

ENGENHARIA:
A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XXVI



Plínio Ferreira Pires

Engenharia: a máquina que constrói o futuro – Volume XXVI

26ª ed.

Goiâna-GO
Editora Conhecimento Livre

Copyright© 2026 por Editora Conhecimento Livre

26ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pires, Plínio Ferreira
P638E Engenharia: a máquina que constrói o futuro – Volume XXVI

/ Plínio Ferreira Pires. – Goiânia-GO

Editora Conhecimento Livre, 2026

152 f.: il
DOI: 10.37423/2026.edcl1311
ISBN: 978-65-5367-798-2
Modo de acesso: World Wide Web
Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Pires, Plínio Ferreira II. Título

CDU: 620

https://doi.org/10.37423/2026.edcl1311

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Conselho Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

Editora Conhecimento Livre
Goiânia-GO
2026

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 6
RUPTURAS EM ATERROS SANITÁRIOS E MÉTODOS DE ANÁLISE PARA ESTABILIDADE GEOTÉCNICA
Ana Leticia Ramos Bezerra
Daniel Epifânio Bezerra
Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia
Gabriel Araújo Paes Freire
Milena Cristina Rocha de Souza
Wlysses Wagner Medeiros Lins
Rivaildo da Silva Ramos Filho
Lara Pereira Tavares Mendes
Cláudio Luis Aráujo Neto
Amanda Paiva Farias
DOI 10.37423/260611078

CAPÍTULO 2 35
CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS EXPANSIVOS NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA
Gilson Gabriel Teixeira Varela
Ana Leticia Ramos Bezerra
Daniel Epifânio Bezerra
Gabriel Araújo Paes Freire
Milena Cristina Rocha de Souza
Lara Pereira Tavares Mendes
Romik Wilson de Assis Júnior
Leonardo Rodrigues Guedes
Allan Kewen Camara de Oliveira
Mateus Valdevino de Siqueira
DOI 10.37423/260611095

CAPÍTULO 3 54
ESTUDO DA COMPOSTAGEM DOMÉSTICA COMO INSTRUMENTO DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E MELHORIA DA QUALIDADE DE VIDA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
Juliana Lima da Silva
Robson José Silva Robson José Silva
Ana Leticia Ramos Bezerra
Ketlyn Jaquelize Lima Sousa
Cláudio Luis Aráujo Neto
Amanda Paiva Farias
Adla Jamilly Vieira Felipe
Gabriel Araújo Paes Freire
Áurea Kelly Jordão Borges de Araújo
Pablo Rafael Ferreira Ramos
DOI 10.37423/260611096

CAPÍTULO 4 93
LOGÍSTICA REVERSA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ALTERNATIVAS PARA A INDÚSTRIA BRASILEIRA E VALE DO SÃO FRANCISCO
Elvis Gustavo Silva Araújo
Flávio Souza Fernandes
Lucas Soriano de Souza
Manoel de Oliveira Santos Sobrinho
DOI 10.37423/260611100

CAPÍTULO 5 105
MODELAGEM DE UM CIRCUITO RLC CHAVEADO DE DUAS MALHAS E VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL VIA MATLAB/SIMULINK®
Júlio Cesar Batista de Souza
Samara Gomes Badalotti
Flávio Luiz Rossini
DOI 10.37423/260711108

CAPÍTULO 6 129
PERFIL DOS EGRESSOS COMO SUBSÍDIO À AVALIAÇÃO DE CURSOS DE GRADUAÇÃO: UM ESTUDO NA LICENCIATURA EM MATEMÁTICA DA UFCG – CAMPUS CUITÉ (PB)
Alecxandro Alves Vieira
Paulo César Macedo Dantas
DOI 10.37423/260711113

Capítulo 1

10.37423/260611078

RUPTURAS EM ATERROS SANITÁRIOS E MÉTODOS DE ANÁLISE PARA ESTABILIDADE GEOTÉCNICA

Ana Leticia Ramos Bezerra — *Universidade Federal de Pernambuco*

Daniel Epifânio Bezerra — *Universidade Federal de Campina Grande*

Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia — *Universidade Federal de Campina Grande*

Gabriel Araújo Paes Freire — *Universidade Federal de Campina Grande*

Milena Cristina Rocha de Souza — *Universidade Federal de Pernambuco*

Wlysses Wagner Medeiros Lins — *Universidade Federal de Pernambuco*

Rivaildo da Silva Ramos Filho — *Universidade Federal de Campina Grande*

Lara Pereira Tavares Mendes — *Universidade Federal de Campina Grande*

Cláudio Luis Araújo Neto — *Universidade Federal do Maranhão*

Amanda Paiva Farias — *Universidade Federal de Campina Grande*

RESUMO

A estabilidade de taludes em aterros sanitários é um aspecto fundamental para a segurança operacional e ambiental desses empreendimentos. Este trabalho tem como objetivo apresentar o estado da arte sobre a ruptura de taludes em aterros sanitários, abordando os principais mecanismos de instabilidade, fatores condicionantes, casos históricos de ruptura e métodos empregados na avaliação da estabilidade geotécnica. A pesquisa consistiu em uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, realizada a partir de estudos nacionais e internacionais publicados na literatura especializada. Os resultados indicam que elevados níveis de lixiviado, poropressões excessivas, compactação inadequada dos resíduos, baixa capacidade de suporte da fundação e falhas nos sistemas de drenagem figuram entre as principais causas de instabilidade. Verificou-se ainda que os métodos de equilíbrio limite são amplamente utilizados nas análises de estabilidade e que o monitoramento geotécnico desempenha papel essencial na prevenção de falhas. Conclui-se que a integração entre projeto, operação e monitoramento é fundamental para reduzir riscos e aumentar a segurança dos aterros sanitários.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos; segurança geotécnica; fatores de instabilidade; monitoramento geotécnico; análise de estabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), associado às restrições ambientais e territoriais para implantação de novos aterros sanitários, tem intensificado a busca por estratégias capazes de ampliar a vida útil dos empreendimentos existentes. Entre essas alternativas, destaca-se o alteamento dos maciços de resíduos, prática que permite otimizar o uso das áreas disponíveis e aumentar a capacidade de disposição final (Ghasemian; Karimpour-Fard; Nadi, 2024). Entretanto, embora apresente vantagens econômicas e operacionais, essa solução impõe maiores solicitações aos maciços e amplia os desafios relacionados à segurança geotécnica durante as fases de operação, encerramento e pós-encerramento (Lü et al., 2018).

A preocupação com a estabilidade de aterros sanitários ganhou destaque internacional após a ocorrência de diversos acidentes de grande magnitude registrados nas últimas décadas. Eventos envolvendo deslizamentos de resíduos resultaram em perdas humanas, danos ambientais severos e elevados prejuízos econômicos, evidenciando a necessidade de aperfeiçoamento dos critérios de projeto, operação e monitoramento dessas estruturas (Li; Chen; Lin, 2023). Casos emblemáticos demonstram que falhas em aterros sanitários podem assumir proporções comparáveis às de grandes desastres geotécnicos, reforçando a importância da compreensão dos mecanismos envolvidos nos processos de ruptura.

Nesse contexto, a estabilidade de taludes constitui uma das principais preocupações da engenharia geotécnica aplicada aos aterros sanitários, acompanhando todas as fases do empreendimento, desde a concepção do projeto até o encerramento das atividades e o monitoramento pós-operacional (Gao et al., 2018). A ocorrência de rupturas está associada a uma combinação de fatores, incluindo características dos resíduos sólidos urbanos, acúmulo de lixiviados, elevação das pressões neutras, geração de biogás, falhas nos sistemas de drenagem, inclinações excessivas dos taludes e condições climáticas adversas. A interação entre esses fatores torna o comportamento mecânico dos maciços de resíduos significativamente mais complexo quando comparado aos taludes convencionais de solo.

Com o avanço das pesquisas na área, diferentes métodos têm sido empregados para avaliar a estabilidade geotécnica de aterros sanitários. As abordagens mais difundidas incluem os métodos de equilíbrio limite, amplamente utilizados em análises bidimensionais, além de modelagens numéricas e análises tridimensionais que permitem representar com maior fidelidade as condições geométricas e geotécnicas dos maciços. Apesar dos avanços observados, ainda existem desafios relacionados à

caracterização dos resíduos sólidos urbanos, à representação das condições hidráulicas internas e à previsão dos mecanismos de ruptura em diferentes contextos operacionais.

Diante da relevância do tema e da necessidade de consolidar o conhecimento produzido nas últimas décadas, torna-se importante reunir e sistematizar as principais contribuições da literatura científica acerca das falhas em aterros sanitários. A compreensão dos mecanismos de instabilidade, dos fatores condicionantes e das metodologias utilizadas para análise da estabilidade constitui um importante subsídio para o desenvolvimento de projetos mais seguros e para o aprimoramento das práticas de gestão desses empreendimentos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o estado da arte sobre a ruptura de taludes em aterros sanitários, abordando os principais mecanismos de instabilidade, fatores condicionantes, casos históricos de ruptura e métodos empregados para avaliação da estabilidade geotécnica.

2 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, desenvolvida com o objetivo de reunir, analisar e sistematizar o conhecimento científico disponível sobre a ruptura de taludes em aterros sanitários. A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão da literatura especializada, abrangendo estudos nacionais e internacionais relacionados aos mecanismos de instabilidade, fatores condicionantes, casos históricos de ruptura e métodos utilizados na avaliação da estabilidade geotécnica dessas estruturas.

A etapa de levantamento bibliográfico foi realizada em 2024, a partir da consulta a bases de dados científicas e repositórios acadêmicos amplamente utilizados nas áreas de engenharia geotécnica e ambiental, incluindo Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. As buscas foram conduzidas por meio de combinações de termos em português e inglês, tais como: “aterro sanitário”, “estabilidade de taludes”, “ruptura de taludes”, “resíduos sólidos urbanos”, “landfill stability”, “landfill slope failure”, “municipal solid waste”, “waste slope stability” e “landfill landslide”.

Foram considerados artigos científicos, teses, dissertações e documentos técnicos que abordassem análises de estabilidade de aterros sanitários, mecanismos de ruptura, monitoramento geotécnico, métodos de cálculo e estudos de caso de falhas reportadas na literatura. A seleção dos materiais priorizou publicações diretamente relacionadas ao comportamento geotécnico dos RSU, à influência

das condições hidráulicas internas, aos métodos de equilíbrio limite e às implicações dos acidentes para o projeto, a operação e o monitoramento de aterros sanitários.

As informações obtidas foram organizadas e analisadas de forma temática, contemplando: (i) monitoramento geotécnico de aterros sanitários; (ii) fundamentos da estabilidade de taludes; (iii) métodos de análise por equilíbrio limite; (iv) fatores que influenciam a estabilidade dos maciços de RSU; (v) estado da arte das pesquisas desenvolvidas na área; e (vi) casos históricos de ruptura reportados na literatura técnica. Em seguida, realizou-se uma síntese descritiva e comparativa dos estudos selecionados, com ênfase na identificação das metodologias empregadas, dos softwares utilizados, das abordagens analíticas adotadas, das principais causas de instabilidade e das lacunas ainda existentes na representação do comportamento real dos aterros sanitários.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Mecanismos de monitoramento geotécnico de aterros sanitários

Em aterros sanitários, o monitoramento geoambiental e geotécnico deve ser realizado tanto durante a operação quanto após o encerramento das atividades, a fim de garantir a preservação ambiental, a segurança da população do entorno e a estabilidade do maciço de resíduos. Além disso, esse acompanhamento permite verificar o funcionamento dos sistemas de drenagem de lixiviados e gases, identificar alterações no comportamento do aterro e subsidiar a adoção de medidas preventivas ou corretivas (Araújo Neto, 2021).A análise da segurança global de taludes em aterros sanitários é uma das preocupações mais críticas no monitoramento geotécnico desses locais. Dado que a estabilidade geotécnica dos aterros é afetada por uma extensa variedade de parâmetros geotécnicos, é essencial que a estabilidade do maciço de resíduos, das camadas de cobertura final e de base, e a fundação do aterro seja cuidadosamente monitorada (Mehdizadeh et al., 2020).

