

# REPAE

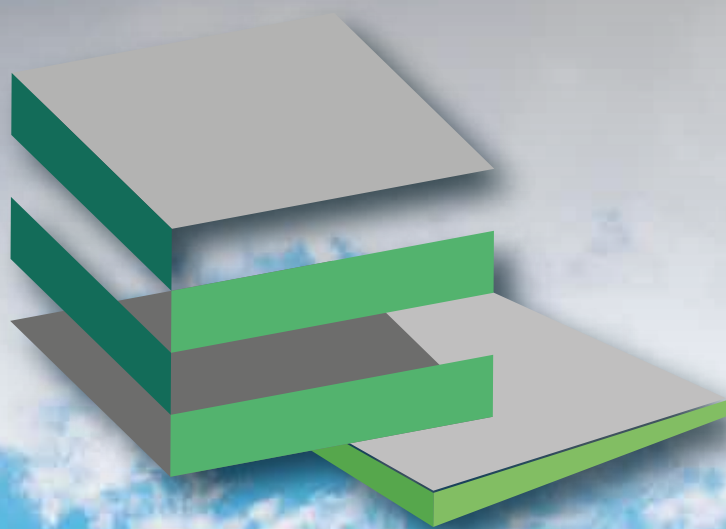
Revista Científica de Pesquisa  
Aplicada à Engenharia



**UnB**



Volume 6, 2022 | ISSN: 2595-0002



 **PET**  
**Engenharia civil**





# REPAAE

Revista Científica de Pesquisa  
Aplicada à Engenharia  
Volume 6  
ISSN:2595-0002

# EDITORIAL

**Por André Luís Brasil Cavalcante**

Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB

Tutor do Programa de Educação Tutorial da Engenharia Civil da UnB

A Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia (REPAE) tem vivido uma evolução emocionante e significativa! Editada pelo Programa de Educação Tutorial do curso de Engenharia Civil (PET-Civil) da Universidade de Brasília (UnB), em suas duas primeiras edições, começou como uma plataforma para aproximar os estudantes de Engenharia Civil da UnB do mundo científico e acadêmico.

Mas a REPAE não parou por aí. Na terceira edição, a revista expandiu seu grupo de enfoque e modernizou-se, alcançando alunos e ex-alunos dos cursos de Engenharia Civil e Ambiental de diferentes Instituições de Ensino Superior. Na quarta edição, ela ampliou ainda mais seu corpo editorial e revisores, incorporando profissionais de Universidades Nacionais e Internacionais e implementando avaliações por pares e duplamente cegas. A REPAE também obteve o seu Número Internacional Padrão de Série (ISSN).

Na quinta edição, a REPAE surpreendeu ao incluir o identificador de Objeto Digital (DOI) em todos os artigos, dando um grande passo para a sua internacionalização. A revista também aguarda pela oficialização de sua classificação no sistema Qualis Capes. Na atual edição, a REPAE renovou seu template de submissão de artigos, oferecendo uma aparência renovada e uma melhor experiência aos seus leitores.

Tudo isso é motivo de muito orgulho e alegria! A pesquisa científica é crucial para o progresso tecnológico e científico de nosso país é essencial para o crescimento e desenvolvimento da engenharia. Incentivar a pesquisa científica desde o início da graduação, incluindo pesquisas de iniciação científica e trabalhos de conclusão de curso, resulta em profissionais melhor preparados, criativos, empreendedores e capazes de encontrar soluções para os desafios da sociedade.

É uma honra escrever este editorial e fazer parte desta história emocionante!

# APRESENTAÇÃO

A Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia (REPAAE) é a manifestação de um sonho que se tornou realidade. Desde sua criação, ela tem como objetivo ser a ponte entre os alunos de graduação e o meio científico e acadêmico. Nascida no seio do Programa de Educação Tutorial do curso de Engenharia Civil da Universidade de Brasília (PET Civil UnB), um grupo que atua com base no Ensino, Pesquisa e Extensão, em parceria com a Universidade.

A REPAAE é a oportunidade perfeita para que os alunos possam publicar trabalhos e artigos elaborados durante o período de graduação, e dar a conhecer seu potencial. Além disso, ela permite que os discentes se familiarizem com o processo de submissão, avaliação e publicação de pesquisas em revistas científicas, tornando os estudos desenvolvidos durante a graduação mais acessíveis à comunidade acadêmica.

Atualmente, a REPAAE possui sete áreas de submissão: Construção Civil, Estruturas, Geotecnia, Recursos Hídricos, Transportes, Representação Gráfica e Ensino na Engenharia. Cada uma dessas áreas é uma janela para o mundo da pesquisa, e permite que os leitores entrem em contato com o que há de mais atual e relevante na Engenharia.

Em suma, a REPAAE é a revista perfeita para quem deseja se manter atualizado sobre o mundo da Engenharia, e para aqueles que desejam dar a conhecer seu potencial. Não perca a chance de participar desta história!

# Expediente

## Conselho Editorial

André Luís Brasil Cavalcante  
Fabiana Serra de Arruda  
Matheus Lima de Barros  
Michelle Andrade

## Comissão Editorial

Anna Luíza Medeiros Corrêa da Silva  
Carlos Eduardo Ribeiro dos Santos  
Davi Martins de Aragão  
Faruk Lima Santos Abder Rahman Yasin Mohd Yasin  
Fernanda de Oliveira Porto  
Fernanda Ferreira Barro  
Gabriela Pereira do Nascimento  
Georgia Brunelli Bofill  
Isabela Nunes Carvalho  
João Pedro de Souza Armando  
Lethícia Raquel da Silva Gomes  
Maria Isabela de Souza Rodrigues  
Maria Júlia de Miranda Fiel dos Santos

## Projeto Gráfico, Direção de Arte e Diagramação

Anna Luíza Medeiros Corrêa da Silva  
Carlos Eduardo Ribeiro dos Santos  
Faruk Lima Santos Abder Rahman Yasin Mohd Yasin  
Gabriela Pereira do Nascimento  
Georgia Brunelli Bofill  
João Pedro de Souza Armando  
Lethícia Raquel da Silva Gomes  
Maria Isabela de Souza Rodrigues

Programa de Educação Tutorial - Engenharia Civil [PET-CIVIL]  
Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília [FT-UnB]  
Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte - Brasília [DF]  
CEP 70910-900 | [petencunb@gmail.com](mailto:petencunb@gmail.com)



# SUMÁRIO

## **10 SEÇÃO 1 - GEOTECNIA**

- 11 Estudos Laboratoriais Para A Análise Do Fenômeno De Erosão Interna
- 19 Modelagem Do Transporte De Gases Do Efeito Estufa Em Camada De Cobertura De Aterro Sanitário

## **27 SEÇÃO 2 - RECURSOS HÍDRICOS**

- 28 Análise De Implementação De Medidas Compensatórias Para O Manejo De Águas Pluviais Urbanas No Campus Darcy Ribeiro Da Unb

## **33 SEÇÃO 3 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA**

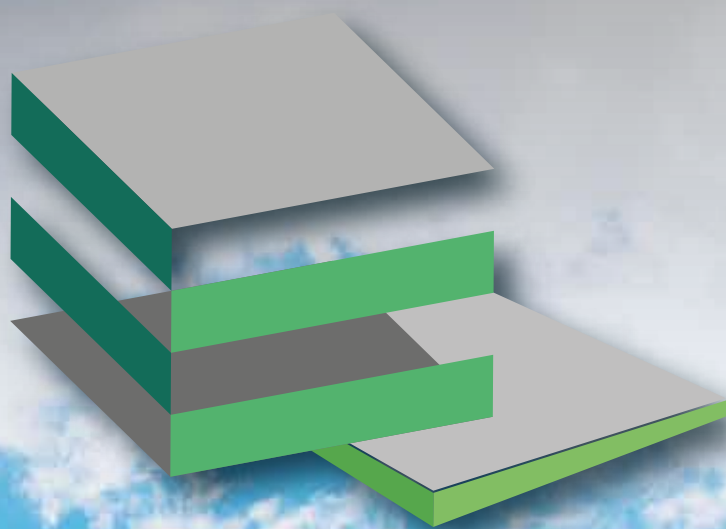
- 34 A Interoperabilidade No Processo Bim: Uma Análise Comparativa Dos Métodos De Captura E Conversão De Dados Construtivos Para Manutenção De Edificações Existentes

## **42 SEÇÃO 4 - TRANSPORTES**

- 43 **Análise Da Segurança De Crianças Na Travessia Em Faixas De Pedestres**
  
- 49 **Análise De Tempo Semafórico Utilizando O Sumo: Estudo De Caso Da Rotatória Do Final Da Asa Norte**
  
- 58 **Aplicação da Lógica Fuzzy para Gerenciamento de Riscos em Aeroportos**
  
- 67 **Padrão Espacial Da Mobilidade Das Pessoas Com Deficiência Da Universidade De Brasília**

## **75 COMISSÃO EDITORIAL**





 **PET**  
Engenharia civil





**Seção 1**

**Geotecnia**



REP A E

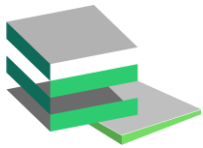
Revista Científica de Pesquisa  
Aplicação à Engenharia  
Volume 6 | ISSN: 2595-0002



UnB



**PET**  
Engenharia civil



# ESTUDOS LABORATORIAIS PARA A ANÁLISE DO FENÔMENO DE EROÇÃO INTERNA

**Gabriela Rodrigues Moreira\***

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

**Katherin Rocio Cano Bezerra da Costa**

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

## RESUMO

As falhas em projetos de barragens, apresentam sérias consequências sociais, ambientais e econômicas, sendo o fenômeno de erosão interna ou *piping* a segunda principal causa responsável por estas falhas. Segundo a literatura, o *piping* representa 46% dos casos de rupturas em barragens, evidenciando assim a importância do estudo deste fenômeno físico. A análise do *piping*, é feita comumente através de simulações numéricas, onde é possível incorporar as características do maciço. No entanto, neste trabalho, é proposta uma metodologia para a análise do potencial de erosão interna em laboratório, desenvolvendo um modelo reduzido que represente a geometria, o tipo de barragem e as características físicas e hidráulicas do material. Como caso de estudo, nesta pesquisa, foi considerada uma barragem de gravidade hipotética, com uma fundação composta por um material granular, o qual foi caracterizado em laboratório. Foi implementada uma metodologia de seis etapas para a montagem do modelo, garantindo uma padronização dos ensaios e da reprodução de cada teste. O modelo reduzido foi construído em um aquário de vidro onde se empregou um protótipo de acrílico para simular a barragem de gravidade. Cada ensaio realizado no sistema construído, precisou de algumas horas em funcionamento para a visualização das linhas de fluxo e da erosão interna no contato aterro-fundação. Foi possível então, implementando a metodologia proposta, o monitoramento visual do fenômeno de erosão interna e, também, a erosão no centro do pé da barragem. A montagem deste sistema permitiu representar satisfatoriamente as linhas de fluxo, as quais foram validadas no software *SEEP/W* do *GeoStudio*, confirmando que uma barragem construída em solos porosos é muito susceptível a geração de erosão interna, trazendo como consequência inevitável, a falha de barragem. Assim, torna-se este trabalho, uma metodologia inicial para aprimorar futuramente a modelagem em laboratório de diferentes tipos de barragens com o objetivo de avaliar antecipadamente o potencial de desenvolvimento de *piping*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Erosão Interna, Barragem de Gravidade, Linhas de Fluxo, Modelo Reduzido.

## ABSTRACT

*The failures in dam projects present serious social, environmental, and economic consequences, with the internal erosion phenomenon or piping being the second cause responsible for these failures. According to the literature, piping represents 46% of the cases of dam failures, thus highlighting the importance of studying this physical phenomenon. The analysis of piping is commonly done through numerical simulations, where it is possible to incorporate the characteristics of the massif. However, in this work, a methodology is proposed for the analysis of the potential for internal erosion in the laboratory, developing a reduced model that represents the geometry, the type of dam, and the physical and hydraulic characteristics of the material. As a case study, in this research, a hypothetical gravity dam was considered, with a foundation composed of a granular material, which was characterized in the laboratory. A six-step methodology was implemented for the assembly of the model, ensuring standardization of the tests and the reproduction of each test. The reduced model was built in a glass tank where an acrylic prototype was used to simulate the gravity dam. Each test performed on the constructed system required a few hours of operation to visualize the flow lines and internal erosion in the embankment-foundation*

\*Autor correspondente: [grmoreira6@gmail.com](mailto:grmoreira6@gmail.com)



contact. It was then possible, by implementing the proposed methodology, to visually monitor the internal erosion phenomenon and also the erosion at the foot of the dam. The assembly of this system allowed for a satisfactory representation of the flow lines, which were validated in the GeoStudio software SEEP/W, confirming that a dam built on porous soils is very susceptible to internal erosion generation, bringing as an inevitable consequence, dam failure. Thus, this work becomes an initial methodology to improve future laboratory modeling of different types of dams in order to evaluate in advance the potential for piping development.

**KEYWORDS:** Internal Erosion, Gravity Dam, Flow Lines, Reduced Scale Mode.

## 1. INTRODUÇÃO

Barragens são obras de engenharia construídas transversalmente ao um curso d'água com o objetivo de deter uma grande quantidade de água para fins de produção energética, controle de vazão para navegação, irrigação, abastecimento urbano, entre outras atividades que se beneficiam de grandes reservatórios (CHIOSSI, 2013).

Por ser uma obra de grande dimensão, uma possível falha no projeto gera inúmeras consequências sociais, ambientais e econômicas. Segundo dados estatísticos, a erosão interna é responsável por 46% das falhas em barragens, o *overtopping* é responsável por 48% e as falhas estruturais são responsáveis por 6% (CALDEIRA, 2018). Diferente do *overtopping* e das falhas na elaboração do projeto estrutural, a detecção da erosão interna normalmente ocorre já em um estágio de ruptura avançado da barragem, pois é um fenômeno interno e progressivo, sendo assim, difícil de identificar a olho nu e necessitando de sistemas sofisticado para sua detecção. A erosão interna consiste no carreamento de partículas de solo devido ao fluxo de água no corpo da barragem, na fundação, ou entre aterro e fundação (MOURÃO & TORRES, 2019).

Este trabalho terá como foco o estudo da erosão interna em fundações de barragens, com reprodução de ensaios em ambiente controlado com possibilidade da análise da influência das linhas de fluxo no fenômeno da erosão interna.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Barragens

Para projetar uma barragem, algumas condições devem ser atendidas de acordo com o tipo de barragem e da função desempenhada no período de operação. Os três principais tipos de barragens são

barragem de terra, barragem de enrocamento e barragem de concreto (CRUZ, 2004).

As barragens de terra normalmente possuem taludes mais suaves, com isso, apresentam bases mais largas, aumentando o volume do maciço. Essas barragens podem ser homogêneas ou zonadas, sendo indicado a construção de filtros internos para o escoamento da água que percola no interior do maciço.

As barragens de enrocamento são compostas predominantemente por material rochoso, podendo ter uma face impermeável, seja de concreto, material asfáltico ou outros materiais e possuem núcleos impermeáveis compostos por material argiloso. Normalmente, este tipo de barragem apresenta base menor que as barragens de terra e taludes mais inclinados (TONUSSI, 2017).

Por fim, as barragens de concreto são, entre os tipos apresentados, a de menor volume e são classificadas em dois tipos: barragens de gravidade e barragens de contrafortes.

As barragens de concreto tipo gravidade, apresentam uma seção levemente trapezoidal e depende das condições topográficas. Por outro lado, as barragens de concreto tipo contrafortes, tem uma placa de concreto armado que cumpre a função de contraforte em direção a jusante para direcionar a carga até as fundações. Este último tipo de barragem, disponibiliza a estrutura com maior resistência na parte a jusante, resistindo à pressão da coluna d'água com seu próprio peso transmitindo-a para a fundação (TONUSSI, 2017).

### 2.2 Fenômeno de Fluxo em Barragens

De acordo com a geotecnia clássica, os vazios do solo podem ser preenchidos por água e/ou ar, que sob diferença de potenciais, as partículas de água se deslocam num único sentido pelo interior do solo, conhecido como fluxo unidimensional. A análise desse fenômeno é de extrema importância para prever o comportamento e resolver problemas

práticos da engenharia geotécnica (PINTO, 2011).

Segundo a Lei de Darcy, a velocidade de infiltração da água por uma determinada área é definida por:

$$v = ki \quad (1)$$

onde,  $v$  é a velocidade de descarga [m/s],  $k$  é a coeficiente de permeabilidade [m/s] e  $i$  é o gradiente hidráulico [adimensional].

Destaca-se a relação linear entre a velocidade e o gradiente hidráulico, sendo assim o coeficiente de permeabilidade é uma constante característica do material (DAS, 2019).

Por fim, outro conceito importante que será abordado no ensaio são as redes de fluxo, que em um meio poroso, são compostas pelo conjunto das linhas de fluxo e linhas equipotenciais, como observado na Figura 1. Sendo, as linhas de fluxo o caminho que a água percorre no meio e as linhas equipotenciais são a união de pontos com a mesma carga hidráulica.

Algumas formas para determinar as linhas de fluxo são através da construção de modelos físicos ou de modelos reduzidos em escala, como também com a utilização de softwares comerciais numéricos.

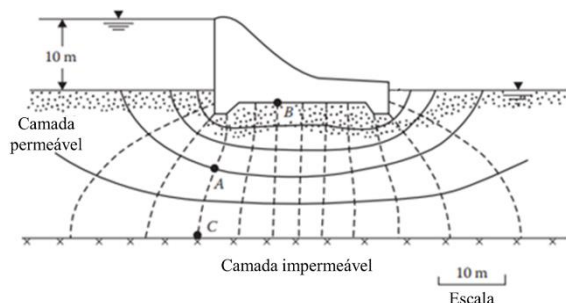


Figura 1. Formação das linhas de fluxo em uma barragem (modificado de Das, 2019).

### 2.3 Erosão Interna em Barragens

Segundo a NBR 13028 (ABNT, 2017), para garantir a segurança em uma barragem durante seu projeto, deve-se analisar os riscos de ocorrer erosão interna, também conhecida como *piping*. A erosão interna pode ocorrer tanto no maciço, quanto na fundação de uma barragem quando a força de percolação for alta o suficiente para mover partículas do solo criando uma espécie de canal para passagem da água.

Segundo ASDSO (2019), erosão interna ocorre

mais frequentemente perto de tubos e vertedouros, em rachaduras, itens associados a barragem ou na fundação.

Uma das formas de analisar o risco de uma barragem desenvolver *piping* é por meio de ensaios laboratoriais, a fim de conhecer as propriedades dos materiais que compõem o maciço e a fundação. Assim, é necessário determinar os parâmetros físicos e hidráulicos dos materiais.

De acordo com Das (2019), é possível determinar a formação do fenômeno de erosão interna quando há um fluxo ascendente e o gradiente hidráulico for igual ao gradiente crítico. O gradiente crítico pode ser determinado de acordo com:

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (2)$$

onde,  $i_{cr}$  é o gradiente hidráulico crítico [adimensional],  $\gamma_{sub}$  é peso específico saturado do solo [kN/m<sup>3</sup>],  $\gamma_w$  é peso específico da água [kN/m<sup>3</sup>].

O coeficiente de permeabilidade do solo, conhecido também como condutividade hidráulica, deve ser determinado através de ensaios laboratoriais de acordo com a NBR 13292 (ABNT, 2021), pois com os valores obtidos é possível realizar análises de estabilidade de barragens, por exemplo, e avaliar as estruturas de contenção de maciços sujeitos a forças de percolação (DAS, 2019).

Observa-se que a erosão interna pode ocorrer de três formas: (1) através do aterro como apresentado na Figura 2, (2) através da fundação como apresentado na Figura 3 e (3) através do contato aterro e fundação apresentado na Figura 4 (USACE, 2015).

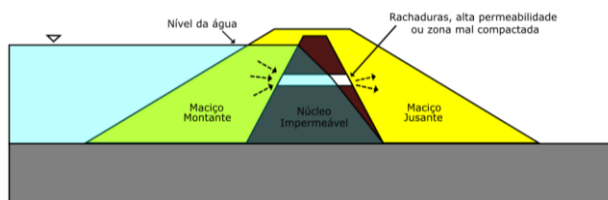


Figura 2. Fenômeno da erosão interna através do aterro (modificado de USACE, 2015).

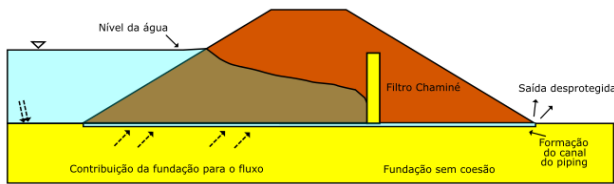


Figura 3. Fenômeno da erosão interna através da fundação (modificado de USACE, 2015).

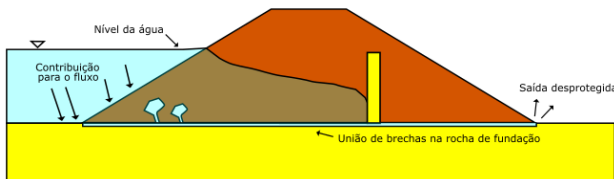


Figura 4. Fenômeno da erosão interna através do contato aterro e fundação (modificado de USACE, 2015).

Segundo USACE (2015), a principal causa de ruptura em uma barragem de concreto de deve a falhas na fundação gerada pela erosão regressiva, principalmente quando são construídas sobre solo ou aluviões, que será o modelo reproduzido no ensaio laboratorial.

A erosão regressiva inicia em uma zona de escoamento livre e sem filtros, tanto no aterro quanto na fundação, acarretando no carreamento de partículas do material poroso de modo progressivo e regressivo (no sentido de jusante para montante). Em solos homogêneos esse fenômeno progride para um uma erosão tubular (*piping*) quando os gradientes hidráulicos e a velocidade de percolação atingem valores críticos (CALDEIRA, 2008).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para montagem do modelo reduzido e para a simulação do fluxo foi aplicada em seis etapas (Figura 5). Seguir as etapas apresentadas a seguir foi importante para padronização dos ensaios.



Figura 5. Fluxograma da metodologia aplicada.

Inicialmente, os materiais foram escolhidos em função da sua granulometria. O recipiente utilizado para representar o meio ensaiado foi um aquário de vidro com dimensões de 0,60 x 0,26 x 0,24 m, assim foi utilizada uma areia média de construção (Figura 6) para representar a fundação analisada.



Figura 6. Material poroso selecionado.

Outro material utilizado na montagem do experimento, foi o protótipo da barragem de gravidade totalmente vedado, feita em acrílico com uma geometria hipotética típica deste tipo de barragem de concreto. As dimensões da barragem são doze centímetros de altura, sete centímetros de base e dois centímetros de largura da crista. Dentro, o acrílico foi preenchido com um pedregulho com granulometria entre 2 mm e 4,75 mm, para gerar uma resistência à carga d'água a montante e melhor visualização do ensaio. A imagem ilustrativa do protótipo de acrílico está apresentada na Figura 7.

A segunda etapa consiste na realização dos ensaios para caracterização física e hidráulica dos materiais. Para caracterizar a areia média de construção foram realizados o ensaio de distribuição granulométrica segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016) e o ensaio de permeabilidade de carga constante segundo a NBR 13292 (ABNT, 2021).

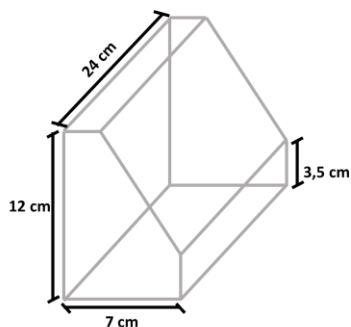


Figura 7. Protótipo de acrílico.

Após a determinação dos parâmetros geotécnicos, na etapa seguinte foi realizada a montagem da barragem e do sistema de umedecimento. Na montagem, foi realizada a compactação por percussão manual do maciço em quatro camadas de 3,8 cm, para manter a homogeneidade da compactação. Na última camada, foi posicionado com devida cautela o protótipo de acrílico mantendo a densidade homogênea como apresentado na Figura 8.



Figura 8. Montagem do sistema.

O sistema de umedecimento desenvolvido para manter o fluxo de água constante no ensaio está apresentado na Figura 9.

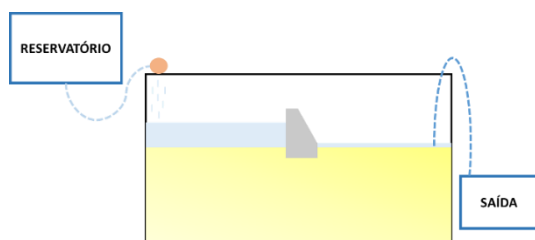


Figura 9. Esquema do sistema de umedecimento.

Na quarta etapa, com o reservatório abastecido, foi ligado o sistema de umedecimento até a saturação do material poroso e obtenção do equilíbrio da carga constante a montante, como

apresentado na Figura 10.



Figura 10. Sistema com fluxo equilibrado.

Após atingir o equilíbrio do fluxo de água através do meio poroso, foi injetado corante de cor verde na lateral do vidro para visualização da formação das linhas de fluxo. Adotou-se uma distância igual entre os três pontos que foi aplicado o corante, como apresentado na Figura 11.

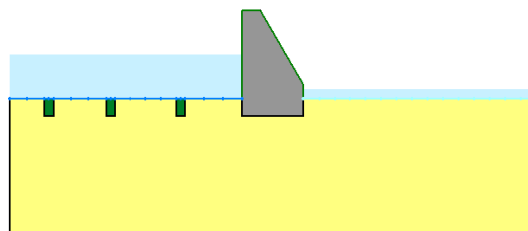


Figura 11. Esquema da aplicação do corante a montante da barragem.

Por fim, coletaram-se os dados relacionados ao processo de erosão através da fundação e formação das linhas de fluxo. Os dados serão apresentados no formato de imagens na seção a seguir, mas também foi realizado captura em vídeos.

#### 4. RESULTADOS

De acordo com a metodologia apresentada, foi simulado o fluxo d'água de um modelo reduzido de uma barragem de gravidade. Utilizou-se para representar a fundação, uma areia de construção de granulometria média e foram realizados ensaios de granulometria e permeabilidade para caracterizá-lo.

O ensaio de granulometria foi realizado seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2016). Observa-se na Figura 12, que o solo tem distribuição uniforme, ou seja, a maioria das partículas possuem seu diâmetro dentro de um mesmo intervalo. Um meio poroso composto por um material uniforme, gera um meio com poros maiores pelo rearranjo das partículas. Para compor a fundação do ensaio foi descartada a parte retida na

peneira nº10, assim o solo apresentaria uma maior homogeneidade (Figura 12).

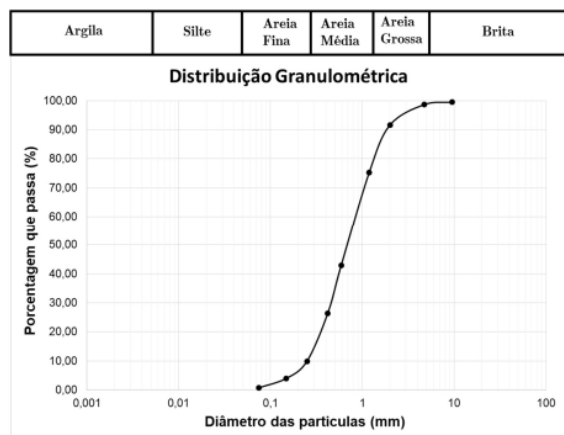


Figura 12. Distribuição Granulométrica para o material granular.

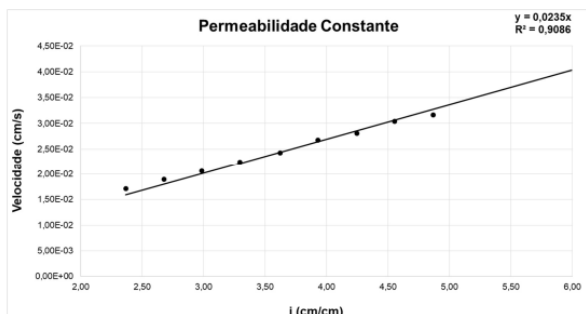


Figura 13. Ensaio de condutividade hidráulica de carga constante para solo arenoso.

A condutividade hidráulica de um solo é diretamente influenciada pela densidade. Assim, foi realizado o ensaio de permeabilidade hidráulica com uma massa específica similar ao definido para a construção da fundação da barragem no aquário de vidro.

O ensaio de permeabilidade foi executado de acordo com a NBR 13292 (ABNT, 2021), os dados obtidos estão apresentados na Figura 13.

O coeficiente de permeabilidade para a areia é igual a  $2,35 \times 10^{-4}$  m/s, com um R-quadrado de 0,9, indicando que o ajuste apresenta uma ótima estimativa.

#### 4.1 Observação das linhas de fluxo

Nos ensaios realizados, foi aplicado um fluxo constante para o preenchimento do reservatório da barragem e para o seu funcionamento. Após o preenchimento do reservatório, e da saturação da

fundação, foi aplicado um corante verde, próximo à uma das paredes laterais do aquário de vidro para a visualização das linhas de fluxo geradas no sistema (Figuras 14, 15, 16 e 17).

Para analisar a formação das linhas de fluxo, foram necessários em média de 3 horas a 4 horas de ensaio, assim é apresentado nas figuras 14, 15, 16 e 17 uma sequência de fotos para observar o fenômeno. O corante utilizado não fixou no material a montante. Assim, não foi possível observar por completo o fenômeno, porém é possível observar todo o fenômeno simulado no GeoStudio (Figura 18).



Figura 14. Início da observação das linhas de fluxo.



Figura 15. Segunda captura da formação das linhas de fluxo.



Figura 16. Terceira captura da formação das linhas de fluxo.





Figura 17. Quarta captura da formação das linhas de fluxo

No *software GeoStudio*, por meio da análise de percolação utilizando o *SEEP/W*, foi validado o resultado obtido nos testes experimentais, observando assim a formação das linhas de fluxo por meio de uma abordagem teórica, que correspondem ao visualizado no ensaio proposto neste trabalho. Na Figura 18, ressalta-se que os resultados são apresentados por meio de: setas que indicam o fluxo gerado, linhas esverdeadas que representam as linhas de fluxo e as condições de subpressão que estão identificadas acima do terreno na cor azul clara.

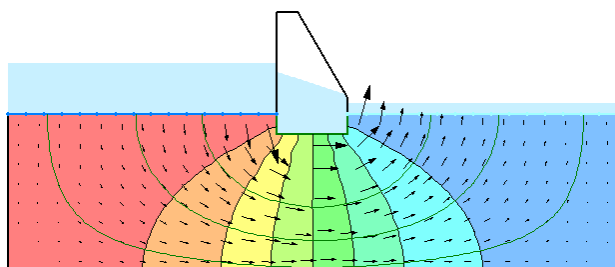


Figura 18. Análise das linhas de fluxo no *software SEEP/W*.

De acordo com a Equação (2), foi determinado o valor do gradiente hidráulico crítico com base na massa específica obtida para o material arenoso ( $1,35 \text{ g/cm}^3$ ), o valor obtido para o  $i_{cr}$  é igual a 0,35.

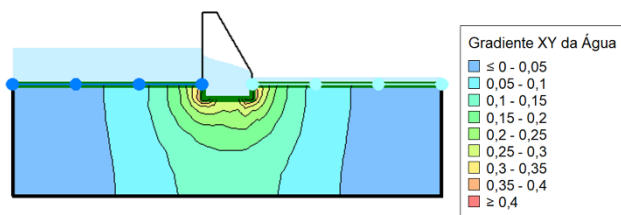


Figura 19. Gradiente hidráulico obtido através do *SEEP/W*.

