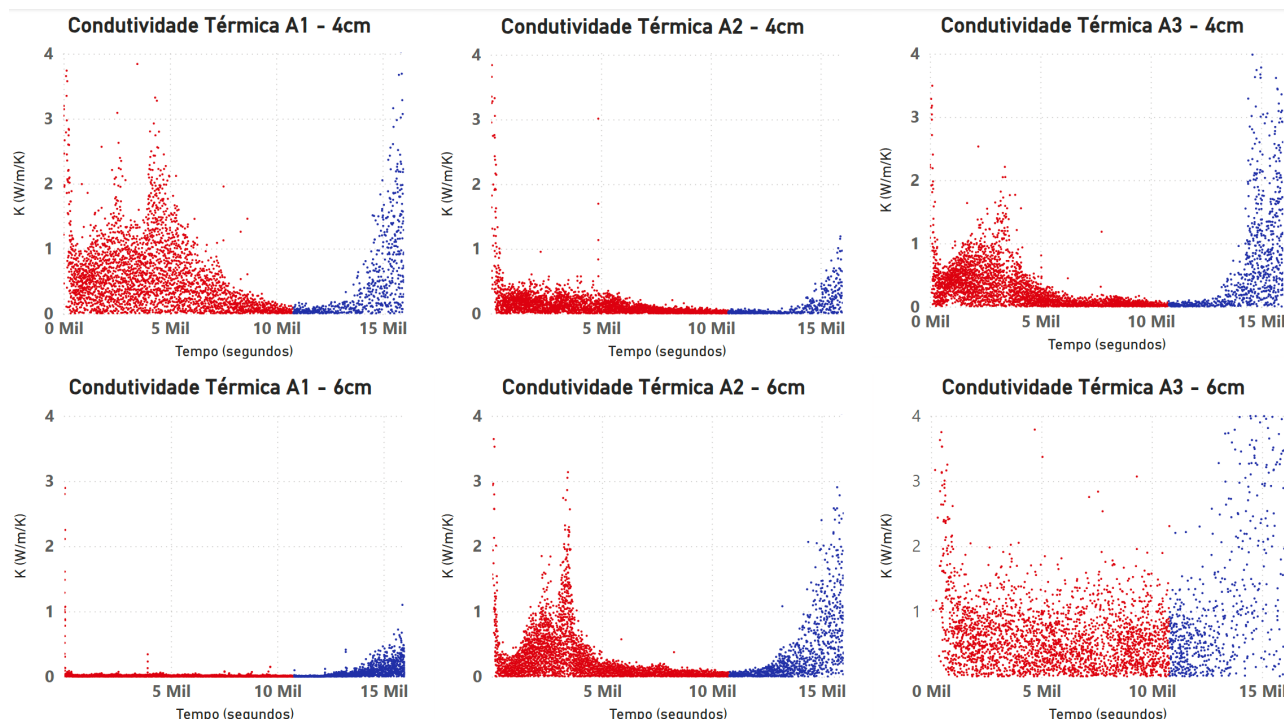


Figura 8 – Variabilidade da condutividade térmica. Fonte: Os autores.

Os resultados, apresentados na Figura 8, indicaram que a condutividade térmica em meios porosos sofre variações ao longo do tempo durante as etapas de aquecimento e resfriamento. Inicialmente, os valores de condutividade são elevados, diminuem durante a fase intermediária e aumentam novamente no final do período de resfriamento.

Os resultados obtidos foram consistentes com estudos anteriores que avaliaram a condutividade e a difusividade térmica em solos argilosos (HOYOS et al., 2024; INCROPERA e DEWITT, 2014). No entanto, variações podem ser observadas dependendo da composição mineralógica e do teor de umidade do solo. O resultados obtidos nesse estudo se assemelharam aos valores típicos propostos por Mitchell e Soga (2005) e Ferrari (2002), mesmo sendo realizados com solos caracterizados com diferentes propriedades físico-químicas, demonstrando assim conformidade dos resultados a literatura sobre o tema.

Durante o ensaio, percebeu-se que nas fases iniciais de aquecimento e finais de resfriamento, a condutividade térmica apresentou uma redução, seguida por uma estabilização intermediária e, posteriormente, um aumento no final do experimento. Acredita-se que o aumento da temperatura no solo

causa uma redistribuição da umidade, impactando diretamente a condutividade térmica. Hoyos et al. (2024) destacam que a migração da umidade ocorre tanto nas fases líquida quanto vapor, sendo impulsionada por diferenças de temperatura, em um processo conhecido como fluxo de umidade induzido termicamente. Os autores afirmam que, ao ser aquecido, o solo direciona a umidade das regiões mais quentes para as áreas mais frias, alterando temporariamente as propriedades térmicas locais e aumentando a condutividade térmica nas regiões onde a umidade se acumula.

Assim, os resultados indicam que, durante o aquecimento, houve uma redução na condutividade térmica devido à migração da umidade para as regiões mais frias nas bordas do Corpo de Prova (CP), e essa condutividade aumentou novamente com o resfriamento do centro do CP, à medida que a umidade retornou, preenchendo os espaços vazios. Esse comportamento é crítico em aplicações geotécnicas, como aterros termicamente ativos e cabos estruturais que geram calor, influenciando diretamente a eficiência térmica do solo ao redor desses sistemas e podendo impactar as propriedades mecânicas dos solos, que são dependentes dos teores de umidade.

Além do uso do método de diferenças finitas, uma

modelagem teórica mais abrangente, que leve em consideração os processos de condução, convecção e redistribuição de umidade, poderia complementar as análises experimentais realizadas. Modelos numéricos que incluam a convecção, especialmente em solos porosos, podem fornecer uma melhor compreensão dos fenômenos térmicos e suas interações com as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no estudo das propriedades térmicas dos solos sob um fluxo transiente de calor, foi possível concluir que a exposição dos CPs a um gradiente térmico, especialmente a partir da superfície, provoca impactos significativos nas propriedades térmicas do solo. A pesquisa analisou as variações de temperatura em diferentes profundidades de corpos de prova cilíndricos compactados com solos argilosos, observando-se variações notáveis nas propriedades térmicas, como condutividade e difusividade térmica.

Embora este estudo tenha utilizado três corpos de prova para a análise, a replicação limitada pode ter influenciado a generalização dos resultados. Para estudos futuros, recomenda-se a inclusão de um maior número de amostras replicadas, a fim de aumentar a robustez estatística e permitir uma análise mais detalhada das variações térmicas e de umidade em diferentes condições de solo.

Os resultados mostraram que, com uma fonte de calor prescrita, ocorre uma redistribuição da umidade induzida por gradientes térmicos, fenômeno que influencia diretamente a condutividade térmica e a difusividade do solo.

Os valores experimentais obtidos para condutividade e difusividade térmica foram próximos dos valores teóricos médios reportados na literatura para solos, o que valida a metodologia adotada e as medições realizadas.

Adicionalmente, o estudo ressaltou a dificuldade de manter a temperatura constante nas amostras devido à variabilidade do fluxo de calor, enfatizando a necessidade de mais pesquisas para aprimorar as metodologias experimentais.

Investigações futuras devem considerar a inclusão de sensores adicionais em várias profundidades e regiões dos corpos de prova, bem como a implementação de metodologias de controle rigoroso de fluxo de calor e umidade. Além disso, a aplicação de modelos numéricos mais complexos, que incluam os efeitos de convecção e redistribuição de umidade,

proporcionaria uma visão mais completa dos fenômenos térmicos e suas interações com as propriedades mecânicas do solo.