É essencial enfatizar que, independentemente do método utilizado para avaliar a estabilidade de um talude, é altamente recomendável realizar investigações geotécnicas detalhadas e implementar sistemas de monitoramento de campo. Esses sistemas permitem o acompanhamento constante de deslocamentos horizontais e verticais do talude, assim como dos níveis de pressão piezométrica. Esse acompanhamento é crucial tanto durante a construção quanto após sua conclusão. Somente com base

nessas informações, o projetista pode avaliar as premissas do projeto ou sugerir ajustes no modelo inicial (Gerscovich, 2016).

O monitoramento geotécnico desses empreendimentos deve ser incorporado a partir da etapa de planejamento do monitoramento ambiental, ainda na fase de projeto. É essencial estabelecer um sistema de monitoramento que permita uma avaliação contínua e periódica da estabilidade e do comportamento do maciço. Por meio dos resultados obtidos com o monitoramento é possível detectar variações no padrão de comportamento esperado e sugerir medidas preventivas e corretivas, direcionando as ações de conservação e manutenção necessárias (Simões; Catapreta, 2013).

No contexto brasileiro, ainda não há regulamentação específica voltada exclusivamente à avaliação da estabilidade de aterros sanitários por meio de instrumentação em campo (Araújo Neto, 2021). Conforme destaca Boscov (2008), a NBR 11682 (ABNT, 2009) apresenta diretrizes sobre modelos, critérios e limites para a avaliação do comportamento de maciços terrosos instrumentados. Embora essa norma não trate especificamente de aterros sanitários, seus princípios podem auxiliar na definição de estratégias de monitoramento, especialmente quando associados às particularidades dos maciços de RSU. Assim, a implantação de sistemas de instrumentação é fundamental para antecipar sinais de instabilidade, prevenir rupturas de taludes e reduzir riscos operacionais e ambientais.

Para assegurar a eficácia do monitoramento, é necessário considerar um conjunto de fatores relevantes, como recalques, deslocamentos horizontais e verticais, geração e variação das pressões internas de líquidos e gases, além de inspeções visuais periódicas (Andrades, 2018; Simões et al., 2003). Também devem ser avaliadas as condições geológicas locais, a quantidade e as características dos resíduos recebidos, a configuração das células, o modo de operação do empreendimento e o estágio de encerramento do aterro (Benvenuto et al., 2019).Para o monitoramento dos deslocamentos do maciço sanitário, o método comumente empregado é o de levantamentos topográficos de marcos superficiais, os quais registram os movimentos do maciço em relação a um ponto de referência fixo (Boscov, 2008). Já o monitoramento dos níveis de lixiviado ou nível piezométrico de líquidos é realizado utilizando piezômetros. Esses dispositivos são instrumentos empregados para detectar variações no nível de piezométrico de líquidos presentes no interior do maciço (Slimani et al., 2017).

3.2 Análise de estabilidade de taludes

Talude pode ser definido como qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser natural, como encostas, ou construído pelo homem, como cortes e aterros (Massad, 2003). A estabilidade de taludes está relacionada às condições em que parte do material constituinte pode se deslocar em relação ao maciço remanescente, dando origem a movimentos de massa ao longo de uma superfície de ruptura. No Quadro 1 é apresentada a classificação geral desses movimentos.

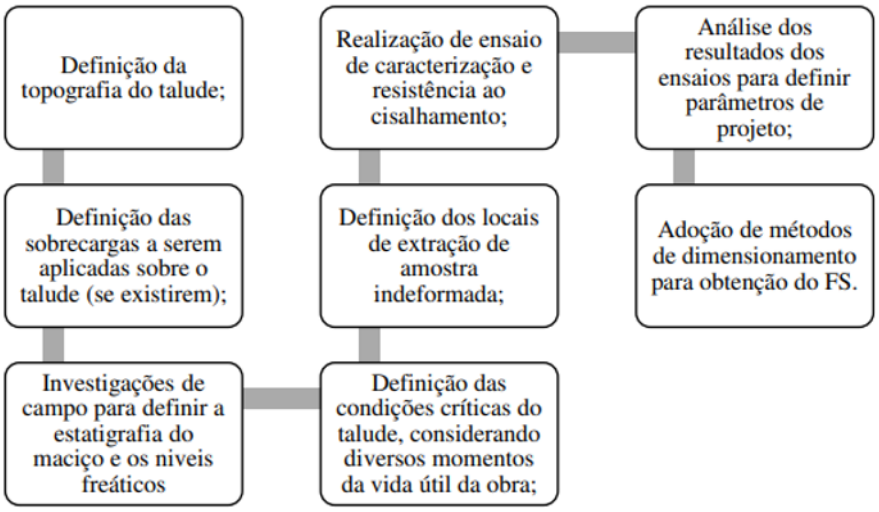
Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa

Classificação dos movimentos de massa	**Definição**
Rastejo (*creep*)	Rastejo é um tipo de movimento de terro que ocorre em fluxo lento e vagaroso,imperceptível e contínuo. Esse tipo de deslocamento de terra é provocado por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, porém insuficiente para causar rupturas.
Escorregamentos (*slides*)	O escorregamento é um movimento de uma massa de solo ou rocha, em declive, pode ocorrer sobre superfícies em ruptura ou sobre zonas relativamente finas com intensa deformação por cisalhamento.
Quedas (*falls*)	Quedas consistem em movimentos que ocorrem de forma repentina para baixo, podendo ser de rocha ou terra, ou ambas, que se desprendem de taludes íngremes ou de penhascos.
Corridas (*flows*)	Corridas são movimentos de terra caracterizadas por uma relativa velocidade no processo de escoamento do solo ou material formado por solo e rocha com massa de aspecto viscoso.

Fonte: Adaptado de Highland e Bobrowsky (2008).

A necessidade de realizar análises de estabilidade de taludes surge em diversas situações, a exemplo de barragens de rejeito e aterros sanitários. Nesse contexto, a consideração de ruptura parte do pressuposto de que uma superfície de cisalhamento contínua é formada na massa de solo. Isso implica que existe uma camada de solo ao redor da superfície de cisalhamento que perde suas características ao longo do processo de ruptura, originando uma zona cisalhada (Gerscovich, 2016). A concepção de um projeto de análise estabilidade de taludes é iniciada com o objetivo de avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Geralmente, os projetos seguem uma abordagem determinística em que se calcula o Fator de Segurança (FS) comparando as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento (Gerscovich; Vargas Junior; Campos, 2015). Em geral, os estudos de estabilidade de taludes convencionais para solos seguem a seguinte metodologia apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Metodologia de estudos de estabilidade de taludes



Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016).

Conforme Massad (2003), para determinar o FS é necessário conhecer as forças atuantes no talude, essas são classificadas em dois tipos: forças instabilizadoras e forças resistentes. Enquanto as forças instabilizadoras são responsáveis por induzir o movimento de massa ao longo da superfície de ruptura por meio das tensões cisalhantes mobilizadas, as forças resistentes lutam contra a ação do movimento de massa, devido à resistência ao cisalhamento do material.A determinação do limite aceitável para o fator de segurança é influenciada, entre outros aspectos, pelas possíveis consequências de uma possível falha em termos de danos humanos e/ou financeiros. A NBR 11682 (ABNT, 2009) estipula que, dependendo dos níveis de risco envolvidos, é primordial classificar inicialmente o projeto em uma das categorias de nível de segurança definidas a partir dos riscos associados a danos humanos e perdas materiais apresentados nos Quadros 2 e 3, respectivamente.

Quadro 2 - Nível de segurança desejado contra perdas

Nível de segurança	**Critério**
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais urbanos, ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas.
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas.
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas.

Fonte: (ABNT, 2009)

A classificação de risco deve levar em conta não apenas as condições atuais do talude, mas também a utilização futura da área, garantindo a estabilidade contra escavações na base, desmatamento, cargas excessivas e elevada infiltração (Gerscovich, 2016).

Quadro 3 - Nível e segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	**Critério**
Alto	Danos materiais: locais próximos a propriedades e alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeitos e fábrica de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: ABNT (2009).

Outra recomendação da NBR 11682 (ABNT, 2009) relacionada aos níveis de segurança estabelecidos para projeto diz respeito aos fatores de segurança mínimos admissíveis, sendo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para escorregamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT (2009).

Vale salientar ainda que, além de calcular o fator de segurança, é aconselhável implantar dispositivos de campo para monitorar os deslocamentos horizontais e verticais do talude, bem como os níveis de pressão piezométrica. Esse monitoramento deve ser realizado tanto durante a construção quanto após a conclusão da obra (Gerscovich, 2016).

3.3 Métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite

Conforme Massad (2003), os métodos para análise de estabilidade de taludes, utilizados, consistem na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tida como um corpo rígido-plástico, considerando que esse corpo está na iminência de entrar em processo de escorregamento. Por isso, os métodos são chamados de maneira geral, de métodos de equilíbrio-limite. Tendo como base as forças que atuam no corpo, as tensões de cisalhamento induzidas são determinadas por meio de equações de equilíbrio. Os métodos de Equilíbrio-Limite partem das seguintes premissas:

1. O solo comporta-se como material rígido-plástico, ou seja, rompe bruscamente, sem que haja deformações;

2. As equações de equilíbrio têm validade até a iminência da ruptura, quando o processo se torna dinâmica;

3. O coeficiente de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram- se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Dentre os métodos tradicionais desta abordagem, destacam-se o método Ordinário de Fellenius (1936), o método proposto por Bishop (1955), o método de Morgenstern-Price (1965), o método Spencer (1967) e o método Janbu (1975) (Dang et al., 2022). O método de equilíbrio limite fragmenta o talude em blocos menores e estabelece uma solução de equilíbrio de forças para esses blocos, permitindo a determinação do fator de segurança (Zhang et al., 2020). O Quadro 4 apresenta as principais abordagens para a resolução de uma análise de estabilidade em taludes de terra, utilizando o conceito de equilíbrio limite.

Quadro 4 - Principais métodos de solução de análises de estabilidades pela teoria do equilíbrio limite e suas características

Método	Características
Fellenius	Subestima o fator de segurança. Erros significativos em massas de ruptura profundas com elevada poropressão. O cálculo é bastante simples, sem necessidade de iteração. Estritamente aplicável apenas a superfícies de ruptura circulares.
Bishop simplificado	Força normal na base da fatia obtida pela resolução de forças em uma fatia na direção vertical. Os resultados são bastante precisos. O método é estritamente restrito a superfícies de ruptura de formato circular. Procedimento iterativo necessário para solução, mas convergência rápida. Erros são possíveis quando parte da superfície de ruptura tem inclinação negativa acentuada perto do topo.