Como observado na Figura 19, o gradiente

hidráulico na região mais próximo do contato aterro-fundação foi igual ou superior a 0,35. Ou seja, nessa região a tensão efetiva é nula e o material arenoso se comporta como líquido, iniciando um processo de erosão.

## 4.2 Fenômeno de erosão interna

A partir do momento da saturação do solo e da formação da carga d'água a montante, inicia-se um processo de erosão na fundação da barragem. Na primeira hora, começou a observar-se o carreamento de partículas nas laterais do ensaio, como apresentado na Figura 20.

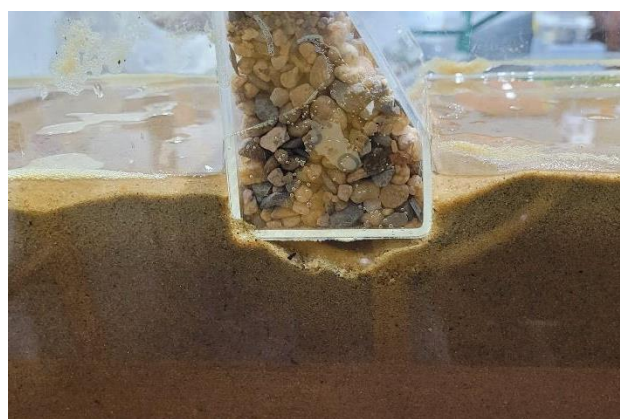


Figura 20. Observação do fenômeno da erosão interna na lateral.

Por volta da segunda hora de análise, foi observada a erosão interna no centro do pé da barragem a jusante, com a formação de tubo, iniciando uma erosão similar ao fenômeno conhecido como areia movediça, apresentado na Figura 21.

Segundo observado nos ensaios, dentro de algumas horas com o fluxo d'água constante, a progressão da erosão interna acarretava na ruptura da fundação, aumentando a passagem de água e o carreamento do material de fundação em alta velocidade.

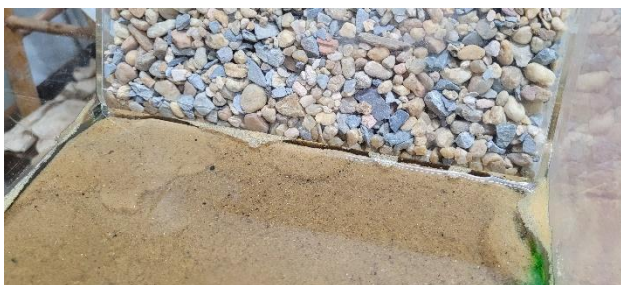


Figura 21. Observação do fenômeno da erosão interna no meio do pé da barragem.

## 5. CONCLUSÃO

A montagem do modelo reduzido permitiu a observação da formação das linhas de fluxo e do fenômeno da erosão interna, proposto no início desta pesquisa.

Comprovou-se que a construção de barragens em solos porosos é muito susceptível a geração da erosão interna, como no modelo ensaiado, acarretando na ruptura da barragem. Para isto, segundo a literatura, indica-se o tratamento da fundação como medida preventiva para o desenvolvimento do fenômeno de erosão interna nesses casos. Uma forma de tratamento de fundação, é o *cut-off*, como medida de prevenção, o qual é feito através da escavação de uma parte do solo da fundação, preenchendo-o com o mesmo material compactado do maciço.

A observação das linhas de fluxo através da aplicação do corante foi muito instrutiva, propõe-se o uso deste tipo de modelos laboratoriais para melhor entender o fenômeno de fluxo em diferentes tipos de fundações e de barragens, visando diferentes alternativas para o tratamento da fundação e na previsão de possíveis desafios construtivos que podem ser gerados em função da carga piezométrica e o tipo de barragem.

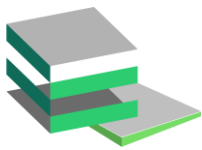
## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos, pelo suporte dado a esta pesquisa, à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Projeto 305484/2020-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) e à

ANEEL/Neoenergia/CEB Distribuição S.A. (Projeto PD-05160-1904/2019, contrato CEBD782/2019).

## REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos de contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021.
- ASDSO (2019). Dam Failures and Incidents. In: <https://damsafety.org/dam-failures>.
- Caldeira, L. (2018). Internal Erosion in Dams. *Soils and Rocks*, São Paulo, 41(3): 237-263.
- Caldeira, L. & Santos, R. (2008). Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações. XI Congresso Nacional de Engenharia. Coimbra, Portugal. Em: <http://repositorio.inec.pt:8080/jspui/handle/123456789/12267>.
- Chiossi, N.J. (2013). *Geologia de engenharia*. 3.ed, Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil. Em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/162912/epub/246>.
- Cruz, P. T. (2004). *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. 2. ed. Oficina de Textos. São Paulo, SP, Brasil.
- Das, B. M. & Sobhan, K. (2019). *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 9. ed., Cengage Learning, São Paulo, SP, Brasil.
- Mourão, B.G. & TORRES, C.O. (2019). Análise Probabilística de *Piping* em Barragens, Publicação G.PF-001/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75 p.
- Pinto, C.S. (2011) *Curso básico de mecânica dos solos*. 3 ed. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil.
- USACE (2015). *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis*. Department of the Interior, Bureau of Reclamation e U.S. Army Corps of Engineers. U.S.
- Tonussi, A.P. (2017). Estudo de ruptura de barragem por *piping*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. 65 p.



# MODELAGEM DO TRANSPORTE DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

**Hugo Allan Albuquerque Barbosa\***

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

**Moisés Antônio da Costa Lemos**

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

A emissão de gases do efeito estufa provoca diversos impactos ambientais, como as mudanças climáticas. O biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono, é gerado pela biodegradação da matéria orgânica dentro do maciço de um aterro, e podem trazer impacto ambiental se emitido para atmosfera. A camada de cobertura de aterros sanitários, mesmo bem estruturada, podem emitir de forma difusa esses gases para a atmosfera. Para evitar a emissão desses gases, é minimamente necessário o entendimento do transporte para assim minimizar os impactos ambientais. A metodologia consistiu na obtenção de trabalhos laboratoriais em ensaios de colunas que simulassem o transporte de gases em camada de cobertura de aterro sanitários. A partir da análise de trabalhos laboratoriais, obteve-se dados e parâmetros relativos ao transporte dos gases e seu respectivo comportamento ao longo de diferentes camadas de cobertura. Posteriormente, foi realizada a modelagem do transporte dos gases com os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011), através do método semi-analítico de Lemos e Cavalcante (2023) e, a modelagem numérica utilizando o COMSOL, para se obter a previsão do transporte dos gases. Dentre os resultados obtidos encontram-se: difusão dos gases, como o do metano que foi de  $3,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , a taxa de oxidação do metano, taxa de formação do dióxido de carbono, taxa de consumo do oxigênio, entre outros parâmetros. Portanto, é possível perceber que este trabalho permitiu a obtenção de parâmetros da oxidação do metano, permitindo maior entendimento do transporte de gases e que futuros trabalhos busquem o aumento da eficiência desse processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Camada de cobertura, Oxidação do metano, Aterro sanitário, Modelagem.

## ABSTRACT

*The emission of greenhouse gases causes several environmental impacts (e.g., climate change). Landfill Gas, composed mostly of methane and carbon dioxide, is generated by the biodegradation of organic matter within the mass of a landfill, and may cause environmental impact if emitted into the atmosphere. The cover layer of sanitary landfills, even well structured, can diffusely emit these gases into the atmosphere. To avoid the emission of these gases, their transport is minimally necessary to minimize environmental impacts. The methodology consisted of obtaining laboratory research in column tests that simulate the transport of gases in the cover layer of a sanitary landfill. Based on the experimental analysis, data and parameters related to the transport of gases and their respective behavior along the different covering layers were obtained. Subsequently, gas transport modeling was carried out with data extracted from Rachor et al. (2011), through the semi-analytical method of Lemos and Cavalcante (2023) and numerical modeling using COMSOL, to obtain the prediction of gas transport. Among the results obtained are: diffusion of gases, such as methane which was  $3.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , methane oxidation rate, carbon dioxide formation rate, oxygen consumption rate, among other parameters. Therefore, in this research were obtained methane oxidation parameters, allowing a better understanding of the transport of gases and*

\*Autor correspondente: [hugoallan602@gmail.com](mailto:hugoallan602@gmail.com)



allowing future works increase the efficiency of this process.

**KEYWORDS:** Cover layer, Methane oxidation, Landfill, Modeling.

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, a sociedade vem de forma acelerada enfrentando grandes problemas por causa dos impactos ambientais, sendo o aquecimento global um dos mais complexos e preocupantes (MACIEL, 2003). A emissão de gases do efeito estufa para atmosfera são advindos de diversas fontes, inclusive da disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários (CETESB, 2022). E com o advento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei nº 12.305/2010, em que se prevê uma disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos dos resíduos sólidos urbanos, iniciou uma grande quantidade de construções de aterros sanitários pelo país, aumentando ainda mais essa preocupação já existente (BRASIL, 2010).

A decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos gera um conjunto de gases conhecidos como biogás (MACIEL, 2003). A composição majoritária do biogás é formada por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sendo ambos gases do efeito estufa, tornando os aterros sanitários uma fonte poluente, caso esses gases sejam emitidos para a atmosfera (COSTA, 2015). Nesse sentido, o potencial de oxidação microbiana do metano em aterros sanitários surge como um dos meios para reduzir as emissões de metano para a atmosfera, como é abordado no trabalho de Hilger e Hummer (2003).

Os aterros sanitários são construídos de forma que o armazenamento dos resíduos sólidos seja dado de forma adequada (CETESB, 1982). São projetados para que haja o adequado manejo do biogás gerado ao longo do tempo, possibilitando assim uma maior eficiência na captação e oxidação do metano na camada de cobertura dos aterros, contribuindo para a redução das emissões de gases à atmosfera (COSTA, 2015). A adequada instalação também impede que parte dos líquidos infiltre no interior do aterro prevenindo uma maior produção de lixiviados (ABNT, 1992).

Como citado anteriormente, para evitar que águas pluviais adentrem no interior do aterro e que sejam emitidos gases para atmosfera, são construídas camadas de coberturas com o objetivo de mitigar

esses problemas (ABNT, 1997).

Para um melhor desempenho das camadas de coberturas é necessário se conhecer os materiais que as compõem, analisando as características geotécnicas e os condicionantes locais das regiões onde serão implantados os aterros sanitários (SCHEUTZ et al., 2009).

Nesse contexto, torna-se importante o estudo de camadas de cobertura que apresentem materiais e características construtivas, que minimizem significativamente as emissões dos gases do efeito estufa para atmosfera e que promovam a oxidação do metano gerado na massa de resíduos do aterro.

Na Figura 1 está destacado o comportamento típico dos gases na camada de cobertura, em que os gases que compõe o biogás, no caso o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{CO}_2$  estão ascendendo por mecanismos de advecção e difusão, enquanto os gases atmosféricos estão adentrando a camada de cobertura pelo mecanismo de difusão (LEMOS, 2020).

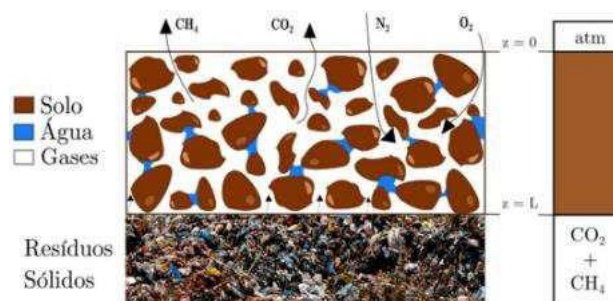


Figura 1. Ilustração da direção dos gases na camada de cobertura de um aterro (LEMOS, 2020).

Por fim, para um estudo detalhado da eficiência da camada de cobertura para a não emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera, é necessário a previsão do transporte de gases e reações que diminuem sua concentração, como por exemplo, a oxidação do metano, dentro das camadas de coberturas dos aterros sanitários (LEMOS, 2020).

A redução da emissão de gases de efeito estufa é influenciada pelo material da camada de cobertura e disponibilidade de oxigênio. A melhoria da aeração aumenta a eficiência de oxidação de  $\text{CH}_4$  (HUANG et al., 2020).

O objetivo deste trabalho é utilizar análises experimentais obtidas na literatura e a partir do método semi-analítico de Lemos e Cavalcante (2023)

e modelagem numérica (COMSOL) modelar o comportamento do transporte dos gases em camada de cobertura de aterro sanitário. A importância do estudo visa a emissão mínima de gases do efeito estufa a partir do maior entendimento de reações e mecanismos do transporte dos gases, possível a partir de modelagens como a desenvolvida nessa pesquisa.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Camada de cobertura

A camada de cobertura de aterros sanitários tem a função de isolar os resíduos do meio externo; controlar a entrada de água e ar para dentro do maciço sanitário; minimizar a migração para a atmosfera dos gases gerados pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos; servir como elemento de redução de odor, vetores de doença e outros inconvenientes; ser componente do sistema de drenagem das águas pluviais; e facilitar a recomposição da paisagem (CATAPRETA, 2008).

### 2.2 Trabalhos laboratoriais

Primeiramente, a pesquisa consistiu na busca por trabalhos laboratoriais em colunas de solo simulando camadas de cobertura em diversos materiais que compõem o sistema em aterros espalhados pelo mundo. Acerca deste assunto, destaca-se os trabalhos de Thomassen et al. (2019), Rachor et al. (2011), Huang et al. (2020), Tanthachoon et al. (2007). Na Tabela 1, verifica-se os detalhes desses trabalhos.

Tabela 1. Abordagens experimentais em solos de camada de cobertura de aterros sanitários.

| Autores                   | Material do Ensaio                          | Concentração do Biogás                               | Temperatura do Ensaio | Material da camada de cobertura  |
|---------------------------|---|--|-----------------------|--|
| Tanthachoon et al. (2007) | Coluna de Acrílico (D = 15 cm e L = 100 cm) | 60% CH <sub>4</sub> e 40% CO <sub>2</sub>            | 35°C                  | Areia siltosa e compostos com vegetação na parte superior  |
| Rachor et al. (2011)      | Coluna de PVC (D=19 cm) e (L=107 cm)        | 60% CH <sub>4</sub> e 40% CO <sub>2</sub>            | 19 °C                 | Quatro solos minerais experimentais e um solo com sedimentos, que era rico em matéria orgânica e tinha uma fração maior de material fino |
| Thomassen et al. (2019)   | Coluna de PVC (D=20 cm) e (L=100 cm)        | 99,5% CH <sub>4</sub> e o restante de ar atmosférico | 20 – 22 °C            | O material utilizado neste experimento foi um composto coletado por uma empresa de reciclagem  |
| Huang et al. (2020)       | Coluna de acrílico (D=14 cm) e (L=100 cm)   | 60% CH <sub>4</sub> e 40% CO <sub>2</sub>            | 25 ± 3 °C             | Solo de cobertura franco arenoso, que foi coletado em um aterro sanitário em Shenzhen - China  |

Com a seleção dos trabalhos, foi obtido a concentração de cada gás ao longo da profundidade

da camada de cobertura como pode ser observado na Figura 2. Visto que essas informações são fundamentais para poder simular e calibrar modelos matemáticos de transporte dos gases.

Entre os trabalhos presentes na Tabela 1, o trabalho de Rachor et al. (2011), apresentava uma maior diversidade de dados, o que permitiria uma melhor validação da modelagem realizada.

Os ensaios realizados por Rachor et al. (2011) consistiram em cinco colunas, que foram construídas com tubos de PVC com comprimento de 1070 mm e diâmetro interno de 190 mm. As colunas foram fechadas com tampas de vedação em ambos os lados na parte final. Na parte inferior, uma entrada para gás sintético de aterro e na parte superior foi instalada uma entrada de ar e uma saída para o gás. Verticalmente, os pontos de amostragem de gás foram montados em intervalos de 10 cm, no qual com o uso das seringas descartáveis era possível obter a amostragem do gás do solo. Na Figura 3 está presente a configuração utilizada no ensaio de Rachor et al, 2011.

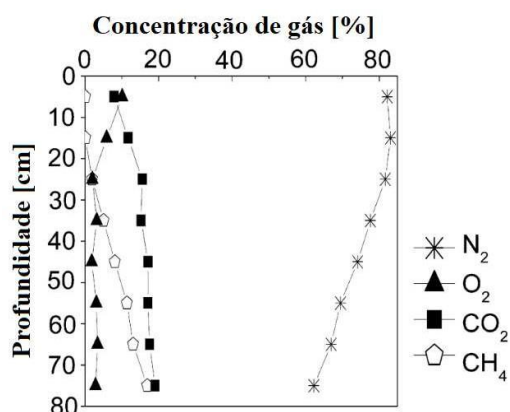


Figura 2. Concentração dos gases ao longo da profundidade. Fonte: Rachor et al. (2011)

Cada coluna foi preenchida com uma camada de distribuição composta de pedregulho com 17 cm de espessura, acima havia 80 cm de solo.

Os solos, que foram selecionados de um aterro na Holanda, consistiam de quatro solos arenosos e um solo com características de uma areia argilosa, que era rico em matéria orgânica e tinha uma fração maior de material fino. Nenhum dos materiais foi exposto ao gás de aterro sanitário antes do início do experimento (RACHOR et al, 2011).

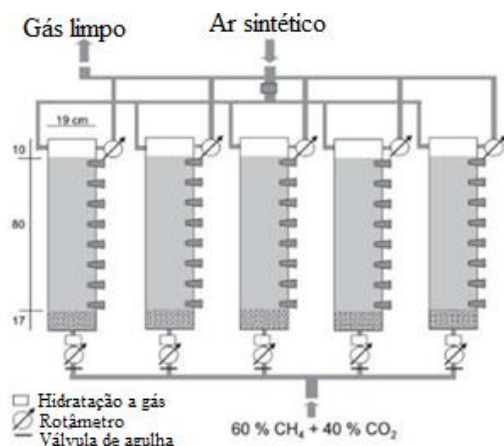


Figura 3. Configuração esquemática do experimento de coluna (Modificado de Rachor et al., 2011).

## 2.3 Programas Computacionais

### 2.3.1 Web Plot Digitizer

O *Web Plot Digitizer* foi desenvolvido para a extração de dados, visto que uma grande quantidade de dados técnicos está disponível apenas na forma de gráficos e imagens (ROHATGI, 2020). Nessas imagens, é fácil visualizar a relação entre as variáveis envolvidas, mas recuperando os valores numéricos exatos dos dados, é possível obter diversas avaliações que ficariam restringidas apenas com as imagens.

### 2.3.2 SWRC AI

O software *SWRC AI* foi utilizado para obtenção de parâmetros relativos a curva de retenção de água no solo nos quais são de grande importância em diversos modelos de simulação de transporte de gases. A aplicação foi desenvolvida pela parceria do Geofluxe (Grupo de Pesquisa Inovações e Tecnologias Aplicadas em Geotecnia Ambiental) e GEOAMB (Laboratório de Geotecnia Ambiental - UFBA).

### 2.3.3 Mathematica

O Software *Mathematica* usa números de alta precisão controlados e análises simbólicas para resolver problemas que seriam de solução impossível com métodos numéricos tradicionais e números de precisão limitada.

## 2.3.4 COMSOL

O *COMSOL Multiphysics*, é um software de análise de elementos finitos, solucionador e simulador multifísico de plataforma cruzada. Ele permite interfaces de usuário convencionais baseadas em física e sistemas acoplados de equações diferenciais parciais (COMSOL, 2022).

## 3. METODOLOGIA

A metodologia (Figura 4) utilizada consistiu, primeiramente, na obtenção de trabalhos laboratoriais que realizaram ensaios de coluna, com os solos utilizados na camada de cobertura de aterros sanitários ao redor de todo o mundo, simulando o transporte dos gases e a relação destes na oxidação do gás metano.

Após a seleção de trabalhos sobre o tema realizou-se a extração dos dados referentes aos parâmetros geotécnicos do solo. Além dos valores numéricos dos gráficos que relacionam a profundidade da camada de cobertura com a concentração dos gases, através do software *Web Plot Digitizer* (ROHATGI, 2020). Após a extração dos dados de todos os artigos pesquisados, foi selecionado os parâmetros que foram utilizados na modelagem. Assim, escolheu-se um dos artigos, para realizar a modelagem e calibração posterior nos softwares *Mathematica* (LEMOS e CALVALCANTE, 2023) e *COMSOL*.

Com os dados extraídos dos trabalhos experimentais, verificou-se que parte dos parâmetros necessários para a modelagem numérica não foram citados nos trabalhos, sendo necessário a utilização de outra aplicação para obtenção desses valores.

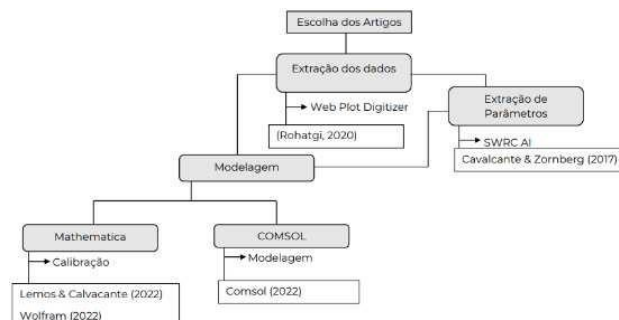


Figura 4. Organograma das etapas da metodologia.

Por exemplo, para obtenção de parâmetros a respeito da curva de retenção de água no solo utilizou-se o software *SWRC AI* (GEOFLUXO, 2022).

No SWRC AI foram incluídos os valores das proporções granulométricas do solo, utilizando o modelo constitutivo de Cavalcante e Zornberg (2017) para se obter o parâmetro do ajuste hidráulico da curva de retenção da água no solo.

Entre os parâmetros extraídos com essa aplicação, tem-se: teor de água volumétrica saturada ( $\theta_s$ ) e Teor de água volumétrica residual ( $\theta_r$ ) e ajuste hidráulico da curva de retenção de água no solo.

Além da escolha de um dos trabalhos para se realizar a modelagem e calibração do modelo, para poder se obter o transporte dos gases na camada de cobertura simulado com aquele tipo de solo.

Utilizou-se o trabalho de Rachor et al. (2011) e a previsão do transporte dos gases foi modelado utilizando-se o modelo analítico de Lemos e Cavalcante (2023).

Calibrando os dados experimentais a partir do modelo desenvolvido por Lemos e Cavalcante (2023), foi possível, se obter dados de saídas, que seriam comparadas com a modelagem numérica realizada pelo software COMSOL.

Com a utilização do COMSOL, realizou-se a modelagem numérica. Após realizada a previsão do transporte dos gases, foi realizada uma comparação com os resultados obtidos pelo método de Lemos e Cavalcante (2023).

Na Tabela 2 estão os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011), os dados que não se encontravam no trabalho, foram extraídos do trabalho de Lemos (2020) e do software SWRC AI (GEOFUXO, 2022) em que foram utilizados para a calibração no Mathematica.

Tabela 2. Parâmetros extraídos de Rachor et al. (2011).

| Parâmetro   | Valor                   |
|---|-------------------------|
| Porosidade (n)                                    | 0,3798                  |
| Densidade aparentemente seca do solo ( $\rho_d$ ) | 1670 kg m <sup>-3</sup> |
| Densidade das partículas do solo ( $\rho_s$ )     | 2692 kg m <sup>-3</sup> |
| Teor de água volumétrica saturada ( $\theta_s$ )  | 0,3798                  |
| Teor de água volumétrica residual ( $\theta_r$ )  | 0,03                    |
| Taxa máxima de oxidação do metano ( $V_{max}$ )   | 7,5x10 <sup>-5</sup>    |
| Constante de Henry para CH <sub>4</sub>           | 0,0316                  |
| Constante de Henry para O <sub>2</sub>            | 0,0318                  |
| Constante de Henry para CO <sub>2</sub>           | 0,8145                  |

|  |        |
|--|--------|
| Constante de Henry para N <sub>2</sub> | 0,0159 |
| Fração do metano ( $X_{CH_4}$ ) %      | 60     |
| Areia %                                | 86,8   |
| Silte %                                | 6,3    |
| Argila %                               | 7,1    |
| Tempo de ensaio                        | 36     |

Para modelagem no COMSOL, foram obtidos os parâmetros que necessitavam para a simulação do transporte dos gases com o trabalho realizado por Rachor et al. (2011). Na Tabela 3 é possível verificar os parâmetros utilizados.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no COMSOL.

| Parâmetro  | Valor                                      |
|--|--|
| Temperatura (n)  | 19 °C                                      |
| Massa Molar CH <sub>4</sub>  | 1670 kg m <sup>-3</sup>                    |
| Massa molar CO <sub>2</sub>  | 44,0095 g/mol                              |
| Massa molar O <sub>2</sub>   | 31,998 g/mol                               |
| Massa molar N <sub>2</sub>   | 28,0134 g/mol                              |
| Massa molar H <sub>2</sub> O   | 18,01528 g/mol                             |
| Permeabilidade Intrínseca ( $K_{in}$ )   | 1*10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup>         |
| Teor de Umidade volumétrico Inicial ( $\theta_i$ )                                 | 0,167                                      |
| Umidade volumétrica mínima que a oxidação é insignificante ( $\theta_{wiltting}$ ) | 0,04                                       |
| Umidade volumétrica máxima que não ocorra infiltração no solo ( $\theta_{rc}$ )    | 0,15                                       |
| Comprimento da Coluna (L)  | 0,80 m                                     |
| Raio da coluna   | 9,5 cm                                     |
| Constante de meia saturação ( $K_{m,CH_4}$ )                                       | 0,0066                                     |
| Constante de meia saturação ( $K_{m,O_2}$ )  | 0,012                                      |
| Viscosidade CH <sub>4</sub>  | 1,10x10 <sup>-5</sup> Pa.s                 |
| Viscosidade CO <sub>2</sub>  | 1,46x10 <sup>-5</sup> Pa.s                 |
| Viscosidade O <sub>2</sub>   | 2,03x10 <sup>-5</sup> Pa.s                 |
| Viscosidade N <sub>2</sub>   | 1,75x10 <sup>-5</sup> Pa.s                 |
| Constante universal dos gases  | 8,314 J mol <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> |
| Fluxo total de biogás  | 22,93 mol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>  |

Após a realização de todos os passos, foi possível obter os parâmetros referentes ao transporte dos gases do trabalho realizado por Rachor et al. (2011), em que valores como a difusão real do gás Metano, a taxa de oxidação do CH<sub>4</sub>, a taxa de consumo do oxigênio durante a oxidação do CH<sub>4</sub>, a geração de CO<sub>2</sub> nesse processo, como será

possível verificar na parte de resultados.

#### 4. RESULTADOS

Utilizado os softwares *Mathematica* e *COMSOL*, para calibração e tratamento dos dados, respectivamente, e o modelo desenvolvido por Lemos e Calvacante (2023), foi possível chegar em resultados satisfatórios.

Resultados como a previsão do transporte dos gases e o comportamento da oxidação do metano ao longo da profundidade da camada de cobertura, como pode ser observado na Figura 5. As linhas contínuas são a previsão do modelo e os pontos são advindos dos dados experimentais (t = 36 dias).

Foi comparado os resultados obtidos com a simulação do transporte dos gases realizada no *COMSOL*, com os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011), no qual temos um resultado satisfatório, visto que ambos apresentam comportamento semelhante, as diferenças se dão por conta dos arredondamentos e parâmetros utilizados na modelagem do *COMSOL*. Na Figura 6 está a comparação dos resultados obtidos, sendo as linhas contínuas e coloridas os dados obtidos com a simulação realizada no *COMSOL*, e os pontos os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011) para t = 36 dias.

Após ter sido realizado a modelagem no *COMSOL* comparou-se com os valores obtidos pelo modelo de Lemos e Cavalcante (2023). A obtenção de diversos parâmetros foi possível por conta da utilização de todo o método e softwares utilizados neste trabalho. Como resultados, foram obtidos a difusão dos gases, como pode ser observado na Tabela 4 pelo método de Lemos e Cavalcante (2023) e pelo *COMSOL* (Tabela 5).

Além dos valores de difusão de cada um dos gases analisados, também foi possível obter a taxa de oxidação do CH<sub>4</sub>, a taxa de formação do CO<sub>2</sub> com o processo de oxidação do CH<sub>4</sub> e a taxa de consumo do O<sub>2</sub>. Na Tabela 6, é possível verificar os valores constantes obtidos em duas faixas de profundidade da camada de cobertura. Na Tabela 7 constam os valores obtidos pelo *COMSOL*, os valores variam ao longo da profundidade, dessa maneira optou-se por mostrar o maior valor ao longo da coluna.

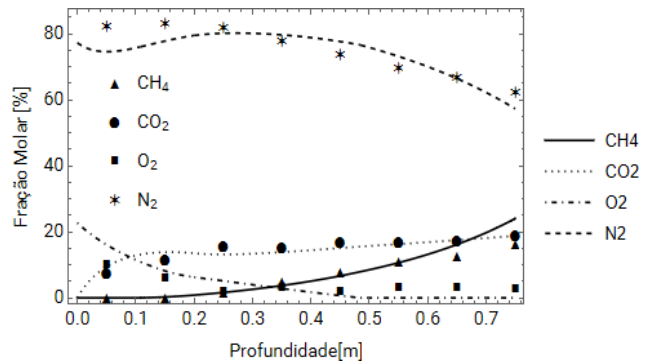


Figura 5. Calibração do modelo utilizando o MATHEMATICA.

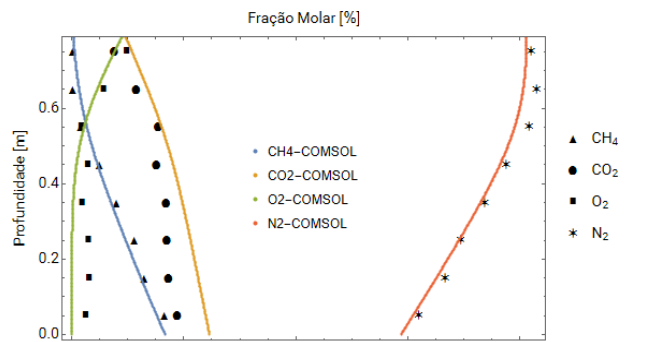


Figura 6. Calibração do modelo utilizando o COMSOL.