Além disso, é necessário desenvolver uma modelagem teórica que considere as perdas de calor por convecção nos corpos de prova, uma vez que essas perdas afetam a distribuição de temperatura e a difusão de calor. A influência do fluxo de umidade em função de gradientes térmicos altera localmente os índices de vazios e a porosidade do solo, impactando diretamente a resistência mecânica e suas envoltórias de resistência. Essas alterações podem comprometer a estabilidade de taludes e outras estruturas geotécnicas, sendo um aspecto relevante para estudos futuros sobre a interação entre calor, umidade e propriedades mecânicas dos solos.

Em suma, a pesquisa contribuiu para o entendimento inicial dos impactos térmicos dos incêndios sobre o solo, mas indicou a necessidade de investigações futuras que considerem a variabilidade das propriedades dos solos e o desenvolvimento de modelos numéricos mais precisos para avaliar esses fenômenos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF), em especial à Diretoria de Investigação de Incêndio, pelo apoio técnico e logístico concedido ao longo da pesquisa. A disponibilização de equipamentos e do laboratório da corporação foi fundamental para a realização dos testes experimentais, contribuindo diretamente para o avanço dos resultados obtidos neste estudo.

Estendemos também nossos agradecimentos ao Laboratório GEOFLUXO, da Universidade de Brasília (UnB), pelo suporte científico e acadêmico durante todas as etapas da pesquisa. A colaboração da equipe do GEOFLUXO foi essencial para o desenvolvimento das análises térmicas e interpretação dos dados, proporcionando um ambiente interdisciplinar e inovador que fortaleceu significativamente os objetivos propostos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Almeida, S.; Silva, E.; Martins, F.; Fernandez, H.; Costa, R.; Lança, R. (2016). Propriedades hidráulicas de solos algarvios em cenário pós-incêndio. In: *15º Congresso Nacional de Geotecnia e 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, Porto. Anais [...]. Porto: Universidade do Algarve.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2017).

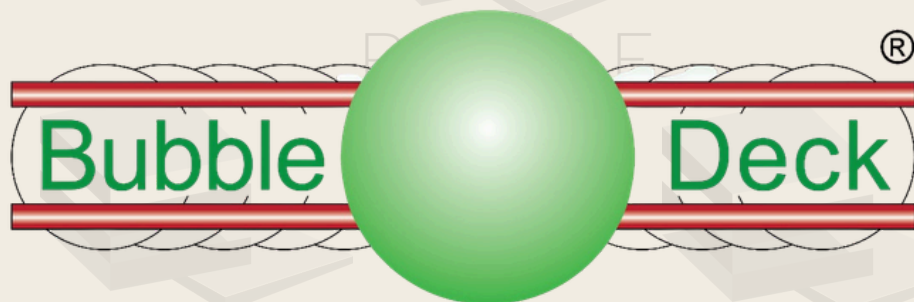
- NBR 6458: Granulometria de solos. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2016). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- Bowers, S. A.; Hanks, R. J. (1962). Specific heat capacity of soils and minerals as determined with a differential scanning calorimeter. *Soil Science*, 94(6), 392–396.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*. 14th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Burden, R. L.; Faires, J. D. (2011). *Numerical Analysis*. 9th ed. Brooks/Cole.
- Brasil. (2024). Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, p. 1, 1 ago. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14944.htm. Acesso em: 7 set. 2024.
- Cassol, E. A.; Lima, V. C.; Lopes, M. A. (2004). Erosão hídrica em solos sob diferentes coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(2), 369–375.
- Castro, L. C. de. (2003). *Manual de Defesa Civil*. Brasília: Ministério da Integração Nacional.
- Chapra, S. C. (2018). *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists*. 4th ed. McGraw-Hill Education.
- Clivati, A. A. (1991). Método proposto para determinação da difusividade térmica de meios porosos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba.
- Crisóstomo, M. C.; Silva, M. F.; Vale, A. T.; Chaves, B. S. (2021). Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus sp.*, *T. vulgaris* e *P. lecontei*. *Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal*, 49–61. DOI: 10.37885/210203270.
- Da Silva, E. M. J. A.; Almeida, S. L.; Costa, R.; Fernandez, R.; Granja-Martins, H.; Pedras, C. M. G. (2016). Propriedades hidráulicas de solos algarvios em cenário pós-incêndio. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.1/9132>.
- De Vries, D. A.; Van Wijk, W. R. (1963). Thermal properties of soils. In: Van Wijk, W. R. (Ed.). *Physics of Plant Environment*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 210–235.
- Defesa Civil Estadual do RJ (DCERJ). (2024). Incêndios florestais – O que é? Disponível em: <https://defesacivil.rj.gov.br/index.php/para-o-cidadao/como-agir-em-desastres/22-incendios-florestais>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- Dematte, J. L. I. (1967). Propriedades térmicas dos solos. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, 24(1), 123–134.
- Duarte, D. F. (2004). Estimation from soil temperature of soil thermal diffusivity and heat flux in sub-surface layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(2), 231–242.
- Erickson, H. E.; White, D. P. (2008). Efeitos dos incêndios florestais nas propriedades físicas e químicas do solo. *Forest Ecology and Management*, 256(5), 1005–1015.
- Ferrari, P. R. (2002). *Medida da difusividade térmica de um solo incorporado com resíduo industrial de silicato*. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.
- G1. (2015). Fogo queima duas viaturas dos bombeiros em incêndio no DF. Disponível em: <https://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2015/09/fogo-queima-duas-viaturas-dos-bombeiros-em-incendio-no-df.html>. Acesso em: 15 set. 2024.
- G1. (2019). Morre bombeira atingida por árvore em ação de combate a incêndio no DF. Disponível em: <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2019/09/15/morre-militar-ferida-durante-acao-de-combate-a-incendio-no-df.ghtml>. Acesso em: 15 set. 2024.
- Hallema, D. W. (2017). *Soil, Water, and Fire: Forest Soil and Water Interaction after Wildfire*. Springer Nature.
- Horton, R.; Wierenga, P. J. (1984). The effect of soil moisture on the thermal properties of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 48(3), 102–108.
- Hoyos, L. R.; Yu, X.; Kaneza, N.; Pokhrel, A. (2024). Thermally induced moisture flow in a silty sand under a 1-D thermal gradient. *Geosciences*, 14. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geosciences14080207>. Acesso em: 26 set. 2024.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P. (2014). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Wiley.
- Minella, J. P. G.; Merten, G. H.; Cassol, E. A.; Fantin-Cruz, I.; Neves, P. S.; Ponciano, L. (2017). Impacto da erosão hídrica no transporte de sedimentos e nutrientes em solos coesos. *Journal of Environmental Management*, 201, 115–124.
- Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Montagnoli de Almeida, S. D. (2001). Respirômetro de Bartha & Pramer para avaliar a produção de CO₂ do solo impactado por resíduo de indústria processadora de sílica-gel e de vinhaça de destilaria de etanol. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro.
- Montagnoli, A.; Terzaghi, M.; Mariotti, B.; Nocentini, S.; Scarascia-Mugnozza, G.; Lingua, E. (2017). Fine root morphological and functional traits in *Fagus sylvatica* and *Fraxinus excelsior* saplings as dependent on species, root order and competition. *Plant and Soil*, 419, 333–346.
- Moreno, R. O. (2018). Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para medição do calor específico do solo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Oliveira, F. J. (2015). Estudo do comportamento térmico de materiais de construção sob condições climáticas extremas. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation.