Janbu	Necessita da suposição em relação à posição da linha de ação da resultante. As iterações são realizadas com conjuntos sucessivos de forças entre as fatias até que a convergência seja alcançada. Adequado para superfícies de escorregamento de forma arbitrária. A convergência geralmente é rápida.
Janbu simplificado	O uso de fatores de correção é necessário. Adequado para superfícies de escorregamento de forma arbitrária em solos e rochas, principalmente para trabalhos preliminares.
Morgenstern-Price	Método versátil que satisfaz o equilíbrio de forças e momentos e leva em conta forças entre fatias. Uma função de força lateral deve ser assumida. O método é aplicável a superfícies de ruptura de formato arbitrário e condições de contorno arbitrárias. A aceitabilidade da solução deve ser verificada como no método Janbu. Experiência considerável e julgamento necessários para usar o método de forma confiável, para assumir funções de força lateral que conduzam a resultados aceitáveis e para interpretar os resultados.
Spencer	Originalmente concebido para superfícies de rupturas circulares, mas adaptado para superfícies de rupturas não circulares (Spencer, 1973; Wright, 1975). Assume que as forças entre fatias são paralelas. Precisão aceitável. Satisfaz o equilíbrio de forças e momentos. Desejável uso de computador. Especialmente concebido para problemas de estabilidade de aterros, mas pode ser utilizado para todos os tipos de problemas.

Fonte: Chowdhury, Bhattacharya e Flentje (2010).

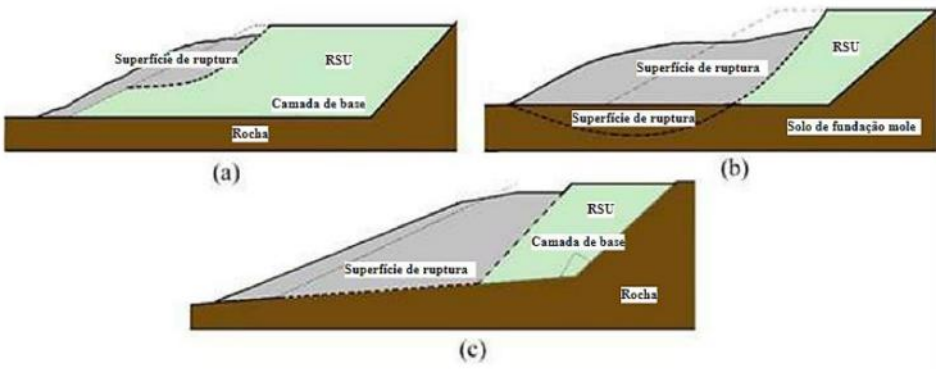
3.4 Análise de estabilidade de taludes em aterros Sanitários

As análises de estabilidade de aterros sanitários apresentam maior complexidade em relação aos taludes convencionais, pois envolvem maciços compostos por solos, resíduos sólidos urbanos e, em muitos casos, sistemas de impermeabilização e drenagem. Segundo Oliveira (2002), essa complexidade decorre da ausência de teorias, modelos e normas capazes de representar de forma plenamente realista o comportamento geotécnico dos RSU, cuja composição e propriedades variam espacialmente e ao longo do tempo. Assim, como não há métodos específicos para esse tipo de estudo, as análises de estabilidade de aterros sanitários seguem um procedimento semelhante ao aplicado em problemas geotécnicos tradicionais. No contexto dessas obras, podem ocorrer falhas no solo de base, na camada de RSU, na cobertura do aterro sanitário ou em zonas de contato (resíduo/solo; resíduo/geomembrana; geomembrana/solo) (Strauss, 1998; Abramson et al., 2002). As falhas podem acontecer em diversas fases da construção e operação, incluindo a fase de aplicação da camada de cobertura, deposição dos resíduos e após o fechamento do aterro (Abramson et al., 2002).

Existem três tipos principais de falhas: a circular, que ocorre dentro da massa de resíduos e é mais comum em materiais homogêneos; a por bloco, que ocorre ao longo de um plano de ruptura no interior da massa de resíduos ou na interface entre a massa de resíduos e estruturas circundantes (resíduo/solo e resíduo/geomembrana) e a de cobertura, que ocorre ao longo de interfaces frágeis entre os resíduos e camada de cobertura do aterro. Uma falha de cobertura pode ser mais provável durante a construção da camada de cobertura e é influenciada por fatores como infiltração de água e cargas de equipamentos pesados (Abramson et al., 2002).

A Figura 2 ilustra três modos comuns de ruptura de taludes no contexto de uma determinada configuração de aterro. No modo 1, a superfície de ruptura é gerada no interior da camada de resíduos, no modo 2, a superfície de ruptura passa pelo solo de fundação e no modo 3, a superfície de ruptura desenvolve-se ao decorrer da interface entre a camada de base e a camada de resíduos (Zhang et al., 2020).

Figura 2 - Modos de instabilidade de talude de aterro sanitário: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3.



Fonte: Zhang et al., (2020)

Segundo Strauss (1998), os principais fatores que regem a análise de estabilidade em aterros sanitários são:

- Propriedades do solo de fundação
- Resistência ao cisalhamento e peso específico dos RSU;
- Geometria do talude;
- Nível do lixiviado e seu padrão de fluxo dentro do aterro;

- Tipo de cobertura;
- Resistência da cobertura à erosão.

Conforme Borgatto (2006), dentre os fatores preponderantes que exercem influência sobre a estabilidade de aterros sanitários, podem ser destacados:

- Parâmetros geotécnicos dos resíduos;
- Geometria do aterro;
- Altura e inclinação dos taludes;
- Poropressões na base do aterro
- Sistema hidrogeológico do local do aterro;
- Interface das forças de cisalhamento entre os materiais geossintéticos;
- Interface das forças de cisalhamento entre geossintéticos e solo;
- Controle, operação e monitoramento do aterro.

3.5 Estado da arte em estabilidade de taludes de aterros sanitários

A diversidade de fontes consultadas, incluindo trabalhos científicos nacionais e internacionais contribuiu para a construção de um panorama representativo das práticas empregadas na área. O Quadro 5 apresenta uma compilação dos estudos encontrados.

Quadro 5 - Resultado do levantamento bibliográfico sobre estudos de análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários

Aterro	**Metodologia/ Abordagem/Dimensão**	***Software* utilizado**	**Referência**
Aterro sanitário em Curitiba Aterro sanitário em São Paulo	MEL/ Método de Bishop simplificado / Determinística / 2D	Slide 6 e *slope/w*	(Andrades, 2018)
Aterro de Caetetuba - SP	MEL / Método de Bishop Simplificado, Fellenius, Jambu Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price / Determinística / 2D	*slope/w*	(Remédio, 2014)

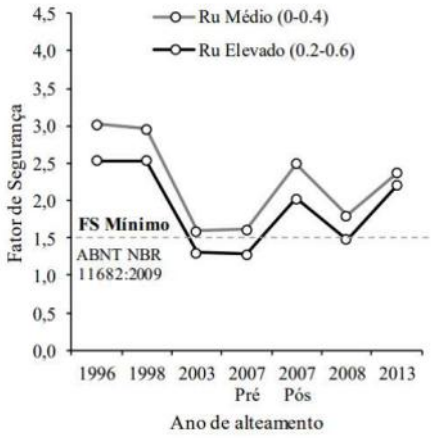
Aterro não controlado (Portugal)	MEL / Método de Morgenstern-Price/ Determinística / 2D	*slope/w*	(Silva, 2014)
Aterro sanitário em Porto Alegre	MEL / Método de Jambu Simplificado, Bishop e Spencer/ Determinística / 2D	PCSTABL	(Strauss, 1998)
Aterro Sanitário de Rosário do Sul - RS	-	*slope/w*	(Cirolini *et al.,* 2020)
Aterro Sanitário de Bandeirantes Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre Aterro Controlado de Canabrava Aterro Sanitário Metropolitano Centro	MEL / Método de Bishop Simplificado/ Determinística / 2D	*slope/w*	(Medeiros; Norberto; Mariano, 2020)
Aterro sanitário (Minas Gerais)	MEL / Método de Morgenstern-Price e Bishop Simplificado/ Determinística / 2D	*slope/w*	(Damasceno *et al.,* 2020)
Aterro de resíduos de Kettleman Hills	MEL/ Determinística / 2D e 3D	-	(Seed; Mitchell; Seed, 1990))
Aterro sanitário Sítio São João - SP	MEL / Método de Morgenstern-Price/ Determinística/ Probabilística/ 2D	Slide	(Daciolo, 2020)
Aterro sanitário de Rumpke Aterro sanitário de Durban	MEL / Método de Morgenstern-Price / Probabilística/ 2D	*slope/w*	(Jahanfar *et al.,* 2017
Aterro de Suzhou - China	MEL / Método de Bishop Simplificado / Determinística/ 2D	-	Zhan, Chen e Ling (2008)
Aterro sanitário Bulbul em Durban	MEL/ Método de Bishop simplificado, Janbu, Morgenstern-Price e método de equilíbrio universal / Determinística/ 2D	*slope/w*	Lu *et al.,* (2019)
Aterro sanitário de Meethotamulla	MEL / Método de Morgenstern-Price / Probabilística / 2D	-	(Basha; Raviteja, 2018)

A análise dos estudos compilados indica predominância dos métodos de equilíbrio limite, especialmente das formulações de Bishop Simplificado e Morgenstern-Price. Essa recorrência revela a preferência por métodos consolidados na prática geotécnica, capazes de fornecer estimativas do fator de segurança com diferentes níveis de rigor. Observa-se também a adoção de abordagens determinísticas e, em menor escala, probabilísticas, o que evidencia a preocupação crescente com as incertezas associadas à obtenção dos parâmetros geotécnicos dos RSU.

A variedade de softwares utilizados, como slope/w, Slide, e PCSTABL, reflete a disponibilidade de potenciais ferramentas. A predominância de análises bidimensionais é notável, seguindo uma tradição consolidada na literatura técnica. No entanto, para o Aterro de Resíduos de Kettleman Hills, os autores incorporaram análises tridimensionais, indicando uma consideração de modelos mais complexos e representativos da realidade. De modo geral, a falta de análises tridimensionais nas pesquisas examinadas sugere uma lacuna para realização de pesquisas que exploram a influência da terceira dimensão na estabilidade de taludes de aterros sanitários.

Entre os resultados discutidos na literatura, Daciolo (2020) e Jahanfar et al. (2017) analisaram fatores capazes de provocar variações no fator de segurança, como o alteamento das células, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e os níveis de poropressão. A Figura 3 apresenta a relação entre o fator de segurança, o ano de alteamento e o parâmetro de poropressão (Ru), permitindo compreender as variações do FS ao longo do processo de alteamento e o comportamento da poropressão no aterro sanitário Sítio São João, em São Paulo.

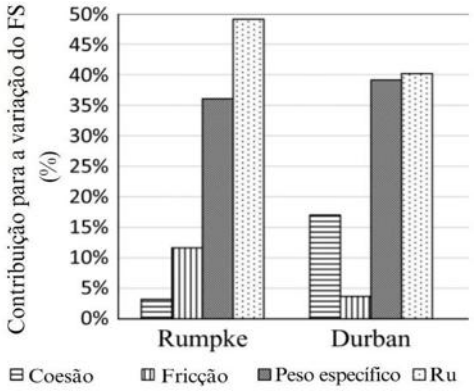
Figura 3 - Resultados do FS para análise determinística do aterro Sítio São João



Fonte: Daciolo (2020).

A Figura4 ilustra a contribuição da coesão, do ângulo de atrito e do peso específico para as oscilações do fator de segurança nos dois casos analisados pelos autores. O fator de segurança do aterro de Rumpke exibiu variações mais significativas, atribuídas à influência da poropressão existente no interior do maciço. Já o fator de segurança obtido para o aterro de Durban, além de ser afetado pela poropresão, também demonstrou ser mais sensível ao peso específico dos materiais considerados nas análises.