Tabela 4. Difusão dos gases pelo método de Lemos e Cavalcante (2023).

| D <sub>CH4</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | D <sub>CO2</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | D <sub>O2</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | D <sub>N2</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | v <sub>g</sub><br>[m s <sup>-1</sup> ] |
|--|--|---|---|--|
| 2,4x10 <sup>-5</sup>                     | 3,9x10 <sup>-7</sup>                     | 4,8x10 <sup>-6</sup>                    | 7,6x10 <sup>-6</sup>                    | 7,9x10 <sup>-6</sup>                   |

Tabela 5. Difusão dos gases pelo COMSOL.

| D <sub>CH4</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | D <sub>CO2</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | D <sub>O2</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | D <sub>N2</sub><br>[m s <sup>-2</sup> ] | v <sub>g</sub><br>[m s <sup>-1</sup> ] |
|--|--|---|---|--|
| 2,6x10 <sup>-6</sup>                     | 2,0x10 <sup>-6</sup>                     | 2,5x10 <sup>-6</sup>                    | 2,3x10 <sup>-6</sup>                    | 1,1x10 <sup>-6</sup>                   |

Tabela 6. Taxas de geração/consumo dos gases devido a oxidação do metano pelo método de Lemos e Cavalcante (2023).

| Prof.<br>[m] | Y <sub>CH4</sub><br>[mol/m <sup>3</sup> s] | Y <sub>CO2</sub><br>[mol/m <sup>3</sup> s] | Y <sub>O2</sub><br>[mol/m <sup>3</sup> s] |
|--------------|--|--|---|
| L < 0,2      | -0,000615                                  | 0,0001230                                  | -0,0011076                                |
| L ≥ 0,2      | -0,000043                                  | 0,0000217                                  | -0,0000652                                |

Tabela 7. Maiores taxas de geração/consumo dos gases devido a oxidação do metano obtido no COMSOL.

| Prof.<br>[m] | Y <sub>CH4</sub><br>[mol/m <sup>3</sup> s] | Y <sub>CO2</sub><br>[mol/m <sup>3</sup> s] | Y <sub>O2</sub><br>[mol/m <sup>3</sup> s] |
|--------------|--|--|---|
| L=0,2        | -0,000061                                  | 0,000031                                   | -0,00012                                  |



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da modelagem semi-analítica e numérica realizada nessa pesquisa, percebeu-se que os modelos simularam o transporte dos gases na camada de cobertura de aterro sanitário satisfatoriamente, e assim, foi possível a obtenção de parâmetros da oxidação do metano. As vantagens desses estudos devem-se a melhora, no entendimento do transporte de gases, o que pode futuramente melhorar a eficiência desse processo e diminuir a emissão que ocorre de forma difusa dos gases de efeito estufa pela camada de cobertura para a atmosfera. Ressalta-se ainda que esta pesquisa mostrou a importância de complementar trabalhos experimentais com a parte de modelagem, em que em conjunto, possibilitam uma melhor análise sobre o tema.

Com as modelagens que foram realizadas, foi possível, a partir de calibrações, alcançar uma oxidação do metano de forma otimizada. Além disso, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, haja vista que mostraram uma visão geral de como a simulação do transporte dos gases é importante para obtenção da taxa de consumo do  $O_2$ , taxa de oxidação do  $CH_4$  e a taxa de formação do  $CO_2$ , e assim, é possível obter uma melhor taxa de oxidação do metano possível, podendo potencializar esse processo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos, pelo suporte dado a esta pesquisa, à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Projetos 305484/2020-6 e 140923/2020-9), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF).

## REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 13.896: *Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8419: *Apresentação de projetos de*

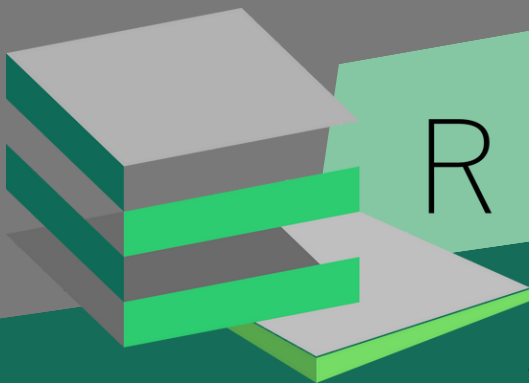
- aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro, 1992.
- Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). *Diário Oficial da União*. República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 de agosto de 2010.
- Catapreta, C. A. A. (2008). *Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- Cavalcante, A. L. B; Zornberg, J. G. (2017). Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems. I: Analytical Solutions. *International Journal of Geomechanics*, 1–17p., 2017.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1982). *Norma para apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. CETESB. São Paulo, 1982.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2022). *Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão*. CETESB. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 23 de agosto de 2022.
- Comsol (2022). *COMSOL Multiphysics*. 2022. Disponível em: <https://www.comsol.com/>. Acesso em: 12 de agosto de 2022.
- Costa, M. D. (2015). *Estudos De Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas De Solos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 144p. 2015.
- De Visscher, A., Thomas, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O. (1999). Methane oxidation in simulated landfill cover soil environments. *Environ. Sci. Technol.* 33 (11), 1854–1859, 6p, 1999.
- Geofluxo (2022). SWRC AI. Disponível em: <https://www.geofluxo.com/geoapps/swrc-ai/>. Acesso em 18 de agosto de 2022.
- Hilger, H., Humer, M. (2003). Biotic landfill cover treatments for mitigating methane emissions. *Environ. Monit. Assess.* 84p, 2003.
- Huang D, Yang L, XU W, Chen Q, KO JH, XU Q. (2020). Enhancement of the methane removal efficiency via aeration for biochar-amended landfill soil cover. *Environ Pollut* 263, 9p., 2020.
- Maciel, F. J.; Jucá, J. F. T. (2011). Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, v. 31, n. 5, 12p., 2011.
- Maciel, F. J.; Jucá, J. F. T. (2003). *Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE*. 2003. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-

- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- Lemos, M.A.C. (2020). *Modelagem Analítica do Transporte Transiente de Gases em Meio Poroso Não Saturado*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 341/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.
- Lemos, M. A.C; Cavalcante, A. L. B. (2023). Semi-Analytical Modeling of Gas Transport and Methane Oxidation in a Landfill Cover Layer. *Sustainability* (No prelo).
- Rachor, I., Gebert, J., Grongroft, A., Pfeiffer, E.M. (2011). Assessment of the methane oxidation capacity of compacted soils intended for use as landfill cover materials. *Waste Manage.* 31, 833–842, 10p., 2011.
- Rohatgi, A. (2020). WebPlotDigitizer User Manual. 2020. Disponível em: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/userManual.pdf>. Acesso em: 10 de agosto de 2022.
- Thomasen, T. B., Scheutz, C., Kjeldsen, P. (2019). Treatment of landfill gas with low methane content by biocover systems. *Waste Management*, 84, 29-37, 2019.
- Scheutz, C., Bogner, J., De Visscher, A., Gebert, J., Hilger, H., Huber-Humer, M., Kjeldsen, P., Spokas, K. (2009). Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Manag. Res.* 27 (5), 409–455, 2009.
- Wolfram (2022). *Wolfram Mathematica*. 2022. Disponível em: <https://www.wolfram.com/mathematica/>. Acesso em: 10 de agosto de 2022.



**Seção 2**

**Recursos Hídricos**



REP A E

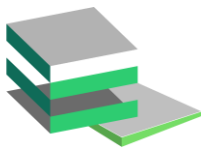
Revista Científica de Pesquisa  
Aplicação à Engenharia  
Volume 6 | ISSN: 2595-0002



UnB



**PET**  
Engenharia civil



# ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS PARA O MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS NO CAMPUS DARCY RIBEIRO DA UNB

**Davi Martins de Aragão\***

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

**Sergio Koide**

Universidade de Brasília/Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos/Brasília/Brasil

## RESUMO

A Universidade de Brasília, assim como a cidade em que está localizada, sofre com alagamentos recorrentes no período chuvoso devido à crescente impermeabilização do solo decorrente da ocupação urbana e do sistema de drenagem concebido e construído à época da criação da cidade. Esta pesquisa tem como objetivo o estudo de medidas mitigatórias desse tipo de problema e propõe a implantação de reservatórios de infiltração no canteiro localizado ao lado do estacionamento do Instituto Central de Ciências Norte, com vistas ao amortecimento das ondas de cheia com utilização dessa área livre, com limites que respeitem a passagem de pedestres e bicicletas. A proposta foi simulada no programa de simulação hidrológica e hidráulica PCSWMM 2D e foi analisada a quantidade de escoamento infiltrado e o impacto da medida no manejo das águas pluviais da área de intervenção. Como resultados, obteve-se reduções significativas da vazão máxima de escoamento superficial e da vazão total escoada nas áreas adjacentes. Entretanto mais a jusante não houve diferenças nesses itens analisados, devido ao fato de que a maior parte das águas pluviais que chegam à universidade terem origem na bacia a montante, acima da via L3 Norte.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alagamentos, PCSWMM 2D, reservatórios de infiltração, LID.

## ABSTRACT

*The University of Brasília, as well as the city in which it is located, suffers from recurrent flooding in the rainy season due to the increasing waterproofing of the soil resulted from urban occupation and the drainage system designed and built at the time of the creation of the city. This research aims to study mitigating measures for this type of problem and proposes the implementation of infiltration reservoirs in the construction site located next to the parking lot of the Instituto Central de Ciências Norte, intending to dampen flood waves using this free area, with limits that respect the passage of pedestrians and bicycles. The proposal was simulated in the hydrological and hydraulic simulation program PCSWMM 2D to analyze the amount of infiltrated runoff and the impact of the measure on the management of rainwater in the intervention area. As a result, significant reductions were obtained in the maximum flow of surface runoff and the total flow in adjacent areas. However, further downstream, there were no differences in these analyzed items, considering most of the rainwater that reaches the university originates in the upstream basin, above the L3 North route.*

**KEYWORDS:** Floods, PCSWMM 2D, infiltration reservoirs, LID.

## 1. INTRODUÇÃO

Constantes alagamentos fazem parte da realidade da cidade de Brasília durante o período chuvoso, assim como o foco de estudo desta pesquisa, a UnB. Esse

tipo de problema ocorre devido a vários fatores ligados ao crescimento populacional e à urbanização higienista até hoje vigente. O aumento da impermeabilização do solo diminui áreas vegetativas propícias à infiltração, o que aumenta o escoamento

\*Autor correspondente: [dvmartins05@gmail.com](mailto:dvmartins05@gmail.com)



superficial. Há preferência por sistemas higienistas de drenagem urbana, com rápida evacuação de águas pluviais, desenvolvidos sem maiores preocupações ambientais. Outrossim, fatores climáticos provindos da escalada da temperatura global e ilhas de calor causadas pela escolha arquitetônica de prédios espelhados e poucas áreas verdes nas cidades podem provocar eventos climáticos mais intensos ao longo dos anos (Souza, 2020).

Para trazer soluções de forma próxima ao cenário natural pré-urbanizado, propõe-se o uso de LIDs (Low Impact Development) (Tavanti e Barbassa, 2012), que são sistemas de drenagem sustentáveis, abrangendo trincheiras, valas de infiltração, telhados verdes e outros dispositivos, ideias para contrapor os sistemas de drenagem convencionais pela versatilidade com outros elementos do saneamento básico e pelo menor impacto ambiental gerado.

Dessa forma, este trabalho analisa o efeito da proposta de implementação de dois reservatórios de infiltração com paredes e fundo gramados, instalados no canteiro ao norte do estacionamento do ICC Norte, quantificando o quanto será infiltrado de águas pluviais por eles, e se haverá diminuição no escoamento superficial por meio desse mecanismo.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo

A UnB está situada em um terreno que apresenta declive em toda a Asa Norte, desde proximidades ao Autódromo de Brasília em direção ao lago Paranoá, criando caminhos para o escoamento superficial através do campus (Damasceno, 2021).

O estudo tem como área de estudo a ala norte da universidade, entre a Faculdade de Tecnologia (FT) e o Instituto Central de Ciências (ICC) Norte, composta por áreas gramadas, construídas com edifícios e pavimentações, e com cerca de 0,23 quilômetros quadrados divididos em 93 sub-bacias. Apesar de contar com áreas vegetadas significativas, estas não foram idealizadas para receber e infiltrar águas pluviais. O trecho também é composto principalmente de áreas impermeabilizadas, o que dificulta a percolação da água no solo e favorece o escoamento superficial rápido. O ICC é um prédio de grande comprimento (cerca de 700 m) construído com sua maior dimensão paralela às curvas de nível, constituindo-se num obstáculo à passagem das águas pluviais.



Figura 1. Sub-bacias da ala norte do Campus Darcy Ribeiro, Asa norte - UnB.

Fonte: PCSWMM Professional 2D.

### 2.2 Aplicação dos reservatórios de infiltração

Utilizando o programa de simulação PCSWMM 2D, foram analisados os efeitos da implementação de dois reservatórios de infiltração com dimensões de 500 m<sup>2</sup> e 580 m<sup>2</sup>, no gramado situado entre o estacionamento e a via lateral, com área de aproximadamente 4700 m<sup>2</sup>, delimitada pelas entradas norte do estacionamento. Essa área gramada tem calçadas, ciclovias e poucas árvores de pequeno porte, podendo ser um dos locais para a implantação de LIDs. O dimensionamento dos reservatórios levou em consideração a presença da calçada para largura máxima, com dimensões de 38,7 x 13,1 metros e 40,6 x 14,3 metros e ambos com profundidade de 0,5 metro, 1% de inclinação e conectados à macrodrenagem. A viabilidade do projeto foi verificada conforme Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal (ADASA, 2018), e teve seu impacto medido posteriormente pelo *software* citado.

Esse tipo de técnica compensatória tem como objetivo reter parte do escoamento superficial por infiltração e reduzir o volume da vazão que escoaria para pontos a jusante do local. Ademais, atua na diminuição da poluição difusa que pode chegar aos corpos d'água devido à sedimentação das partículas e à infiltração na zona subterrânea (Souza *et al.*, 2019).



Figura 2. Localização do canteiro para implementação de dois reservatórios de infiltração.

Fonte: Google Earth Pro.

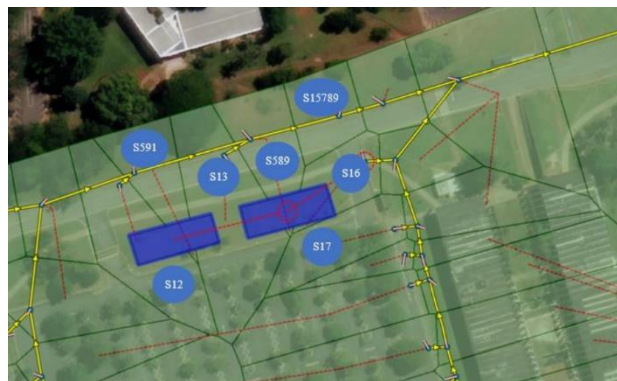


Figura 3. Modelagem dos reservatórios de infiltração com o programa PCSWMM 2D.

Fonte: PCSWMM Professional 2D.

### 2.3 Modelagem no SWMM

Pela simulação, foram comparados dois cenários sob uma chuva de 2 anos de recorrência e uma hora de duração, um com a situação atual, sem intervenções, e outro com a presença das valas. Chuvas com tempo de retorno de 2 anos são chuvas de pouca intensidade e maior frequência, para analisar a atuação dos reservatórios em situações consideradas usuais. O cálculo da chuva de projeto foi realizado utilizando a curva de Intensidade – Duração – Frequência (IDF) recomendada para o Distrito Federal pelo PDDU-DF (GDF, 2009), conforme equação 1.

$$I = \frac{1574,70 T^{0,207}}{(t+11)^{0,884}} \quad (1)$$

Onde I é a intensidade da chuva (mm/h), T é o tempo de retorno em anos e t é o tempo de duração da chuva (min).

Para representar o escoamento vindo a montante da área de estudo, realizou-se a distribuição da vazão adicional em 10 nós da malha 2D por modelo calibrado por Costa (2013). A base do modelo foi disponibilizada e realizada por estudos anteriores de Damasceno (2021) e Souza (2020). Com isso pode-se obter previamente a divisão das sub-bacias, caracterização e identificação do solo e respectivos valores de número de escoamento CN, além das informações e locais da rede de macrodrenagem.

Para análise posterior, foi considerado os resultados das sub-bacias ao redor do sistema de drenagem proposto, de nomes S12, S13, S15789, S16, S17, S589 e S591. O processo de modelagem e tomada de resultados no programa foi realizado conforme Rossman (2015).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram realizadas com chuvas de projeto de tempo de recorrência de 2 anos para medir a segurança do sistema diante de poucos eventos críticos. Foram escolhidas sete sub-bacias para análise da vazão máxima de escoamento e do escoamento superficial total, tendo em vista a proximidade e estarem a jusante das técnicas de controle, para a plena passagem da vazão sobre elas e poder gerar assim a infiltração esperada.

A tabela 1 apresenta valores quantitativos de vazão máxima de escoamento superficial e o escoamento superficial total sobre cada sub-bacia. O cenário Base indica a simulação sem a medida de controle e o cenário Reservatórios, com a medida. Já a tabela 2 apresenta a redução em porcentagem dessas variáveis em virtude da proposta.

Tabela 1. Valores da vazão de pico e do escoamento superficial total das sub-bacias próximas à intervenção proposta no cenário de base e no cenário com valas nas simulações com TRs = 2 anos.

| Nome das sub-bacias | Vazão máxima de escoamento superficial |                        | Escoamento superficial total |                      |
|---------------------|--|------------------------|------------------------------|----------------------|
|                     | Base (m³/s)                            | Reservat ó-rios (m³/s) | Base (m³)                    | Reservat ó-rios (m³) |
| S12                 | 0,05346                                | 0,0478                 | 76,61                        | 68,5                 |
| S13                 | 0,1106                                 | 0,09866                | 155,3                        | 138,5                |
| S15789              | 0,04615                                | 0,04615                | 66,21                        | 66,21                |
| S16                 | 0,02367                                | 0,01906                | 33,92                        | 28,20                |
| S17                 | 0,0519                                 | 0,0519                 | 73,04                        | 73,04                |
| S589                | 0,03565                                | 0,0324                 | 50,68                        | 46,33                |
| S591                | 0,0457                                 | 0,04226                | 58,47                        | 54,77                |

Fonte: PCSWMM Professional 2D.

Tabela 2. Reduções em porcentagem da vazão de pico e do escoamento superficial total das sub-bacias próximas à intervenção proposta no cenário de base e no cenário com valas nas simulações com TRs = 2 anos.

| Nome das sub-bacias | Vazão máxima de escoamento superficial | Escoamento superficial total |
|---------------------|--|------------------------------|
|                     | Redução (%)                            | Redução (%)                  |
| S12                 | 10,59                                  | 10,59                        |
| S13                 | 10,80                                  | 10,82                        |
| S15789              | 0                                      | 0                            |
| S16                 | 19,48                                  | 16,86                        |
| S17                 | 0                                      | 0                            |
| S589                | 9,12                                   | 8,58                         |
| S591                | 7,52                                   | 6,76                         |

Fonte: PCSWMM Professional 2D.

Para as sub-bacias S12 e S13 foram obtidas reduções de 10% da vazão máxima e escoamento total, enquanto para a sub-bacia S16 obteve-se o melhor resultado, com redução de 19% para a vazão máxima e 17% para o escoamento total. Em seguida tem-se as sub-bacias S589 e S591 com reduções abaixo de 10%, e as sub-bacias S15789 e S17 com nenhuma mudança ou efeito expressado. Apesar disso, são resultados relevantes para se considerar uma futura implementação da proposição, principalmente considerando os serviços ecossistêmicos prestados pelos reservatórios infiltrando parte significativa da água que vai direto para o lago.

As sub-bacias para as quais não se obtiveram resultados podem ter como motivo sua posição relativa ao reservatório, pois o volume de ambas não descarrega nas valas a montante pela conformação da topografia local. Outrossim, a falta de resultados pode estar relacionada à faixa de influência da medida, que é considerada limitada devido a seu comprimento.

Os reservatórios por sua vez infiltraram, no período de 24 horas, 129,7 mm e 57,65 mm, gerando um total de 187,35 mm infiltrados. Ao considerar a área total de 1080 m<sup>2</sup> destinadas para os reservatórios de infiltração, tem-se como resultado um valor expressivo de 202 m<sup>3</sup> de águas pluviais infiltradas em um dia.

Tabela 3. Valores da infiltração máxima e da infiltração total em 24 horas dos reservatórios na simulação com TRs = 2 anos.

| Reservatórios  | Infiltração máxima (mm/h) | Infiltração total (mm) |
|----------------|---------------------------|------------------------|
| Reservatório 1 | 129,5                     | 129,7                  |
| Reservatório 2 | 57,58                     | 57,65                  |

Fonte: PCSWMM Professional 2D.

#### 4. CONCLUSÕES

A proposição apresentada nesta pesquisa procura atenuar o aumento progressivo do escoamento superficial decorrente do crescimento urbano, mudanças climáticas e impermeabilização do solo. Pelos resultados é possível avaliar o impacto positivo que esse tipo de medida pode trazer ao meio ambiente, com reduções consideráveis no escoamento total e na vazão máxima de escoamento para as sub-bacias a jusante dos reservatórios, como também no volume de água infiltrado, indicando que soluções de baixo impacto devem ser integradas aos sistemas de drenagem.

Outra forma de evitar possíveis alagamentos é melhorar as condições do sistema de drenagem a montante da universidade, para que uma menor vazão de escoamento vinda de outras áreas da Asa Norte chegue até o local, impedindo o pleno funcionamento da drenagem da área de estudo pela alta demanda.

Conclui-se que a melhoria proporcionada pelos reservatórios de infiltração pode ser considerada apenas local, com sub-bacias menos próximas recebendo a mesma quantidade de escoamento, o que indica que se deve redimensionar a microdrenagem da área. Também deve-se adotar mais tipos de LIDs nessa integração pelos benefícios ambientais, econômicos e funcionais.

#### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelas bolsas de pesquisa concedidas; à Maria Elisa Leite Costa pelo apoio e orientação; à CHI Water pela licença acadêmica do programa PCSWMM 2D; ao Felipe Damasceno pelos dados de simulação; à Giovana Vilas Bôas Laterza e à Gabriela Elise Silva Cavalcante pela colaboração.

#### REFERÊNCIAS

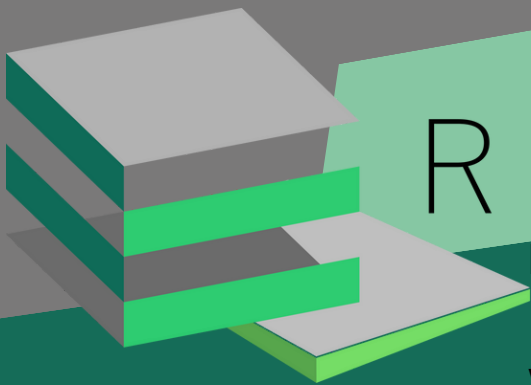
- ADASA – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (2018). *Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal*. Brasília: ADASA.
- Costa, M. E. L. (2013). *Monitoramento e modelagem das águas da drenagem urbana na bacia do lago Paranoá*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 179p.
- Damasceno, F.L. (2021). *Avaliação do sistema de manejo de águas pluviais na Universidade de Brasília por simulações 1D-2D*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 72p.
- GDF – Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Obras. (2009). *Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal*. Concremat Engenharia, Brasília, DF.
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Cincinnati (EUA): USEPA (United States Environment Protection Agency).
- Souza, A.P.B.C. (2020). *Monografia de Projeto Final*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89p.
- Souza, F. P.; Costa, M.E.L.; Koide, S. (2019). *Hydrological Modelling and Evaluation of Detention Ponds to Improve Urban Drainage System and Water Quality*. Water, 17p.
- Tavanti, D.R.; Barbassa, A.P. (2012). *Análise dos Desenvolvimentos Urbanos de Baixo Impacto e Convencional*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 17-28p.





**Seção 3**

**Representação Gráfica**



REP A E

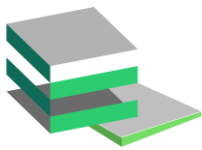
Revista Científica de Pesquisa  
Aplicação à Engenharia  
Volume 6 | ISSN: 2595-0002



UnB



**PET**  
Engenharia civil



# A INTEROPERABILIDADE NO PROCESSO BIM: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE CAPTURA E CONVERSÃO DE DADOS CONSTRUTIVOS PARA MANUTENÇÃO DE EDIFICAÇÕES EXISTENTES

**Marcela Pereira\***

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

**Leonardo Inojosa**

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

## RESUMO

O BIM-Building Information Modeling é um processo de troca de informações que se destaca por otimizar o planejamento de intervenções e o aprimoramento da tomada de decisão na gestão e manutenção da edificação; destaca-se também por possibilitar a colaboração simultânea dos profissionais envolvidos no projeto. O uso desta metodologia na manutenção de edificações existentes, tanto para reforma e restauração, como para a modernização sustentável, possibilita a documentação dos aspectos construtivos da edificação, a produção de inventários que levem em conta requisitos de manutenção e uma gestão dinâmica frente às modificações realizadas ao longo do ciclo de vida da edificação. Tendo em vista as vantagens acima citadas a respeito do uso do BIM para manutenção, esta pesquisa tem como foco principal a avaliação de métodos de captura e conversão de dados, a partir de uma revisão bibliográfica, para a gestão e manutenção de edifícios existentes, visando a maior interoperabilidade do processo. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito da tecnologia BIM e as possíveis formas de captura e coleta de dados de edifícios existentes, e então, a partir da leitura e análise das referências, foram identificadas as vantagens e desvantagens dos principais métodos de captura encontrados, levando em conta fatores como custo, aplicabilidade, tempo e nível de precisão, além de avaliar os entraves existentes quanto à interoperabilidade do processo. Dentre os métodos de captura de informações mais utilizados estão o laser scanner, a fotogrametria e a digitalização 2D. Foi possível perceber que o uso do BIM para gestão e manutenção de edifícios, por ser pouco disseminado, ainda apresenta muitos entraves. Os métodos de captura de informações construtivas de edificações existentes ainda se encontram em desenvolvimento, apresentando diferentes limitações, especialmente na captura de fachadas complexas.

**PALAVRAS-CHAVE:** BIM. Interoperabilidade. Documentação. Manutenção. As-built.

## ABSTRACT

*BIM-Building Information Modeling is an information exchange process that stands out for optimizing intervention planning and improving decision-making in building management and maintenance; it also stands out for enabling the simultaneous collaboration of the professionals involved in the project. The use of this methodology in the maintenance of existing buildings, both for refurbishment and restoration, as well as for sustainable modernization, enables the documentation of the constructive aspects of the building, the production of inventories that consider maintenance requirements and a dynamic management of the changes made throughout the life cycle of the building. In view of the advantages mentioned above regarding the use of BIM for maintenance, this research has as its focus the evaluation of data capture and conversion methods, based on a bibliographical review, for the management and maintenance of existing buildings, aiming at greater process interoperability. For this, a bibliographical review was carried out regarding BIM technology and the possible ways of capturing and collecting data from existing buildings, and then from the reading and analysis of the references,*

\*Autor correspondente: [marfnpenc@gmail.com](mailto:marfnpenc@gmail.com)



*the advantages and disadvantages of the main capture methods found were identified, considering factors such as cost, applicability, time and level of precision, in addition to assessing the existing barriers regarding the interoperability of the process. Among the most used methods of capturing information are the laser scanner, photogrammetry and 2D scanning. It was possible to perceive that the use of BIM for management and maintenance of buildings because it is not widespread, still presents many obstacles. Methods for capturing constructive information from existing buildings are still under development, presenting different limitations, especially in capturing complex facades.*

**KEYWORDS:** BIM. Interoperability. Documentation. Maintenance.As-built.

## 1. INTRODUÇÃO

O BIM-Building Information Modeling é, segundo Eastman et al. (2014, p. 13), “uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção”. A metodologia BIM tem como vantagem fundamental o processo de informatização e integração das frentes de projeto, englobando todas as etapas do projeto. Para que isso seja possível, o processo de intercâmbio de dados entre os colaboradores e softwares deve ser eficaz, evitando perda de informações, reduzindo problemas de compatibilização e o retrabalho. Dessa forma, um dos pilares desta metodologia é a interoperabilidade que, novamente de acordo com Eastman et al. (2014), consiste na característica de permitir a transferência de informação entre múltiplos softwares, possibilitando assim a colaboração simultânea de todos os profissionais envolvidos no projeto. De acordo com o Sindicato Nacional das Empresas de Arquitetura e Engenharia Consultiva, “a questão da interoperabilidade será um dos desafios mais importantes dessa nova era da cadeia produtiva da construção, a Era BIM, sobretudo porque ela pressupõe um trabalho colaborativo, que envolve muitas etapas, pessoas e ferramentas” (SINAENCO, 2020).

No que tange à etapa de operação e manutenção, no caso de edifícios existentes, o BIM apresenta um grande potencial por possibilitar não só a documentação dos aspectos construtivos e geométricos da edificação, mas também a oportunidade de “produzir um inventário abrangente que considere os requisitos de manutenção peculiares destas edificações, incluindo documentação sobre o ciclo de vida do edifício até o presente estado” (DEZEN-KEMPTER et al., 2015, p. 114). Além de ajudar a promover uma gestão dinâmica frente a reformas e modificações realizadas ao longo do ciclo de vida da edificação.

Quando tratamos a respeito da gestão e manutenção de edifícios existentes, o processo de obtenção de dados é um importante passo na criação de modelos, para que seja possível obter um modelo fiel ao as-built e com o máximo de detalhes possível de modo a obter uma análise e monitoramento mais completos. Porém, na maioria das vezes, estamos lidando com edifícios construídos antes mesmo da era CAD, com pranchas impressas ou feitas à mão. Nesses casos, destaca-se a dificuldade da obtenção dos dados, visto que com frequência a informação existente não é conhecida ou não é acessível, e, por vezes, apesar de acessível não apresenta a qualidade esperada, gerando um retrabalho desnecessário e perda de tempo. Além dos entraves citados, a informação contida nas pranchas também pode se mostrar incompatível com o estado real do edifício, por exemplo, devido às reformas e às manutenções não registradas, sendo necessária a utilização de ferramentas alternativas para se obter as informações construtivas da edificação por completo. Também é essencial que essas informações estejam disponíveis em formato digital para que seja utilizado em softwares BIM, o que, como citado anteriormente, em regra não é a realidade.

No caso da possibilidade de acesso a plantas baixas de boa qualidade, temos a solução da digitalização das mesmas, para posteriormente convertê-las em modelos 2D, 3D e, por fim, em um modelo compatível com softwares BIM. Porém não existindo projetos originais, a alternativa é realizar um levantamento. Nesse processo é realizada uma engenharia reversa, em que, a partir de um objeto já existente, são obtidas informações para se reconstruir e interpretar a ideia original do projeto, de acordo com Dezen-Kempter et al. (2015). Porém, esse é um processo extremamente trabalhoso. Nesse sentido, os sistemas de aquisição tridimensionais automatizados, como as tecnologias

de laser scanning e fotogrametria têm auxiliado na realização de levantamento de edificações por possibilitarem a aquisição de informações sem o contato com a edificação e sem a necessidade de medições manuais, por se basearem na digitalização através de sensores que utilizam ondas de luz para realizar a medição de distâncias, direta ou indiretamente.

Vencidas as etapas de obtenção dos dados construtivos e digitalização dos mesmos, é necessária a realização de processos de conversão dos arquivos obtidos para formatos compatíveis com softwares BIM. Além disso, como destacam Kehl e Isatto (2011) é de grande importância que esses formatos sejam compatíveis e interligados entre si, de forma a garantir a interoperabilidade. Nesse contexto, o formato IFC (Industry Foundation Classes), que consiste em um modelo padronizado, internacional e aberto (ISO 16739-1:2018), pois “ainda é tido como a melhor alternativa para permitir a interoperabilidade entre aplicações utilizadas na BIM” (Ayres e Scheer, 2009, pg. 135).

Nesse sentido, o presente trabalho pretende realizar o estudo e a avaliação de métodos de captura e conversão de dados construtivos de edificações existentes, projetadas na era pré BIM, identificando os entraves e dificuldades, por meio de uma revisão sistemática da bibliografia, comparando os diferentes métodos de captura já testados, visando a maior interoperabilidade do processo de criação de modelos BIM para a gestão e manutenção de edifícios existentes.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é indicar os processos de captura e conversão de dados que promovem um melhor aproveitamento das informações de edificações existentes, evitando erros e perdas durante o processo, visando a interoperabilidade. Com isso, busca-se apontar procedimentos mais viáveis, que tornem o processo de obtenção de dados mais prático para o acompanhamento e a manutenção de edifícios existentes em softwares BIM.