- Pereira, J. C. R. (1973). Propriedades térmicas de solos tropicais: condutividade e difusividade térmica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2(1), 1–10.
- Pinto, C. de S. (2006). *Mecânica dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pivello, V. R.; Coutinho, L. M. (1992). Transfer of macro-nutrients to atmosphere during experimental burnings in an open Cerrado. *Journal of Tropical Ecology*, 8, 487–497.
- Prevedello, C. L.; Armindo, R. A. (2015). Comportamento térmico de solos porosos e seus efeitos nas propriedades físicas. *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 113–125.
- Santos, J. P. (2010). Análise numérica do comportamento térmico de solos sob influência de gradientes térmicos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.
- Schumacher, M. V.; Schumacher, G. D. (2018). *Incêndios Florestais*. 3rd ed. Santa Maria: UFSN, Departamento de Incêndios Florestais.
- Setzer, A. W.; Ferreira, L. G. (2023). *Queimadas e Incêndios Florestais: Mediante Monitoramento Orbital*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Silva, A. R. (2012). Propriedades térmicas de solos em condições de campo. Dissertação (Mestrado).
- Zimmer, T. (2017). Dinâmica das Propriedades Térmicas e do Fluxo de Calor no Solo em uma Área de Pastagem no Bioma Pampa. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

ANEXO

Tabela 5 – Propriedades térmicas dos materiais

Calor Específico	Material	J/Kg.K	Referência
	Argiloso	787	Dematte (1967)
	Arenoso	649	Dematte (1967)
	Argilo-Siltosa	1086	Bowers e Hanks (1962)
	Valores médios de solos	731	Mitchell e Soga (2005)
Condutividade Térmica	Material	W/m/K	Referência
	Ar	0,024	Mitchell e Soga (2005)
	Água	0,60	Mitchell e Soga (2005)
	Valores médios de solos	0,25 a 2,9	Mitchell e Soga (2005)
Difusividade Térmica	Material	m²/seg	Referência
	Valores médios de solos	1 a 7×10^{-7}	Pereira (1973)
Densidade	Material	Kg/m³	Referência
	Água	1000	Incropera e Dewitt (2014)
	Alumínio	2700	Incropera e Dewitt (2014)
	Ar	1,10	Incropera e Dewitt (2014)
	Solo franco argilo-arenoso	1310	Moreno (2018)
	Solo arenoso úmido	1680	Moreno (2018)
	Argilo-arenosa úmido	1090	Moreno (2018)



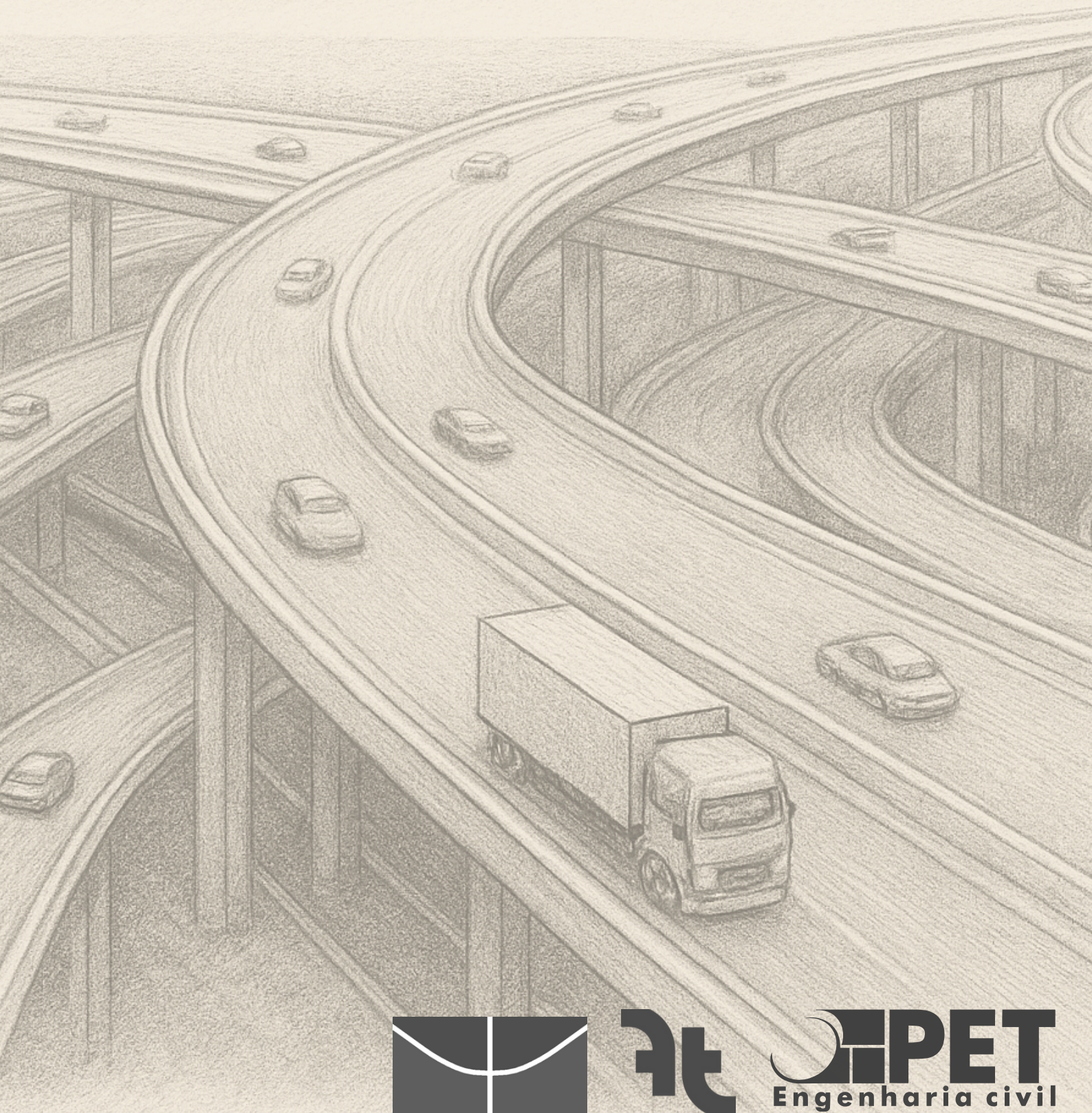
Construindo mais com menos



TECNA

CONSTRUTORA

TRANSPORTES



PROOF OF CONCEPT OF A LOW-COST TOOL FOR DATA COLLECTION AND TRAFFIC CONFLICT IDENTIFICATION AT CROSSWALKS

Samuel Seixas Martin*

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Brasília/Brazil

Fabiana Serra de Arruda

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Brasília/Brazil

ABSTRACT

Urban traffic conflicts pose significant safety risks and present real-time monitoring challenges in increasingly complex environments. Addressing these issues, especially at pedestrian crossings, this study proposes an Artificial Intelligence-based video analysis tool that can be deployed immediately and at low cost for integrated data collection, as literature suggests. Using Python, our program applies object detection, filtering, and temporal tracking with physical marker correlation to count vehicles and pedestrians, measure their speeds, and categorize interactions into risk levels. In a real-world pilot on the University Campus, the tool accurately identified speed violations and high-risk crossing events. Its performance surpasses traditional manual data collection methods in both technical precision and economic efficiency, provided the camera has an unobstructed view. There are vast possibilities for this solution, which enables traffic planners to detect and mitigate conflicts with data-driven tools for the safer traffic that all human beings inherently deserve.

KEYWORDS: Computer Vision, Artificial Intelligence, Traffic Conflicts, Pedestrians, Vehicles, Road Safety.