Figura 4 - Contribuição de diferentes parâmetros para a variação do fator de segurança dos casos em estudo



Fonte: Adapatado de Jahanfar et al., (2007).

Fatores estes que os projetistas e as empresas responsáveis pela operação dos aterros devem considerar durante as etapas de concepção, funcionamento e encerramento dessas obras geotécnicas, atentando-se as peculiaridades e finalidades, a exemplo das características e composições dos resíduos dispostos ao longo da operação. Nessa perspectiva, realizar análises de sensibilidade, mediante a alteração individual de parâmetros como coesão, ângulo de atrito e peso específico, relacionando o fator de segurança com o valor de cada parâmetro, representa uma abordagem eficaz para avaliar o efeito das propriedades geotécnicas dos materiais que compõem o maciço sanitário na estabilidade da estrutura.

3.6 Casos históricos de ruptura e suas implicações para o projeto de aterros sanitários

Diversas rupturas já ocorreram em aterros sanitários, resultando em deslocamentos significativos por longas distâncias e velocidades e danos às vidas, e ao patrimônio dos habitantes de áreas próximas a essas construções, além de impactos ambientais substanciais (Araújo Neto, 2021). Assim, as rupturas de taludes de aterros sanitários que aconteceram na última década trazem à tona a necessidade de melhorar as análises de estabilidade desses empreendimentos (Datta; Sivakumar Babu, 2016).

A Tabela 2 traz informações acerca de acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no Brasil e a Tabela 3, acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no mundo. Ambas trazem, ainda, dados sobre o volume deslizado, altura do aterro e distância percorrida por este volume, para alguns aterros.

Tabela 2 - Acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no Brasil

Ano	Aterro	Volume deslizado (m³)	Altura do aterro (m)	Distância percorrida (m)
1991	Bandeirantes (SP)	65.000	120	250
1992	Itapecerica da Serra (SP)	8.000	-	-
1995	Mauá (SP)	100.000	-	-
2000	Itaquaquecetuba (SP)	1.000.000	-	-
2004	Juiz de Fora (MG)	70.000	-	-
2004	Guaryjá (SP)	40.000	-	-
2006	Itapecerica da Serra (SP)	15.000	-	-
2007	Sítio São João (SP)	220.000	120	120
2011	Itaquaquecetuba (SP)	300.000	-	-

Fonte: Adaptado de Kölsch e Ziehmanm, (2004); Benvenuto (2007); Blight (2008).

Tabela 3 - Acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no mundo

Ano	Aterro	Volume deslizado (m³)	Altura do aterro (m)	Distância percorrida (m)
1993	Istambul (Turquia)	12 a 15.000	40	60
1996	La Coruña (Espanha)	1.400.000	-	-
1996	Rumpke (EUA)	1.200.000	75	360
1997	Dona Juana (Colômbia)	1.500.000	65	150
1997	Saravejo (Iugoslávia)	200.000	50	1000
1997	Durban (África do Sul)	150 a 180.000	45	80
2000	Payatas (Filipinas)	16.000	25	40
2001	Navarro (Colômbia)	250.000	-	-
2005	Leuwigaiah (Indonésia)	2.700.000	70	900

Fonte: Adaptado de Kölsch e Ziehmanm, (2004); Benvenuto (2007); Blight (2008).

Há desafios ao relacionar os volumes deslizados com a distância percorrida pelos escorregamentos. A obtenção dessas correlações é dificultada pelas particularidades decada aterro, a exemplo da topografia, tipo de solo, tipo de resíduos dispostos, e diferenças na operação do aterro, como a compactação, o sistema de drenagem, tipos de cobertura final, entre outros fatores (Batista, 2010).

Zhang et al., (2020) analisaram 62 casos de rupturas de aterros sanitários de 22 países diferentes. Desses, 38 casos foram relatados na literatura técnica, conforme apresentado no Quadro 7. Os autores

buscaram determinar os fatores que contribuíram para a ocorrência das falhas. Com base na localização da superfície de ruptura, categorizou-se a instabilidade de taludes em aterros nos três modos, já apresentados na Figura 2.

Quadro 7 - Casos de falhas em aterros de resíduos sólidos urbanos relatados na literatura técnica

Aterro	Referência	Localização	Ano	Causa da falha	Modo de instabilidade
Aterro sanitário de Sarajevo	Blight, 2008	Antiga Iugoslávia	1977	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário global	Chang, 2005	EUA	1984	Fundação não suportou o carregamento	Modo 2
Aterro sanitário de Kettleman	Byrne *et al.*, 1992 ; Chang, 2005	EUA	1988	Falha no sistema de revestimento	Modo 3
Aterro sanitário de Maine	Koerner e Soong, 2000	EUA	1989	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro Bandeirantes	Bauer *et al.*, 2008	Brasil	1991	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário Radiowo	Koda e Paprocki, 1995	Polônia	1991	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de Skellingsted	Kjeldsen e Fischer, 1995	Polônia	1991	Liberação de gases de aterro	Modo 1
Aterro sanitário de Belo Horizonte	Lavigne *et al.*, 2014	Dinamarca	1992	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário de Gnojna Grora	Bouazza e Wojnarowicz, 2000	Polônia	1993	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de	Lavigne *et al.*, 2014	Polônia	1993	Liberação de gases de aterro	Modo 1

Gembloux					
Aterro Ümraniye – Hekimbashi	Kocasoy e Curi, 1995	Turquia	1993	Chuva	Modo 1
Aterro OII	Matasovic *et al.,* 1994	EUA	1994	Terremoto	Modo 1
Aterro sanitário de Xianrenjiao	Cheng, 1996	China	1994	Compactação incompleta e alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de Yangjiaoshan	Cheng, 1996	China	1994	Compactação incompleta e alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de Guanshan	Cheng, 1996	China	1994	Compactação incompleta e Liberação de gás	Modo 1
Aterro sanitário de Beirolas	Rowe, 1999	EUA	1995	Fundação não suportou o carregamento	Modo 2
Aterro sanitário de Mahoning	Jahanfar *et al.,* 2017	EUA	1996	Baixa resistência da geomembrana	Modo 3
Aterro Rumpke	Eid *et al.,* 2000	EUA	1996	Fundação não suportou o carregamento	Modo 2
Aterro sanitário Bens Coruña	Landva e Dickinson, 2000	Espanha	1996	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro Dona Juana	Caicedo *et al.,* 2002	Colômbia	1997	Altos níveis de poropressão	Modo 1
Aterro sanitário de Bulbul drive	(Blight, 2004)	África do Sul	1997	Alto nível de água lixiviada	Modo 3

Aterro sanitário de Hiriya	(Huvaj-Sarihan and Stark, 2008)	Israel	1997	Compactação incompleta e alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de Payatas	(Merry *et al.,* 2005)	Filipinas	2000	Chuvas e baixa resistência da fundação	Modo 2
Aterro sanitário de Xiaping	(Hu, 2002)	China	2001	Chuvas e baixa resistência da fundação	Modo 2
Aterro sanitário de Ano Liossia	(Landva and Dickinson, 2000)	Grécia	2003	alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de Cruz das Almas	(Gharabaghi *et al.,* 2008)	Brasil	2005	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de Leuwigajah	(Lavigne *et al.,* 2014)	Indonésia	2005	Chuvas e liberações rápidas de gás	Modo 1
Aterro sanitário de Datong	(Su and Zhao, 2008)	China	2005	Baixa resistência da fundação	Modo 2
Aterro sanitário de Bantar Gebang	(Lavigne *et al.,* 2014)	Indonésia	2006	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de La Torre	(Merri *et al.,* 2009)	Itália	2006	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de São João	(De Oliveira *et al.,* 2015)	Brasil	2007	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de Galuga	(Lavigne *et al.,* 2014)	Indonésia	2010	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de Xerolakka	(Athanasopoulos *et al.,* 2013)	Grécia	2010	Compactação incompleta, alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de Jiangcungou	(Yang *et al.,* 2014)	China	2011	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de	(Lavigne *et al.,* 2014)	Indonésia	2013	Alto nível de água lixiviada	Modo 1

Cianjur					
Aterro de Koshe	(Raviteja and MunwarBasha, 2017)	Etiópia	2017	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário de Meethotamulla	(National Building Research Organisation, 2017)	Sri Lanka	2017	Compactação incompleta e baixa resistência da fundação	Modo 2

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020).

Analisando todos os casos, foi constatado como modo de ruptura mais frequente, o modo 1, representando 69,4% dos casos. Enquanto o segundo e o terceiro modo representam, 19,32% e 11,28%, respectivamente. Os autores destacaram ainda as principais causas da instabilidade nos maciços, sendo estas: a presença de altos níveis de lixiviados, compactação dos resíduos inadequada, fundação com capacidade de suporte insuficiente, baixa resistência ao cisalhamento na interface camada de base/RSU, e a liberação rápida de gases seguida de combustão (Zhang et al., 2020).

Nesse contexto, a análise de casos históricos torna-se fundamental para compreender os mecanismos envolvidos nos processos de ruptura e as lições aprendidas a partir desses eventos. Algumas rupturas de taludes de aterros sanitários encontradas na literatura são apresentadas a seguir.

Aterro de Rumpke: O aterro de Rumpke é um dos maiores aterros dos EUA e recebia resíduos com a maior parte sendo composta por material fibroso (frações de materiais fibrosos > 50%). Em março de 1996, ocorreu nesse aterro, a maior ruptura em aterros sanitários já ocorrida nos EUA a qual houve o deslizamento de aproximadamente 1,2 milhão de m³ de resíduos após uma escavação adicional de 45 m na frente da base do aterro. O local estava sobrecarregado em 13-15 metros na época. A falha ocorreu devido a cortes nos resíduos e no solo nativo marrom saturado subjacente aos resíduos (Eid et al., 2000). Na Figura 5 é possível visualizar a geometria da secção transversal do aterro antes da ruptura e na Figura 6 a superfície de ruptura.

Figura 5 - Geometria da secção transversal do aterro de Rumpke antes da ruptura

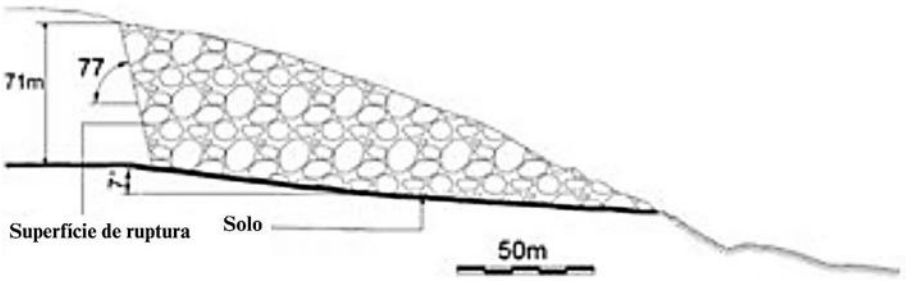


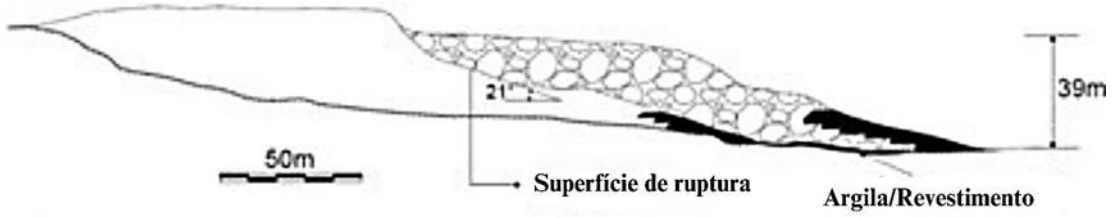
Figura 6 - Superfície de ruptura do aterro de Rumpke



Fonte: Eid et al., (2000).