## 3. METODOLOGIA

Esta pesquisa consiste em uma pesquisa bibliográfica, com foco em uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório a respeito dos métodos de captura de dados construtivos e conversão de dados. Para tal, a pesquisa foi dividida

em 3 etapas: revisão sistemática, análise das referências e estudo comparativo. Primeiramente, foi realizada uma revisão sistemática a respeito das possíveis formas de levantamento e coleta de dados de edifícios existentes e métodos de conversão desses dados para arquivos compatíveis com BIM.

De modo a direcionar a busca por artigos, foram utilizadas palavras-chaves (em português e em inglês) como BIM, interoperabilidade, documentação, manutenção e métodos de captura, assim foram selecionados as referências relacionadas ao assunto, baseando-se em títulos e palavras-chaves. Além disso, foi levado em conta o período da publicação, já que, por se tratar de uma pesquisa a respeito de tecnologias relativamente novas e que ainda se encontram em processo de evolução, pesquisas mais antigas poderiam afetar os resultados devido à desatualização ou até mesmo inexistência de softwares e equipamentos. Dito isso, a busca foi limitada à pesquisas realizadas na última década, com poucas exceções dentre as bibliografias adicionadas em um segundo momento para complementar informações. Foram feitas pesquisas por meio das plataformas como Google Scholar, SciELO e Elsevier, além de repositórios de universidades nacionais e internacionais, periódicos, revistas e publicações em eventos.

Após essa etapa, foi realizada uma filtragem por meio da leitura dos resumos e abstracts, selecionando as referências entre artigos, manuais, pesquisas e estudos de caso, cujo os assuntos abrangiam mais especificamente os temas tratados na pesquisa. Também, nesta primeira etapa, foi possível definir os métodos de captura mais utilizados, baseado na alta recorrência dos mesmos dentre as bibliografias encontradas.

Já na terceira etapa, foi realizada a leitura completa das referências selecionadas e uma espécie fichamento das mesmas para extração das informações mais importantes. Durante a leitura dos artigos, foram absorvidas à pesquisa mais algumas bibliografias complementares, como comentado anteriormente, que estavam entre as citações.

A partir da análise das informações fichadas, foram identificadas as principais vantagens e desvantagens dos principais métodos de captura encontrados, através do cruzamento dos resultados de levantamentos realizados utilizando os diferentes métodos. Para tanto, foram levados em conta fatores como custo, aplicabilidade, tempo gasto e nível de precisão. Além disso, foram avaliados os entraves existentes quanto à interoperabilidade na utilização de softwares para a manutenção de edifícios, bem

como as soluções propostas pelos autores para os problemas identificados. Por fim, as informações analisadas possibilitaram a realização de um estudo comparativo entre métodos e bibliografias.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Digitalização de plantas 2D

Nos casos em que é possível se obter plantas 2D e documentos originais da edificação, existe a possibilidade de utilizar o método de digitalização destes documentos, porém entre a imagem digitalizada e o modelo BIM, existe um longo caminho. Nesse sentido, é possível encontrar algumas bibliografias que tratam a respeito da conversão de imagens para modelos BIM de forma prática, sem a necessidade do desenvolvimento de um modelo do zero. Matias e Palha (2021), por exemplo, se propõem a desenvolver em seu artigo uma metodologia de conversão de imagens rasters 2D, com o intuito de obter um arquivo IFC que seja compatível com softwares BIM, utilizando métodos computacionais em linguagem Python. A partir de um plug-in de edição de imagens e outro, de manipulação de arquivos IFC, disponíveis em bibliotecas Python, foi possível criar um programa de limpeza e edição de imagem para tornar as linhas do documento 2D mais nítidas e identificáveis, como em um modelo CAD, e utilizando o segundo plug-in, foi possível identificar e discriminar os elementos dentro de um arquivo IFC. O plano futuro é associar esses dois programas para obter uma automatização do processo, de modo a auxiliar na automatização da geração de modelos a partir de edificações existentes. Um método semelhante também é demonstrado por Doukari e Greenwood (2020), porém com foco na geração automática de modelos para estudos de massa a partir de digitalização de imagens do Google Earth. Primeiramente, é realizada uma leitura e conversão da imagem para tons de cinza, então são aplicados filtros para aumentar a qualidade da imagem, e por fim são utilizadas ferramentas como Canny Filter e Canny Edge Detection que aprimoram e identificam os contornos da imagem, para então ser possível identificar e extrair objetos.

Silva e Couto (2020) em seu trabalho analisam outro método de conversão de modelos 2D para 3D BIM desenvolvido por Zhu et al. (2014), o qual demonstrou limitações em relação captura de fachadas curvas. Porém, esse método se mostrou uma alternativa válida ao considerarmos custo e

aplicabilidade, por não exigir investimentos altos em equipamentos.

### 4.2 Laser scanning

Laser scanning, ou varredura a laser, consiste numa tecnologia de digitalização remota 3D de alta precisão. Por meio dessa tecnologia é possível realizar levantamentos espaciais de edifícios e objetos, sem necessidade de contato com ele. Dentre as vantagens oferecidas por esse tipo de coleta, podemos citar a rapidez, o fato de se obter o arquivo e as medições automaticamente, a possibilidade de coletar dados em locais de difícil acesso, entre outros. Bortoluzzi et al. (2019) citam uma redução de 90% no tempo gasto com modelagem em relação ao processo tradicional.

O produto gerado pelo levantamento em laser scanning consiste em um arquivo de nuvem de pontos, apesar da vantagem de já serem arquivos 3D, esses arquivos necessitam ser convertidos para arquivos compatíveis com o BIM. Autores como Janssen, Chen e Mohanty (2016) e Janssen et al. (2016) se propuseram a desenvolver métodos automatizados de materialização e conversão de modelos 3D em modelos BIM. Apesar da vantagem da rapidez no processo automatizado de modelagem, de acordo com Bortoluzzi et al. (2019) há uma redução de 90% no tempo gasto com modelagem em relação ao processo tradicional, ainda existem algumas limitações neste processo. Silva e Couto (2020) citam desafios como inserção de aberturas e modelagem de fachadas complexas ou curvas, problemas estes que tiveram que ser resolvidos manualmente. Todavia o investimento exigido em equipamentos ainda é muito alto, um modelo de laser scanner terrestre 3D pode chegar a custar de R\$ 100.000,00 a R\$ 500.000,00\*, por vezes até mais, fato que pode torná-la inviável.

### 4.3 Fotogrametria

De acordo com Granshaw (2020), a fotogrametria consiste em uma derivação de medidas confiáveis a partir de fotografias. A partir das fotografias é possível obter informações como medidas entre objetos, modelos digitais, coordenadas, estado de conservação do objeto, possíveis patologias, entre outros. Além disso, ao utilizar algoritmos de processamento de imagens digitais, a partir de um conjunto de imagens, é possível gerar nuvens de pontos e modelos digitais 3D.

A fotogrametria assim como o laser scanner pode

ser realizada à curta, com o uso de câmeras, ou longa distância, com o uso de drones ou aeronaves não tripuláveis. Atualmente, câmeras de pequeno porte, mesmo as não-métricas, ou até mesmo câmeras de celular de alta resolução conseguem apresentar resultados satisfatórios, por exemplo, Dezen-Kempter et al. utilizam um smartphone em seu estudo. Apesar da praticidade e do fácil acesso a esses instrumentos de pequeno porte, é necessário que se adote certos procedimentos extras de modo a garantir um bom resultado, como o uso de tripés e estabilizadores. Já o uso de drones, de acordo com Silva et al. (2022), apresenta vantagens por gerarem informações primárias, poucas fotografias grandes, e secundárias, muitas fotografias pequenas.

## 5. RESULTADOS

Partindo dos fatos acima abordados, é possível notar que as tecnologias de levantamento, medição e captura de dados construtivos auxiliam em tornar o processo mais rápido e ágil, porém o processo continua apresentando falhas pontuais. Dentre as principais dificuldades ditadas pelos autores estudados estão o alto custo, especialmente em relação à fotogrametria e o laser scanner, a falta de compatibilidade entre softwares, e a modelagem de famílias específicas e de fachadas complexas, que especialmente no caso de edifícios históricos precisam ser criadas do zero.

Quanto à interoperabilidade, a falta de compatibilidade entre softwares é o que mais afeta o processo, por exemplo no estudo de Dezen-Kempter et al. (2015, p. 123) optou-se por utilizar os softwares Autodesk para processamento da nuvem de pontos e para modelagem BIM “por acreditar-se que a transferência de dados seria mais fácil e rápida entre produtos da mesma empresa, o que acabou não acontecendo”. Dezen-Kempter et al. (2015) ressaltam também a dificuldade na modelagem de famílias já que os programas não permitem exportação nem importação de arquivos de nuvem de pontos para arquivos de família. Tal fato gera um trabalho extra no processo de modelagem, exigindo a criação manual de famílias específicas ou utilização de meios intermediários, como o ambiente CAD, para conversão destes elementos, o que acaba por descaracterizar o processo BIM. Frente a este problema, Kehl et al. (2011) propõem a criação de modelos inicialmente com baixo grau de detalhamento, com a adição de informações e refinamento feitos ao longo do processo de manutenção, de acordo com a necessidade. Dessa

forma o tempo gasto na remodelagem de fachadas e famílias históricas seria mais distribuído e menos moroso.

Levando em conta os critérios como custo, precisão, aplicabilidade e tempo gasto, os métodos de conversão 2D sem dúvidas são os mais acessíveis em comparação com os demais, porém demonstraram uma menor precisão e maior tempo de retrabalho, já que, por vezes, as plantas apresentam incompatibilidade com o estado real da edificação. Contudo, quando aliados a programas que automatizam o processamento de imagens digitais, como os métodos propostos por Zhu et al. (2014) e Matias e Palha (2021), se mostraram a melhor opção quanto a aplicabilidade, quando o objetivo é a disseminação do método, tendo em vista o baixo custo, e compensam de certa forma o retrabalho citado acima. Outra opção seria o uso desse método em conjunto com algum dos demais de captura 3D, pontualmente, de modo complementar, podendo proporcionar assim a geração de um modelo mais preciso e de acordo com o objeto real.

Dentre os métodos 3D, o laser scanning se destaca por ser dinâmico, preciso, eficaz e rápido, como apontam Silva e Mortoni (2020). O processo de fotogrametria, dependendo dos equipamentos e instrumentos escolhidos, apresenta resultados semelhantes aos do laser scanning, porém apresenta vantagens por possibilitar a utilização de equipamentos mais acessíveis e ainda assim apresentar resultados de maneira satisfatória. Tais resultados podem ser observados na tabela 1 abaixo, que apresenta o comparativo dos métodos.

Tabela 1. Resumo do estudo comparativo

| Critérios                | Laser Scanner   | Digitalização 2D  | Fotogrametria   |
|--------------------------|---|---|---|
| Frequência de ocorrência | Silva e Couto (2020); Dezen-Kempton et al. (2015)   | Zhu et al. (2014); Doukari e Greenwood (2020); Matias e Palha (2021)  | Dezen-Kempton et al. (2015); Silva et al. (2022)  |
| Custo                    | Alto: os equipamentos podem chegar a custar de R\$ 100.000,00 a R\$ 500.000,00*;  | Baixo: exige pouco investimento na compra de equipamentos, como impressoras;  | Médio: pode ser realizado tanto com auxílio de câmeras comuns como de drones profissionais;                         |
| Aplicabilidade           | Locais de difícil acesso por possibilitar a captura à distância;  | Na existência de plantas originais em boa qualidade;  | No caso do uso de câmeras é necessário que o local seja acessível, já os drones apresentam maior flexibilidade;     |
| Tempo gasto              | Observa-se redução de 90% no tempo de modelagem em relação ao convencional (Bortoluzzi et al., 2019);                           | Maior tempo gasto por gerar resultados em 2D, sendo necessário realizar uma modelagem manual em 3D;                 | Depende do equipamento escolhido. Tempo semelhante ao laser scanning com a utilização de drones, por exemplo;       |
| Nível de precisão        | Alta precisão, exceto na captura de fachadas complexas;   | Depende da qualidade das informações encontradas e da precisão do método de tratamento das imagens a ser utilizado; | Alta precisão, porém apresenta falhas na captura de fachadas complexas e aberturas;                                 |
| Interoperabilidade       | A geração automática de modelos 3D facilita o processo, porém não é possível converter nuvens de pontos em arquivos de família; | Apresenta resultados em IFC, formato compatível com os softwares BIM, facilitando a transferência dos dados;        | Apresenta as mesmas vantagens e desvantagens do laser scanning por gerar o mesmo produto final uma nuvem de pontos; |

Fonte: Autoral.

## 6. CONCLUSÕES

Concluiu-se que todos os métodos apresentam suas vantagens e desvantagens, podendo ser utilizados de acordo com a característica do edifício a ser levantado, das informações e do orçamento disponíveis. Porém, no que tange a precisão e a interoperabilidade, itens importantes no processo BIM, as ferramentas que geram arquivos de nuvens de pontos apresentam vantagem, especialmente, pela existências de softwares já consolidados no mercado de conversão de nuvens de pontos para arquivos compatíveis com softwares BIM, apesar das limitações acima citadas. Já os processos de conversão a partir da digitalização e tratamento de imagens ainda estão em fase experimental como as

soluções trazidas por Matias e Palha (2021) e por Zhu et al. (2014), além de exigirem um certo conhecimento de programação para além dos softwares BIM existentes.

Dessa forma, levando em conta todos os critérios levantados, pode-se dizer que a fotogrametria apresenta as maiores vantagens, por apresentar diferentes possibilidades de ser executada, podendo ser flexível ao nível de detalhe e de precisão requerido no levantamento e ao orçamento disponível. Além disso, apresenta resultados igualmente bons quando comparado aos resultados do laser scanning, mesmo utilizando equipamentos mais em conta, sendo utilizados por vezes de

maneira conjunta como no caso abordado por Dezen-Kempter et al. (2015).

Porém, como pôde ser observado, os métodos de captura de informações construtivas de edificações existentes ainda se encontram em desenvolvimento, apresentando diferentes limitações, especialmente quanto à captura e modelagem de objetos de geometria complexa. Além disso, a dificuldade de obtenção de plantas e documentação original, a limitação de bibliotecas de famílias disponíveis, no caso de edifícios históricos, e a falta de compatibilidade entre os softwares durante o processo foram problemas recorrentes dentre as bibliografias analisadas.

Espera-se, a partir dos resultados obtidos, incentivar o estudo mais aprofundado dos diferentes métodos de coleta de dados, visando o aprimoramento destes através da união dos pontos fortes e análise de alternativas para os problemas apresentados. E, desta forma, facilitar cada vez mais o processo de documentação de projetos de edificações existentes e a geração de relatórios técnicos sobre condições da edificação, visando fomentar a disseminação do uso de BIM para manutenção de edifícios tendo em vista que a terceira etapa de implantação do plano de estratégia BIM-BR trata do uso do BIM para a manutenção e operação de edifícios públicos (Matias e Palha, 2021).

## REFERÊNCIAS

- Agência Brasileira De Desenvolvimento Industrial; Sienge; Grant Thornton. *Mapeamento da Maturidade BIM no Brasil*, [S. l.], ano 2022, ed. 2, p. 1-27, set 2022. Disponível em: <https://plataformabimbr.abdi.com.br/bimBr/rest/conteudo/imagem/Maturidade%20BIM%20no%20Brasil%20-%202022.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.
- Ayres Filho, C.; Scheer, S. Metacompileção de classes para acesso a modelos IFC e sugestões para criação de classes para acesso em alto nível. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, [S. l.], v. 4, n. 2, p. p.112-138, 2009. DOI: 10.4237/gtp.v4i2.112. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/50961>. Acesso em: 30 setembro. 2021.
- Canuto, Cristiane Lopes; Moura, Larissa Ribeiro De; Slagado, Mônica Santos. Tecnologias digitais e preservação do patrimônio arquitetônico: explorando alternativas. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 7, n. 4, p. 252-264, dez. 2016. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8647456>>. Acesso em: 14 maio 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i4.8647456>.
- Castelo, Ana Maria; Marcellini, Laura; Viana, Iuri. A construção digital - Parte 2. Blog do IBRE, [S. l.], 23 out. 2018. Disponível em: <https://blogdoibre.fgv.br/posts/construcao-digital-parte-2>. Acesso em: 3 jun. 2021.
- Dezen-Kempter, E.; Soibelman, L.; Chen, M.; Müller, A.V. Escaneamento 3D a laser, fotogrametria e modelagem da informação da construção para gestão e operação de edificações históricas. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 113-124, jul./dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710>.
- Doukari, Omar and Greenwood, David (2020). Automatic generation of building information models from digitized plans. *Automation in Construction*, 113. p. 103129. ISSN 0926-5805: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103129>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519313500>. Acesso em: 15 fev. 2022.
- Eastman, C. et al. Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Editora Bookman Companhia Ed, 2014. 486 p.
- Granshaw, Stuart. (2020). Photogrammetric terminology: fourth edition. *The Photogrammetric Record*. 35. 143-288. 10.1111/phor.12314.
- Industry Foundation Classes (IFC) – An Introduction. Building Smart International, 2022. Disponível em: <<https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc>>. Acesso em: 16 jun. 2022.
- Khel, Caroline; Luís Isatto, Eduardo. A tecnologia BIM na documentação e gestão da manutenção de edifícios históricos. V TIC, Salvador, Bahia, Brasil, p. 1-13, 5 ago. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329339288>. Acesso em: 28 set. 2021.
- Matias, M. Da S.; Palha, R. P. Uso de métodos computacionais para automatizar a documentação BIM em edificações existentes a partir de documentos 2D. In: Simpósio Brasileiro De Tecnologia Da Informação E Comunicação Na Construção, 3., 2021, Uberlândia. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1-12. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/606>. Acesso em: 3 ago. 2021.
- Silva, Lenildo et al. Fundamentos Da Aquisição De Imagens Por Drone Para Gerar Produtos De Fotogrametria: Do Plano De Voo Ao Modelo 3D. In: Fotogrametria com imagens adquiridas com drones: do plano de voo ao modelo 3D. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2022. cap. 1, p. 1-43. Disponível em: <https://livros.unb.br/index.php/portal/catalog/book/202>. Acesso em: 17 out. 2022.
- Silva, Marcio Morton; Couto, João Pedro. *Bim Aplicado Às Edificações Existentes – Desafios e Oportunidades Na Gestão De Informação*. Encore 2020, [S. l.], p. 1-11, 6 nov. 2020. Disponível em:



<https://www.researchgate.net/publication/349376493>.  
Acesso em: 3 out. 2021.

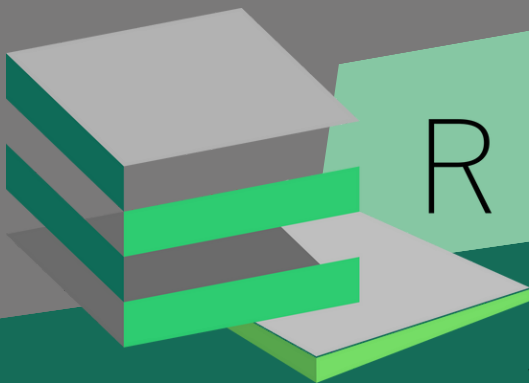
Sinaenco (Brasil). *A interoperabilidade aponta para desafios práticos e tecnológicos na adoção do BIM: Interface entre os sistemas e padrões abertos internacionais serão tema de painel no 3º Seminário Internacional A ERA BIM, com a participação de conferencistas de quatro países*. SINAENCO, [S. l.], 17 nov. 2020. Notícias. Disponível em: <https://sinaenco.com.br/noticias/interoperabilidade-aponta-para-desafios-praticos-e-tecnologicos-na-adocao-do-bim/>. Acesso em: 2 jun. 2021.

Xavier, Alberto Fernando; Fisberg, Luiz. *A estrutura da Universidade de Brasília: Galpão para serviços gerais I e II*. Revista Acrópole, São Paulo, ano 31, n. 369, p. 40-44, 14 jan. 1970. Disponível em: <http://www.acropole.fau.usp.br/edicao/369>. Acesso em: 1 ago. 2022.



**Seção 4**

**Transportes**



REP A E

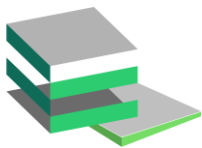
Revista Científica de Pesquisa  
Aplicação à Engenharia  
Volume 6 | ISSN: 2595-0002



UnB



**PET**  
Engenharia civil



# ANÁLISE DA SEGURANÇA DE CRIANÇAS NA TRAVESSIA EM FAIXAS DE PEDESTRES

**Faruk Lima Santos Abder Rahman Yasin Mohd Yasin\***

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

**Fabiana Serra de Arruda**

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

## RESUMO

Este estudo tem como objetivo identificar e analisar soluções adequadas para evitar acidentes envolvendo crianças, por meio da análise de dados de acidentes no Distrito Federal e da infraestrutura urbana atual. Compreender o perfil de deslocamento das crianças é crucial para o desenvolvimento de teorias e medidas para resolver conflitos nesse grupo vulnerável. Foram utilizados registros de acidentes envolvendo pedestres entre 2009 e 2018. A infraestrutura do local e como ela pode estar relacionada ao acidente também foram avaliadas, sendo a proximidade com uma parada de ônibus, a região circundante e a sinalização vertical e horizontal os fatores mais relevantes. Observou-se que Ceilândia é a cidade satélite com o maior número de acidentes. Portanto, o investimento em infraestrutura urbana, com manutenção de sinalização e calçadas, e um melhor planejamento de travessias de pedestres localizadas antes de uma parada de ônibus, torna-se uma solução viável para aumentar as condições de segurança nas travessias de pedestres, especialmente para crianças, no Distrito Federal.

**PALAVRAS-CHAVE:** Segurança de Pedestres, Faixa de Pedestres, Acidentes Viários, Condições de segurança na travessia.

## ABSTRACT

*This study aims to identify and analyze suitable solutions to prevent accidents involving children by analyzing data on accidents in the Federal District and the present urban infrastructure. Understanding the profile of children's travel is crucial for the development of theories and measures to resolve conflicts in this vulnerable group. Pedestrian accident records from 2009 to 2018 were used, and the study's administrative region selection was based on the total number of accidents. The infrastructure of the location and how it may be related to the accident was evaluated, with proximity to a bus stop, the surrounding region, and vertical and horizontal signage being the most relevant factors. It was noted that Ceilândia is the satellite city with the highest number of accidents. Therefore, investment in urban infrastructure, with maintenance of signage and sidewalks, and better planning of pedestrian crossings located before a bus stop, becomes viable solutions to increase safety conditions in pedestrian crossings, especially for children, in the Federal District.*

**KEYWORDS:** Pedestrian Safety, Pedestrian Crossing, Road Accidents, crossing safety conditions.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e o acesso cada vez maior da população a ela, houve um aumento significativo no número de veículos em circulação nas grandes cidades. Essa tendência despertou nas pessoas um desejo de não usar meios ativos de transporte, como caminhar ou andar de bicicleta.

No entanto, o aumento da quantidade de veículos nas ruas também aumentou o número de acidentes de trânsito envolvendo pedestres, especialmente crianças. Diante dessa realidade, este estudo tem como objetivo analisar dados de acidentes ocorridos no Distrito Federal e a infraestrutura urbana presente para identificar e propor soluções adequadas para prevenir acidentes envolvendo esse grupo vulnerável. É importante destacar que as crianças, por não terem

\*Autor correspondente: [farukyasin22@gmail.com](mailto:farukyasin22@gmail.com)



ainda maturidade suficiente para tomar decisões, tendem a reproduzir o comportamento herdado dos pais quando adultos (SOARES, Terezinha, 2021). Por isso, entender o perfil de deslocamento das crianças é essencial para propor medidas que melhorem sua segurança e evitem conflitos com o tráfego.

Entender como o perfil de deslocamento de crianças funciona é de extrema importância para que seja possível propor medidas de resolução de conflitos entre esse grupo de vulneráveis e o tráfego. Uma vez que as lesões ocorridas no trânsito são a principal causa de morte entre crianças e jovens de 5 a 29 anos, esse trabalho se torna essencial para manter a sustentabilidade do meio urbano (Davison, 2008).

Dessa forma, com base em um mapeamento prévio dos acidentes envolvendo crianças no Distrito Federal, além de um levantamento das características urbanas no entorno do local registrado, procurasse entender mais a razão por trás de tais fenômenos. A partir desse mapeamento, este Plano terá como foco analisar e realizar o levantamento das características urbanas no entorno do local registrado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alguns fatores se destacam mais do que outros no que tange às condições de segurança na travessia de faixas de pedestres para crianças. (RIBEIRO, Marcelo Márcio, 2017) Dentre eles, a infraestrutura urbana, a sinalização e semaforização da região e os fatores tangentes ao perfil do comportamento humano, cognitivo e ativo (Yousef, 2015).

Uma expansão desordenada das cidades gerou, na população, o desejo de se ter um veículo particular (EWING et al 2003) para fugir da violência proveniente do uso de transportes ativos. De acordo com o ECA, Estatuto da Criança e do Adolescente, o grupo crianças se estende dos 0 aos 12 anos, dessa forma, a maior parte desse público não detém capacidade de conduzir um veículo motorizado próprio, deixando-os refém da violência urbana.

Este estudo utilizou dados fornecidos pelo Departamento de Trânsito do Distrito Federal. Foram utilizados os registros de acidentes envolvendo pedestres com idades de 0 a 12 anos durante o período de 2009 a 2019. Para cada acidente registrado temos o conjunto de informações que seguem: Circunscrição, Cidade, Endereço, Natureza, Data, Dia da Semana, Hora do dia, Gravidade, Sexo, Idade, Nº de Vítimas e Ano.

### 2.1 Fatores da infraestrutura urbana

O grande objetivo de uma cidade sustentável está na acomodação de todos os grupos possíveis (IBGE, 2019). Assim, um ponto a ser comentado está baseado na qualidade da infraestrutura das rodovias, do planejamento urbano, do planejamento de transportes e da circulação de pedestres e ciclistas e como eles irão conversar para que seja criado um ambiente sustentável (VASCONCELLOS, 2000).

Um termo frequentemente encontrado nesse meio é o 'built environment', que se baseia no ambiente construído e pensado pelo homem. Nele, as pessoas desempenham funções cotidianas, como andar de bicicleta, ir dirigindo para o trabalho, fazer uma caminhada e outros. (SCHULZ et al., 2016).

A Infraestrutura urbana ainda contempla a manutenção e o correto planejamento das vias. Dessa maneira, como os sistemas de transporte se integram e a forma como o espaço, em especial o solo, foi utilizado impactam fortemente nesse fator. (Rosso et al. 2011).

### 2.2 Fatores da Sinalização e Semaforização

Uma sinalização feita de maneira deficiente está diretamente associada à quantidade de acidentes que ocorrem na via (DONROE et al., 2008; FERRAZ et al., 2012). Alguns fatores que, quando omitidos, podem gerar acidentes são: Ausência de sinalização quanto a mudanças na rodovia (presença de semáforos, cruzamentos, vias de exclusividade e etc) e ausência de demarcação ou visibilidade das faixas ou linhas de bordo.

### 2.3 Fatores relacionados ao Perfil Comportamento Humano

Consoante Yousef (2015), o comportamento das pessoas é impreciso e indefinido nas ruas, podendo variar com a experiência, com os ensinamentos na juventude e com o grau de necessidade de uma ação. Assim, fica claro que há uma diferença entre a percepção de uma criança para de um adulto.

Ainda segundo o autor, crianças de 0-3 anos não possuem uma grande capacidade cognitiva, não entendendo as dinâmicas do tráfego, em antemão, crianças de 3-10 anos já compreendem noções básicas de circulação em vias, como, por exemplo, uso de faixas de pedestre, sinalização, velocidade de vias e outros. Por fim, crianças com mais de 11 anos de idade já conseguem ter uma clara diferenciação e interpretação, muito semelhante a de um adulto.

Entre os usuários, as crianças, com as habilidades

cognitivas em desenvolvimento até os 10 anos de idade (JENSEN, 2008), tornam-se mais vulneráveis aos riscos associados às condições, isso porque o incompleto desenvolvimento cognitivo somado a 'liberdade' de ações as deixam expostas as condições adversas.

Esse fator influencia diretamente os acidentes pois uma pessoa que se encontra 'desequilibrada' ou não tem a noção necessária de um meio viário, perde o senso de direção e sentido (PERROW, 2011).

O fator humano se baseia em aspectos e características de erros humanos. Desse modo, podemos observar alguns padrões relacionados aos acidentes. Ainda que erros na condução do veículo ou bicicleta não geram, necessariamente, um acidente, a OMS revela que 90% dos acidentes são gerados por falhas humanas.

A má formação de motoristas (prática e teórica) também influencia diretamente nessas estatísticas. Macedo (2005), argumenta que erros e violações são condutas distintas, porque possuem características distintas. Dessa forma, o mal processamento de algumas informações, por uma componente motivacional, aumenta esses dados.

Além disso, fatores e níveis de estresse no trânsito no trânsito tem capacidade de alterar o raciocínio e a absorção de informação do condutor. Tais fatores, de acordo com AMANDA FENERICH (2016), são: infrações de trânsito, cansaço do motorista, medo de dirigir e a dirigibilidade ruim do veículo.

### 3. MÉTODO DE TRABALHO

A partir desse ponto, serão definidas as escolhas de locais, dados a serem coletados, situação da infraestrutura do local e outros fatores a serem analisados.

Em um primeiro momento, será avaliado de maneira quantitativa a relação dos acidentes nas RA's do Distrito Federal. Assim, haverá uma divisão da análise em duas partes, sendo a primeira com relação a acidentes com crianças fora da faixa de pedestre e a segunda com relação a acidentes com crianças fora da faixa de pedestre.

Em um segundo momento será avaliado de maneira qualitativa, a relação dos acidentes nas RA's do Distrito Federal. Dessa forma, alguns pontos foram selecionados para fazer uma análise das características da infraestrutura do local do acidente, contemplando informações como sinalização vertical e horizontal, entorno e outros.

### 4. ANÁLISE DOS ACIDENTES COM PEDESTRES

## CRIANÇAS NA FAIXA DE PEDESTRE

Como o tema central deste trabalho está focado nas condições de segurança na travessia de faixas de pedestres crianças, nessa próxima parte iremos abordar e detalhar mais sobre as faixas.

### 4.1 Quantidade de acidentes por Região Administrativa

A seleção dos dados e dos locais foi feita usando como referência o banco de dados do DETRAN. Nele foram escolhidos pontos previamente estudados Região Administrativa de Brasília e com base na QDTCF (Quantidade total de Acidentes com Crianças em Faixas de Pedestre), QDTC (Quantidade Total de Acidentes com Crianças) e QTALF (Quantidade de Acidentes Letais em Faixas).