1. INTRODUCTION

Conflicts: why do they exist? Where do they come from? Would it be possible to live in a world without conflicts? In an increasingly connected society, it makes no sense to continue using outdated techniques to try to solve increasingly complex problems. Pedestrian-related crashes have been increasing for the last two decades in the U.S., which illustrates how the increase in the number of intersections leads to more traffic conflict points in cities. In the past, it would have been humanly impossible to know what is happening at each of them in real-time; however, with the Internet of Things (IoT) combined with Artificial Intelligence (AI), this becomes not only feasible but truly possible. (de Oliveira, Cunto, 2023; Zhang, Abdel-Aty, 2022)

The current work is exploratory, and its involved technology has a vast potential to disrupt many areas of our lives and even behave in unforeseen ways. That is why we must remember the Civil Engineering oath in Brazil, which urges everyone pursuing this field to “put all scientific knowledge at the service of the comfort and development of humanity” since we work “for the good of man, not of the machine.” (UDESC,

2016) In popular culture, there is a saying that “with great powers come great responsibilities,” and that is why the use of this technology must adhere to the strictest ethical standards to avoid any use that is detrimental to the human beings who appear in film footage, in compliance with the provisions of the Brazilian General Law on the Protection of Personal Data (LGPD).

Data from SES/DF (2024) indicate that Ceilândia, Taguatinga, and Plano Piloto are the Administrative Regions of the Federal District of Brazil with the highest number of pedestrian accidents and that since 2015, pedestrians who were run over account for approximately 35% of all deaths related to traffic accidents. Furthermore, using data from the Ministry of Health, the Brazilian Association of Traffic Medicine states that in 2023, 39,125 pedestrians were admitted to public hospitals in Brazil due to severe traffic accidents, second only to the number of motorcyclists hospitalized. This number represents an average of one pedestrian hospitalization in serious condition every 15 minutes. Although impossible, the goal is to eliminate this statistic; however, there is ample opportunity to drastically reduce the number of collisions resulting from traffic

*Autor correspondente: samuelseixasmartin@gmail.com

conflicts in urban centers, combining the best that technology has to offer in this regard with all the expertise of traffic authorities.

To prove this concept, we developed a computer program (software) using the Python programming language to achieve the proposed objectives. However, it is essential to say that the tool is not more important than the main objective; in the same way that even pliers can tighten a screw, the way in which someone solves a problem is not as important as the existence of a solution. From now on, it must be known that the identification, alert, and quantification of information concerning traffic conflicts is not only possible but that a scalable solution already exists for it.

This study proposes using a real-time video analysis tool to identify traffic conflicts, count traffic, and measure speed for both people and vehicles. Although the general use of AI is increasingly common, this work proposes a highly technical and low-cost proposition that can be immediately implemented for data collection, allowing effective measures to be taken.

2. LITERATURE REVIEW

2.1 Technical implementations of AI for Pedestrian Detection and Traffic Conflicts

Obviously, computers do not have eyes like humans and, therefore, cannot literally "see." However, making computers perceive the real physical world is still possible; this is why Computer Vision (CV) is such a relevant area within AI research and has received so much attention in recent times, even more so because it is broadly applicable in areas that go from cancer research to queue optimization. However, because the present paper results from applying a scientific computing tool in an Engineering context, one should use a technical approach from both areas.

On the computer science end, there has been a notable advance in computational power and modern algorithms. Mao et al. (2017) exemplify this in their report on how technical improvements in Convolutional Neural Networks (CNNs) aimed to improve pedestrian detection through finer detection of human features in an image. This reduced the number of false positives, such as saying that a tree is a human being or, conversely, finding the correct number of people in a group. At that time, there were already solutions being executed at 15 FPS (Frames Per Second) with an associated error rate of around

25%. Furthermore, Brunetti et al. (2018) highlighted the two most promising work fronts in the research of more efficient methods for pedestrian detection and classification, which explored the agility versus precision paradigm. These were, namely, high frame rate detection (100–135 FPS) on a low-resolution image (480x640 pixels) and Deep Neural Networks which are excellent at tasks that do not require instant classification but still do not produce results that can be applied in real-time.

On the other hand, more robust Engineering analyses were enabled through a large amount of real data, which would otherwise be impractical to make sense of. De Oliveira and Cunto (2023) analyzed more than 700 conflicts (called by the authors vehicle-pedestrian interactions) over 32 hours of recording at pedestrian crossings with and without traffic lights. They used a method that considers the distance between the vehicle and the pedestrian and their speed to calculate the probability of an accident occurring and concluded that 13% of these interactions were serious. As individual behavior changes according to their nationality, this Brazilian paper is important to establish a local reference.

Additionally, researchers such as Zhang and Abdel-Aty (2022) proposed, the previous year, a computational tool that predicts conflicts between pedestrians and vehicles one traffic light cycle before they occur, thus allowing preventive measures to be implemented. In the article, the authors talk about dynamically adjusting cycle times and alerting vehicle drivers to be more careful, but this is just a small glimpse of all this tool has potential. In a Traffic Engineering analysis, these researchers concluded that the four most important factors for increasing the risk of conflicts at intersections are: first, the volume of vehicles turning right; second, the volume of vehicles turning left; and, only in third and fourth place, the speed and volume of the main road.

However, there are still problems that not even AI can solve. Dollar et al. (2012) said there are two main difficulties for CV: the obstacles in the urban environment that partially hide pedestrians and the decrease in the resolution of the pedestrian's image as he moves away from the camera, both of which are physical issues related to the camera infrastructure.

2.2 Image Datasets for Training Computer Vision Models for Pedestrian Detection

This introduction to the computational approach to traffic conflicts leads us to the second paradigm within the world of Computer Vision: "how to teach the

computer to recognize what I want"; for this, sets of data, or datasets, as they are known worldwide, are used. They are systematizations of cataloged data with related properties. Ronald Fisher created the oldest and most pioneering data set in this context in 1936, which related different properties of flowers to their colors. The analysis of this systematized data made it possible to infer the color of flowers based only on the physical measurements of the width and length of their petals and sepals, without ever even observing their color. This is the power of a well-organized data set.

In the context of person and vehicle recognition, some well-known datasets date back to 2013. One of the pioneers in this area was GRAM Road-Traffic Monitoring (GRAM-RTM), developed by Guerrero-Gomez-Olmedo et al. (2013), which, however, only had categorized videos of motor vehicles, such as cars, vans, and trucks. The following year, Urban Tracker was published by Jodoin et al. (2014), a Canadian initiative that, for the first time, combined pedestrians and vehicles in an environment that the researchers called "Urban Mixed Traffic". Also in 2014, the Ko-PER dataset was released, which, unlike the others, experimented with laser scanning of traffic circulating through an intersection, combined with a set of cameras that allowed data to be cross-referenced for a better perception of the spatial movements captured by the laser. The idea was excellent; however, this model was partially discarded due to the perception that, despite the process being more laborious, and financially and computationally more expensive, there were no significant improvements compared to the model with only cameras.

After a few years of stagnation in the work, 2018 saw a revolutionary launch: the JTA dataset from the University of Modena and Reggio Emilia, which used a realistic computer game to record scenes of pedestrians walking on sidewalks. Although it is a very large, high-resolution urban monitoring dataset used in several areas within CV, it is irrelevant to the present work because it only emphasizes pedestrians on the sidewalk, without conflicts with other means of transportation. In the same year, the WILDTRACK dataset was also published, with the identical focus on pedestrians specifically on sidewalks.

According to Dollar et al. (2012), one of the most significant academic challenges in this area at the time was measuring scientific progress in Computer Vision, since the datasets and algorithms used were difficult to correlate. Therefore, the publication of The Multiple Object Tracking Benchmark (MOTChallenge) was of crucial help to standardize the results. It comes

from a partnership between major European universities and an Australian university, focusing on pedestrians in real urban environments including scenes with pedestrians crossing the street, near cars, and in the middle of the street during closed events, among others. It is the result of work that has been going on since 2014, and which, in 2020, during the period known as the pandemic, reached its peak with the launch of the MOT20 version.