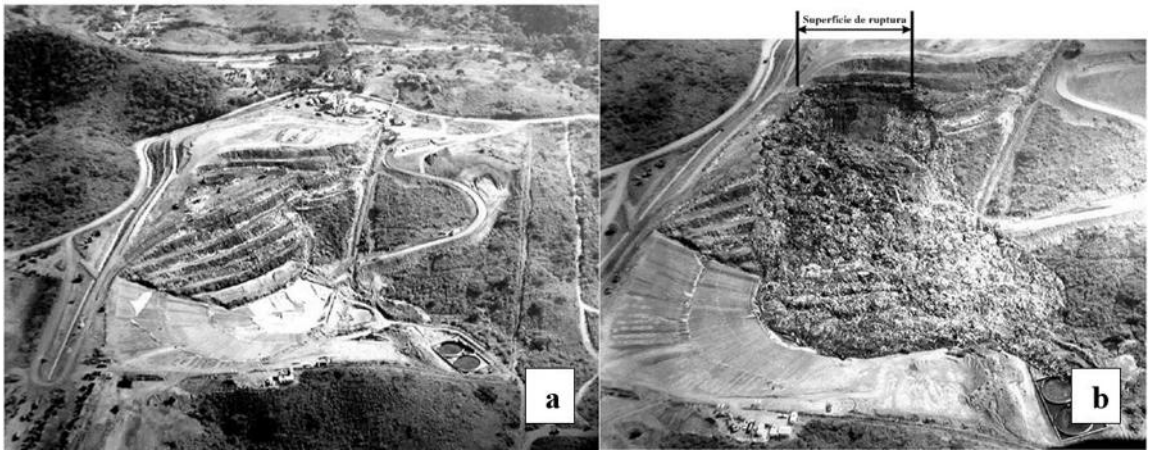
Aterro de Durban: esse aterro sanitário foi projetado para receber disposição simultânea de resíduos líquidos e secos. Nesse aterro a maioria dos resíduos dispostos era composta por materiais não fibrosos (resíduos alimentares). Em 1997 ocorreu uma ruptura e os resíduos invadiram uma área destinada para uma nova fase do aterro (Jahanfa et al., 2017), conforme é possível visualizar na Figura 7. A ruptura classificada como translacional ocorreu subitamente. A ausência de sistemas de drenagem no projeto foi um fator que contribuiu para o acidente, permitindo o acúmulo de líquidos no corpo de resíduos e, consequentemente, gerando poropressão (Blight, 2008). Essa ruptura não causou danos ao meio ambiente, pois o fluxo ficou confinado ao local. A Figura 7 apresenta a geometria da seção transversal do aterro antes de haver a ruptura e a Figura 8 o aterro antes e depois da ruptura.

Figura 7 - Geometria da secção transversal do aterro de Durban antes da ruptura



Fonte: Jahanfar et al., (2017).

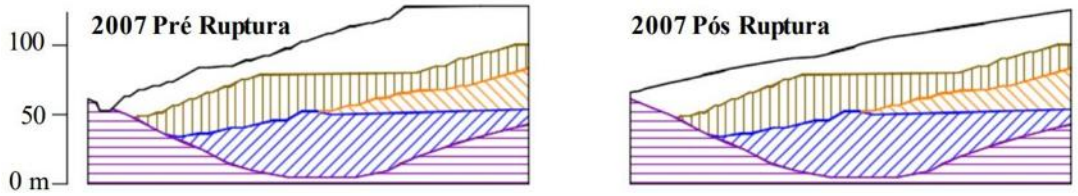
Figura 8 - Aterro de Durban (a) antes e (b) depois da ruptura



Fonte: Blight (2008).

Aterro Sítio São João: esse aterro Sítio São João localizado na zona metropolitana de São Paulo foi operado entre 1991 e 2009. Porém, em 2007 ocorreu uma ruptura rotacional no maciço sanitário deslocando aproximadamente 220.000 metros cúbicos de material (Batista, 2010). Um fator agravante para a estabilidade que pode ter contribuído para a ruptura do aterro foi o aumento dos níveis de poropressão e sua distribuição desigual no maciço sanitário (Oliveira et al., 2015). A Figura 9 ilustra seções do aterro antes e depois de haver a ruptura e a Figura 10 a superfície de ruptura.

Figura 9 - Seções esquemáticas do aterro Sítio São João antes e depois da ruptura



Fonte: Daciolo (2020).

Figura 10 - Superfície de ruptura do aterro Sítio São João



Fonte: Batista (2010).

A análise dos casos históricos de ruptura evidencia que os processos de instabilidade em aterros sanitários resultam da interação de fatores geotécnicos, hidráulicos e operacionais. Entre as causas mais recorrentes identificadas na literatura destacam-se os elevados níveis de lixiviado, o aumento das poropressões internas, a compactação inadequada dos resíduos, a insuficiente capacidade de suporte da fundação e as falhas nos sistemas de drenagem e controle de gases. Os levantamentos realizados por Zhang et al. (2020) demonstram que a maior parte das rupturas ocorre no interior da massa de resíduos, evidenciando a importância do adequado conhecimento das propriedades geotécnicas dos RSU e das condições hidráulicas do maciço.

Sob a perspectiva do projeto e da operação dos aterros sanitários, os acidentes analisados reforçam a necessidade de investigações geotécnicas detalhadas, dimensionamento adequado dos sistemas de drenagem de lixiviados e gases, controle operacional eficiente e monitoramento contínuo das condições de estabilidade. Dessa forma, os casos históricos constituem importantes fontes de aprendizado para a engenharia geotécnica, contribuindo para o aprimoramento das práticas de projeto, operação e monitoramento, bem como para a redução dos riscos associados à ocorrência de rupturas nessas estruturas.

4 CONCLUSÕES

O presente artigo permitiu reunir e sistematizar o conhecimento disponível sobre a ruptura de taludes em aterros sanitários, contemplando os principais mecanismos de instabilidade, fatores

condicionantes, casos históricos de ruptura e métodos empregados na avaliação da estabilidade geotécnica dessas estruturas.

A análise da literatura demonstrou que as rupturas em aterros sanitários resultam de um conjunto de fatores inter-relacionados, destacando-se o acúmulo de lixiviados, a geração de poropressões elevadas, a compactação inadequada dos resíduos, a insuficiência da capacidade de suporte da fundação, a baixa resistência ao cisalhamento em interfaces geossintéticas e a geração de gases no interior do maciço. Entre esses fatores, os elevados níveis de líquidos mostraram-se como uma das causas mais recorrentes dos eventos de instabilidade reportados na literatura.

Os casos históricos analisados evidenciaram que falhas em aterros sanitários podem provocar consequências ambientais, sociais e econômicas de grande magnitude. Os registros observados em diversos países demonstram que os deslizamentos de resíduos frequentemente estão associados à deficiência dos sistemas de drenagem, ao controle inadequado de lixiviados e às condições operacionais do empreendimento. A predominância de rupturas desenvolvidas no interior da massa de resíduos reforça a importância do monitoramento contínuo das condições geotécnicas e hidráulicas dos aterros.

No que se refere aos métodos de avaliação da estabilidade, verificou-se ampla utilização dos métodos de equilíbrio limite, especialmente das formulações de Bishop Simplificado e Morgenstern-Price, em análises predominantemente bidimensionais. Embora essas abordagens apresentem resultados satisfatórios para diversas aplicações práticas, observou-se uma reduzida quantidade de estudos que incorporam análises tridimensionais, indicando uma oportunidade para o avanço das pesquisas na área.

O levantamento bibliográfico realizado também evidenciou que o monitoramento geotécnico constitui uma ferramenta indispensável para a gestão da segurança de aterros sanitários, permitindo a identificação precoce de alterações no comportamento do maciço e contribuindo para a prevenção de processos de ruptura.

Além de consolidar o conhecimento disponível sobre os mecanismos de ruptura em aterros sanitários, esta revisão evidencia a importância da integração entre caracterização geotécnica, monitoramento e controle operacional para o desenvolvimento de projetos mais seguros e sustentáveis."

Por fim, conclui-se que a estabilidade de taludes em aterros sanitários depende da integração entre projeto, operação, monitoramento e controle dos sistemas de drenagem. A ampliação do conhecimento sobre os mecanismos de ruptura, associada ao desenvolvimento de metodologias de análise mais representativas das condições reais dos aterros, constitui um importante caminho para reduzir riscos geotécnicos e aumentar a segurança dessas estruturas ao longo de sua vida útil.

REFERÊNCIAS

ABRAMSON, L. Slope Stability and Stabilization Methods. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.

ANDRADES, S. A. de. Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

ARAÚJO NETO, C. L. de. Modelagem da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos para análises da estabilidade de taludes de aterros sanitários. 2021. 295 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BASHA, B. M.; RAVITEJA, K. V. N. S. Meethotamulla Landfill Failure Analysis: a probabilistic approach. Developments in Geotechnical Engineering, p. 341-351, 2018.

BASHA, B. M.; RAVITEJA, K. V. N. S. Meethotamulla Landfill Failure Analysis: a probabilistic approach. Developments in Geotechnical Engineering, p. 341-351, 2018.

BLIGHT, G. Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review. Waste Management & Research, v. 26, n. 5, p. 448-463, nov. 2008.

BORGATTO, A. V. A. Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos. 2006. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

CAICEDO, B.; YAMIN, L.; GIRALDO, E.; CORONADO, O. Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. Fourth International Congress in Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, v. 1, p. 177-182, 2002.

CHANG, M. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism. Computers and Geotechnics, v. 32, n. 8, p. 587-599, dez. 2005. DOI: 10.1016/j.compgeo.2005.11.002.

CHOWDHURY, R.; BHATTACHARYA, G.; FLENTJE, P. Geotechnical slope analysis. Boca Raton: CRC Press, 2009.

CIROLINI, A.; BRUCH, A. F.; MARQUEZAN, R. G.; SILVA, F. M. M. da; CARNEIRO, M. Análise da estabilidade de taludes do aterro sanitário de Rosário do Sul/RS. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 16, n. 5, 2020.

DACIOLO, L. V. P. Parâmetros de resistência de RSU: abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos. 2020. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

DAMASCENO, L. G.; FERREIRA, P. H.; DUARTE, L. N.; SOUSA, D. H. S.; OLIVEIRA, T. Aplicação de métodos estatísticos na análise de estabilidade em taludes de aterro sanitário. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p. 1-8, 2020.

DATTA, S.; SIVAKUMAR BABU, G. L. Prediction of the slope stability of municipal solid waste landfills using the reliability analysis. In: GEO-CHICAGO 2016. Anais [...]. 2016. p. 668-677.

GAO, W. et al. Storage capacity and slope stability analysis of municipal solid waste landfills. Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 32, n. 4, p. 04018036, 2018.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GHASEMIAN, A.; KARIMPOUR-FARD, M.; NADI, B. Reliability analysis and risk assessment of a landfill slope failure in spatially variable municipal solid waste. International Journal of Environmental Science and Technology, p. 1-14, 2024.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide handbook: a guide to understanding landslides. Reston: U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008. 129 p.

JAHANFAR, A.; GHARABAGHI, B.; MCBEAN, E. A.; DUBEY, B. K. Municipal solid waste slope stability modeling: a probabilistic approach. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 143, n. 8, p. 1-10, ago. 2017.