Tabela 1. Dados das Regiões Administrativas pela quantidade de acidentes.

| Região Administrativa | Região Administrativa | Região Administrativa | Região Administrativa |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Sudoeste              | 1                     | 3                     | 0                     |
| Lago Sul              | 0                     | 3                     | 0                     |
| Cruzeiro              | 0                     | 5                     | 0                     |
| ParkWay               | 0                     | 6                     | 0                     |
| Lago Norte            | 0                     | 11                    | 0                     |
| Riacho fundo 2        | 1                     | 12                    | 0                     |
| Vicente Pires         | 0                     | 11                    | 0                     |
| Varjão                | 0                     | 14                    | 0                     |
| Candangolândia        | 1                     | 14                    | 0                     |
| Núcleo Bandeirante    | 0                     | 23                    | 0                     |
| Águas Claras          | 1                     | 32                    | 0                     |
| Riacho fundo          | 1                     | 43                    | 1                     |
| Brazlândia            | 2                     | 49                    | 0                     |
| Itapoá                | 0                     | 40                    | 0                     |
| Paranoá               | 1                     | 57                    | 0                     |
| Sobradinho 1 e 2      | 4                     | 69                    | 0                     |
| Guará                 | 1                     | 66                    | 0                     |
| São sebastião         | 5                     | 88                    | 0                     |

|                  |   |     |   |
|------------------|---|-----|---|
| Recanto das Emas | 5 | 105 | 1 |
| Gama             | 8 | 103 | 0 |
| Santa Maria      | 5 | 105 | 0 |
| Brasília         | 7 | 132 | 0 |
| Taguatinga       | 9 | 190 | 0 |
| Planaltina       | 8 | 159 | 0 |
| Samambaia        | 6 | 213 | 0 |

Fonte: Base de dados do Detran, 2009-2019

A tabela irá auxiliar a entender melhor o fenômeno dos acidentes viários com crianças na faixa de pedestre. A partir de uma interpretação criteriosa dos dados, pode-se perceber que Ceilândia foi a região administrativa com maior número total de acidentes em faixas tanto no quesito geral, quanto no quesito apenas crianças.

Um fato interessante a ser levantado quanto a quantidade de acidentes é em relação a distância do centro do Distrito Federal, Brasília.

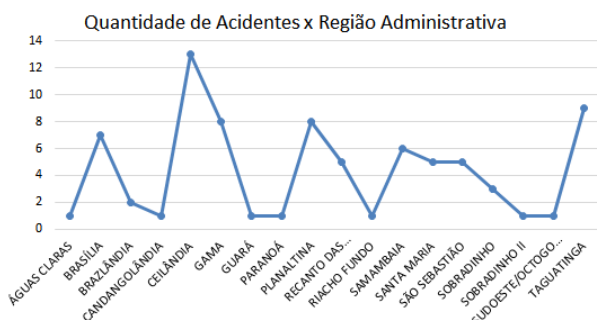


Figura 1. Quantidade de Acidentes x Região Administrativa.  
 Fonte: Autor.

A seguir, um gráfico representando a quantidade total de acidentes com crianças em faixas de pedestre pela quantidade total de acidentes com crianças.

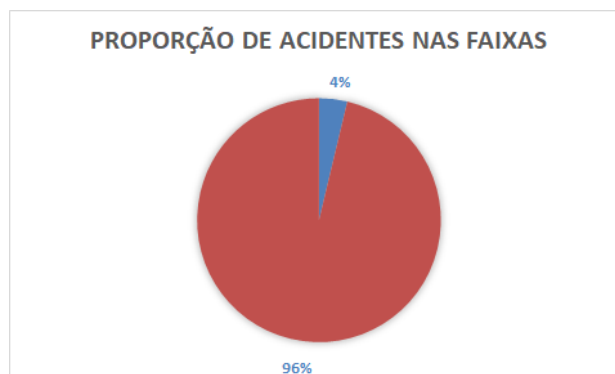


Figura 2. Gráfico Quantidade de acidentes.  
 Fonte: Autor

O gráfico nos informa que apenas 4% dos acidentes com crianças ocorreram em faixas de pedestre, o que já nos mostra de forma clara que o uso da mesma no Distrito Federal é efetivo.

#### 4.2 IDADE DOS PEDESTRES

A idade dos pedestres acidentados também deve ser levada em consideração ao que tange o tema, uma vez que, em teoria, crianças com até 10 ficam mais vulneráveis às condições adversas do trânsito. Os gráficos a seguir nos mostram, respectivamente, a idade pela quantidade de acidentes com crianças e a idade pela quantidade de acidentes com crianças que geraram fatalidade.

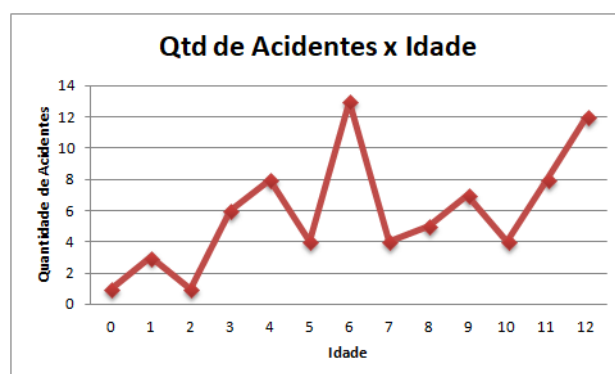


Figura 3. Quantidade de acidentes x Idade.  
 Fonte: Autor.

O gráfico, quando dividido em 4 partes - sendo elas 0-3, 4-6, 7-9 e 10-12 - nos confirma que a maior ocorrência de acidentes ocorre entre as idades de 4 até 6 anos de idade, totalizando 25 acidentes nessa faixa de idade. Tal fato já havia sido mencionado previamente na revisão bibliográfica.

#### 4.3 HORÁRIO DOS ACIDENTES

O horário e o ano que os acidentes ocorrem são fulcrais para uma análise mais detalhada. Isso porque

horários com maior movimentação, fluxo e mobilidade urbana são fatores influenciadores da segurança no trânsito. A seguir, temos um gráfico que explicita a relação de Quantidade de Acidentes pelo horário que eles ocorreram.

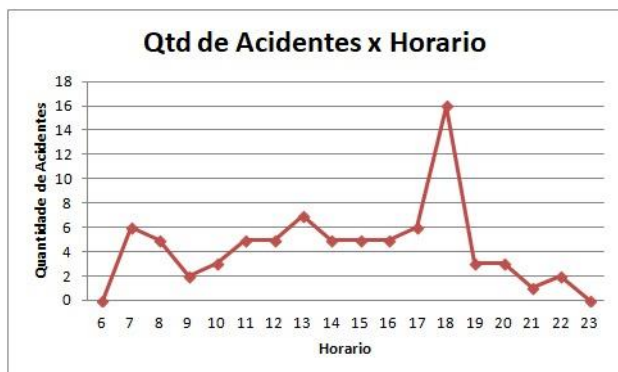


Figura 4. Quantidade de Acidentes x Horário  
Fonte: Autor.

Assim como previsto na literatura, os horários com maior incidência de acidentes correspondem aos horários de maior mobilidade urbana, sendo o horário das 11:00 as 13:00 e 17:00 as 19:00 correspondente aos horários de maior fluxo de saída escolar e, conseqüentemente, o maior trânsito de pessoas e veículos.

Horários mais distantes da entrada e saída de alunos nas escolas tendem a ter uma menor taxa de acidentes, o que mostra como esses picos podem se tornar pontos a serem mais estudados em uma próxima análise.

#### 4.4 ANÁLISE DETALHADA DOS PONTOS

Para essa próxima etapa do trabalho, serão analisados os pontos específicos de acidentes, a fim de entender e obter dados de similaridade entre tais áreas.



Figura 5. VIA N3 - NORTE, QNN 21, CONJ.  
Fonte: Google StreetView.

O ponto acima se encontra ao lado do colégio ALUB, que possui um grande fluxo de alunos

transitando diariamente.

Considerando aspectos de infraestrutura, a via possui uma boa iluminação, rebaixo de calçada para pessoas com dificuldade de locomoção e placas de sinalização de trânsito. No entanto, as sinalizações horizontais estão desgastadas por falta de manutenção e a proximidade dessa faixa com um ponto de parada de ônibus - que diminui a visibilidade do motorista - fazem com que a mesma se torne perigosa para travessia de pedestres.



Figura 6. VIA MN1 (AV. HÉLIO PRATES), CNM 02  
Fonte: Google StreetView.

O próximo ponto a ser analisado se encontra próximo a Feira Central de Ceilândia, ou seja, uma área de grande fluxo de carros e pessoas por se tratar de uma região comercial. Entender o entorno da área estudada é essencial para compreender mais sobre os acidentes.

No que tange aos aspectos de infraestrutura da via, ela possui iluminação de postes, rebaixo de calçada, em más condições que dificulta a mobilidade de pessoas com deficiência motora, tem uma boa sinalização ao longo de sua extensão e não possui uma ciclovia segregada.

A via Hélio Prates, por ser uma das mais movimentadas da região de Ceilândia, necessita de uma maior atenção dos motoristas principalmente em relação aos semáforos e outras formas de sinalização, que provavelmente foi o causador dos acidentes nessa região.



Figura 7. VIA ENQM 17.  
Fonte Google StreetView.

O terceiro ponto a ser analisado se encontra próximo ao Shopping Popular da Ceilândia, que possui um entorno muito movimentado. Mais uma vez o fator 'entorno' se mostra passível de análise para o cumprimento dessa análise.

Nele, encontramos calçadas rebaixadas, uma sinalização horizontal que necessita de manutenção, postes para iluminação noturna, parada de ônibus anterior a faixa de pedestre - diminuindo ainda mais a visibilidade dos motoristas em relação a faixa - e não possui ciclovia segregada a via.

## 5. CONCLUSÃO

Portanto, após uma análise das condições de segurança na travessia de faixas de pedestres crianças com base em características urbanas foi possível compreender e entender alguns fatores constantes que atingem diretamente a segurança desses pedestres.

Quando levamos em consideração a quantidade de acidentes por Regiões Administrativas, Taguatinga, Ceilândia, Samambaia e Planaltina possuem o maior número de acidentes com crianças na faixa e fora dela. Paralelamente, essas regiões possuem um menor poder de aquisição e, conseqüentemente, menor infraestrutura e mais suburbana.

Em relação aos aspectos do comportamento das crianças, a faixa de idade com maior número de acidentes foi a de 4 até 6 anos de idade, totalizando 25 acidentes. Esse dado converge com a teoria.

O horário dos acidentes também é um fator importante para essa análise, sendo assim, os horários com maior incidência correspondem aos horários de maior mobilidade urbana, sendo o horário das 11:00 as 13:00 e 17:00 as 19:00, que são os horários de saídas das escolas.

Por fim, após uma análise das condições de infraestrutura dos locais, ficou nítido que o mau planejamento da região e a alocação de faixas são o principal problema encontrado na travessia de pedestres. Uma vez que, pela proximidade com paradas de ônibus, a visibilidade dos motoristas fica corrompida. Para sanar esse problema, executar um melhor planejamento urbano, levando em consideração o 'built environment' e investindo nas regiões mais periféricas garantindo a manutenção das vias.

## AGRADECIMENTOS

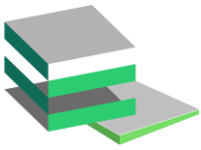
Agradeço aos professores e colegas que sempre estiveram disposto a ajudar e contribuir para um

melhor aprendizado, em especial a professora Fabiana Arruda que foi a orientadora deste projeto. Agradeço também a minha instituição por ter me dado todas as chances e oportunidades para me desenvolver.

## REFERÊNCIAS

- SOARES, Terezinha. Comportamento e Segurança no Trânsito de Crianças: Uma Revisão Bibliográfica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília, 2021.
- DAVISON, Christopher M. et al. An overview of strategies to reduce children's and young people's risk of injury in traffic. *The Lancet*, v. 9, n. 5, p. 292-307, 2008.
- Yousef, Ali Abdelfattah; Abou-Zeid, Maya. Evaluating pedestrian safety in Egyptian cities. *Transportation Research Procedia*, v. 10, p. 678-686, 2015.
- EWING, Reid; CERVERO, Robert. Travel and the built environment: a meta-analysis. *Journal of the American Planning Association*, v. 76, n. 3, p. 265-294, 2003.
- IBGE. Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. Transporte urbano, espaço e equidade. *Revista dos Transportes Públicos*, n. 22, p. 13-26, 2000.
- SCHULZ, Brian W. et al. Built environment correlates of active transportation: A review and research agenda. *American Journal of Preventive Medicine*, v. 51, n. 2, p. 238-248, 2016.
- ROSSO, Veridiana et al. A influência da infraestrutura viária no risco de acidentes de trânsito em Curitiba, Paraná, Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 27, n. 7, p. 1299-1309, 2011.
- DONROE, Jacqueline et al. Road safety campaigns and the perception of safety among school-children. *Safety Science*, v. 46, n. 6, p. 863-870, 2008.
- FERRAZ, Antonio Clóvis Pinto; SCHIOCHET, Fátima; MENDONÇA, Ricardo Alves de. Percepção de pedestres e motoristas sobre a segurança do pedestre em diferentes vias urbanas de Florianópolis, SC. *Transportes*, v. 20, n. 1, p. 27-35, 2012.





# ANÁLISE DE TEMPO SEMAFÓRICO UTILIZANDO O SUMO: ESTUDO DE CASO DA ROTATÓRIA DO FINAL DA ASA NORTE

**Bruno Nunes Teixeira Ferreira\***

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

**Michelle Andrade**

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

## RESUMO

Diariamente as grandes cidades sofrem com o problema do congestionamento de veículos, principalmente no horário de pico. Duas soluções diretas que vêm de imediato são: aumentar a infraestrutura de trânsito e melhorar a qualidade e quantidade do transporte público. Ambas, são soluções caras e demoradas, sem contar com o desconforto prévio que seria instaurado para realizar grandes obras. Porém, existe uma terceira solução, o aprimoramento das operações de controle de trânsito do sistema atual, mais especificamente dos semáforos, no qual não é necessário alterar a infraestrutura física e pode ser aplicado prontamente. Esse trabalho propôs encontrar o melhor tempo semafórico para a rotatória do final da Asa Norte, uma rotatória complexa que possui três cruzamentos semaforizados atuando simultaneamente para interligar quatro importantes vias de alto fluxo de veículos. Nesse trabalho, foi realizada a modelagem da rede através das pesquisas de campo da contagem volumétrica e do fluxo de saturação, seguindo as recomendações do CONTRAN, e do uso de mapas gratuitos disponíveis na internet. Ademais, com o uso do simulador SUMO foi feita uma avaliação do ciclo semafórico atual bem como foi encontrado o melhor tempo de ciclo semafórico, obtido através de um algoritmo desenvolvido em Python3, usando como medida de avaliação para ambos os casos o tempo médio de viagem. Por fim, foi calculado o ciclo ótimo de Webster e comparado com os cenários anteriores. Apesar de não ter sido possível realizar a calibração do simulador, foi encontrada uma redução de 33% do tempo médio de viagem do ciclo do algoritmo em comparação ao ciclo atual, o que evidencia que, mesmo utilizando a calibração padrão, o cenário atual está passível de melhora significativa das condições de circulação de veículos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de Tempo Semafórico, SUMO, Microsimulação de Tráfego, Rotatória

## ABSTRACT

*Big cities suffer daily from the problem of vehicle traffic jam, especially at peak hours. Two immediate solutions to do are: to increase transit infrastructure and to improve the quality and quantity of public transport. Both are expensive and time-consuming solutions, in addition, the prior discomfort that would be established to carry out major works. However, there is a third solution, the improvement of traffic control operations of the current system, specifically the traffic lights, which are not necessary to change the physical infrastructure and it can be applied promptly. This work proposed to find the best traffic lights time for the roundabout at the end of Asa Norte, a complex roundabout that has three traffic lights acting simultaneously to connect four important high-flow ways. In this work, the network modeling was executed through field surveys of the traffic volume count and of the saturation flow, following the recommendations of CONTRAN and the use of free maps available on the internet. Furthermore, using the simulator SUMO, an evaluation of the current traffic lights cycle was performed and the best traffic light cycle time was found. It was obtained through an algorithm developed in Python3 using the mean travel time as an evaluation measure for both cases. Finally, the optimal Webster cycle was calculated and compared with the previous scenarios. Although it was not possible to perform the calibration of the simulator, a reduction of 33% in the mean travel time of the algorithm cycle was found compared to the current cycle, which shows that even using the standard calibration, the current scenario is susceptible to significant improvement in vehicle transit conditions.*

\*Autor correspondente: [brunontf@gmail.com](mailto:brunontf@gmail.com)



**KEYWORDS:** Traffic Lights Time Analysis, SUMO, Traffic Microsimulation, Roundabout

## 1. INTRODUÇÃO

Apesar de Brasília ser uma cidade planejada, é também uma cidade que em decorrência do crescimento populacional, da concentração de empregos do setor público na sua área central e da carência de transporte público, vivencia o problema de congestionamentos cotidianamente.

Andrade (2018) diz que o estresse causado pelo trânsito nos cidadãos é uma das grandes causas de doenças, e que geram altos custos ao sistema de saúde pública. E, segundo Cruz (2019), "o custo com o congestionamento no país soma perdas de R\$ 267 bilhões por ano, o que corresponde a cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil". Além disso, Alobaidi *et al.* (2020) descrevem que os veículos são a fonte dominante de emissões de poluentes atmosféricos nos grandes centros urbanos e os cruzamentos são considerados como pontos de alta emissão veicular dentro da malha viária devido aos eventos de aceleração e desaceleração dos veículos.

Brasília possui um custo de deslocamento elevado, uma vez que o seu modelo de expansão urbana ainda deriva do automóvel, que é reforçado pelo seu desenvolvimento econômico de maior renda per capita do país, conforme Leal (2017).

Somado a isso, os cidadãos brasilienses que utilizam a principal saída norte da região central convivem com condições de tráfego que resultam em um tempo perdido recorrentemente questionado. Ademais, o crescimento populacional do recente bairro Noroeste impacta diretamente nas condições de tráfego da via.

Durante muito tempo pensava-se que o crescimento da malha viária, embora caro e algumas vezes inviável por falta de espaço alocável, era a solução para o problema do congestionamento. Porém, existe uma outra solução: o controle de tráfego urbano.

Conforme Wolshon e Pande (2016), esse conceito consiste em um conjunto de estratégias que visam alterar o comportamento das viagens, de modo a otimizar o sistema de transporte segundo algum objetivo, como por exemplo reduzir o congestionamento, aumentar a mobilidade dos pedestres, reduzir o número de paradas ou de emissão de poluentes. No caso de ambientes urbanos, por exemplo, os engenheiros de tráfego

devem considerar que as cidades demandam vias de trânsito rápido, mas também, devem contemplar espaços de trânsito calmo em que a interação entre veículos, ciclistas e pedestres ocorra de modo seguro para todos esses atores.

Nesse contexto, um exemplo do congestionamento presente em Brasília é a rotatória do final da Asa Norte que interliga os trechos das vias W3 norte, L4 norte, Setor Terminal Norte e Setor Hospitalar Local Norte. Nesses cruzamentos, é recorrente o usuário esperar demasiadamente até acessar as vias de ligação do local. Além disso, há nessa região a presença de hipermercados, shopping center, concessionária de veículos, setor hospitalar e terminal de ônibus que são importantes polos geradores de viagem. A Figura 1.1 mostra o trecho viário desse estudo e a Figura 1.2 mostra a importância desse trecho viário na malha viária da Asa Norte.

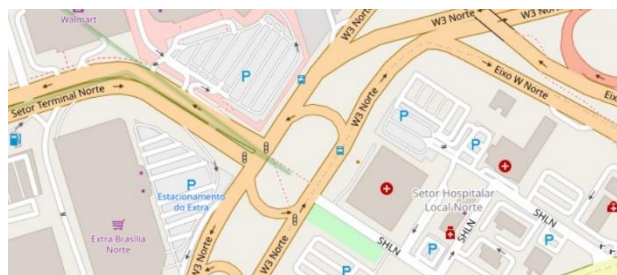


Figura 1.1 Croqui da Localização.  
Fonte: OpenStreetMaps (2017).



Figura 1.2 Croqui da Visão Geral.  
Fonte: OpenStreetMaps (2017).

Pensando nisso, esse trabalho analisa, por meio de simulação computacional, a possibilidade de mitigar o problema do congestionamento através do ajuste do tempo do ciclo semafórico. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo que busca o melhor tempo

de ciclo semafórico.

## 2. METODOLOGIA

Para uma melhor compreensão, a metodologia foi dividida em coleta de dados da rede viária e modelagem computacional. A Figura 2.1 apresenta um fluxograma da metodologia apresentada.

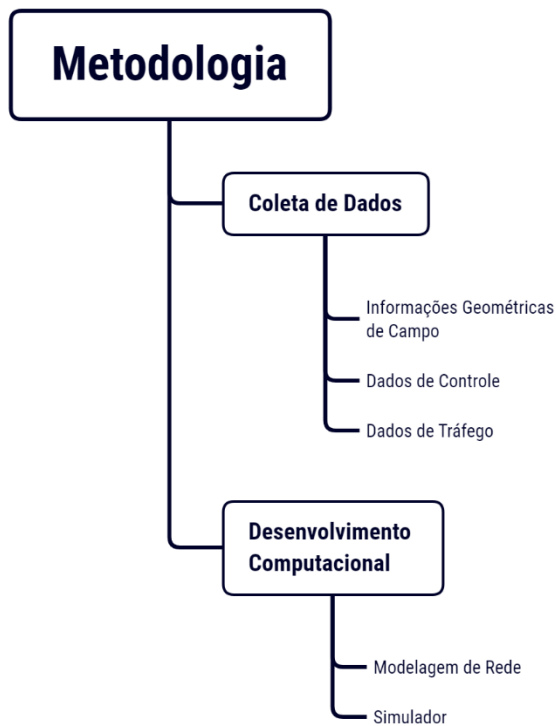


Figura 2.1 Fluxograma da Metodologia Utilizada.

### 2.1 Coleta de Dados

Para realizar a análise comparativa dos padrões operacionais entre o tráfego atual e o tráfego do melhor cenário, foi necessário coletar dados geométricos do trecho viário em estudo, dados da programação semafórica atual e dados do volume de tráfego local.

#### 2.1.1 Informações Geométricas de Campo

Os dados geométricos foram adquiridos com o auxílio da plataforma online de mapas Open Street Maps (OSM) e conferidos parcialmente em campo.

De modo geral, o trecho em estudo é composto de vias com três faixas de trânsito com largura de 3,60m cada e velocidade regulamentada de 60 Km/h. A exceção é a via do Setor Hospitalar Norte, que é um trecho em pista simples.

A região analisada possui três cruzamentos semaforizados, com dois semáforos em cada cruzamento que permitem o trânsito de veículos de uma única aproximação por vez. Esses cruzamentos foram classificados em ordem numérica considerando o sentido horário, conforme apresentado na Figura 2.2. O cruzamento 1 possui os semáforos 1-0 e 1-1, o cruzamento 2 possui os semáforos 2-0 e 2-1 e o cruzamento 3 possui os semáforos 3-0 e 3-1.

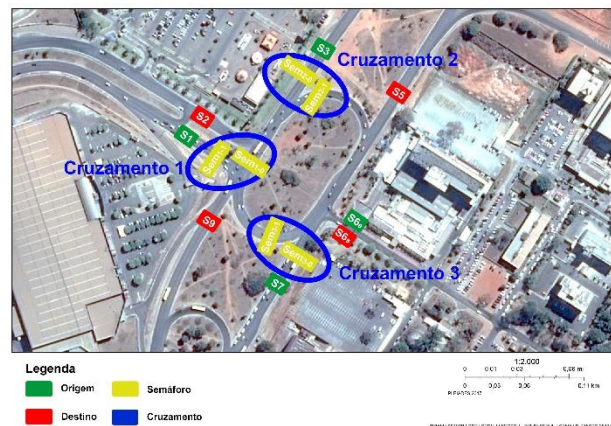


Figura 2.2 Modelo com a Localização dos Semáforos.

Essa subdivisão foi feita de modo a facilitar a identificação dos dois principais estágios existentes, o estágio 0 que permite o trânsito de veículos nas aproximações dos semáforos 1-0, 2-0 e 3-0 e proíbe o trânsito de veículos nas aproximações dos semáforos 1-1, 2-1 e 3-1. Em contrapartida, o estágio 1 realiza o oposto do estágio 0. A Figura 2.3 mostra um diagrama de estágios do trecho em estudo.

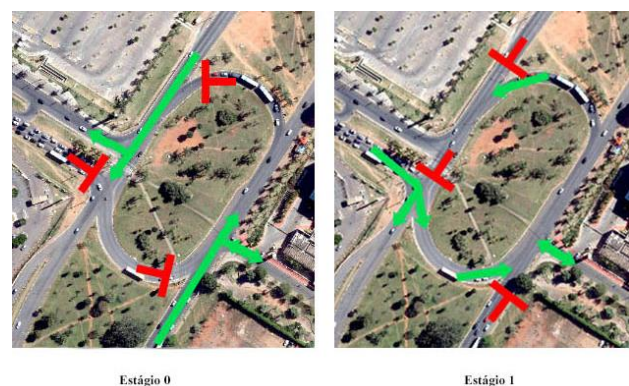


Figura 2.3 Diagrama de Estágios do Trecho em Estudo.

#### 2.1.2 Dados de Controle

A programação semafórica da região em estudo foi coletada em campo, no dia 23 de dezembro de 2021.

Essa programação correspondia ao plano semafórico presente no horário de pico das 18h dos dias de terça-feira a quinta-feira. Para a tomada de tempo, foram feitas filmagens dos ciclos semafóricos de cada cruzamento utilizando um *smartphone*. A tabela 2.1 mostra os tempos coletados.

Tabela 2.1 Tempo do Ciclo Semafórico em Segundos

| Grupos Semafóricos | Tempo Medido em Campo |                      |                       |
|--------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|                    | Tempo de Verde (s)    | Tempo de Amarelo (s) | Tempo de Vermelho (s) |
| Sem. 1-0           | 85                    | 5                    | 2                     |
| Sem. 1-1           | 70                    | 5                    | 2                     |
| Sem. 2-0           | 85                    | 5                    | 2                     |
| Sem. 2-1           | 70                    | 5                    | 2                     |
| Sem. 3-0           | 85                    | 5                    | 2                     |
| Sem.3-1            | 70                    | 5                    | 2                     |

### 2.1.3 Dados de Tráfego

Neste tópico, é abordado a coleta do volume de tráfego e do fluxo de saturação bem como as devidas correções aplicadas. Além disso, a matriz origem-destino.

#### 2.1.3.1 Contagem do Volume de Tráfego

Para o presente trabalho, foi escolhido realizar a contagem volumétrica nos trechos entre interseções através da classificação global com o método de contagem manual.

Conforme o DNIT (2006), a classificação global consiste no registro da quantidade de veículos que cruza um determinado trecho da via, agrupando-os pelas suas classes, no caso, entre carros, motos e ônibus. E o método da contagem manual consiste em registrar a quantidade de veículos com o auxílio de fichas ou um contador mecânico ou eletrônico. Entre as principais vantagens estão: a simplicidade de execução e baixo custo para a realização.

A contagem volumétrica foi realizada durante os dias 27 a 29 de abril de 2021, terça-feira a quinta-feira, durante 15 minutos diários no horário de pico, por volta das 18h05min às 18h20min. Esse intervalo foi escolhido, pois, segundo o DNIT (2006), as horas de pico ocorrem, nos dias da semana, próximas às 9h e às 18h, que coincidem justamente com a ida e volta do trabalho.

A escolha do horário de pico foi tomada pois,

segundo CONTRAN (2014), é justamente nesse horário que ocorrem os maiores fluxos de veículos e, portanto, as vias estão sob solicitação máxima, bem como os dias de terça-feira, quarta-feira e quinta-feira são dias que sofrem as menores variações volumétricas. Ainda, é importante ressaltar que nos dias da contagem volumétrica não houve acidente no local ou nas proximidades e nem feriado que pudesse alterar as condições típicas de fluxo.

Para a contagem in situ, foram posicionadas nove pessoas distribuídas pelas seções de 1 a 9, conforme ilustrado na Figura 2.4. As seções S1, S3, S6e e S7, de cor verde na Figura 2.4, identificam as entradas de veículos no sistema, enquanto as seções S2, S5, S6s, S7 e S9, em vermelho na Figura 2.4, identificam as saídas de veículos no sistema. Além disso, as seções S4 e S8 contaram o fluxo de veículo que cruzaram a rotatória e as seções S1-2 e S5-6 foram seções criadas apenas teoricamente para auxiliar na análise de dados. A seção S6 possui mão dupla e, por isso, foi dividida em S6e, que corresponde a quantidade de veículos que entraram no sistema por essa seção, e S6s, que corresponde a quantidade de veículos que saíram do sistema por essa seção.

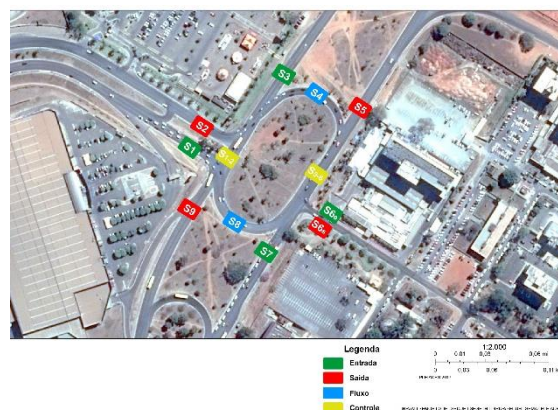


Figura 2.4 Seções Escolhidas para a Contagem de Volume de Tráfego

Para a contagem, foi fornecido a cada pessoa um aplicativo no telefone celular que continha um contador manual individual para os três tipos de veículos escolhidos: carros, motos e ônibus.

#### 2.1.3.2 Análise do Volume de Tráfego

Os dados brutos do volume de tráfego adquiridos em campo contêm uma incerteza causada pelo próprio erro humano e pela quantidade de veículos que estavam rodando, quando iniciou a primeira contagem, e não foram contabilizados.

Assim, foi preciso fazer um ajuste nesses dados conforme a Equação 1 com intuito de reduzir essas diferenças. Essa equação trata da conservação de um sistema aberto, ou seja, o somatório de veículos que entram no sistema tem que ser igual ao somatório dos veículos que saem desse sistema. A Equação.2 desenvolve o princípio da Equação 1 aplicado nas seções definidas.

$$\sum \text{Veículos que entram no sistema} = \sum \text{Veículos que saem do sistema} \quad (1)$$

$$S_1 + S_3 + S_{6e} + S_7 = S_2 + S_5 + S_{6s} + S_9 \quad (2)$$

Além da Equação 2, é possível dividir o sistema da Figura 2.4 em quatro partes e obter mais duas novas equações, as Equações 3 e 4.

$$S_8 + S_9 - S_1 = S_3 + S_4 - S_2 \quad (3)$$

$$S_4 + S_5 = S_7 + S_8 + S_{6e} - S_{6s} \quad (4)$$

Assim, foi possível construir a matriz OD (Origem-Destino) da rede viária em questão para cada tipo de veículo. Além disso, foi possível também calcular a taxa de fluxo. A Tabela 2.2 traz a matriz OD com o volume de tráfego por hora.

Tabela 2.2 Matriz OD com o Volume de Tráfego Por Hora.

| Tipo de Veículo | Origem | Destino |     |     |     |
|-----------------|--------|---------|-----|-----|-----|
|                 | Seção  | S2      | S5  | S6s | S9  |
| Carro           | S1     | 52      | 836 | 112 | 248 |
|                 | S3     | 1112    | 208 | 36  | 384 |
|                 | S6e    | 84      | 192 | -   | 40  |
|                 | S7     | 204     | 772 | 12  | 84  |
|                 | Seção  | S2      | S5  | S6s | S9  |
| Moto            | S1     | 4       | 64  | 12  | 20  |
|                 | S3     | 56      | 0   | 4   | 32  |
|                 | S6e    | 16      | 16  | -   | 28  |
|                 | S7     | 4       | 79  | 1   | 4   |
|                 | Seção  | S2      | S5  | S6s | S9  |
| Ônibus          | S1     | -       | 24  | -   | 96  |
|                 | S3     | 40      | 8   | -   | 20  |
|                 | S7     | 28      | 64  | -   | 32  |

### 2.1.3.3 Fluxo de Saturação e Tempo Perdido

Para o cálculo do fluxo de saturação e de tempo perdido foi utilizado o método 2 do CONTRAN (2014), que é o mesmo método utilizado pela CETSP, por ser o método mais simples e viável de ser aplicado no

local em estudo devido ao elevado fluxo de veículos do local, bem como a disponibilidade de recursos para a coleta dos dados no campo.