3. WORK METHOD

To develop the program, it was necessary first to configure auxiliary tools and software to create a well-designed work environment for efficient, comfortable, and documented programming.

3.1 Nomenclature and Definitions

This program can process images individually (frames) or in sequence (videos). For a video, the program processes it frame by frame, individually, but not in isolation. Thus, for each video frame, the program first performs its isolated analyses on the image, detecting everything it can, and then compares it with the previous frames to establish a relationship of continuity for each detection, which allows the program to track them. The identification of any person or vehicle by the program will be generically referred to below as an "object" or "entity," even though it is known that people are not objects.

3.2 Desktop Setup

A Python interpreter, a text editor, and a console are required to program and execute the software. Therefore, the Python interpreter was installed on the local machine (computer), and all the necessary modules using the Anaconda distribution, which already manages compatibility between modules. Visual Studio Code was chosen for the text editor, which, in an integrated manner, allows writing, executing, and debugging the code.

3.3 Camera Positioning and Definition of Control Areas

This work deals with an interface between the physical world and the virtual world; it is, therefore, necessary to carry out a sequence of actions in order to be able to make the connection between points in the physical world and the virtual world. First, we must prepare the

terrain in which the work will be conducted by choosing the positioning of the physical markers to be visible in the camera's field of view. Then, we must position the camera so that it is possible to see the entire area to be surveyed, with a small amount of spare space. The video can then be recorded once the camera's framing in the area in question has been confirmed. Once the video recording is finished, or when real-time monitoring begins, the images are pre-processed based on the definition of key points in the camera image; these are the polygons, which are called control regions from this point forward. It is indispensable that the camera remains still and at the same point and that the polygons are already defined before starting the next stage.

In the current implementation of the program, it is necessary to define three polygons that encompass the control regions, from smallest to largest: the crosswalk, the street, and the source region. The source region is the area in which the physical world is connected to the virtual world; it is the region in which speeds are measured, and detections are validated; detections outside the source region are discarded. For each of the polygons, it is necessary to indicate its position in the video capture in terms of pixels, and, only for the source region, it is also required to inform its measurements in the real world in rectangular coordinates (width and length), which correspond precisely to the coordinates of the physical markers. The program makes the correlation between the real and virtual polygons of the source region employing a "perspective transformation," which uses complex mathematical equations already implemented in one of the libraries used.

3.4 Program Execution

Once all the initial settings have been made, it is time to run the program. Its default setting is to save videos in real-time after they have been processed, creating a large video file that can be re-watched and calmly analyzed after capture. Another possibility is to use a camera disconnected from the program, which records a video that will only be processed later; this can be done by indicating a video file to the program.

3.5 Premises Used

As with all research work, arbitrary decisions must be made that invariably direct this work toward premises underlying the researcher's will. Knowing this, some of these choices are briefly reported so that the reader knows there are other possibilities.

3.5.1 Arbitrary Choices in the Algorithm

The choices made by the authors in each listed area are described below.

Polygons: The polygons chosen for the source region were right rectangles. For the other polygons, four vertices were used, not necessarily rectangular. However, the program is flexible enough to allow any number of vertices for any polygon to better adjust for the real geometry of the region. For the source region, it is only necessary to ensure the real-virtual pair has the same number of vertices.

Model: We used the Ultralytics module for Python, which, as a free and open-source repository, allows its use for the purposes of this research. The YOLOv8 model was chosen within this module because of its ease of use. This model is designed to be used in a wide variety of real-world situations and is therefore trained to recognize several classes of objects, which makes the model less efficient for use with known and restricted classes, as in the case of this research, which considers only pedestrians and some vehicles.

Reliability: The model used to process the video uses a parameter to decide the classification of the detected object. It was decided that only detections with more than 30% confidence would be considered valid. This value may seem low, but it is used to avoid losing the object when it is partially hidden in the image, as previously discussed.

Occlusions: The model's IOU ("intersection over union") parameter focuses on eliminating duplicate detections for the same object. A value of 0.7 was chosen for it. In short, this means that if the intersection area between two detections is equal to or greater than 70% of their combined area, they are treated as a single detection.

Speed calculation: After processing the frame, the program reports a calculated speed for each identified object. However, it is not an instantaneous speed; instead, it is calculated as a continuous average of the distance traveled in meters by the object in the last 1 second and converted to kilometers per hour (km/h). Thus, this speed is always "delayed," with the delay being directly proportional to the object's acceleration. This choice attempts to solve the problem of a constant but relatively small variability in the position the computer interprets the entity to be in. Thus, although it was possible to report a more precise speed, an interval of one second was chosen for a smoother average.

Legend: Below each identified entity is a legend composed of serial number and speed. The symbol # comes before the serial number, and after the speed

comes its unit, in km/h.

3.5.2 Category Conventions

We decided to classify the detections into three categories: normal, warning, and danger. They are arbitrary but were chosen to facilitate the analysis of possible risks without calculating the actual degree of risk, since the literature in section 2 refers to degrees of risk (high, medium, and low) calculated from a correlation matrix between the identified factors. In the case of this research, the categories are purely spatial, depending only on the object's position around other objects, and are classified independently of the model classes (people, cars, buses, etc.), which are intrinsic to the objects.

In "danger," we placed three situations: all the jaywalkers, which are pedestrians who cross the street outside of a crosswalk, as well as all vehicles traveling outside the street, or all objects when there is at least one pedestrian and at least one vehicle in a crosswalk simultaneously. This last situation happens when, for example, a car invades the pedestrian crossing and there is still a person crossing, or when a person starts to cross while there is still a car passing by. It also considers the elderly and children, more vulnerable people, who may take longer in the crossing or impulsively cross the street outside the pedestrian crossing to catch a ball, for example.

In the "warning" class, we placed all people and vehicles on the pedestrian crossing but not simultaneously with objects from another category together (for example, only people in the crossing or only vehicles inside the crossing). This was done to differentiate them from detections of pedestrians on the sidewalk, which inherently have a lower risk.

All other situations not covered by the previous categories were placed in "normal." For example, pedestrians on the sidewalk or vehicles on the street.

3.5.3 Meaning of the Colors

The program uses only the following colors to overwrite the original image, each used in a different context. For polygons, green symbolizes the crosswalk, blue symbolizes the source region, and black symbolizes the street. As for the categories:

Red: symbolizes danger. It is used when there are conflicts between people and vehicles.

Yellow: symbolizes alert. It is used when an element is within the crosswalk, after it is verified that it is not in the danger category.

White: symbolizes normality; vehicles on the street,

and pedestrians on the sidewalk. It is used on elements and their associated captions when it is verified that they are neither in the alert nor in the danger categories.

4. RESULTS

After developing the computer program in Python to identify normal, alert, and dangerous situations, it requires a live or recorded video to work.

4.1 Data Collection

To initially test the program's behavior, we searched the internet for videos that were freely available and allowed to be used with attribution; however, due to the enormous quantity of results retrieved, some parameters were introduced to search for the ideal video that would test all the functionalities of this work. These are: having a clear and unobstructed view of at least one pedestrian crossing, and of an intersection, which may or may not be traffic lighted; having vehicles and people being captured by the camera; and, perhaps the most difficult parameter to comply with, being a video that was recorded with the camera still. Two videos were found that fully met these criteria: Morina (2020), and Korb (2020), which were used as a basis for the initial tests of the program and will be further presented in their modified versions. Once the testing purposes were fully met, the author recorded a video on Monday, September 23, 2024, around 2:00 p.m., on the street in front of the University Restaurant at the Darcy Ribeiro Campus of the University of Brasília. This video was recorded with a tilted view, from top to bottom, but not completely vertical, as seen in Figure 2, which is the best framing for this CV situation, as it allows a less obstructed view of the entities passing by.