LI, J.; CHEN, R.; LIN, H. Limit Equilibrium Analysis of Landfill Instability Based on Actual Failure Surface. Applied Sciences, v. 13, n. 18, p. 10498, 2023.

LIMA, A. P. Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado. 2002. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

LÜ, X.; XUE, D.; HUANG, M.; LIM, K. W. A shear hardening plasticity model with nonlinear shear strength criterion for municipal solid waste. Computers and Geotechnics, v. 104, p. 207-215, 2018.

MASSAD, F. Obras de terra: curso básico de geotecnia. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MEDEIROS, R. M.; NORBERTO, A. S.; MARIANO, M. O. H. Avaliação de estabilidade de taludes de aterros sanitários. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica, v. 13, n. 3, p. 749, 2020.

MEHDIZADEH, M. J.; SHARIATMADARI, N.; KARIMPOUR-FARD, M. Probabilistic slope stability analysis in Kahrizak landfill: effect of spatial variation of MSW's geotechnical properties. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 79, n. 5, p. 2679-2695, 2020.

OLIVEIRA, D. A. F. Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

REMÉDIO, F. H. Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt. 2014. 130 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

SEED, R. B.; MITCHELL, J. K.; SEED, H. B. Kettleman Hills waste landfill slope failure. II: Stability analyses. Journal of Geotechnical Engineering, v. 116, n. 4, p. 669-690, 1990.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A.; GALVÃO, T. C. B.; BATISTA, H. P. Monitoramento geotécnico de aterros sanitários: a experiência da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 5., 2003, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre, 2003.

STRAUSS, M. Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ZHAN, T. L. T.; CHEN, Y. M.; LING, W. A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. Engineering Geology, v. 97, n. 3-4, p. 97-111, abr. 2008.

ZHANG, Z.; WANG, Y.; FANG, Y.; PAN, X.; ZHANG, J.; XU, H. Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, v. 38, n. 12, p. 1389-1404, 2020.

Capítulo 2

10.37423/260611095

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS EXPANSIVOS NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Gilson Gabriel Teixeira Varela — *Universidade Federal de Campina Grande*

Ana Leticia Ramos Bezerra — *Universidade Federal de Pernambuco*

Daniel Epifânio Bezerra — *Universidade Federal de Campina Grande*

Gabriel Araújo Paes Freire — *Universidade Federal de Campina Grande*

Milena Cristina Rocha de Souza — *Universidade Federal de Pernambuco*

Lara Pereira Tavares Mendes — *Universidade Federal de Campina Grande*

Romik Wilson de Assis Júnior — *Universidade Federal de Pernambuco*

Leonardo Rodrigues Guedes — *Universidade Federal de Campina Grande*

Allan Kewen Camara de Oliveira — *Universidade Federal de Campina Grande*

Mateus Valdevino de Siqueira — *Instituto Federal da Paraíba*

RESUMO

Os solos expansivos constituem uma importante classe de materiais geotécnicos devido à sua capacidade de sofrer variações volumétricas significativas em resposta às alterações do teor de umidade, podendo provocar danos em fundações, pavimentos e demais obras de infraestrutura. Apesar da ocorrência desses materiais em diferentes regiões do Brasil, as informações sobre suas características geotécnicas encontram-se dispersas em teses, dissertações e estudos acadêmicos, dificultando a consolidação de um panorama nacional. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a caracterização geotécnica dos solos expansivos brasileiros, buscando identificar padrões relacionados à distribuição geográfica, composição granulométrica, plasticidade, classificação geotécnica, mineralogia e comportamento expansivo desses materiais. A pesquisa foi conduzida por meio do método Systematic Search Flow (SSF), utilizando o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES como base de dados. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, foram selecionados 18 estudos contendo resultados de caracterização física, mineralógica e mecânica. Os resultados evidenciaram predominância de solos finos, com teor médio de partículas inferiores a 0,075 mm de 77,4%, elevados índices de plasticidade e classificação predominante como argilas de alta compressibilidade (CH) pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos e A-7-6 pelo sistema TRB. A análise mineralógica revelou elevada ocorrência de esmectitas e montmorilonitas, enquanto os ensaios diretos indicaram expansão livre média de 11,7% e pressões de expansão superiores a 280 kPa em alguns depósitos. Os resultados demonstram que os solos expansivos brasileiros apresentam características geotécnicas relativamente bem definidas, associadas à elevada plasticidade, predominância de partículas finas e presença frequente de argilominerais expansivos. Conclui-se que a avaliação adequada desses materiais requer a integração de parâmetros físicos, mineralógicos e mecânicos, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento dos solos expansivos e para o desenvolvimento de projetos geotécnicos mais seguros.

Palavras-chave: solo expansivo; caracterização geotécnica; expansividade; argilominerais expansivos.

1 INTRODUÇÃO

O solo constitui o principal material de suporte das obras de engenharia civil, sendo seu comportamento determinante para a estabilidade, segurança e desempenho das estruturas. As propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos solos influenciam diretamente o comportamento de fundações, pavimentos, taludes e obras de terra, tornando indispensável sua adequada caracterização durante as etapas de investigação geotécnica. Entre os diversos tipos de solos encontrados na natureza, os solos expansivos destacam-se por apresentarem comportamento hidromecânico diferenciado, caracterizado por expressivas variações volumétricas associadas às mudanças no teor de umidade.

Os solos expansivos são materiais predominantemente não saturados que apresentam aumento de volume quando submetidos ao umedecimento e retração durante processos de secagem. Esse comportamento está relacionado principalmente à presença de argilominerais expansivos, especialmente aqueles pertencentes ao grupo das esmectitas, como a montmorilonita, cuja estrutura cristalina favorece a adsorção de moléculas de água entre suas camadas minerais. Como consequência, ocorrem alterações volumétricas que podem gerar deformações significativas mesmo sob baixos níveis de carregamento (MARINHO, 2018).

A ocorrência desses materiais está associada a condições geológicas, climáticas e mineralógicas específicas. Regiões caracterizadas por elevadas taxas de evapotranspiração, associadas a períodos alternados de umedecimento e secagem, favorecem a formação e a preservação de minerais expansivos. Em âmbito internacional, os solos expansivos são amplamente distribuídos em regiões áridas e semiáridas, sendo responsáveis por elevados custos de manutenção e recuperação de obras geotécnicas. No Brasil, registros desses materiais têm sido reportados principalmente na Região Nordeste, com destaque para os estados de Pernambuco, Ceará e Bahia, embora ocorrências também tenham sido identificadas em estados das regiões Sul e Sudeste, como Paraná, Santa Catarina e São Paulo (MORAIS, 2017; MARINHO, 2018).

As variações volumétricas decorrentes dos ciclos de umedecimento e secagem podem provocar diversos problemas em obras de engenharia. Fissuras em edificações, levantamento de pavimentos, deslocamentos diferenciais em fundações, danos em estruturas enterradas e deformações em sistemas de contenção constituem algumas das manifestações mais frequentemente associadas à

presença de solos expansivos. A magnitude desses efeitos depende de fatores como composição mineralógica, granulometria, plasticidade, densidade seca, sucção, condições de drenagem e variações sazonais de umidade (ATAIDE, 2017; PAIVA, 2016).

Diante dos riscos associados ao comportamento desses materiais, a caracterização geotécnica assume papel fundamental na identificação do potencial expansivo e na previsão de seu desempenho em campo. Parâmetros como composição granulométrica, limites de consistência, índice de atividade, classificação geotécnica, composição mineralógica e resultados de ensaios de expansão constituem ferramentas amplamente utilizadas para avaliar o comportamento dos solos expansivos e subsidiar decisões de projeto.

Apesar da importância do tema para a engenharia geotécnica nacional, observa-se que as informações disponíveis sobre os solos expansivos brasileiros encontram-se dispersas em teses, dissertações e trabalhos acadêmicos desenvolvidos em diferentes instituições de pesquisa. Essa fragmentação dificulta a consolidação de um panorama nacional sobre as características geotécnicas desses materiais, limitando a compreensão de padrões relacionados à sua distribuição geográfica, composição, classificação e comportamento expansivo.

Nesse contexto, torna-se relevante reunir e sistematizar os resultados produzidos pela comunidade científica brasileira, permitindo uma visão integrada das características geotécnicas dos solos expansivos identificados no país. A consolidação dessas informações pode contribuir para o aprimoramento das investigações geotécnicas e para o desenvolvimento de estratégias mais adequadas de avaliação e mitigação dos problemas associados a esses materiais.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a caracterização geotécnica dos solos expansivos no Brasil, buscando identificar padrões relacionados à distribuição geográfica dos estudos, composição granulométrica, limites de consistência, classificação geotécnica, composição mineralógica e parâmetros de expansividade reportados em pesquisas acadêmicas nacionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os solos expansivos constituem um dos materiais mais desafiadores para a engenharia geotécnica devido à sua capacidade de sofrer variações volumétricas significativas em resposta às alterações das

condições de umidade. O comportamento desses solos está associado a uma complexa interação entre fatores mineralógicos, físico-químicos, ambientais e mecânicos, que influenciam diretamente sua capacidade de expansão e retração. Em virtude dos danos que podem provocar em fundações, pavimentos, estruturas enterradas e edificações, o estudo desses materiais tem despertado crescente interesse da comunidade técnico-científica.

A compreensão do comportamento dos solos expansivos exige o conhecimento de aspectos relacionados à sua formação, composição mineralógica, mecanismos responsáveis pela expansão, fatores condicionantes da expansividade e métodos empregados para sua identificação e caracterização. Esses elementos são fundamentais para interpretar os resultados obtidos em investigações geotécnicas e compreender as diferenças de comportamento observadas entre depósitos naturais aparentemente semelhantes.

Nesse contexto, este capítulo apresenta os principais conceitos teóricos relacionados aos solos expansivos, abordando inicialmente suas características gerais e condições de ocorrência. Em seguida, são discutidos os aspectos mineralógicos e os mecanismos físico-químicos associados ao fenômeno da expansão, bem como os fatores que influenciam sua intensidade. Por fim, são apresentados os principais métodos utilizados para identificação e avaliação do potencial expansivo dos solos, fornecendo a base conceitual necessária para a análise e discussão dos resultados apresentados neste estudo.

2.1 Solos expansivos: definição, formação e ocorrência

Os solos expansivos constituem uma classe particular de materiais geotécnicos caracterizada pela capacidade de sofrer variações volumétricas significativas em decorrência das alterações do teor de umidade. Esses materiais apresentam comportamento distinto daquele observado em solos convencionais, uma vez que a absorção de água pode provocar aumento expressivo de volume, enquanto a perda de umidade resulta em retração e desenvolvimento de fissuras. Segundo Marinho (2018), a expansão e a contração representam fenômenos naturais associados à interação entre a água e os minerais constituintes da fração argilosa do solo.

A gênese desses materiais está relacionada aos processos de intemperismo físico e químico que atuam sobre as rochas ao longo do tempo geológico. De acordo com Pinto (2006), a decomposição dos minerais primários presentes nas rochas origina partículas cada vez menores e favorece a formação de

minerais secundários, dentre os quais se destacam diversos argilominerais. Em determinadas condições ambientais, especialmente em regiões áridas e semiáridas, esses minerais podem desenvolver características que conferem elevado potencial expansivo aos solos.

Morais (2017) destaca que a ocorrência de solos expansivos está fortemente associada às condições climáticas predominantes. Em regiões onde a evapotranspiração supera a precipitação durante grande parte do ano, a lixiviação dos minerais é reduzida, favorecendo a formação e preservação de argilominerais expansivos. Essa condição explica a ampla ocorrência desses solos em regiões semiáridas, especialmente no Nordeste brasileiro.