Em locais com elevado tráfego, o método permite que essa contagem seja feita em apenas um faixa da pista e depois extrapolada, o que de fato foi realizado. O método requer ainda que, para que um ciclo seja válido, é necessário que haja pelo menos cinco intervalos saturados.

O primeiro intervalo é somente utilizado para o cálculo do tempo perdido inicial, bem como os intervalos durante o tempo de entretardos são utilizados para o cálculo do tempo perdido final. O tempo perdido inicial calculado não pode ser inferior a 1s e o tempo perdido final calculado não pode ser negativo. Assim, o fluxo de saturação de um ciclo é calculado então pela Equação 5.

$$F_s = \frac{\sum_{j=2}^{NIS} NVI_j}{5 (NIS - 1)} \quad (5)$$

onde  $F_s$  é o fluxo de saturação [veíc./s], NIS é o número de intervalos saturados e  $NVI_j$  é o número de veículos no intervalo "j".

O tempo perdido inicial é calculado através da Equação 6.

$$T_{pi} = 5 - \frac{NV_1}{F_s} \quad (6)$$

onde  $T_{pi}$  é o tempo perdido inicial [s],  $NV_1$  é o número de veículos do primeiro intervalo e  $F_s$  é o fluxo de saturação [veíc./s].

Para o cálculo do tempo perdido final, utilizando esse método, seriam necessários ciclos saturados de veículos, ou seja, ciclos em que os todos os intervalos estivessem veículos cruzando, o que não foi possível ser atendido. Porém, conforme Mannering e Washburn (2013), é difícil encontrar em campo tais ciclos. Assim, os autores recomendam que 3s de tempo perdido final é uma boa estimativa, e, portanto, é o que foi adotado para todos os semáforos.

## 2.2 Desenvolvimento Computacional

Nesta parte, é descrita a implementação dos dados adquiridos no software de simulação, bem como da sua configuração para o processamento computacional.

### 2.2.1 Modelagem da Rede

A modelagem da rede foi feita utilizando a ferramenta NetEdit, que faz parte do software SUMO. Segundo Krajzewicz *et al.* (2012), "NetEdit é um editor gráfico de rede que pode ser usado para criar redes do zero e modificar todos os aspectos das redes existentes. Com uma interface de seleção e destaque, também pode ser utilizado para definir e editar rotas, veículos e pessoas."

Além disso, foi utilizado o OSM Web Wizard, um módulo do SUMO, que capturou os principais dados físicos do Open Street Maps (OSM) necessários para auxiliar a modelagem da rede, como por exemplo, as larguras e quantidades de faixas, os comprimentos das pistas e as velocidades das vias. A Figura 2.5 ilustra a rede modelada com os dados de geométricos e de controle.

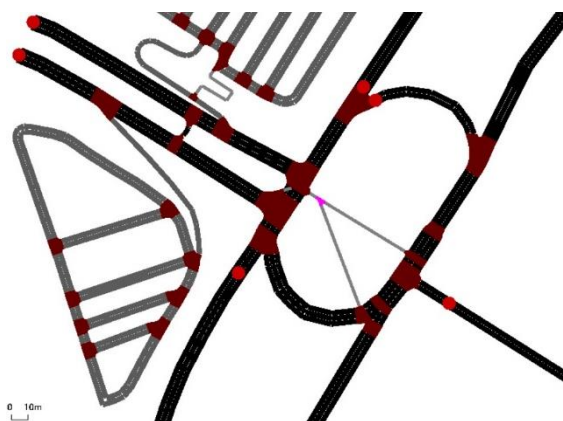


Figura 2.5 Modelo da Rede.

## 2.2.2 Simulador

O SUMO (Simulação de Mobilidade Urbana) é um simulador microscópico de tráfego multimodal, com licença livre GPL2, desenvolvido pelo centro aeroespacial alemão. Ele se destaca pela flexibilidade de programação, velocidade de execução e baixo consumo computacional.

### 2.2.2.1 Modelagem de Tráfego

Com os dados da Tabela 2.2, foi possível então criar o arquivo de rotas do SUMO também com a ferramenta NetEdit. Ainda, foram considerados três tipos de veículos: carros, motos e ônibus, que correspondem com a maioria dos tipos de veículos que utilizam a rede e que foram registrados na contagem volumétrica.

### 2.2.2.2 Algoritmo de Varredura

O algoritmo de varredura desenvolvido é um programa que busca encontrar o menor tempo médio de viagem através da alteração dos tempos de ciclos semafóricos e dos seus respectivos tempos de verde.

O SUMO, após cada simulação, gera resultados de desempenho da rede na forma de relatórios em formato .xml. Esses relatórios contêm, por exemplo, informações de rotas de veículos, quantidade de entrada e saída de veículos na rede, emissão de gases poluentes, tempo médio de viagem, consumo de combustível, comprimento de filas, entre outros.

Um relatório em especial chamado *Summary* disponibiliza, por segundo, informações sobre a quantidade total de veículos que foram inseridos na simulação, que estão rodando, que estão parados ou que já chegaram ao seu destino. Além disso, ele também disponibiliza o tempo médio de viagem da rede, que foi a medida utilizada para a criação do programa.

Assim, foi desenvolvido um algoritmo em Python3 a fim de encontrar o menor tempo médio de viagem dado um volume de tráfego constante bem como o tempo total de ciclo semafórico preestabelecido e comum aos três cruzamentos da rede.

A lógica do algoritmo consiste em varrer dentro de um ciclo semafórico todas as combinações possíveis de tempo de verde e, conseqüentemente, de vermelho. Ou seja, ele cria uma matriz que vai incrementando, em um intervalo predeterminado, o tempo de verde e decrementando o tempo de vermelho de cada semáforo por simulação.

Por exemplo, se um semáforo tem um ciclo de 40s com 10s de verde e 30s de vermelho e o intervalo de incremento seja de 5s, após a primeira simulação tem-se o ciclo alterado para 15s de verde e 25 de vermelho, e após a segunda simulação o ciclo será de 20s de verde e 20s de vermelho, e assim sucessivamente até atingir o limite mínimo do tempo de vermelho, no caso, 10s. Os tempos de entreverdes não são alterados, e nesse exemplo, para fins explicativos, foram desconsiderados do tempo de ciclo.

No exemplo anterior, foi mostrada a variação dos tempos semafóricos para um único semáforo, porém, na rede modelada existem três cruzamentos com dois semáforos cada, totalizando seis semáforos. Como o algoritmo incrementaria cada um individualmente enquanto manteria os demais constantes até varrer todos os casos possíveis para todos os semáforos, isso exigiria muito processamento do computador e, conseqüentemente, o tempo para realizar todas as simulações seria elevado.

Por isso, foi considerado, no algoritmo, que em mesmo cruzamento necessariamente quando um

semáforo está liberando a passagem dos veículos o outro semáforo está proibindo a passagem dos veículos da sua respectiva aproximação, ou seja, o tempo de verde de um é o tempo de vermelho do outro.

Além disso, foi percebido que para qualquer fluxo saturado, quando os tempos de verde entre os semáforos do estágio 0 ou do estágio 1 estão muito espaçados, o tempo médio de viagem é elevado, e quando os tempos de verde estão próximos o tempo médio de viagem é menor. Isso faz sentido, pois tempos de verde muito espaçados entre semáforos, mostram que a defasagem na rede está tão elevada a ponto de interferir no sentido do fluxo oposto, o que acaba gerando congestionamento por impedir a passagem na rotatória. Assim, foi definido um limite de cinco vezes o intervalo de incremento como defasagem máxima para cada semáforo.

Ainda, é importante ressaltar que foi considerado, para cada ciclo semaforico, um intervalo de 5s de transição do amarelo para o vermelho e 2s como vermelho geral, bem como foi configurado que cada simulação durasse uma hora do mundo virtual. A figura 2.6 mostra um exemplo de ciclo semaforico simulado.



Figura 2.6 Exemplo de Fases de um Ciclo Semaforico Simulado.

Como o relatório *Summary* traz a variável tempo médio de viagem da rede por segundo, foi necessário calcular o tempo médio de viagem de cada simulação. Este cálculo foi feito como a média de todos os tempos médios de viagem desprezando os dez minutos iniciais, pois é necessário um período inicial para carregar na simulação os veículos que já estavam rodando. Esse período de dez minutos iniciais foi definido após perceber que depois, desse intervalo, o tempo médio de viagem possui menos variações.

### 3. RESULTADOS

Segundo o CONTRAN (2014), é recomendado que o tempo de ciclo semaforico não ultrapasse 120s, por isso, foram definidos inicialmente três tempos de ciclo. O primeiro ciclo tem 94s e ele foi escolhido, de maneira aleatória, possuindo 40s de tempo de verde, 40s de vermelho e 14s de entreverdes; o segundo ciclo era para ter possuído 120s, por ser o tempo máximo recomendado pela norma, porém houve um equívoco

ele acabou possuindo 124s, o que não influenciou o resultado final, e o terceiro ciclo tem 145s por ser o tempo de ciclo oficial informado pelo DETRAN-DF para a rotatória em estudo. Também foi definido que o tempo mínimo de verde para um semáforo é de 10s, conforme a recomendação do tempo de verde de segurança do CONTRAN (2014), e que o intervalo de incremento no tempo de verde seria de 5s, pois esse intervalo é suficiente para produzir alterações no fluxo de veículos da rede e não gerar uma grande quantidade de simulações. Além disso, também foi definido que tempos de amarelo e vermelho geral são constantes a todos os ciclos e seus valores são respectivamente 5s e 2s, pois são valores comumente utilizados pelo DETRAN-DF e pelo CONTRAN.

A fim de se obter o melhor tempo de ciclo global, foram realizadas outras simulações variando o tempo de ciclo. Inicialmente foram calculados ciclos com diferença de 20s em relação aos três primeiros ciclos escolhidos, e depois foi-se variando 5s em torno do ciclo com menor tempo médio de viagem encontrado. A Figura 3.1 ilustra o gráfico com todos os tempos de ciclo simulados e seus respectivos tempos médio de viagem. É possível dizer que as diferenças do tempo médio de viagem entre os ciclos de 74s e 99s são pequenas e que o melhor tempo de ciclo encontrado é de 94s.

Tempo Médio de Viagem Por Ciclo Semaforico

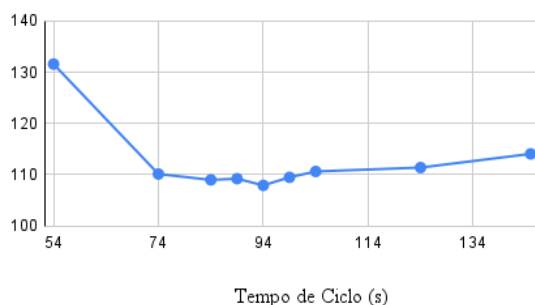


Figura 3.1 Tempo Médio de Viagem por Ciclo Semaforico.

#### 3.1 Ciclo Ótimo Webster

O ciclo de Webster foi calculado utilizando a Equação 7, e posteriormente foi necessário aumentar o ciclo em 30% para que o tempo de verde, em todos os semáforos, não fosse inferior a 10s, que é menor tempo de verde de admissível pela literatura.

$$T_{co} = 5 - \frac{1,5 t_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad (7)$$

onde  $T_{co}$  tempo de ciclo ótimo [s],  $t_p$  é o tempo

perdido total [s],  $y_i$  é a taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio "i" e "n" é o número de estágios.

Apesar da distorção do tempo de ciclo causada por esse aumento, segundo o CONTRAN (2014) "tempos de ciclo na faixa de 0,75 a 1,5 do tempo de ciclo ótimo produzem atrasos médios por veículos no máximo 20% superiores ao valor do atraso obtido com o tempo de ciclo ótimo".

### 3.2 Comparação de Cenários

Após obter os valores do tempo de verde do ciclo de Webster, foi então possível inseri-los no simulador e obter o seu respectivo tempo médio de viagem a fim de compará-lo com os cenários do ciclo atual e do melhor ciclo encontrado pelo algoritmo. Os tempos de amarelo e vermelho geral são constantes a todos os ciclos e seus valores são respectivamente 5s e 2s. A Tabela 3.1 traz essa comparação.

Tabela 3.1. Comparação Entre os Principais Ciclos Semafóricos.

| Ciclos Semafóricos     | Grupos Semafóricos | Tempo de Verde (s) | Tempo de Vermelho (s) | Tempo Médio de Viagem (s) | Tempo de Ciclo (s) |
|------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Ciclo do Algoritmo     | Sem. 1-0           | 30                 | 50                    | 107,9                     | 94                 |
|                        | Sem. 2-0           | 40                 | 40                    |                           |                    |
|                        | Sem. 3-0           | 20                 | 60                    |                           |                    |
| Ciclo Ótimo de Webster | Sem. 1-0           | 20                 | 16                    | 131,5                     | 50, 54 e 53*       |
|                        | Sem. 2-0           | 29                 | 11                    |                           |                    |
|                        | Sem. 3-0           | 16                 | 23                    |                           |                    |
| Ciclo Atual Medido     | Sem. 1-0           | 85                 | 70                    | 161,8                     | 169                |
|                        | Sem. 2-0           | 85                 | 70                    |                           |                    |
|                        | Sem. 3-0           | 85                 | 70                    |                           |                    |

Legenda: \* para os cruzamentos 1, 2 e 3 respectivamente

Assim, é possível verificar que o tempo médio de viagem do cenário calculado pelo algoritmo é 18% menor comparado ao cenário do Webster e 33% menor do que o cenário atual.

Todavia, como o ciclo de Webster é teoricamente o ciclo com menor atraso possível, existem três principais hipóteses que explicam esse resultado encontrado. A primeira hipótese é que, devido à falta de calibração, não foi possível simular o trecho viário no software com precisão. A segunda hipótese é que pode ter ocorrido algum erro na coleta de dados do fluxo de saturação, que consequentemente causou erro no cálculo do ciclo de Webster. E a terceira

hipótese é que, segundo o CONTRAN (2014), em interseções com alto grau de saturação não é recomendado o método de Webster para o cálculo do ciclo ótimo.

### 3.3 Sementes Randômicas

Uma semente (seed) é o ponto inicial para um computador gerar uma sequência de números aleatórios.

O Sumo utiliza sementes aleatórias com base na hora atual do sistema, resultando em um comportamento verdadeiramente aleatório. Entre os principais parâmetros alterados pela semente no início da simulação estão: horário da entrada de veículos na simulação, rotas escolhidas pelos motoristas, distribuição de velocidade dos veículos e comportamento do motorista.

Assim, com o intuito de se obter um comportamento constante da rede, foram rodadas cinco simulações aleatórias, com doze horas de simulação do tempo virtual, para cada um dos três cenários analisados. A Tabela 3.2 traz os tempos médios de viagem para cada simulação.

Tabela 3.2 Tabela com o Tempo Médio de Viagem dos Três Cenários Utilizando Sementes Aleatórias.

| Cenários               | Tempo Médio de Viagem (s) | Média do Tempo Médio de Viagem (s) |
|------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Ciclo do Algoritmo     | 119,45                    | 118,86                             |
|                        | 120,49                    |                                    |
|                        | 122,05                    |                                    |
|                        | 116,79                    |                                    |
|                        | 115,53                    |                                    |
| Ciclo Ótimo de Webster | 143,94                    | 144,37                             |
|                        | 144,69                    |                                    |
|                        | 145,45                    |                                    |
|                        | 143,3                     |                                    |
|                        | 144,48                    |                                    |
| Ciclo Atual Medido     | 186,83                    | 186,47                             |
|                        | 186,42                    |                                    |
|                        | 187,46                    |                                    |
|                        | 185,17                    |                                    |
|                        | 186,46                    |                                    |

Primeiramente, observa-se na Tabela 3.2 que os valores do tempo médio de viagem das diferentes sementes possuem variações pequenas, evidenciando que a rede possui um comportamento



constante. Observa-se também que os valores de tempo médio de viagem, em todas as sementes, foram superiores aos da Tabela 3.1, isso ocorreu provavelmente porque as simulações aleatórias rodaram durante doze horas com o fluxo de veículos do horário de pico, contra apenas uma hora da Tabela 3.1.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou uma busca do melhor tempo semafórico utilizando o SUMO, um simulador microscópico de código livre, para melhorar as condições de circulação da rotatória que interliga o final da Asa Norte com o Lago Norte, com o Noroeste e com a EPIA, a partir de simulações computacionais e coleta de dados seguindo as recomendações do CONTRAN e do DNIT. Para encontrar o melhor tempo semafórico, foram definidos três objetivos específicos.

O primeiro, foi desenvolver um algoritmo de varredura do tempo semafórico, o que foi feito através de dados de desempenho de relatórios de saída do SUMO e da linguagem de programação Python3. Essa rotina permitiu, utilizando a medida tempo médio de viagem, encontrar os melhores tempos de verde para cada semáforo da rede, utilizando um tempo de ciclo constante a todos os semáforos.

O segundo, foi avaliar as condições de tráfego global da rede em termos da medida de desempenho tempo médio de viagem. Foi descoberto primeiramente, o melhor tempo de ciclo comum a todos os semáforos e os seus respectivos tempos de verde utilizando o algoritmo desenvolvido. Depois foi calculado o ciclo ótimo de Webster e seu tempo médio de viagem na simulação. Por último, foi calculado o tempo médio de viagem do cenário atual. Assim foi descoberto que o ciclo do algoritmo proporcionou um tempo médio de viagem 18% inferior ao ciclo de Webster e 33% inferior ao ciclo atual.

Porém, como o ciclo de Webster é teoricamente o ciclo com menor atraso possível, evidencia-se que pôde ter ocorrido algum erro de medição do fluxo de saturação, e conseqüente erro no cálculo do ciclo, ou que a falta de calibração do simulador gerou essa distorção. Ainda, há a hipótese de que, segundo o CONTRAN (2014), em interseções com alto grau de saturação não é recomendado o método de Webster para o cálculo do ciclo ótimo, o que pôde também ter gerado esse desvio.

E o terceiro, foi utilizar sementes aleatórias com o objetivo de testar o desempenho da rede. Foram ao

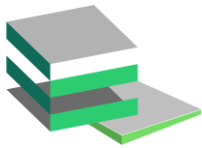
todo, quinze simulações que duraram doze horas do tempo virtual cada, e foram avaliados seus respectivos tempos médios de viagem que variaram entre si em menos de três por cento.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à UnB (Universidade de Brasília) e ao ENC (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) pelo apoio que permitiu a realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- Alobaidi, M. K.; Badri, R. M. e Salman, M. M. (2020). *Evaluating the negative impact of traffic congestion on air pollution at signalized intersection*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 737, p. 12146.
- Andrade, J. M. F. (2018). *A tecnologia e seus benefícios para o trânsito*. Disponível em: <https://portaldotransito.com.br/noticias/urbanismo/tecnologia-e-seus-beneficios-para-o-transito/>. Acesso em: 21/11/2019.
- CONTRAN (2014). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V*. Ministério das Cidades.
- Cruz, E. P. (2019). *Três em cada quatro brasileiros não planejam gastos com transporte*. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-05/76-dos-brasileiros-nao-planejam-gastos-com-transporte-diz-pesquisa>. Acesso em: 21/11/2019.
- DETRAN-DF (2021). *Tabela de programação semafórica*. Requerimento, via de lei de acesso à informação, número: 59878990.
- DNIT (2006). *Manual de Estudos de Tráfego*. Publicação IPR - 723. Ministério dos Transportes.
- Krajzewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M. e Bieker, L. (2012). *Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban Mobility*. International Journal On Advances in Systems and Measurements, v. 5, p. 128-138.
- Leal, M. C. C. (2017). *Plano Diretor de Transportes e Mobilidade do Distrito Federal (PDTU/DF): Instrumento de Mobilidade Urbana - Companhia de Planejamento do Distrito Federal*. Disponível em: [http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/TD\\_25\\_Plano\\_Sustent%C3%A1vel\\_para\\_Mobilidade\\_Urbana\\_do\\_DF.pdf](http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/TD_25_Plano_Sustent%C3%A1vel_para_Mobilidade_Urbana_do_DF.pdf). Acesso em: 26/11/2019.
- Manning, F. e Washburn, S. S. (2013). *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*. Wiley.
- Openstreetmap (2017). Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>.
- Wolshon, B. e Pande, A. (2016). *The Institute of Transportation Engineers, Traffic Engineering Handbook, 7th Edition*. John Wiley Sons Ltd.



# APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS EM AEROPORTOS

**Elohim Adonai dos Santos Nery Nunes Ribeiro\***

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

**Fabiana Serra de Arruda**

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

## RESUMO

A utilização da Matriz de Risco é um critério mínimo exigido pela OACI (Organização da Aviação Civil Internacional), que deve ser adaptado para atender às necessidades de cada aeroporto. Este artigo faz uma associação da análise de eventos de risco utilizando a matriz de riscos com uma análise numérica por meio da Lógica Fuzzy, trazendo não mais apenas a classificação linguística para os eventos (Aceitável, Tolerável ou Intolerável). São propostos quatro eventos de risco, em duas simulações de operações aeroportuárias simplificadas. A partir disso, é realizada uma pesquisa com cinco avaliadores especialistas em Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO) buscando uma avaliação numérica a cada evento. As respostas foram o input para um Sistema de Controle Fuzzy (SCF), construído com base na matriz de riscos da OACI. Os outputs deste SCF permitiram a classificação numérica dos eventos de risco. Três, dentre os quatro eventos, foram classificados como 3A pela matriz, mas com valores diferentes de saída do SCF. Os resultados mostram que é viável a utilização da ferramenta para refinamento de análise de tolerabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aeroportos, Gerenciamento de Riscos, Lógica Fuzzy, Matriz de Risco

## ABSTRACT

*The use of the Risk Matrix is a minimum criterion required by ICAO (International Civil Aviation Organization), which must be adapted to meet the needs of each airport. This article associates the analysis of risk events using the risk matrix with a numerical analysis using Fuzzy Logic, not only bringing the linguistic classification to the events (Acceptable, Tolerable or intolerable). Four risk events are proposed, in two simulations of simplified airport operations. From this, a survey is carried out with five Safety Management System (SMS) specialist evaluators seeking a numerical assessment for each event. The answers were the input for a Fuzzy Control System (FCS), built based on the ICAO risk matrix. The outputs of this FCS allowed the numerical classification of risk events. Three of the four events were classified as 3A by the matrix, but with different FCS output values. The results show that it is feasible to use the tool to refine the tolerability analysis.*

**KEYWORDS:** Airports, Risk Management, Fuzzy Logic, Risk Matrix

## 1. INTRODUÇÃO

As operações aeroportuárias são dotadas de risco em cada uma de suas etapas. Para o controle e mitigação desses riscos, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) estabelece um Sistema de Gerenciamento de Riscos à Segurança Operacional (SGSO), que engloba políticas, práticas de gestão, avaliação, revisão e ferramentas próprias com o intuito de identificar potenciais fatores que gerem prejuízos às operações aeroportuárias ou às pessoas

e/ou materiais e equipamentos envolvidos, e agir contra suas ocorrências ou consequências. Uma das ferramentas mais difundidas nas atividades do SGSO é a matriz de probabilidade e impacto.

A matriz de probabilidade e impacto (ou matriz de risco) é a ferramenta recomendada pela ICAO para o gerenciamento dos riscos e priorização de ações de mitigação, especificamente associadas aos riscos à segurança operacional de aeroportos, utilizando uma análise majoritariamente qualitativa, associada a fatores quantitativos das operações. Watanabe et al.

\*Autor correspondente: [elohim.rbr@gmail.com](mailto:elohim.rbr@gmail.com)



(2019, p. 4) discorrem em seu trabalho que a matriz de risco, apesar de sua vantagem na simplicidade de implementação, apresenta perdas em seus processos pois a análise quantitativa do risco torna-se desconhecida, visto que seus dados de entrada tratam as consequências dos perigos de maneira inteiramente qualitativa, exigindo certa meticulosidade dos especialistas para a atribuição das magnitudes de probabilidade e impacto.

A ICAO (2018, p. 2-14) possibilita que os operadores de aeródromos adaptem as tabelas e matrizes de avaliações de risco, de maneira a refletir suas necessidades e complexidades de operações, e que estas avaliações devem levar em consideração parâmetros qualitativos e quantitativos.

Para promover uma classificação e associação quantitativas de eventos de risco qualitativos surge o ferramental da Lógica Fuzzy (ou lógica difusa) que apresenta modelagens matemáticas mais próximas aos aspectos observáveis da realidade (Krykhtine, 2018, p. 22).

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma adaptação da metodologia de gerenciamento de riscos da ICAO utilizando a Lógica Fuzzy associada à Matriz de Riscos. O produto deste artigo busca auxiliar na tomada de decisão de operadores de aeroportos frente à eventos de risco diferentes, mas que pela avaliação convencional de riscos, não são facilmente diferenciados para priorização de ações, por terem classificações iguais na matriz de probabilidade e impacto.

## 2. GERENCIAMENTO DE RISCOS (ICAO)

Na aviação civil, a ICAO, em seu DOC 9859, define os pilares *safety* (segurança operacional) e *security* (segurança contra atos ilícitos) como os domínios operacionais básicos dentre aqueles que compõem o sistema da aviação geral.

A segurança operacional, foco deste trabalho, é definida pela ANAC, no Regulamento Brasileiro da Aviação Civil N°153 (RBAC 153), como:

“[...] estado no qual o risco de lesões a pessoas ou danos a bens se reduz ou se mantém em um nível aceitável, ou abaixo deste, por meio de um processo contínuo de identificação de perigos e gestão de riscos (RBAC 153, ANAC).”

O modelo ICAO do Gerenciamento da Segurança Operacional é um processo que evolui através de 4

fases principais:

- 1) Identificação de perigos e análise das consequências dos perigos;
- 2) Avaliação do risco associado;
- 3) Desenvolvimento de estratégias para eliminação ou mitigação do risco; e
- 4) Avaliação das estratégias implementadas.

Este trabalho é aplicado à fase de Avaliação dos Riscos, onde a ICAO recomenda a utilização da Matriz de Riscos.

A fase de avaliação dos riscos associa um valor numérico à realização de uma atividade, operação ou evento (FAA, 2009, p. 18). Esta definição do valor numérico, entretanto perpassa por avaliações tanto qualitativas, quanto quantitativas (Canale, 2005, p. 6). O grau de risco associado a determinada operação é comparado com a tolerância, para definir se o risco é aceitável ou não. Caso a operação planejada resulte em uma tolerância inaceitável, as atividades devem ser canceladas pelos operadores. (FAA, 2009, p. 29).

A ICAO, portanto, define três níveis de avaliação do risco associado às operações no DOC 9859 (2018, pp. 35-40): Probabilidade de Ocorrência, Severidade e Tolerância.

A avaliação da probabilidade de ocorrência é baseada na determinação da chance ou frequência que o acidente ou incidente pode ocorrer para cada perigo identificado na primeira fase do gerenciamento de riscos (Orlando, 2020, p. 31). Esta probabilidade pode ser estimada ou calculada, a depender da disposição de dados confiáveis a respeito das operações (Canale, 2005, p. 6), levando em consideração todas as medidas de controle e segurança já existentes no sistema em vigor no aeródromo (Veras, 2011, p. 62). A ICAO define uma métrica qualitativa para esta avaliação, conforme a Tabela 01.

Tabela 1. Avaliação da Probabilidade

| Frequência              | Significado   | Valor |
|-------------------------|---|-------|
| Frequente               | Provável de ocorrer várias vezes (tem ocorrido com frequência)  | 5     |
| Provável                | Provável de ocorrer algumas vezes (tem ocorrido sem frequência) | 4     |
| Remoto                  | Improvável de ocorrer, mas possível (tem ocorrido raramente)    | 3     |
| Improvável              | Muito improvável de acontecer (não há registro de ocorrências)  | 2     |
| Extremamente Improvável | Quase inconcebível de que o evento ocorra                       | 1     |

Fonte: ICAO (2018)

Feita a análise de probabilidades, a próxima etapa é a de avaliação da severidade das consequências dos perigos, com base na extensão dos possíveis danos resultados destes perigos (Orlando, 2020 e ICAO, 2018). São avaliadas as possíveis fatalidades ou danos a pessoas, operações ou equipamentos que estejam em aeronaves ou em contato direto com qualquer parte da aeronave e até mesmo na área de projeção da explosão do jato da aeronave. Ainda é realizada a análise com base em danos sofridos pela aeronave ou instalações de serviços do aeroporto (ICAO, 2018).

Para a avaliação da severidade devem ser considerados os piores cenários razoavelmente esperados como resultado para as consequências dos perigos identificados (Canale, 2005), levando em consideração quaisquer medidas de mitigação existentes (ANAC, 2019). Assim como na avaliação de probabilidades, a ICAO exemplifica uma categorização da severidade das consequências dos perigos em cinco níveis:

**(A) Catastrófica:** Aeronave/equipamento destruído; múltiplas fatalidades;

**(B) Crítica:** Larga redução das margens de segurança, dano físico ou carga de trabalho acima da capacidade operacional de desempenhar suas atividades de maneira acurada e completa; lesões sérias; graves danos a equipamentos;

**(C) Significativa:** Redução significativa das margens de segurança, redução na habilidade do operador em responder a condições operacionais adversas como resultado do aumento da carga de trabalho ou

condições que impedem sua eficiência; incidente sério; lesões às pessoas;

**(D) Pequena:** Interferência; limitações operacionais; utilização de procedimentos de emergência; incidentes menores;

**(E) Insignificante:** Consequências menores.

A combinação dos graus de probabilidade e severidade é utilizada para a definição do índice de tolerabilidade, utilizando um exemplo de matriz de risco proposto pela ICAO, alinhando as tabelas sugeridas anteriormente. A matriz de risco (Tabela 2) classifica conceitualmente os índices em 3 regiões principais de nível de risco: intolerável (vermelho), tolerável (amarelo), aceitável (verde) (Barroso, 2015, p. 22).

Tabela 2. Matriz de Risco

| Probabilidade | Severidade |    |    |    |    |
|---------------|------------|----|----|----|----|
|               | A          | B  | C  | D  | E  |
| 5             | 5A         | 5B | 5C | 5D | 5E |
| 4             | 4A         | 4B | 4C | 4D | 4E |
| 3             | 3A         | 3B | 3C | 3D | 3E |
| 2             | 2A         | 2B | 2C | 2D | 2E |
| 1             | 1A         | 1B | 1C | 1D | 1E |

Fonte: ICAO (2018)

Com base na indicação de tolerância da matriz de risco, são determinadas as ações, conforme o exemplo da ICAO:

**Intolerável:** Tomar ações imediatas para mitigação do risco ou interromper as atividades. Realizar mitigação prioritária do risco para garantir que haja controles preventivos adicionais ou melhorados para reduzir o índice de risco para um risco tolerável.

**Tolerável:** Pode ser tolerado com base na mitigação do risco. Requer uma decisão de gerenciamento para aceitar o risco.