4.2 Data Processing

Initially, videos freely available by Morina (2020) and Korb (2020) were used to test the program's operation. Later, the author used footage taken in front of the University Restaurant as a real-life example to test its behavior in a realistic scenario.

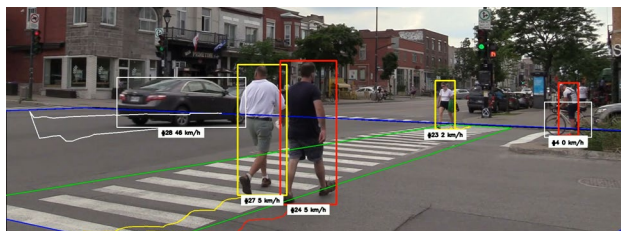


Figure 1. Several detection categories occurring simultaneously.

Source: Korb (2020) - adapted by the authors.

Figure 1 is very interesting because it simultaneously depicts a variety of situations incorporated into the classification algorithm. It is possible to identify at least five colors present in the image: red, yellow, white, green, and blue, and, perhaps the most hidden, black. Six detections can be observed from left to right, which will be treated according to their unique serial numbers. In the first, it is possible to observe a gray car framed with the white color and the caption "#26 46 km/h." This label represents that this object was identified with serial number 26, had its speed measured at 46 km/h, and, according to the criteria in section 3.4, explained previously, was classified as "normal," thus receiving the color white, since, being a car, it is on the street, and not on top of the crosswalk. In addition, behind the car is a trail of its position in the last 2 seconds as it moves across the screen, which is common for all detections.

Similarly, the following two cases received colors that represent their categories according to the program's analysis: detections 27 and 24 are of two men walking side by side; the man in yellow is in the "alert" category because he is on the crosswalk, and the man in red next to him is in the "danger" category because he is walking on the street, even though he is next to the crosswalk, but not in it. The subsequent detection, serial number 23, is of a woman who enters the crosswalk on the opposite side of the road and walks toward the two men: note that the detection model used in the program is well-trained enough to recognize people in different positions and angles; this also happens with vehicles, as can be seen in the following examples.

Finally, the last case is tricky because it involves a cyclist: typically, a human being thinks of a cyclist as a combination of person and bicycle; however, the program divides them into two separate entities. This is because this specific model only separately knows what a bicycle and a person are; that is why the person is framed in red ("person on the street"), and the bicycle is in white ("vehicle on the street").

Figures 2 and 3 show the vehicle and the pedestrians simultaneously occupying the crosswalk (marked in green), which should not occur. Therefore, as discussed in section 3.4.3, the algorithm determined that both the vehicles and pedestrians in the crosswalk would be colored red. This color was chosen to indicate visually that all involved are in a dangerous situation: the pedestrians because they are in real danger of being run over, and the vehicle because it is a real risk to the safety of the pedestrians.

Undoubtedly, there are situations in which a vehicle has safely entered the crosswalk area without people on the crosswalk, and then a pedestrian begins to cross the crosswalk, which can be one of the interpretations of Figure 2. Nevertheless, it is still classified as a dangerous situation. However, most cases are like the one in Figure 3, in which the pedestrians are already on the crosswalk, and the vehicle nevertheless begins to cross it.

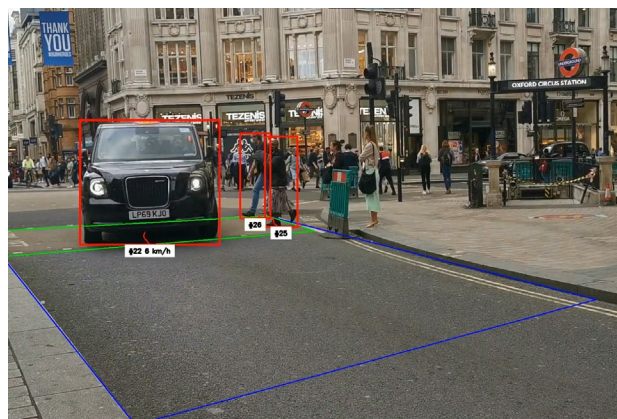


Figure 2. Identification of conflict between vehicles and pedestrians.

Source: Morina (2020) - adapted by the authors.

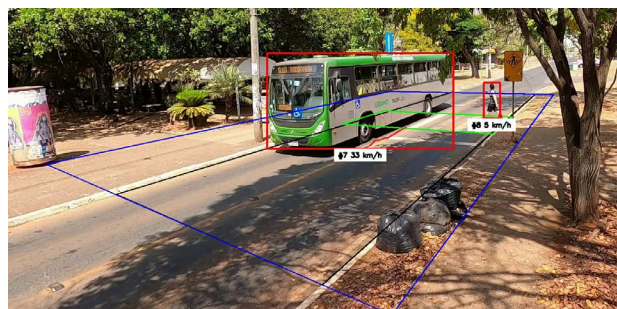


Figure 3. Identification of conflict between vehicles and pedestrians.

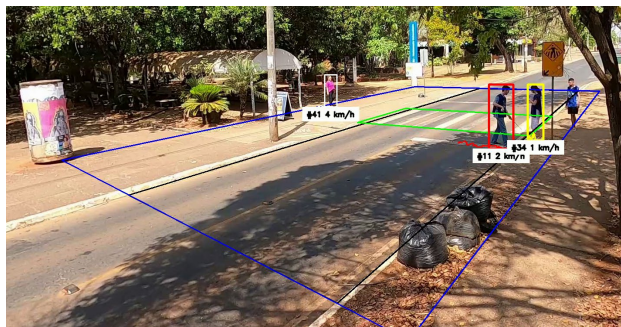


Figure 4. Identification of street and crosswalk occupancy with their respective colors.

In Figures 4 and 5, we can see the different categories in which pedestrians and vehicles can be classified, depending on their position relative to the street and the crosswalk, with the crosswalk marked in green, the street in black, and the source region in blue. As Figure 4 shows, pedestrian detections without the presence of cars are correctly marked as dangerous when outside the crosswalk but inside the street, alert when inside the crosswalk, and normal when outside the street (on the sidewalk). The fourth pedestrian in Figure 4, furthest to the right of the image, is not identified in this video frame because the midpoint of his detection is slightly outside the source region; however, he is considered after he enters the source region. As explained in section 3.2, this happens because detections outside the source region are discarded.

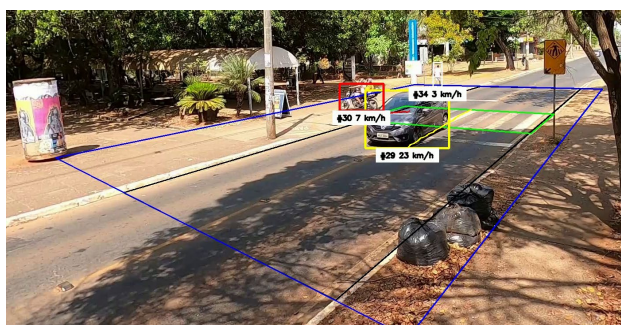


Figure 5. Identification of street and crosswalk occupancy with their respective colors.

Figure 5 shows that vehicles are also correctly assigned as dangerous when off the street, alert when inside the pedestrian crossing, and normal when inside the street; the latter situation is seen in Figure 1. The program also recognizes buses as vehicles, not just cars; trucks are also correctly identified, although not shown in this report.