Embora a maior parte dos estudos nacionais esteja concentrada nessa região, registros de solos expansivos também foram observados em outras áreas do país, demonstrando que a ocorrência desses materiais não está limitada a um único contexto geológico ou climático. Essa ampla distribuição reforça a necessidade de sua adequada identificação durante as etapas de investigação geotécnica, especialmente em obras de infraestrutura e fundações.

Do ponto de vista da engenharia civil, a importância desses solos decorre dos danos que podem causar às estruturas. Ataide (2017) destaca que os movimentos associados aos ciclos de expansão e retração podem produzir fissuras em edificações, deformações em pavimentos, deslocamentos diferenciais em fundações e comprometimento do desempenho de estruturas enterradas. Em muitos casos, os custos associados às medidas corretivas superam significativamente aqueles necessários para a identificação prévia do problema durante a fase de projeto.

2.2 Mineralogia e mecanismos responsáveis pela expansividade

O comportamento expansivo dos solos está diretamente relacionado à natureza dos minerais presentes na fração argilosa. Entre os diversos argilominerais encontrados nos solos naturais, aqueles pertencentes ao grupo das esmectitas são reconhecidos como os principais responsáveis pelos fenômenos de expansão observados em campo e em laboratório.

Segundo Ataide (2017), os minerais expansivos apresentam estrutura cristalina do tipo 2:1, constituída por duas folhas tetraédricas envolvendo uma folha octaédrica. Essa configuração estrutural possibilita a entrada de moléculas de água e cátions hidratados entre as camadas minerais, promovendo o aumento do espaçamento interlamelar e, consequentemente, a expansão do material.

Dentre os minerais expansivos, a montmorilonita merece destaque especial por apresentar elevada superfície específica e elevada capacidade de troca catiônica. Essas características favorecem intensas interações físico-químicas com a água, tornando esse mineral um dos principais responsáveis pelos elevados valores de expansão registrados em solos naturais.

Por outro lado, minerais como a caulinita apresentam comportamento significativamente diferente. Devido às fortes ligações existentes entre suas camadas estruturais, a entrada de água no interior da estrutura cristalina é limitada, reduzindo substancialmente sua capacidade expansiva. Dessa forma, a simples quantificação da fração argila não é suficiente para caracterizar adequadamente o potencial expansivo de um solo, sendo necessária a identificação dos minerais presentes.

Morais (2017) descreve que a expansão dos solos ocorre principalmente por meio de dois mecanismos. O primeiro corresponde à expansão intracristalina, associada à entrada de água entre as camadas estruturais dos argilominerais expansivos. O segundo mecanismo está relacionado à expansão osmótica, decorrente das interações eletroquímicas entre as partículas do solo e a solução presente nos poros.

A expansão osmótica ocorre em função do desenvolvimento de forças repulsivas associadas às duplas camadas elétricas que se formam ao redor das partículas argilosas. À medida que aumenta o teor de umidade, essas forças tendem a afastar as partículas, contribuindo para o aumento do volume do solo. A intensidade desse fenômeno depende de diversos fatores, incluindo a composição química da água dos poros e os tipos de cátions adsorvidos pelos minerais.

Portanto, o comportamento expansivo observado nos solos naturais resulta da interação simultânea entre aspectos mineralógicos e físico-químicos, justificando a elevada variabilidade dos resultados encontrados em diferentes depósitos.

2.3 Fatores condicionantes da expansividade

Embora a mineralogia seja considerada o principal fator responsável pela expansão dos solos, diversos outros aspectos influenciam a magnitude das deformações observadas. Segundo Ataide (2017), fatores intrínsecos como granulometria, índice de plasticidade, densidade seca, estrutura do solo e composição mineralógica exercem influência direta sobre o potencial expansivo. Solos contendo

maiores proporções de partículas finas geralmente apresentam maior superfície específica disponível para interação com a água, favorecendo o desenvolvimento de deformações volumétricas.

A plasticidade constitui outro parâmetro frequentemente utilizado na avaliação da expansividade. Em geral, solos com elevados índices de plasticidade tendem a apresentar maior potencial de expansão. Entretanto, essa relação não é absoluta, uma vez que solos com índices semelhantes podem apresentar comportamentos distintos em função das diferenças mineralógicas.

Barbosa (2019) destaca a importância da sucção matricial no comportamento dos solos expansivos. Solos submetidos a elevadas sucções apresentam maior tendência à absorção de água quando ocorre umedecimento, aumentando o potencial de expansão. Dessa forma, as condições de umidade inicial exercem papel fundamental na resposta mecânica do material.

Além dos fatores intrínsecos, Paiva (2016) ressalta a influência de fatores externos, como clima, vegetação, drenagem, profundidade do lençol freático e histórico de tensões. A ação combinada desses fatores controla a intensidade dos ciclos de expansão e retração observados ao longo do tempo.

A compreensão desses mecanismos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação dos problemas associados aos solos expansivos, especialmente em regiões onde esses materiais ocorrem com maior frequência.

2.4 Métodos de identificação dos solos expansivos

A identificação dos solos expansivos constitui uma etapa fundamental das investigações geotécnicas, uma vez que o comportamento desses materiais nem sempre pode ser previsto apenas por observações visuais ou classificações convencionais. Segundo Paiva (2016), os métodos de identificação podem ser agrupados em métodos indiretos e métodos diretos.

Os métodos indiretos baseiam-se na análise de características físicas, mineralógicas e índices geotécnicos associados ao potencial expansivo. Nesse grupo encontram-se os métodos identificativos, qualitativos e orientativos. Os métodos identificativos utilizam técnicas laboratoriais como difração de raios X, microscopia eletrônica, análise termodiferencial, capacidade de troca catiônica e análises físico-químicas, permitindo a identificação dos minerais responsáveis pela expansão.

Os métodos qualitativos utilizam correlações empíricas desenvolvidas por diversos pesquisadores ao longo do tempo. Entre os critérios mais difundidos destacam-se aqueles propostos por Skempton, Holtz e Gibbs, Chen e Cuellar, que relacionam parâmetros como limite de liquidez, índice de plasticidade, limite de contração e teor de argila ao potencial expansivo do solo. Embora amplamente utilizados devido à simplicidade de aplicação, esses métodos apresentam limitações, pois materiais com características físicas semelhantes podem apresentar comportamentos expansivos distintos.

Os métodos orientativos complementam essa avaliação por meio da análise de fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos e de evidências observadas em campo, como fissuras superficiais, deformações em estruturas e histórico de problemas geotécnicos na região.

Por sua vez, os métodos diretos permitem medir efetivamente a resposta expansiva do solo quando submetido ao umedecimento. Segundo Paiva (2016), esses métodos incluem os ensaios de expansão livre, pressão de expansão, ensaios edométricos simples, ensaios edométricos duplos e ensaios com sucção controlada. Diferentemente dos métodos indiretos, essas técnicas fornecem parâmetros quantitativos que representam diretamente o comportamento do material.

Em função da maior representatividade dos resultados obtidos, os métodos diretos são considerados as ferramentas mais confiáveis para avaliação do potencial expansivo dos solos. Entretanto, sua utilização não elimina a importância das análises físicas e mineralógicas, que continuam sendo essenciais para a compreensão dos mecanismos responsáveis pelo comportamento observado. Dessa forma, a caracterização adequada dos solos expansivos deve ser realizada de forma integrada, combinando diferentes métodos de investigação para obtenção de diagnósticos mais precisos e seguros.

3 METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com o objetivo de identificar, selecionar, analisar e consolidar informações referentes à caracterização geotécnica dos solos expansivos brasileiros. A pesquisa buscou reunir e sintetizar parâmetros físicos, índices de consistência, classificações geotécnicas, características mineralógicas e indicadores de expansividade reportados na literatura nacional, permitindo a construção de um panorama representativo desses materiais.

Para garantir a sistematização e a reprodutibilidade da pesquisa, foi adotado o método Systematic Search Flow (SSF), proposto por Ferenhof e Fernandes (2016). O método estabelece um procedimento estruturado para condução de revisões sistemáticas, compreendendo etapas sequenciais de definição do protocolo de pesquisa, realização das buscas, seleção dos estudos, análise dos dados e síntese dos resultados.

A busca bibliográfica foi realizada no Catálogo de Teses e Dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), selecionado por concentrar a produção científica dos programas de pós-graduação brasileiros. Foram empregadas as palavras-chave “solo expansivo”, “argila expansiva” e “pressão de expansão”, por representarem os principais termos utilizados em pesquisas relacionadas à caracterização desses materiais.

A busca inicial resultou na identificação de 46 trabalhos potencialmente relevantes. Em seguida, foi realizada uma triagem preliminar por meio da análise dos títulos, resumos e palavras-chave, com o objetivo de verificar a aderência dos estudos ao tema da pesquisa. Posteriormente, os trabalhos selecionados foram submetidos à análise de elegibilidade, considerando os critérios de inclusão e exclusão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Critérios de inclusão e exclusão adotados na revisão sistemática

Critérios de inclusão	**Critérios de exclusão**
Estudos realizados em território brasileiro	Trabalhos duplicados
Teses e dissertações disponíveis no Catálogo CAPES	Estudos sem resultados laboratoriais
Pesquisas relacionadas à caracterização geotécnica de solos expansivos	Trabalhos cujo foco principal não fosse a expansividade dos solos
Trabalhos contendo resultados de caracterização física, mineralógica ou mecânica	Estudos sem informações suficientes para extração dos dados
Pesquisas com dados quantitativos relacionados ao potencial expansivo	Revisões bibliográficas sem dados experimentais

Fonte: Elaborado pelos autores.

A aplicação dos critérios estabelecidos resultou na seleção de 18 estudos para composição do portfólio final da revisão sistemática. Os trabalhos selecionados correspondem majoritariamente a dissertações e teses desenvolvidas em programas de pós-graduação da Região Nordeste, especialmente na

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), instituição que concentra grande parte das pesquisas nacionais sobre solos expansivos.

Tabela 1 – Estudos selecionados para composição da revisão sistemática

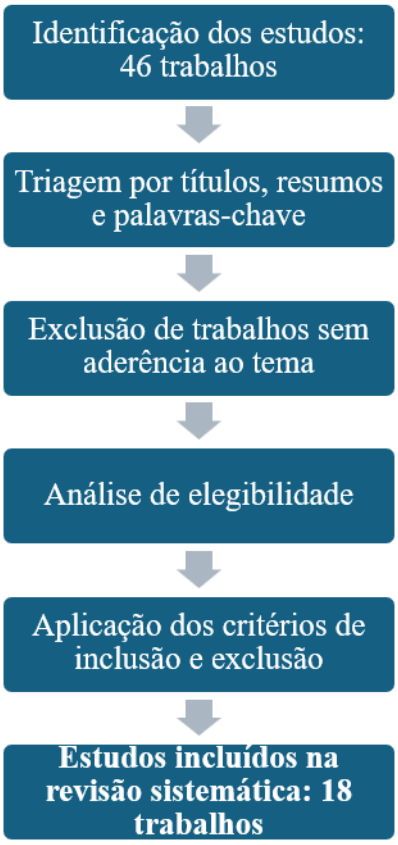
Autor/Ano	**Instituição**	**Localidade estudada**
Paiva (2009)	UFPE	Cabrobó, Paulista e Ipojuca (PE)
Ataide (2017)	UFPE	Paulista (PE)
Morais (2017)	UFPE	Paulista (PE)
Marinho (2018)	UFPE	Santa Maria da Boa Vista (PE)
Tenório (2018)	UFCG	Nordeste brasileiro
Barbosa (2019)	UFPE	Pernambuco
Drumond (2019)	UFPE	Pernambuco
Bezerra (2019)	UFPE	Pernambuco
Silva Júnior	UFPE	Semiárido pernambucano
Pereira (1999)	UFPR	Paraná
Perazzolo (2003)	UFRGS	Rio Grande do Sul
Santos (2008)	UFPE	Pernambuco
Demais estudos selecionados	Diversas instituições	Brasil

Fonte: Adaptado dos estudos selecionados.