**Aceitável:** Aceitável como é. Não necessita de ações para a mitigação do risco.

### 3. LÓGICA FUZZY

A técnica da Lógica Fuzzy, ou Lógica Difusa, amplia o horizonte de possibilidades de resposta de dispositivos eletrônicos. Ao invés de restringir esta resposta ao conjunto binário {0, 1} ou {Sim, Não}, introduz o conceito de pertinência, sendo este o grande diferencial da teoria dos números nebulosos (Krikhtine, 2018, p. 36). Este conceito se baseia na proposição de que existem alternativas intermediárias, admitindo a possibilidade de um "Quase Verdadeiro = 0,9" ou "Quase Falso = 0,1" (Rignel, 2011, pp. 8-9). Lotfi Zadeh (1978, PP. 5-8)

propõe em sua teoria que entre os limites 0 e 1 existe uma função de pertinência  $\mu(x)$  do tipo:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < a \\ \mu_A(x) & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{para } x > b \end{cases} \quad (1)$$

A função pertinência  $\mu_A(x)$  pode assumir diversas formas, a depender da distribuição analisada. A escolha da função é resultado da análise do comportamento dos parâmetros que explicam determinado fenômeno (Krykhtine, 2018, p. 28). Os casos mais utilizados são os de função pertinência triangular e trapezoidal, conforme as Figuras 1 e 2:

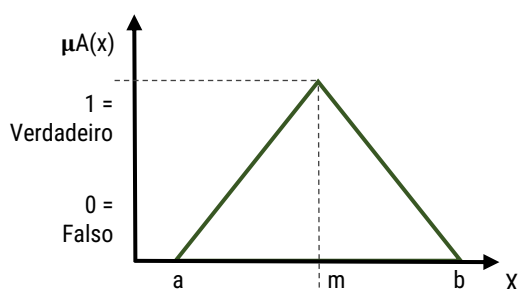


Figura 1. Exemplo de função de pertinência triangular.  
 Fonte: acervo pessoal.

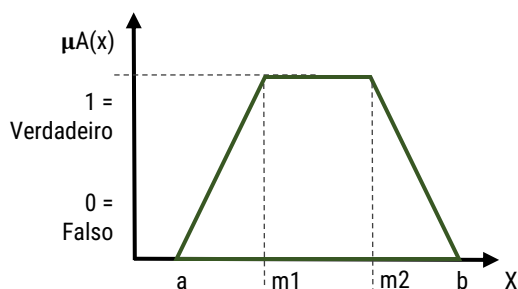


Figura 2. Exemplo de função de pertinência trapezoidal.  
 Fonte: acervo pessoal.

Onde,

a e b: mínimo e máximo valores, respectivamente, em que a função  $\mu_A(x)$  assume algum grau de pertinência;

m, m1 e m2: valor onde a função de pertinência assume seu maior valor de aderência.

As operações entre dois diferentes conjuntos fuzzy e suas respectivas funções de pertinência também são definições importantes de serem compreendidas, pois serão exploradas no decorrer deste trabalho:

- A Soma de dois conjuntos Fuzzy A e B, com funções de pertinência  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$

respectivamente, num mesmo espaço X é dada pela seguinte relação:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A, \mu_B), \text{ para todo } x \in X \quad (2)$$

- A Intersecção de dois conjuntos Fuzzy A e B, com funções de pertinência  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$  respectivamente, num mesmo espaço X é dada pela seguinte relação:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A, \mu_B), \text{ para todo } x \in X \quad (3)$$

### 3.1 Sistema de Controle Fuzzy (SCF)

Papis et al. (2019, p. 3) descrevem o sistema clássico de um controle fuzzy conforme as seguintes fases:

**a. Fuzzificação:** Converte a entrada de um valor numérico numa variável linguística, com base nas funções de pertinência, determinando um grau de pertinência a esta entrada em cada função.

**b. Inferência:** É a fase onde a pertinência do dado de saída é definida, tendo como parâmetro inicial as Regras Base, e passando por três estágios de inferência: Agregação, Ativação e Acumulação.

- Regras Base são correlações entre conjuntos fuzzy de entrada, determinando uma saída específica para diferentes combinações. Normalmente estão na forma de funções lógicas E e OU: “SE X = A1 E Y = B1 ENTÃO Z = C1”.

No contexto da aviação civil, as regras base se enquadram nos resultados da própria matriz de risco, como:

“SE Probabilidade = Frequente E Severidade = Catastrófica ENTÃO Risco = Intolerável”.

**c. Defuzzificação:** este processo é aplicado quando é necessária uma saída numérica do problema. São vários os métodos para este processo. Papis et al. citam os seguintes: Primeiro do Máximo, Último do Máximo, Centro do Máximo, Centro de Gravidade e Método da Altura.

## 4. MÉTODO

Foi realizada uma pesquisa com especialistas em SGSO em aeroportos do Brasil, com o intuito de coletar as suas avaliações para 4 eventos de risco, apresentados em duas situações distintas. Nenhum especialista teve acesso às respostas dos outros.

Os valores de Probabilidade e Severidade obtidos na avaliação dos especialistas foram utilizados como *input* para o Sistema de Controle Fuzzy, aplicado conforme o item 3.1.

Os *outputs* numéricos do SCF serviram de insumo para que fosse feito um ranqueamento dos eventos de risco, estabelecendo-se uma ordem de prioridade para a tomada de decisões.

#### 4.1 Aplicação da Pesquisa

A pesquisa foi aplicada por meio de um formulário na plataforma *SurveyMonkey*. O formulário coleta informações a respeito de: área de formação dos respondentes; ocupação no momento da pesquisa; há quanto tempo atuam com SGSO; em qual(is) estado(s) atua com SGSO; número do código do aeroporto de maior complexidade que atua (de acordo com a classificação da ICAO); letra do código do aeroporto de maior complexidade que atua (de acordo com a classificação da ICAO). Estas informações são coletadas visto que a utilização da Lógica Fuzzy tem por objetivo balizar as incertezas de avaliações de risco, e a experiência de cada profissional naturalmente gera vieses em sua avaliação individual e específica.

A avaliação de riscos no formulário é aplicada a duas simulações de operações aeroportuárias: Manutenção de Pista e Pouso de Emergência. Após a apresentação da operação, são destacados alguns eventos de risco associados a cada uma, e então os respondentes são convidados a avaliar numericamente cada evento de risco. Esta avaliação de risco foi baseada num exemplo de matriz de risco adaptada pelo Aeroporto Internacional de Incheon, na Coreia do Sul, disponibilizada como exemplo pela ICAO (2018, p. 2-14 – 2-15), destacando 3 parâmetros de perda na avaliação de severidade: Perdas Humanas (H), Perdas de Equipamentos (E) e Perdas em operações (O). Foi pedido que os avaliadores focassem em perdas de equipamentos, monetarizando esta perda em dólares, conforme a Tabela 3. A avaliação da probabilidade é dada pelo tempo de recorrência, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 3. Legenda para Avaliação de Severidade

| Código | Significado          |
|--------|----------------------|
| A      | Mais de \$10Mi       |
| B      | Entre \$1Mi e \$10Mi |
| C      | Entre \$100m e \$1Mi |
| D      | Entre \$10m e \$100m |
| E      | Menos de \$10m       |

Fonte: Aeroporto Internacional de Incheon - KOR, adaptada

Tabela 4. Legenda para Avaliação de Probabilidade

| Código | Significado                            |
|--------|--|
| 1      | Provável que o evento ocorra uma vez a |

|   |   |
|---|---|
|   | cada mês  |
| 2 | Provável que o evento ocorra uma vez a cada ano     |
| 3 | Provável que o evento ocorra uma vez a cada 5 anos  |
| 4 | Provável que o evento ocorra uma vez a cada 20 anos |
| 5 | Improvável que o evento ocorra em 20 anos           |

Fonte: Aeroporto Internacional de Incheon - KOR, adaptada

#### 4.2 Eventos de Risco Propostos

A seguir, serão apresentadas as situações propostas:

##### Situação 01 - Operação de Manutenção de Pista

Após uma precipitação de 10 minutos, está prevista uma operação para manutenção da pista, para remoção do acúmulo de água e de borracha na área de toque. A operação é em um aeroporto de pista única, que realiza cerca de 350 operações diárias de pouso e decolagem.

##### DESCRIÇÃO DOS PERIGOS ANALISADOS

Perigo 1.1) Trabalhador inexperiente entra/permanece na pista sem a autorização da TWR (do inglês "Tower" - Torre de Controle);  
 Perigo 1.2) Invasão dos motores à área lateral da pista.

##### CONSEQUÊNCIAS DOS PERIGOS

Evento 1.1) Colisão de Aeronave com veículo/pessoas;  
 Evento 1.2) Ingestão de componentes pelas turbinas e consequente falha nos motores.

##### MEDIDAS MITIGADORAS EXISTENTES

Medida 1.1) Exame prático para admissão de motoristas; Supervisão da fraseologia utilizada por motoristas e controladores; Comunicações de trabalhadores de manutenção, pilotos e TWR em VHF; Plano Operacional de Obras e Serviços (POOS).  
 Medida 1.2) Check-list de operação para os trabalhadores da manutenção

##### Situação 02 - Pouso Emergencial

Por conta de um passageiro passando mal, o piloto avalia a possibilidade de um pouso emergencial de um Boeing 747-8 num aeroporto com operação máxima de Boeing 747-400, de classificação 4E.

##### DESCRIÇÃO DOS PERIGOS ANALISADOS

Perigo 2.1) Habilidades do piloto insuficientes para realizar a frenagem no comprimento de pista disponível;

Perigo 2.2) Esforços aplicados ao pavimento além de sua resistência.

### CONSEQUÊNCIAS DOS PERIGOS

Evento 2.1) Excursão de pista;

Evento 2.2) Deterioração do pavimento da pista de pouso/decolagem ou pistas de táxi.

### MEDIDAS MITIGADORAS EXISTENTES

Medida 2.1) Monitoramento de dados de vôo; Line Operational Safety Audit - LOSA; Runway End Safety Area - RESA; Emissões de reportes de condições da pista;

Medida 2.2) Inspeção operacional rotineira da pista de pouso/decolagem; Plano de manutenção preventiva das pistas de pouso/decolagem e táxi.

## 4.3 Resultados Obtidos

Diante das situações propostas, e considerando apenas as medidas mitigadoras apresentadas no roteiro, os avaliadores propuseram valores de Severidade, considerando apenas perdas de equipamentos, em dólares, e Probabilidade, levando em conta o tempo de recorrência, em meses.

Os resultados da avaliação de severidade e probabilidade dos eventos de risco da situação 01 e situação 02 são apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente, sendo a probabilidade medida em tempo de recorrência em meses.

Tabela 5. Avaliação de severidade e probabilidade dos eventos 1.1 e 1.2

| Avalr. | Sev. 1.1 | Prob. 1.1 | Sev. 1.2 | Prob. 1.2 |
|--------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1      | \$10m    | 2         | \$10m    | 7         |
| 2      | \$50Mi   | 1         | \$100m   | 1         |
| 3      | \$100Mi  | 60        | \$100Mi  | 60        |
| 4      | \$80m    | 180       | \$100m   | 48        |
| 5      | \$100Mi  | 240       | \$100Mi  | 240       |

Fonte: respostas ao formulário

Tabela 6. Avaliação de severidade e probabilidade dos eventos 2.1 e 2.2

| Avalr. | Sev. 2.1 | Prob. 2.1 | Sev. 2.2  | Prob. 2.2 |
|--------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1      | \$10m    | 2         | \$0m      | 3         |
| 2      | \$500m   | 1         | \$100m    | 1         |
| 3      | \$100Mi  | 240       | \$60m     | 600       |
| 4      | \$8m     | 50        | \$100m    | 60        |
| 5      | \$100Mi  | 600       | \$10,13Mi | 600       |

Fonte: respostas ao formulário

A análise direta dos valores obtidos mostra discrepâncias entre as respostas. Para este trabalho, serão considerados todos os valores, para com eles realizar uma média. Desta forma, valores muito altos

reforçam a tendência do avaliador a se inclinar a uma avaliação mais crítica, e valores muito baixos denotam a perspectiva de que as medidas mitigadoras existentes na simulação já são boas alternativas para os eventos de risco analisados. Apenas foi considerado como inválido o valor nulo da severidade 2.2 para o Avaliador 1, e descartado para fazer a média.

Portanto, utilizando as médias dos valores obtidos, e então lançando estes valores nos intervalos das Tabelas 3 e 4 são atingidos os resultados abaixo:

- Evento 1.1: Severidade R\$50.018.000,00; Probabilidade 96.60; Classificação 3A
- Evento 1.2: Severidade R\$40.042.000,00; Probabilidade 71.20; Classificação 3A
- Evento 2.1: Severidade R\$41.702.000,00; Probabilidade 178.60; Classificação 3A
- Evento 2.2: Severidade R\$2.597.500,00; Probabilidade 252.80; Classificação 2B

Os resultados obtidos trazem, então, 3 eventos de risco com a mesma classificação (3A), que pela Tabela 2 são associados à categoria "Intolerável", sendo necessário desenvolver medidas mitigadoras para todos os eventos, visando reduzir sua classificação. Além disso, um dos eventos é de classificação 2B, e conseqüentemente "Tolerável", necessitando de medidas mitigatórias.

Entretanto, a classificação idêntica dos eventos de risco 1.1, 1.2 e 2.1, reforça o objetivo da pesquisa. No próximo tópico, será realizada a aplicação da Lógica Fuzzy aos valores obtidos para se promover um valor adicional à categoria utilizando a metodologia explicada no item 3.

## 4.4 Aplicação da Lógica Fuzzy

Os dados obtidos no item 4.3 são utilizados como input para o Sistema de Controle Fuzzy, como no item 3.1. O Sistema foi criado utilizando o software Scilab® em sua versão 6.1.1, com o apoio do Toolbox sciFLT.

### 4.4.1 Funções de Pertinência

Estabelecer funções de pertinência requer o entendimento claro do comportamento das variáveis em função dos parâmetros analisados. A aplicação da Lógica Fuzzy proposta neste trabalho não é uma prática cotidiana no setor da aviação civil, portanto não há estudos consolidados que demonstrem o

comportamento de Probabilidade, Severidade e Tolerabilidade de eventos de risco em função de perdas e tempo de recorrência, sendo necessário arbitrar as curvas de pertinência para prosseguimento da análise e demonstração do sistema.

As funções utilizadas levaram em consideração os intervalos das Tabelas 3 e 4. Foram arbitradas funções trapezoidais para os intervalos das extremidades, e triangulares para os intervalos centrais. Aos valores limites de Severidade descritos na Tabela 3 foi adicionada uma margem de 10% para mais e para menos deste valor. Por exemplo, para a avaliação da Severidade, o intervalo de severidade "Fraco" é compreendido pelos limites inferior e superior \$10.000,00 e \$100.000,00 respectivamente. Foi adotado um intervalo de \$9.000,00 a \$110.000,00 com a margem de 10%. Os valores centrais que representam 100% da função de pertinência de severidade foram atribuídos ao valor exatamente no centro do intervalo. O mesmo se repete a todos os valores de Severidade, seguindo os seguintes limites:

- Insignificante: Trapezoidal (-1, 0, 10000, 11000)
- Fraco: Triangular (9000, 55000, 110000)
- Moderado: Triangular (90000, 550000, 1000000)
- Grave: Triangular (900000, 5500000, 11000000)
- Catastrófico: Trapezoidal (9000000, 10000000, 100000000, 100000001)

As curvas de pertinência de Probabilidade foram realizadas com os mesmos formatos das de Severidade, entretanto, os limites dos intervalos foram tomados diferentemente. O limite inferior de um intervalo é dado como o inverso do valor que representa a variável linguística anterior. O limite superior é dado como o inverso valor que representa a variável linguística subsequente. Por exemplo, a Tabela 4 associa o valor "Remoto" como 60 meses, portanto os limites inferior e superior de sua função de pertinência são 1/12 meses (inverso do valor atribuído a Ocasional) e 1/240 meses (inverso do valor atribuído a Improvável), sendo o Remoto associado diretamente ao valor 1/60. Os intervalos das funções de Probabilidade são mostrados abaixo:

- Muito Improvável: Trapezoidal (-0.0001, 0, 0.00167, 0.00417)
- Improvável: Triangular (0.00167, 0.00417, 0.0167)
- Remoto: Triangular (0.00417, 0.0167, 0.0833)
- Ocasional: Triangular (0.0167, 0.0833, 1)
- Frequente: Trapezoidal (0.0833, 1, 1.00009,

1.0001)

Também foram constituídas as funções de pertinência para a Tolerabilidade, associando os valores dos intervalos Aceitável, Tolerável e Intolerável. Não há regra numérica para estes intervalos, portanto arbitrou-se os intervalos abaixo:

- Aceitável: Trapezoidal (-1, 0, 30, 35)
- Tolerável: Triangular (30, 50, 75)
- Intolerável: Trapezoidal (70, 80, 100, 101)

#### 4.4.2 Sistema de Controle Fuzzy

##### Fuzzificação:

Este processo é realizado de maneira direta. Um valor numérico é convertido em variável linguística, de acordo com o intervalo em que é compreendido. Naturalmente, neste processo um valor pode ser associado a mais de uma variável. Nestes casos, é avaliado o grau de pertinência deste valor para cada função, associando à variável o valor da ordenada no ponto X dado como input (probabilidade/severidade).

##### Inferência:

A inferência é primeiramente apoiada pelas regras base. Estas regras são as correlações de Severidade X Probabilidade = Tolerabilidade. Por exemplo:

Se Severidade = 5 (Catastrófica) e Probabilidade = A (Frequente), Tolerabilidade = 5A (Intolerável).

O mesmo se repete a todas as 25 combinações possíveis, que formam, cada uma, regras diferentes.

##### Defuzzificação

A Defuzzificação associa uma série de operações gráficas para trazer um resultado numérico ao output do Sistema de Controle Fuzzy. Abaixo são expostos os resultados obtidos como output para os valores de entrada já mencionados. O processo de defuzzificação utilizado foi o de centróide.

- Evento 1.1: Sev. R\$50.018.000,00; Prob. 96.60; Classif. 3A; Output 67.452
- Evento 1.2: Sev. R\$40.042.000,00; Prob. 71.20; Classif. 3A; Output 76.940
- Evento 2.1: Sev. R\$41.702.000,00; Prob. 178.60; Classif. 3A; Output 55.978
- Evento 2.2: Sev. R\$2.597.500,00; Prob. 252.80; Classif. 2B; Output 46.075

Os resultados obtidos da análise dos eventos



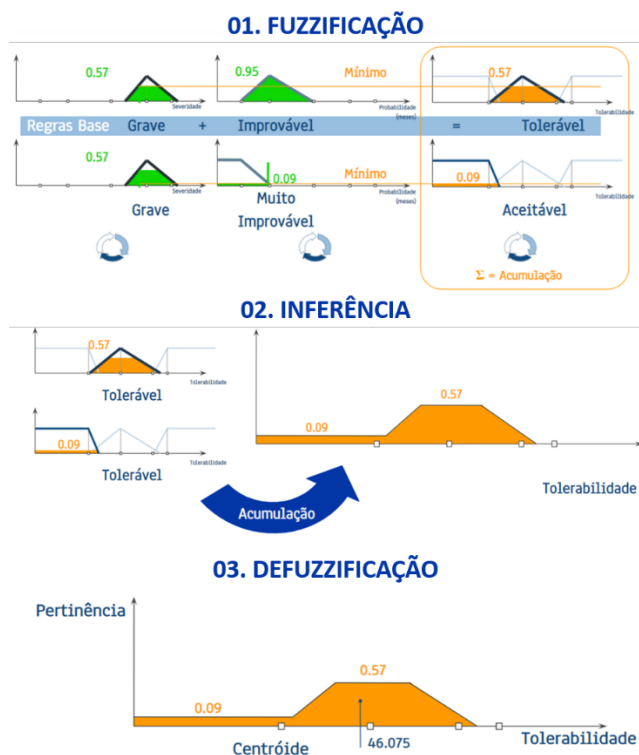
de risco trazem outro parâmetro para agregar a avaliação. Se o número associado é interpretado como potencializador do risco, considera-se que quanto maior o número, maior a criticidade do evento, e conseqüentemente, maior a necessidade de desenvolvimento de ações para eliminar ou mitigar o risco associado.

Em ordem decrescente de criticidade os eventos são classificados da seguinte forma (probabilidade com 3 casas decimais):

- ① Evento 1.2: 3A – 76.940
- ② Evento 1.1: 3A – 67.452
- ③ Evento 2.1: 3A – 55.978
- ④ Evento 2.2: 2B – 46.075

Reforça-se, portanto, que a análise numérica de eventos de risco auxilia na diferenciação das ações para uma mesma classificação. Mesmo tendo 3 eventos de mesma classificação (3A), foi possível estabelecer um ranqueamento para estes eventos, o que torna satisfatório o desempenho da ferramenta Lógica Difusa para complementar o trabalho de gerenciamento de riscos na aviação civil.

A Figura 2 ilustra graficamente o funcionamento do SCF, aplicado ao Evento 2.2.



Representação sem escala.

Figura 2: Processo gráfico do Sistema de Controle Fuzzy – Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação. (Fonte: Acervo pessoal).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi associar a avaliação de riscos com a matriz de riscos da ICAO com a Lógica Fuzzy, para se obter um parâmetro quantitativo de avaliação de eventos de risco, e promover uma diferenciação de eventos de mesma categoria na matriz. A avaliação dos eventos de risco foi realizada de maneira preventiva, considerando que os eventos nas simulações já estavam em andamento.

O estudo apresenta limitações, que reforçam a necessidade de novas pesquisas que complementem esta. Dentre as limitações, cita-se a utilização de funções de pertinência arbitrárias, o que pode gerar desvios na análise em relação ao comportamento real de evolução dos parâmetros severidade, probabilidade e tolerabilidade. Além disso, ressalta-se a restrição da quantificação de severidade a apenas prejuízo monetário, fato evitou dificuldades que seriam encontradas numa análise de campo, como a dificuldade de quantificar prejuízos humanos e operacionais.

A pesquisa aplicada obteve 5 respostas válidas de especialistas e a partir disto os eventos foram classificados de acordo com a Matriz de Risco da ICAO, além de também serem avaliados sob a perspectiva da Lógica Fuzzy, sendo providos de um valor numérico associado. Os quatro eventos foram ranqueados, estabelecendo-se uma ordem de prioridades para promoção de medidas para mitigar/eliminar os riscos. Em ordem decrescente de prioridade, os eventos foram classificados da seguinte forma: Evento 1.2: 3A – 76.940; Evento 1.1: 3A – 67.452; Evento 2.1: 3A – 55.978; Evento 2.2: 2B – 46.075.

Como foi possível observar pelas avaliações coletadas com especialistas, a avaliação de riscos carrega certa subjetividade, podendo variar um especialista para outro, mas que obteve discrepâncias significantes nesta coleta, o que torna necessário um balizador para que esta subjetividade retorne a diferenciação desejada para os eventos. Mesmo com variações nas respostas dos especialistas, a lógica fuzzy ainda colaborou para que eventos de maior gravidade fossem contemplados por sua criticidade. Os 3 eventos que colocavam em risco vidas foram classificados com severidade catastrófica, como esperado mesmo antes de uma análise numérica. Destaca-se que o objetivo principal da pesquisa foi atingido, e que ao término de análise dos resultados, foi possível ranquear os eventos de risco de acordo

com a sua criticidade, associando o output do Sistema de Controle Fuzzy, e mantendo as suas classificações de acordo com a matriz de riscos da ICAO.

A utilização da ferramenta, no entanto, mostra grande necessidade de utilização prévia de metodologias ou ferramentas para quantificar a severidade e probabilidade de um evento de risco. A disparidade entre as respostas de especialistas denota que a subjetividade ainda gera grandes diferenças nos resultados de uma avaliação de riscos. A quantidade de informação disponível para os especialistas avaliarem os eventos de risco também é considerada como um complicador para a obtenção de resultados mais concisos.

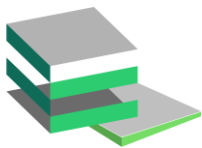
O output do Sistema de Controle Fuzzy forneceu uma avaliação numérica adequada, mas a classificação linguística foi incoerente, e foi necessário desconsiderar esta resposta, e recorrer à classificação da ICAO, trazendo uma problemática ao estudo apresentado.

Visto que a avaliação numérica de eventos de risco é um tema recorrente, e que demanda pesquisas e desenvolvimento, são recomendações para complementar este trabalho outras contribuições científicas:

- Estudar o comportamento das funções de pertinência para as classificações linguísticas da matriz de risco da ICAO (Probabilidade, Severidade e Tolerabilidade);
- Realizar a mesma avaliação numérica de forma reativa (considerando dados já consolidados sobre os eventos de risco);
- Realizar a mesma avaliação numérica de forma proativa (considerando pesquisas e ferramentas para a determinação proativa do risco associado a eventos na aviação civil).

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (2019). Guia para o Gerenciamento de Riscos da Aviação Civil.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (2020). Relatório Anual da Segurança Operacional (RASO) - 2019.
- BARROSO, Luiza Franco. Avaliação de Risco de Acidentes Aéreos em Aeroportos utilizando Simulação Monte Carlo: Uma Aplicação ao Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão. 2015. 127f. Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Transporte Aéreo e Aeroportos - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- CANALE, S; DISTEFANO, N; LEONARDI, S. A risk assessment procedure for the safety management of airport infrastructures. III Convegno Internazionale SIIV (People, Land, Environment and Transport Infrastructures), Bari, Itália, 2005.
- FAA, Federal Aviation Administration. Risk Management Handbook. Washington DC: FAA, 2009.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (Canadá). Safety Management Manual. 4 ed. 2018. E-book.
- JOHN WANG, C.H; SHI KUN TAN; KIN HUAT LOW. Collision risk management for non-cooperative UAS traffic in airport-restricted airspace with alert zones based on probabilistic conflict map. 2019. 19f. Transportation Research Part C 109. pp 19-39.
- KRYKHTINE, Fabio Luiz Peres. Abordagem Fuzzy para Otimização de Planos de Vôo. 2018, 130f. Tese de doutorado - UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro
- MAMDANI, E.H., (1977). Applications of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning using Linguistic Synthesis, IEEE Trans. Computers, Vol. 126: 1182-1191.
- ORLANDO, I.R. (2020). Proposta de uma Ferramenta para Gerenciamento de Risco em Aeroportos Localizados em Meios Urbanos. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.
- PAPIS, Mateusz; MATYJEWski, Marek. The use of fuzzy logic elements for the risk analysis in aviation. Journal of KONBIN 2019. Volume 49, n.2. pp. 31-53. Warsaw, Polônia
- POKORÁDI, László. Application of fuzzy set theory for risk assessment. Journal of KONBIN Volume 14,15; n 2, 3. pp. 195 - 204. Warsaw, Polônia.
- RIGNEL, D. G. S; CHENCI, G. P; LUCAS, C. A. Uma Introdução a Lógica Fuzzy. 2011. 12f. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica. Volume 01. N 01.
- VERAS, Alan Advíncula. ANÁLISE DE RISCOS EM AEROPORTOS: UMA ABORDAGEM PROATIVA. 2011. 105f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- WATANABE, D. K; SABBATINO, L. A; BATISTELA, G. C. Avaliação Qualitativa dos Riscos de um Projeto por meio da Lógica Fuzzy. 2019. 16f. XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Santos, São Paulo.
- ZADEH, L.A. (1978). Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1: 3-28.



# PADRÃO ESPACIAL DA MOBILIDADE DAS PESSOAS COM DEFICIÊNCIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**Samuel Wilber Sousa Oliveira\***

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

**Pastor Willy Gonzales Taco**

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

## RESUMO

O presente relatório do PIBIC apresenta os resultados dos padrões espaciais do comportamento da mobilidade das Pessoas com Deficiência (PcD) da UnB. Foram utilizados os dados coletados pela "Pesquisa Social: Condições para a Retomada de Atividades Presenciais realizada pelo Subcomitê de Pesquisa Social do CCAR" da UnB. Os dados tratados e filtrados permitiram criar uma base georreferenciada em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), onde foram localizadas as cidades satélites em que residem as PcD e o Campus em que estudam. A análise temporal dos deslocamentos num contexto pré-pandêmico possibilitou a compreensão dos desafios enfrentados pelas PcD no cotidiano da mobilidade urbana.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mobilidade, Covid-19, PcD, SIG.

## ABSTRACT

*The present report of the PIBIC presents the results of the spatial analysis of the displacement behavior of the UnB's PwD students. The database used were collected by "Pesquisa Social: Condições para a Retomada de Atividades Presenciais realizada pelo Subcomitê de Pesquisa Social do CCAR" of Universidade de Brasília. The addressed and filtered data allowed the creation of a georeferenced base in the Geographic Information System (GIS), where satellite-towns resided by students and the campus where they study were located. The temporal analysis of the displacement in a pre-pandemic context allowed the comprehension of the challenges faced by the PwD people in the routine of the urban mobility.*

**KEYWORDS:** Mobility, Covid-19, PwD, GIS.

## 1. INTRODUÇÃO

A Pandemia da COVID-19 trouxe diversas alterações na mobilidade das pessoas devido às medidas de restrições que limitavam o deslocamento e promoviam o isolamento social. Procurava-se atenuar a disseminação do vírus através da diminuição da quantidade de pessoas circulando, manter o distanciamento entre as pessoas e, por causa disso, grande parte dos meios de transporte tiveram redução na sua utilização. Assim, as relações sociais e atividades em geral que requerem da participação física das pessoas foram truncadas, afetando a população em todos seus segmentos. Talvez os grupos mais vulneráveis como idosos, crianças e Pessoas com Deficiências (PcD) foram os que experimentaram as maiores restrições durante a

pandemia (Chaabane *et al.*, 2021; Lebrasseur *et al.*, 2021; Shaer e Haghshenas, 2021).

Segundo a Lei nº 13.146 (Brasil, 2015) uma Pessoa com Deficiência é aquela que tem impedimento de longo prazo de natureza física, mental, intelectual ou sensorial, o qual, em interação com uma ou mais barreiras, pode obstruir sua participação plena e efetiva na sociedade em igualdade de condições com as demais pessoas. Sabe-se que as PcD enfrentam diversas dificuldades no cotidiano, não apenas por seus impedimentos, mas também por aspectos que permeiam de forma mais ampla as relações sociais. A soma dos vários fatores de exclusão mostra que a taxa de escolaridade das PcD é inferior à das pessoas sem deficiência. A baixa escolaridade é resultado de um expressivo quadro de exclusão, que vai desde a falta

\*Autor correspondente: [samuelwilber67@gmail.com](mailto:samuelwilber67@gmail.com)



de transporte adequado para os centros de ensino até a falta de acessibilidade, pois muitas das vezes não existem banheiros adaptados e nem elevadores (Clemente, 2004, *apud* Souza, 2008) nas instituições de ensino.

Uma instituição de grande porte na Capital Federal do Brasil é a Universidade de Brasília que reúne uma população que ultrapassa os 50 mil usuários, dos quais, aproximadamente 40 mil são alunos nas suas mais diversas áreas de estudo e com diversas características. Segundo dados do anuário estatístico 2020 do Decanato de Planejamento, Orçamento e Avaliação institucional (DPO), na UnB, as PcD, em 2019 eram 366 pessoas (UnB, 2020a) e não diferente de outros grupos populacionais, também enfrentaram as dificuldades devido à pandemia da COVID-19.