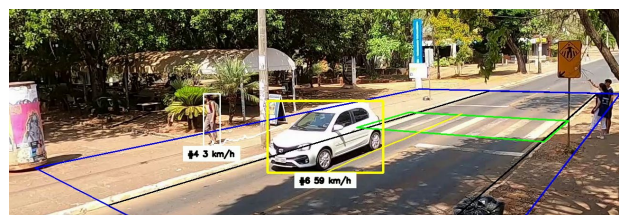


Figure 6. Measurement of speeds on the road.

In addition, Zhang and Abdel-Aty (2022) state that vehicle speed contributes significantly to the risk of conflict and increased accidents, even more so on a straight segment like the one in front of the University Restaurant, where the first two factors of the aforementioned study, which concern intersections at the turn, are not present, making speed the most important factor in conflict mechanisms.

The Brazilian metrology agency, INMETRO, is responsible for approving speed cameras used for issuing speeding tickets. Normally, speed cameras use copper coils embedded in the pavement that electrically detect moving iron, such as the motors of the vehicles. However, this proof-of-concept software enables the collection of realistic data without meddling with the transportation infrastructure, such as the pavement. Although INMETRO has not yet approved the speed measurement technique used in this work and, therefore, it cannot be used to issue speeding tickets, the software can be used for identifying critical points in cities with increased risk of accidents and conflicts. In the example in Figure 6, it is notable that the region where the video was filmed is within "Zone 30", where the regulatory speed limit of the road is 30 km/h, and the vehicle is traveling at an excess of almost 100% of this speed.

Finally, after analyzing the 15 minutes of video recorded in the field, the software counted 54 vehicles, 90 pedestrians, and 54 conflicts. This results in approximately 3.6 conflicts per minute and a rate of 37.5% in relation to the total number of vehicle and pedestrian detections in the video.

4.3 Identifying the Program's Positive and Negative Aspects

As the authors also participated in the manual counting of pedestrians and vehicles crossing an intersection, it was possible to have a critical view when comparing the two methods.

On the one hand, counting pedestrians and vehicles using computational methods is undoubtedly more efficient in using resources, whether time or money. Yes, the initial cost is much higher; however, it

is diluted as the research period increases or with a high traffic volume. In addition, it is also possible to use parallel counting of several fronts with a single piece of equipment; there are videos on the internet in which a camera with an aerial view can count the vehicle traffic in all directions of a roundabout, something that would not be possible in the manual form of work without allocating several researchers. Furthermore, the error rate can be considerably reduced by using customized models and subsequent processing, since manual counting is often done without video recording, with no possibility of recounting, and, even with the analysis of recorded videos, there is still the effect of burnout on employees due to repetitive work.

On the other hand, the CV counting method requires special care and has limitations that do not exist in manual counting. As previously mentioned, the equipment for analyzing the data is quite expensive, with the quality of the video being almost directly proportional to the camera's price and its related add-ons: infrared functions for seeing at night, for example. Besides the camera, powerful computers are still needed to process the generated videos, which are also expensive, but now do not influence the quality of the research as much: a cheaper computer will take longer. In addition, it is impossible to use the cameras in bad weather conditions; not necessarily because it is not possible to use a camera in adverse situations (the GoPro works, for example), but rather because sufficient brightness and sharpness are required to discern the objects present in the video, something that does not happen at night, in rainy or in foggy periods. The weather can also physically damage the equipment and influence the lenses' cleanness, which can blur the images and make them unusable. Finally, the error rate of computational methods depending on the model used is still considerable.

The conclusion is that Computer Vision remains an imprecise method, but it provides an excellent estimate of the magnitude of the traffic volume. This is important for continuous monitoring of intersections so that timely measures can be taken based on instantaneous information. This is the main advantage of data collection with Artificial Intelligence processing: real-time information.

5. CONCLUSIONS

Therefore, the examples shown demonstrate the feasibility of implementing a low-cost, high-tech system for large-scale traffic counting, speed monitoring, and conflict detection, enabling accident mitigation. It no longer makes sense to treat intersections in increasingly connected cities as they did 50 or even 10 years ago: technology is an ally of human beings in preserving and improving quality of life, and it should be used as such.

While this proof-of-concept software works fully at any intersection where a camera can be attached, its optimal performance depends on an unobstructed, sharp view of the intersection. Despite this condition, the real-life application demonstrated the substantial technical and economic advantages of this proof-of-concept over manual data collection methods. The software efficiently performs multiple tasks simultaneously and collects diverse, integrated data that would typically require separate equipment and considerably more time and resources.

The integrated data, encompassing number of pedestrians, vehicle types and counts, speed, precise positioning relative to the road and the crosswalk, and conflict indicators, enables robust, continuous analysis of human-vehicle interactions, 24 hours a day. The 15-minute example showcased a high rate of conflicts, especially when considering vehicles invading the sidewalk, which represents both a threat to the drivers and especially to the pedestrians. This highlights the substantial number of uncatalogued conflicts that continuous monitoring could identify.

While urban surveillance raises serious privacy concerns, this research advocates strategically instrumenting critical intersections, which presents a technically sound and economically viable approach. Ultimately, by providing insights that enable the mitigation of traffic conflicts, this technology directly contributes to the fundamental human right to safety and the preservation of life in our shared urban spaces. In the dynamic environment of urban traffic, minimizing conflicts is not merely a technical challenge but a moral imperative, essential for preserving human life and enhancing the quality of urban living.

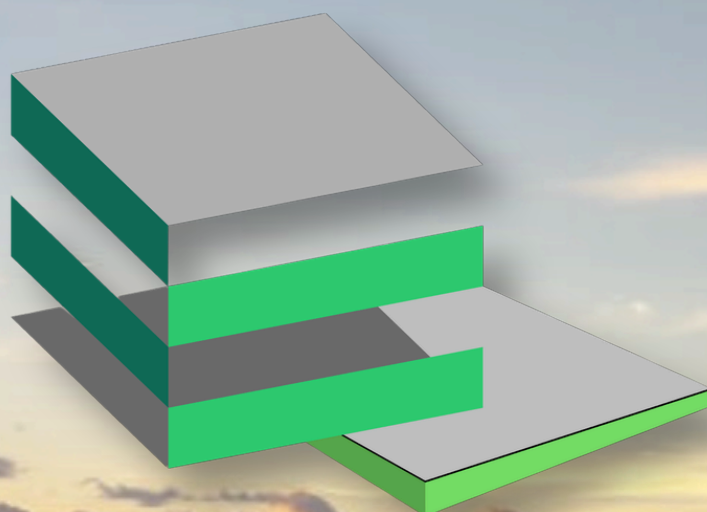
In the future, it is recommended to improve the detection of cyclists through a model specifically trained to recognize the person and their bicycle as a whole instead of separating them. Also, alternatives to deal with obstructed lenses must be sought.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Work Plan PIBIC 9726A). The authors are also grateful to the Python Software Foundation and the developers of the other modules used in the program, as well as the University of Brasília and the Civil and Environmental Engineering Department for the world-class formation. To the Author and Sustainer of all life, our God and Father, be glory forever and ever. Amen.