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo avaliar os padrões de mobilidade das PcD da UnB, a partir de dados coletados durante a pandemia COVID-19 e os desdobramentos da retomada pós-pandemia. Para tal objetivo, o trabalho está dividido em 5 seções. Seguida da primeira seção introdutória, na segunda seção, é apresentada a revisão da literatura sobre efeitos da pandemia COVID-19 na mobilidade das PcD. Na terceira seção, são apresentados o método e os dados utilizados no estudo. Na quarta seção, são apresentados os resultados e as análises do estudo. Finalmente, são elencadas as conclusões e recomendações.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A rotina de todas as pessoas, no mundo, foi alterada durante a pandemia devido às adaptações realizadas em função do vírus COVID-19, exigindo adequações na forma como as pessoas realizavam as suas atividades, tais como a instauração de aulas e trabalho remotos. Na esfera da mobilidade, também houve impactos, como no caso do transporte público, que passou a ser evitado devido às restrições impostas e ao temor de contaminação pelo vírus. Mas não foi só o transporte público que foi afetado, em geral, todos os meios de transporte, em maior ou menor grau sofreram reduções (Benita, 2021). Tanto as atividades que as pessoas realizavam quanto os meios que elas utilizavam para deslocar-se sofreram impactos, afetando a sociedade e em maior grau a população mais vulnerável, tais como os PcD.

Nesse sentido, estudos durante e pós-pandemia foram publicados retratando alguns desses impactos produzidos pela pandemia COVID-19 nas PcD. De Boer *et al.* (2021), por exemplo, discutem a prática de

exercícios físicos como uma forma de bem-estar na saúde das PcD. Segundo os autores, cerca de 47% das PcD são inativas, em contraposição com as demais pessoas sem deficiência, que apresentam apenas 26% de inatividade. Baseado nessa constatação, o estudo realizado pelos autores buscou caracterizar os impactos provocados pela pandemia, a fim de avaliar de que maneira a mobilidade foi alterada e como tais grupos específicos são mais afetados. Os autores constataram que houve uma piora na quantidade de atividades físicas realizadas pelas pessoas, no grau e na quantidade, e na quantidade de pessoas com quadro de sedentarismo, afetando o bem-estar da população. Determinaram também, a existência de uma relação entre os níveis de atividade física com o grau de ansiedade e depressão sentido pelas pessoas, de modo que quanto mais atividades físicas praticadas, menores os níveis dessas doenças mentais. Isto é, como a pandemia reduziu a quantidade de atividade física praticada pelas pessoas, a saúde mental foi afetada, aumentando os níveis de depressão e ansiedade, somado ainda a outros fatores como a dor sofrida pela morte de entes queridos.

Esse fator da saúde mental e os efeitos da pandemia COVID-19 foi motivo de estudo em alunos de graduação na Arábia Saudita. Alyoubi *et al.* (2021) mostraram que os alunos relataram altos níveis de depressão e ansiedade, com índices maiores para o sexo feminino, e baixa resiliência, com as mulheres tendo mais dificuldades. O sono dos alunos também foi afetado, com vários casos de insônia. Ainda, os autores determinaram a existência de uma relação entre os alunos que apresentavam condições de dificuldade de aprendizado pré-existentes, como dislexia e TDAH (Transtorno de Deficit de Atenção e Hiperatividade) e os altos níveis de ansiedade e estresse.

Quanto ao ensino para crianças e adolescentes, Chaabane *et al.* (2021) determinaram que existe um maior grau dos riscos de aumento das disparidades educacionais já existentes, devido à falta de apoio e dos recursos para aprendizagem remota, principalmente quando tratamos da população mais pobre ou ainda PcD. Ao passo que as escolas foram fechadas, muitos jovens perderam acesso aos recursos essenciais para sua saúde e bem-estar que eram fornecidos pelas instituições educacionais. A prestação de serviços de saúde, que tinham como base a escola, os programas de nutrição para as famílias mais carentes são recursos essenciais para crianças com deficiência, incluindo o envolvimento

com educadores especializados e ambientes de aprendizagem estruturados.

### 3. MÉTODO E DADOS

Para analisar os efeitos da Pandemia da COVID-19 na mobilidade dos discentes PcD da UnB, foram utilizados os dados coletados pela “Pesquisa Social: Condições para a Retomada de Atividades Presenciais” realizada pelo Subcomitê de Pesquisa Social do Comitê de Coordenação das Ações de Recuperação - CCAR (UnB, 2020b). Os dados obtidos em formato csv foram tratados e filtrados a fim de representar a população alvo do estudo, totalizando 211 PcD que estudam nos diversos campi da UnB. A partir desses dados, procedeu-se a representação espacial dos deslocamentos das PcD, das RA em direção aos campi da Universidade de Brasília, utilizando-se o software de Sistema de Informações Geográficas ArcGIS. A análise espacial realizada levou em consideração os deslocamentos feitos pelas PcD num contexto pré-pandêmico, junto à sua opinião sobre a pandemia e a mobilidade para um contexto pós-pandêmico. Ainda, na análise temporal dos deslocamentos, foi utilizado o tempo médio das viagens feitas pelas PcD.

### 4. RESULTADOS E ANÁLISE

A seguir são apresentados os resultados com a caracterização da distribuição das PcD por campus Darcy Ribeiro, Gama, Planaltina e Ceilândia, assim como a representação espacial dos deslocamentos por modo de transporte.

#### 4.1 Caracterização das PcD

Na Figura 1, é apresentada a distribuição das PcD, segundo o campus onde realizam suas atividades. Observa-se que a maior proporção tem como destino das suas atividades de estudo o Campus Darcy Ribeiro, com 65,96% no período diurno e 21,81% no período noturno, totalizando 87,77%. Segue o Campus de Ceilândia, com 4,26% unicamente no período diurno.

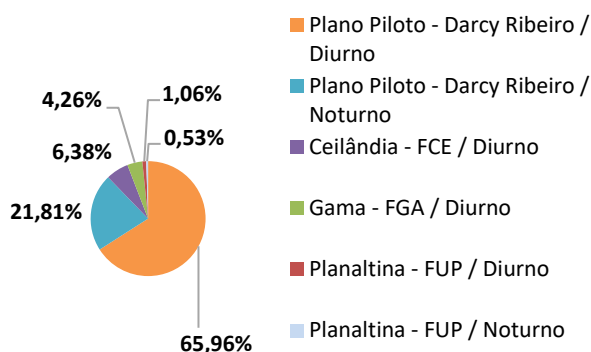


Figura 1. Distribuição das PcD pelos Campi.  
Fonte: Os Autores, 2022.

Na Figura 2, é apresentada a distribuição das PcD segundo o lugar onde moram, no caso, por Região Administrativa (RA). Como observado, no Plano Piloto se concentram a maior proporção das PcD, pois em tal RA, moram 17% do total. Ainda, se observa que em 31 das RA do DF mora ao menos uma PcD.

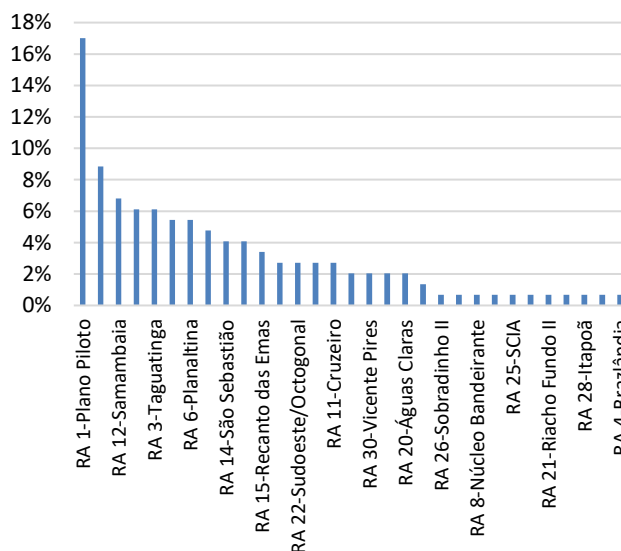


Figura 2. Região administrativa de residência das PcD.  
Fonte: Os Autores, 2022.

Quanto ao modo de transporte utilizado pelas PcD para se deslocarem, existe uma prevalência do transporte público por ônibus (57%) e automóvel próprio (21%), somando 78% (Figura 3).

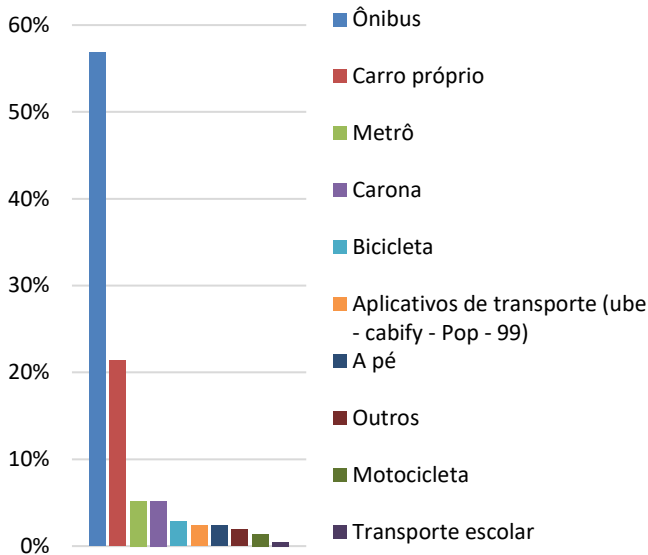


Figura 3. Distribuição dos modos de transporte utilizados pelas PcD para ir e/ou voltar dos Campi  
 Fonte: Os Autores, 2022.

#### 4.2 Distribuição espacial dos deslocamentos das PcD

A representação espacial dos deslocamentos foi gerada utilizando-se da matriz origem-destino das viagens realizadas por modo de transporte. A origem e destino do local de moradia das PcD foi o centroide da RA. Para o caso específico do Plano Piloto, o centroide da RA, pela sua forma geométrica, coincide com a posição do Parque de Brasília. Com isso, se faz necessário observar este fato para uma adequada interpretação dos mapas com as linhas de desejo. No caso dos campi, para a localização da sua posição no espaço geográfico, foram utilizadas as coordenadas geográficas correspondentes em SIRGAS 2000, UTM 23S.

Assim, nas Figura 4 e 5 são apresentadas as linhas de fluxo das viagens realizadas pelas PcD entre a RA onde moram e os campi da UnB onde realizam suas atividades. Como observado na Figura 4, os pares origem e destino do Plano Piloto - Campus Darcy Ribeiro e Taguatinga - Campus Ceilândia apresentam o maior fluxo de viagens em comparação aos outros pares origem e destino. Ainda, a maior distância de deslocamento está entre os pares origem e destino de Gama - Campus Darcy Ribeiro e Planaltina - Campus Darcy Ribeiro. Já na Figura 5, é representado o deslocamento espacial pelo modo transporte público. As RAs que apresentam o maior fluxo em direção ao Campus Darcy Ribeiro são Samambaia, Ceilândia, Planaltina e Plano Piloto.

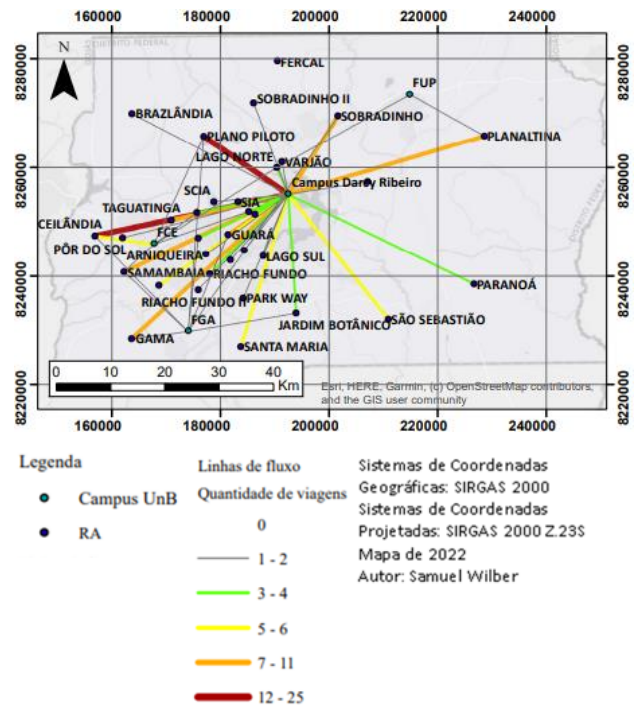


Figura 4. Linhas de desejo das viagens realizadas pelas PcD considerando todos os modos de transporte.  
 Fonte: Os Autores, 2022.

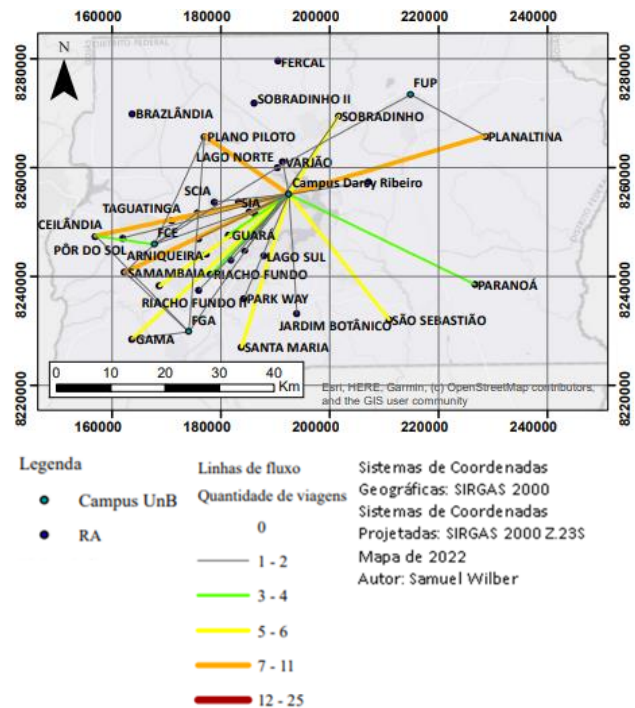


Figura 5. Linhas de desejo das viagens realizadas pelas PcD considerando somente transporte público.  
 Fonte: Os Autores, 2022.

Na Figura 6, observa-se a distribuição espacial das viagens por automóvel das PcD, com alta prevalência para o eixo Plano Piloto - Campus Darcy Ribeiro. Na Figura 7, os fluxos correspondem a outros modos

diferentes dos anteriormente apresentados. Novamente, o Campus Darcy Ribeiro aparece como destino e origem dos fluxos, com o Plano Piloto sendo o de maior proporção.

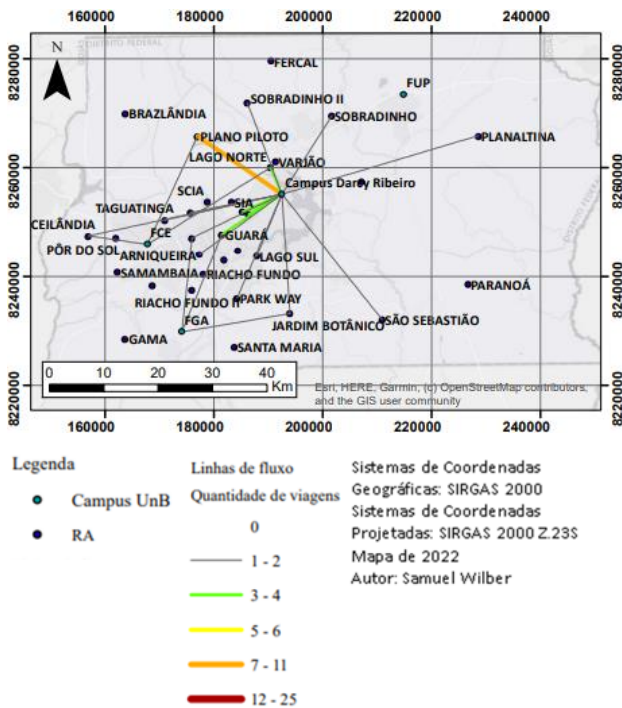


Figura 6. Linhas de desejo das viagens realizadas pelas PcD considerando o modo automóvel.  
 Fonte: Os Autores, 2022.

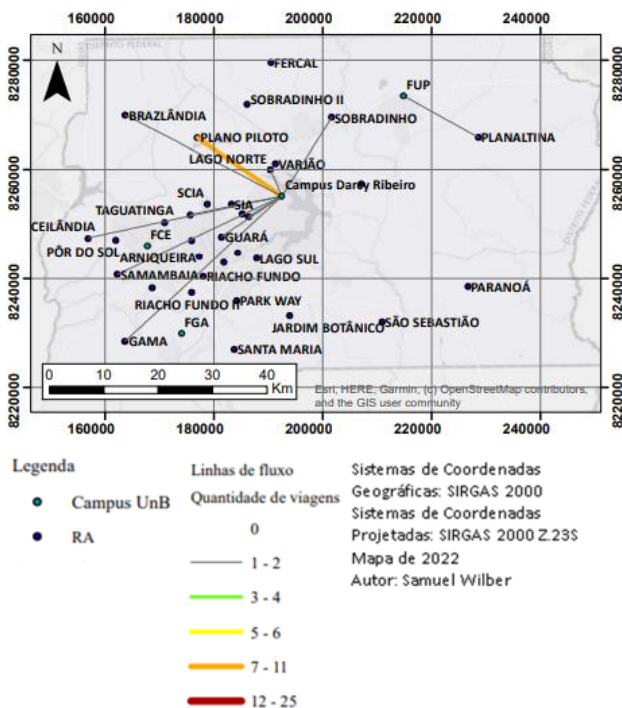


Figura 7. Linhas de desejo das viagens realizadas pelas PcD considerando outros modos de transporte (aplicativo, a pé, etc.).  
 Fonte: Os Autores, 2022.

### 4.3 Tempo de deslocamento das viagens pelas PcD

Os tempos médios das viagens realizadas por transporte público (TP) e veículo particular (VP) entre as RA de origem e os campi da Universidade foram calculados fazendo uso do Google Maps, tendo como referência de partida a segunda-feira às 7 horas da manhã. Ainda, foi realizado um ajuste para os locais de início das viagens, como por exemplo, no caso da RA Plano Piloto, em que foi considerada como ponto de origem da viagem em direção ao Campus Darcy Ribeiro a Rodoviária do Plano Piloto (Tabela 1).

Tabela 1 - Tempo médio das viagens realizadas entre as RAs e os Campus da UnB

| Região Administrativa | Tempo médio até Darcy Ribeiro |              | Tempo médio até FCE |        | Tempo médio até FGA |        | Tempo médio até FUP |    |
|-----------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|----|
|                       | TP                            | VP           | TP                  | VP     | TP                  | VP     | TP                  | VP |
| CEILÂNDIA             | 2 h e 6 min                   | 1 h e 15 min | 21 min              | 16 min | 2 h e 45 min        | x      | x                   | x  |
| PÔR DO SOL            | 2 h e 30 min                  | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| ARNIQUEIRA            | x                             | 45 min       | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| TAGUATINGA            | 2 h                           | 50 min       | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| CRUZEIRO              | 51 min                        | 28 min       | 1 h e 36 min        | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| SAMAMBAIA             | 1 h e 59 min                  | x            | 49 min              | x      | 2 h e 2 min         | x      | x                   | x  |
| RIACHO FUNDO          | 1 h e 40 min                  | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| RECANTO DAS EMAS      | 2 h e 9 min                   | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| LAGO SUL              | x                             | 18 min       | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| LAGO NORTE            | x                             | 16 min       | 2 h e 28 min        | 1 h    | x                   | x      | 2 h e 22 min        | x  |
| CANDANGOLÂNDIA        | 1 h e 15 min                  | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| RIACHO FUNDO II       | 2 h e 4 min                   | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| SUDOESTE/OCTOGONAL    | x                             | 28 min       | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| ÁGUAS CLARAS          | 1 h e 41 min                  | 50 min       | x                   | x      | x                   | 55 min | x                   | x  |
| PLANO PILOTO          | 33 min                        | 14 min       | 1 h e 43 min        | 55 min | 1 h e 14 min        | x      | x                   | x  |
| BRAZLÂNDIA            | x                             | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| SOBRADINHO            | 1 h e 18 min                  | 28 min       | x                   | x      | 2 h e 55 min        | x      | x                   | x  |
| PLANALTIMA            | 2 h e 30 min                  | 1 h e 20 min | x                   | x      | x                   | x      | 30 min              | x  |
| NÚCLEO BANDEIRANTE    | 1 h e 20 min                  | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| GUARÁ                 | 1 h e 23 min                  | 35 min       | x                   | x      | x                   | 35 min | x                   | x  |
| SCIA                  | 30 min                        | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| SOBRADINHO II         | x                             | 55 min       | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| VARJÃO                | 51 min                        | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| PARK WAY              | 1 h e 9 min                   | 28 min       | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| ITAPOÁ                | 1 h e 43 min                  | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| SIA                   | x                             | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| VICENTE PIRES         | 2 h e 4 min                   | 40 min       | 1 h e 20 min        | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| FERCAL                | x                             | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| GAMA                  | 3 h e 49 min                  | x            | x                   | x      | 29 min              | x      | x                   | x  |
| SANTA MARIA           | 2 h e 4 min                   | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| JARDIM BOTÂNICO       | 1 h e 42 min                  | 35 min       | x                   | x      | x                   | 50 min | x                   | x  |
| SÃO SEBASTIÃO         | 1 h e 59 min                  | 50 min       | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |
| PARANOÁ               | 2 h e 2 min                   | x            | x                   | x      | x                   | x      | x                   | x  |

"TP" = transporte público; "VP" = veículo próprio; "x" = não existem viagens realizadas

Percebe-se que os tempos médios das viagens das PcD variam dependendo do tipo de modo de transporte e campi de destino, podendo

sobrepasar das 2 horas de viagem.

#### 4.4 Discussão em relação ao período pós-pandêmico

Dos mapas espaciais, fica evidente a distância entre o lugar de moradia e a localização do Campus Darcy Ribeiro como um fator imprescindível para análise da mobilidade das PcD. No cenário pré-pandemia, observa-se que a maioria dos entrevistados em questão moram longe de seus locais de atividade (estudo, trabalho), e que a maior parte dessas pessoas depende de transporte público.

No cenário da pandemia, todas as atividades foram realizadas de forma remota, não havendo sido realizado deslocamentos por parte das PcD. Além disso, a retomada das atividades levou um tempo de dois anos, com o qual muitas das pessoas que entraram na UnB ficaram estudando de forma remota sem nunca terem pisado nos respectivos campi.

O entendimento do que pode ocorrer na retomada das atividades no cenário pós-pandemia pode ser motivo de avaliação considerando as respostas as PcD na “Pesquisa Social de Dados”. Nas respostas, percebe-se resposta favorável à permanência do estilo de aula remoto, diferente do que os não PcD responderam. Pode ser que tal resposta seja resultado das dificuldades que as PcD enfrentam ao terem que fazer seus deslocamentos em direção à Universidade, ou até mesmo pela insegurança causada pela infecção do vírus ou suas variantes.

#### 5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os estudos da revisão da literatura mostraram que as PcD apresentaram maior vulnerabilidade na saúde mental quando comparados a pessoas sem deficiência. Assim, o impacto negativo produzido pela pandemia de COVID-19 nas PcD é uma questão de saúde pública que gera a necessidade de fornecer apoio e orientação adicional às PcD para ajudá-las a se tornarem e permanecerem fisicamente ativas e bem em todo tempo e espaço. Ainda, estudos futuros devem focar as consequências e necessidades específicas dessa população vulnerável para garantir sua inclusão nas recomendações de saúde pública e nos planos de mobilidade e estarem na pauta de discussão pelos formuladores de políticas públicas.

A avaliação espacial dos deslocamentos das PcD mostra que esse grupo enfrenta os mesmos problemas que enfrenta a população sem deficiências. Isso mostra que os sistemas de

transporte e a forma como são elaboradas as políticas de ensino superior devem se articular para oferecer alternativas que melhorem as condições de deslocamento das PcD. Desta forma, a sociedade como um todo terá como resultado um atendimento saudável e seguro.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de Iniciação Científica, à Universidade de Brasília (UnB), a qual foi vital para tal estudo; além do professor Pastor Willy Gonzales Taco, cujo apoio foi imprescindível.

#### REFERÊNCIAS

- ALYOUBI, A.; HALSTEAD, E.J.; ZAMBELLI, Z.; DIMITRIOU, D. (2021). *The Impact of the COVID-19 Pandemic on Students' Mental Health and Sleep in Saudi Arabia*. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, Article 9344.
- ASHOUR, L.A.; DANNENBERG, A.L.; SHEN, Q.; FANG, X.; WANG, Y. (2021). *Paratransit services for people with disabilities in the Seattle region during the COVID-19 pandemic: Lessons for recovery planning*. *Journal of Transport & Health*, 22, Article 101115.
- BENITA, F. (2021). *Human mobility behavior in COVID-19: A systematic literature review and bibliometric analysis*. *Sustainable Cities and Society*, 70, Article 102916.
- BRASIL (2015). Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência), Lei 13.146 de 6 Julho de 2015 Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2015/lei/13146.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/13146.htm)>. Acesso em: 21/03/2022.
- BRASIL, MINISTÉRIO PÚBLICO DO TRABALHO (2020). NOTA-TÉCNICA CONJUNTA 07/2020 – PGT/COORDIGUALDADE. Disponível em: <<https://www.feac.org.br/wp-content/uploads/2020/04/NT-sobre-trabalhador-com-defici%C3%Aancia-Pandemia-Convid-19.pdf>>. Acesso em: 21/03/2022.
- CHAABANE, S.; DORAISWAMY, S.; CHAABNA, K.; MAMTANI, R.; CHEEMA, S. (2021). *The Impact of COVID-19 School Closure on Child and Adolescent Health: A Rapid Systematic Review*. *Children* 2021, 8(5), Article 415.
- CLEMENTE, C.A. (2004). *Trabalhando com a diferença: Responsabilidade social & inclusão de portadores de deficiência*. Brasília: Edição especial. Ministério do Trabalho e Emprego.
- DE BOER, D.R.; HOEKSTRA, F.; HUETINK, K.I.M.; HOEKSTRA, T.; KROPS, L.A.; HETTINGA, F.J. (2021). *Physical Activity, Sedentary Behavior and Well-Being of Adults with Physical Disabilities and/or Chronic*



*Diseases during the First Wave of the COVID-19 Pandemic: A Rapid Review. Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, Article 6342.

GOOGLE MAPS (2022). Disponível em: < Google Maps >. Acesso em 12/09/2022.

LEBRASSEUR, A.; FORTIN-BÉDARD, N.; LETTRE, J.; BUSSIERES, E.; BEST, K.; BOUCHER, N.; HOTTON, M.; BEAULIEU-BONNEAU, S.; MERCIER, C.; LAMONTAGNE, M.; ROUTHIER, F. (2021). *Impact of COVID-19 on people with physical disabilities: A rapid review. Disability and Health Journal*, 14, Article 101014.

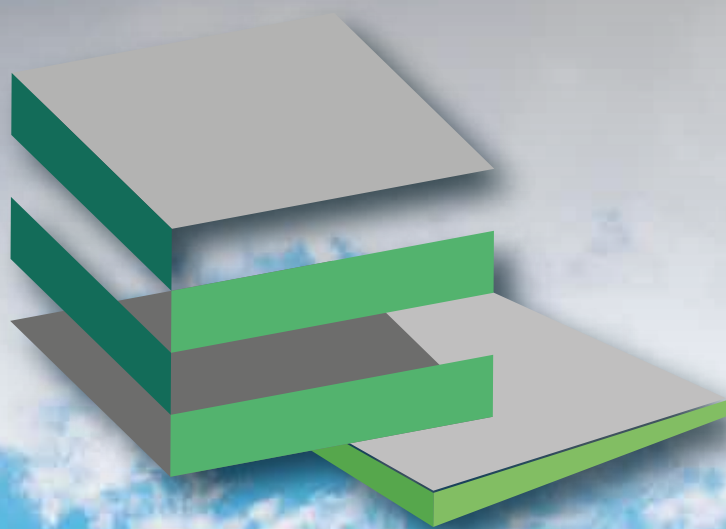
ROSA, F.R.P.A.C.; DE FIGUEIREDO, B.Q.; RODRIGUES, B.; ROEHRS, D.D.; DE MATOS, J.V.M.; GONÇALVES, L.O.; MEDEIROS, V.L.O. (2021). Os impactos da pandemia de COVID-19 na mobilidade urbana: uma revisão narrativa de literatura. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 16, Article e460101623917.

SHAER, A; HAGHSHENAS, H. (2021). *The impacts of COVID-19 on older adults' active transportation mode usage in Isfahan, Iran. Journal of Transport & Health*, 23, Article 101244.

SOUZA, J.H.O. (2008). UnB e Deficiência: um perfil dessa relação intermediada pelo PPNE.

UNB (2020a). DPO - Decanato de Planejamento, Orçamento e Avaliação institucional. Anuário Estatístico 2020. Disponível em: <<https://dpo.unb.br/>>. Acesso em: 20/01/2022.

UNB (2020b). Pesquisa Social: Condições para a Retomada de Atividades Presenciais. Disponível em: <<http://repositoriocovid19.unb.br/pesquisa-social/>>. Acesso em: 21/03/2022.



 **PET**  
Engenharia civil





**PROF.ª DR.ª RENATA  
CONCIANI NUNES**

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



**PROF. DR. VINÍCIUS RESENDE  
DOMINGUES**

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

# **COMISSÃO AVALIADORA**

**GEOTECNIA**



**M.SC. ANA PAOLA DO  
NASCIMENTO DANTAS**

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



**M.SC. MOISÉS ANTÔNIO  
DA COSTA LEMOS**

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



**PROF. DR. FÁBIO ZANCHETTA**

<http://lattes.cnpq.br/0252376413657461>



**PROF. DR. PHILIPPE**

**BARBOSA SILVA**

<http://lattes.cnpq.br/0702780795925115>

# COMISSÃO AVALIADORA

TRANSPORTES



**M.SC. MARCELO  
PEREIRA ALMEIDA**

<http://lattes.cnpq.br/1037089976151399>



**M.SC. GABRIEL  
ANDRADE LANZARO**

<http://lattes.cnpq.br/8372428289484593>



**PROF. M.SC. ARTHUR  
TAVARES SCHLEICHER**

<http://lattes.cnpq.br/3450296063299235>

**COMISSÃO  
AVALIADORA**  
RECURSOS HÍDRICOS



**M.SC. ANDRÉIA DE ALMEIDA**

<http://lattes.cnpq.br/1468780491856221>



**PROF. DR. EVANGELOS DIMITRIOS  
CHISTAKOU**

<http://lattes.cnpq.br/0698123475561025>

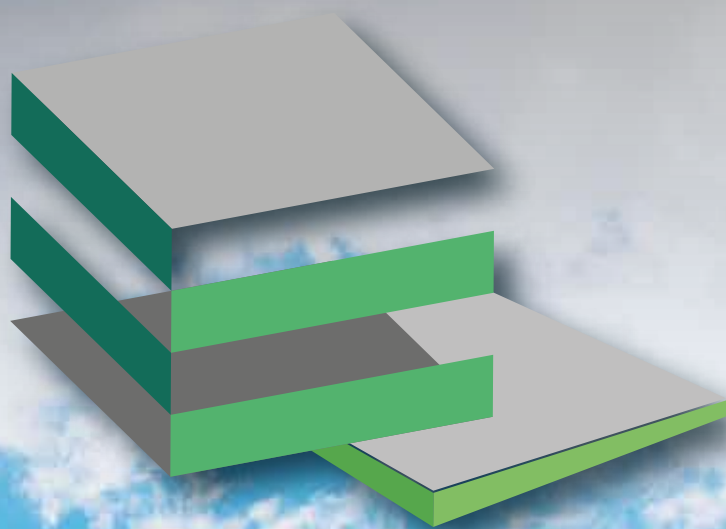
# **COMISSÃO AVALIADORA**

**REPRESENTAÇÃO  
GRÁFICA**



**PROF. DR. FÉLIX ALVES DA SILVA  
JUNIOR**

<http://lattes.cnpq.br/1214457416002858>



 **PET**  
Engenharia civil