REFERENCES

- Associação Brasileira de Medicina do Tráfego (ABRAMET) (2024). *Quase 8 em cada 10 vítimas graves do trânsito são pedestres, ciclistas ou motociclistas*. Available at: <https://abramet.com.br/noticias/quase-8-em-cada-10-vitimas-graves-do-transito-sao-pedestres-ciclistas-ou-motociclistas/>. Accessed 19 September 2024.
- BRUNETTI, A. et al. (2018). Computer vision and deep learning techniques for pedestrian detection and tracking: A survey. *Neurocomputing*, 300, ISSN 0925-2312, p. 17-33. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.01.092>.
- DE OLIVEIRA, B. and CUNTO, F. (2023). Caracterização da interação pedestre-veículo em travessias semaforizadas. *TRANSPORTES*, v. 31, n. 3, p. e2768. Available at: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i3.2768>.
- DENDORFER, P. et al. (2020). *MOTChallenge: A Benchmark for Single-Camera Multiple Target Tracking*. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.07548>.
- DOLLAR, P. et al. (2012). Pedestrian Detection: An Evaluation of the State of the Art. *IEEE Journals & Magazine*. Available at: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2011.155>. Accessed 19 September 2024.
- GUERRERO-GOMEZ-OLMEDO, R. et al. (2013). Vehicle Tracking by Simultaneous Detection and Viewpoint Estimation. *Natural and Artificial Computation in Engineering and Medical Applications. IWINAC*; p. 306-316. Available at: <https://gram.web.uah.es/data/publications/iwinac13-guerrero.pdf>. Accessed 19 September 2024.
- JODOIN, J. et al. (2014). Urban Tracker: Multiple Object Tracking in Urban Mixed Traffic. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, Steamboat Springs, CO, USA; p. 885-892. Available at: <https://www.jpjodoin.com/urbantracker/download/JodoinetAIWACV2014.pdf>. Accessed 19 September 2024.
- KORB, G. (2020). Footage of a Busy Street. Quebec, Canada. Available at: <https://www.pexels.com/video/footage-of-a-busy-street-4779862/>. Accessed 19 September 2024.
- MAO, J., et al. (2017). *What Can Help Pedestrian Detection?* Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.02757>. Acessado em: 19/09/2024.
- MORINA, G. (2020). View of Busy Street at Oxford Circus Station. London, United Kingdom. Available at: <https://www.pexels.com/video/view-of-bust-street-at-oxford-circus-station-5330919/>. Accessed 19 September 2024.
- Secretaria de Saúde do Distrito Federal (SES/DF) (2024). Dia do Pedestre traz conscientização sobre segurança no trânsito. Available at: <https://www.saude.df.gov.br/w/dia-do-pedestre-traz-conscientizacao-sobre-seguranca-no-transito>. Accessed 19 September 2024.
- STRIGEL, E. et al. (2014). The Ko-PER intersection laserscanner and video dataset. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, p. 1900-1901. Available at: https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/iui.inst.110/Bilder/Forschung/Datensaetze/20141010_DatasetDocumentation.pdf. Accessed 19 September 2024.
- UDESC (2016). Juramentos e cores dos cursos. Available at: <https://www.udesc.br/guiadeeventos/juramentos>. Accessed 19 September 2024.
- ZHANG, S. and ABDEL-ATY, M. (2022). Real-Time Pedestrian Conflict Prediction Model at the Signal Cycle Level Using Machine Learning Models. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation System*, 3, p. 176-186, Available at: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3155126>.



JPET
Engenharia civil

COMISSÃO AVALIADORA



PROF.ª D.SC JÉSSICA SIQUEIRA DE SOUZA

<http://lattes.cnpq.br/0980484447482495>

PROF. M.SC JULIO ROBERTO USZACKI JUNIOR

<http://lattes.cnpq.br/5382291449929885>



M.SC MATHEUS DE SOUZA SILVA

<http://lattes.cnpq.br/3688719668786852>

PROF. D.SC YURI SOTERO BOMFIM FRAGA

<http://lattes.cnpq.br/5055016786232011>



COMISSÃO AVALIADORA



PROF.ª D.SC FABIANA SERRA DE ARRUDA

<http://lattes.cnpq.br/2580906230595550>

PROF. D.SC ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE

<http://lattes.cnpq.br/1515779118499986>



COMISSÃO AVALIADORA



PROF. D.SC FRANCISCO EVANGELISTA JÚNIOR
<http://lattes.cnpq.br/1213553571707025>

PROF.^a D.SC GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO
<http://lattes.cnpq.br/7606353024542498>



PROF. D.SC MICHELL MACEDO ALVES
<http://lattes.cnpq.br/5833773173320606>

PROF. D.SC RODRIGO DE MELO LAMEIRAS
<http://lattes.cnpq.br/9194162024248712>



PROF.^a D.SC GISELE CRISTINA ANTUNES MARTINS
<http://lattes.cnpq.br/7001161195946998>

PROF.^a D.SC VANESSA CRISTINA DE CASTILHO
<http://lattes.cnpq.br/7224610551194911>



PROF. D.SC IAGO FREITAS DE ALMEIDA
<http://lattes.cnpq.br/0637632264893227>

COMISSÃO AVALIADORA

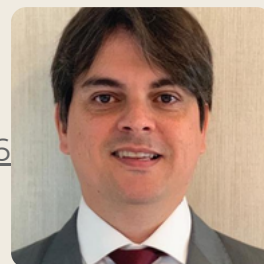


D.Sc ANA PAOLA DO NASCIMENTO DANTAS

<http://lattes.cnpq.br/3268743818686334>

PROF. D.SC ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE

<http://lattes.cnpq.br/1515779118499986>



D.SC JOÃO MANUEL MARCELINO MATEUS DA SILVA

<http://lattes.cnpq.br/2291118882149411>

PROF.^a D.SC RENATA CONCIANI NUNES

<http://lattes.cnpq.br/3289800404391423>

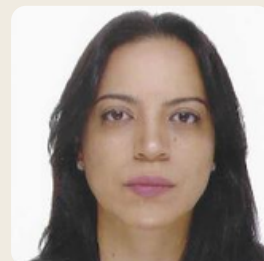


**PROF.^a D.SC MARCIA MARIA DOS ANJOS
MASCARENHA**

<http://lattes.cnpq.br/5184066802578105>

PROF.^a D.SC MARTA PEREIRA DA LUZ

<http://lattes.cnpq.br/5995967458007910>



PROF. D. SC VINÍCIUS RESENDE DOMINGUES

<http://lattes.cnpq.br/4995093606619520>

COMISSÃO AVALIADORA



D. SC YAGO MACHADO PEREIRA DE MATOS

<http://lattes.cnpq.br/5533205384020554>

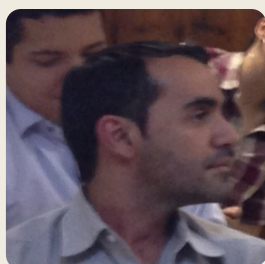


M. SC MOISÉS ANTÔNIO DA COSTA LEMOS

<http://lattes.cnpq.br/8066031763862927>

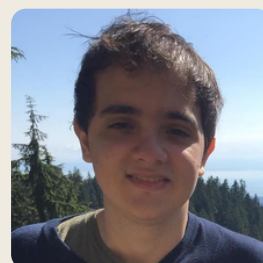
COMISSÃO AVALIADORA

PROF. D.SC OTAVIO HENRIQUE DA SILVA
<http://lattes.cnpq.br/2580906230595550>



M.SC. MARCELO PEREIRA ALMEIDA
<http://lattes.cnpq.br/1037089976151399>

M.SC. GABRIEL ANDRADE LANZARO
<http://lattes.cnpq.br/8372428289484593>



PROF. D.SC FÁBIO ZANCHETTA
<http://lattes.cnpq.br/0252376413657461>

PROF. D.SC PHILIPPE BARBOSA SILVA
<http://lattes.cnpq.br/0702780795925115>



PROF.ª D. SC MICHELLE ANDRADE
<http://lattes.cnpq.br/3254944113298230>