Observa-se que a maior parte dos trabalhos foi desenvolvida no estado de Pernambuco, evidenciando a relevância regional do tema e a atuação contínua de grupos de pesquisa especializados em solos expansivos. Entretanto, também foram identificados estudos em outras regiões do país, permitindo ampliar a compreensão sobre a ocorrência e o comportamento desses materiais em diferentes contextos geológicos.

A Figura 1 apresenta o fluxograma simplificado do processo de seleção dos estudos.

Figura 1 – Fluxograma de seleção dos estudos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os trabalhos selecionados foram analisados integralmente, sendo extraídas informações relacionadas aos principais parâmetros utilizados na caracterização geotécnica dos solos expansivos brasileiros. Os parâmetros analisados foram agrupados conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de caracterização geotécnica analisados na revisão

Grupo de análise	**Parâmetros avaliados**
Caracterização física	Pedregulho, areia, silte, argila e teor de finos
Consistência	Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP)
Classificação geotécnica	Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), classificação TRB e Índice de Atividade (IA)
Mineralogia	Esmectita, montmorilonita, caulinita e vermiculita
Expansividade	Expansão livre (%) e pressão de expansão (kPa)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados extraídos foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística descritiva. Foram calculadas frequências relativas, médias, valores máximos, valores mínimos e desvios padrão, quando disponíveis nos estudos originais. Esses procedimentos permitiram identificar tendências e padrões geotécnicos recorrentes nos solos expansivos brasileiros.

A síntese dos resultados foi realizada por meio de tabelas comparativas e análises integradas das informações coletadas. A discussão concentrou-se na avaliação das características granulométricas, dos limites de consistência, das classificações geotécnicas, dos índices de atividade, da composição mineralógica e dos parâmetros de expansividade reportados pelos estudos selecionados. Por fim, os resultados foram interpretados de forma integrada, permitindo a identificação das principais características geotécnicas dos solos expansivos brasileiros e a consolidação de um panorama nacional sobre esses materiais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição geográfica dos estudos sobre solos expansivos no Brasil

A análise dos estudos selecionados evidenciou uma concentração significativa das pesquisas sobre solos expansivos na Região Nordeste, especialmente no estado de Pernambuco. Dos trabalhos analisados, aproximadamente 72% foram desenvolvidos em municípios pernambucanos, com destaque para Paulista, Ipojuca e Cabrobó. Essa concentração pode ser atribuída tanto à ocorrência de solos com potencial expansivo em áreas semiáridas quanto à consolidação de grupos de pesquisa dedicados ao tema em instituições locais. A Tabela 1 ilustra a distribuição geográfica dos estudos analisados.

Tabela 2 – Distribuição geográfica dos estudos analisados

Localidade	**Frequência (%)**	**Clima predominante**
Paulista (PE)	40	Tropical/Semiárido
Ipojuca (PE)	15	Tropical
Cabrobó (PE)	10	Semiárido
Outros (SP, SC, PR, RS)	35	Temperado/Subtropical

A predominância de estudos em Pernambuco não implica necessariamente que os solos expansivos estejam restritos a essa região. Na realidade, a distribuição geográfica observada reflete também a disponibilidade de pesquisas acadêmicas e a existência de registros históricos de problemas geotécnicos associados à expansão dos solos. Estudos realizados nas regiões Sul e Sudeste demonstram que depósitos potencialmente expansivos podem ocorrer sob diferentes condições geológicas e climáticas, reforçando a necessidade de investigações específicas durante a etapa de reconhecimento geotécnico.

Outro aspecto relevante refere-se à influência do clima sobre a manifestação dos fenômenos de expansão e retração. Em regiões semiáridas, os ciclos alternados de estiagem e precipitação favorecem variações expressivas no teor de umidade do solo, intensificando os processos de expansão volumétrica e retração. Dessa forma, além da composição mineralógica, fatores climáticos desempenham papel fundamental na ocorrência e intensidade dos problemas associados aos solos expansivos.

4.2 Caracterização física dos solos expansivos brasileiros

A caracterização granulométrica dos estudos analisados revelou predominância de partículas finas, característica amplamente associada aos solos expansivos. Em média, a fração composta por silte e argila correspondeu a 77,4% da massa total dos materiais avaliados, enquanto a fração arenosa apresentou participação significativamente inferior.

Tabela 3 – Composição granulométrica média dos solos expansivos brasileiros

Fração	Percentual médio (%)	Desvio padrão (%)
Pedregulho	0,5	1,21
Areia	22,1	12,06
Silte	47,7	10,31
Argila	29,7	14,08
Finos (<0,075 mm)	77,4	12,71

Os resultados indicam que a fração silte representa o componente predominante na maioria dos depósitos analisados, seguida pela fração argila. Embora tradicionalmente os solos expansivos sejam associados a elevados teores de argila, a literatura nacional demonstra que a expansividade pode

ocorrer mesmo em materiais cuja fração silte seja predominante, desde que a composição mineralógica contenha quantidades significativas de argilominerais expansivos.

A elevada porcentagem de finos observada nos estudos analisados exerce influência direta sobre a retenção de água e o desenvolvimento de forças físico-químicas responsáveis pela expansão. Solos com elevada superfície específica apresentam maior capacidade de adsorção de água, favorecendo alterações volumétricas mais expressivas quando submetidos ao umedecimento.

Além da granulometria, os limites de consistência constituem parâmetros fundamentais para avaliação do potencial expansivo dos solos. Os dados levantados indicaram predominância de elevados valores de limite de liquidez e índice de plasticidade, evidenciando comportamento compatível com materiais altamente plásticos.

A elevada plasticidade observada nos solos analisados está diretamente relacionada à presença de partículas finas e à mineralogia da fração argilosa. Segundo Ataide (2017), materiais que apresentam elevados limites de liquidez tendem a exibir maior capacidade de absorção de água e, consequentemente, maior potencial de expansão. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a associação entre plasticidade elevada e comportamento expansivo reportada na literatura especializada.

Sistema	Classe	Frequência (%)
SUCS	CH	60
SUCS	CL	25
TRB	A-7-6	60
TRB	A-6	25

A predominância da classe CH demonstra que a maior parte dos solos analisados é composta por argilas inorgânicas de alta plasticidade. Essa classificação está em consonância com os elevados valores de limite de liquidez e índice de plasticidade observados nos estudos selecionados. Solos pertencentes a essa classe apresentam elevada compressibilidade e maior suscetibilidade às variações volumétricas induzidas pela umidade.

De forma semelhante, a predominância da classificação A-7-6 indica materiais com comportamento considerado inadequado para utilização direta em camadas estruturais de pavimentos, devido à

elevada plasticidade e sensibilidade à água. Essa condição reforça a necessidade de tratamentos estabilizantes quando esses materiais são empregados em obras rodoviárias.

Um resultado particularmente interessante refere-se ao índice de atividade. Apesar da elevada expansividade observada em diversos estudos, a maioria das amostras apresentou valores classificados como inativos segundo os critérios tradicionais. Esse comportamento sugere que o índice de atividade, quando utilizado isoladamente, pode não representar adequadamente o potencial expansivo dos solos brasileiros, especialmente em depósitos com composição mineralógica complexa.

5 CONCLUSÕES

A presente revisão sistemática permitiu consolidar informações dispersas na literatura nacional acerca da caracterização geotécnica dos solos expansivos brasileiros, contribuindo para a compreensão integrada de suas principais características físicas, mineralógicas e mecânicas. A análise dos estudos selecionados demonstrou que, apesar da diversidade geológica e climática das áreas investigadas, os solos expansivos identificados no Brasil apresentam padrões geotécnicos recorrentes que possibilitam sua caracterização de forma relativamente consistente.

Os resultados obtidos evidenciam que a expansividade desses materiais está associada à combinação de fatores granulométricos, mineralógicos e de plasticidade, não podendo ser adequadamente compreendida por meio da avaliação isolada de um único parâmetro. Nesse sentido, a caracterização geotécnica mostrou-se dependente da análise integrada das propriedades físicas, dos índices de consistência, da composição mineralógica e dos parâmetros mecânicos relacionados ao comportamento expansivo.

A revisão também permitiu verificar que a presença de argilominerais expansivos exerce papel fundamental na manifestação das variações volumétricas observadas, reforçando a importância da mineralogia como componente indispensável nos processos de investigação geotécnica. Da mesma forma, constatou-se que a utilização conjunta de ensaios de caracterização e de métodos diretos de avaliação da expansividade proporciona interpretações mais confiáveis sobre o comportamento desses materiais em campo.

Do ponto de vista científico, o estudo contribui para a consolidação de um panorama nacional sobre os solos expansivos brasileiros, reunindo informações que se encontravam dispersas em diferentes

teses e dissertações. Essa sistematização permite ampliar o conhecimento disponível sobre esses materiais e fornece subsídios para futuras pesquisas relacionadas à identificação, classificação e comportamento geotécnico dos solos expansivos.

Por fim, destaca-se a necessidade de ampliação dos estudos em regiões ainda pouco investigadas, bem como da padronização dos procedimentos de caracterização empregados nas pesquisas nacionais. Tais iniciativas poderão contribuir para o desenvolvimento de bases de dados mais representativas e para o aprimoramento das práticas de investigação e projeto em áreas suscetíveis à ocorrência de solos expansivos.

REFERÊNCIAS

ABMS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Solos não saturados. São Paulo: ABMS, 2004.

ATAIDE, Stive Osca Falcão. Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

BARBOSA, Felipe Araújo Silva. Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BARBOSA, Valquiria. Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BEZERRA, André Luis. Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz do Município de Brejo da Madre de Deus – PE. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CARVALHO, José Camapum de. Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: ABMS, 2015.

CONSTANTINO, Camila de Souza. Estabilização de um solo expansivo do Município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

CORRÊA, Juliana Francisca. Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

DRUMOND, Magno Augusto Motta Macieira. Avaliação da aplicação da cinza resultante da queima do bagaço da cana-de-açúcar sobre o potencial expansivo de uma argila proveniente do município de Paulista-PE. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

FERENHOF, Helio Aisenberg; FERNANDES, Roberto Fabiano. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SSF. Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina, Florianópolis, v. 21, n. 3, p. 550–563, 2016.

JUNIOR, Miguel Angel Mello Silva. Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

MARINHO, Rafaella Pereira. Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista – PE. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

MORAIS, Joanderson James Oliveira. Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do Município de Paulista – PE. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

NUNES, Marcus Soares. Fundamentos de mecânica dos solos. 15. ed. Belo Horizonte: IPUC, 2010.

PAIVA, Sergio Carvalho de. Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca – PE e de suas misturas com cal. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PAIVA, William de. Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

PERAZZOLO, Lilian. Estudo geotécnico de dois taludes da formação Serra Geral, RS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PEREIRA, Eliana Martins. Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da formação Guabirotuba na região do Iguaçu – PR. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, Gerson Marques dos. Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não saturada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SILVA, Jayne Araújo. Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SOUZA, Jéssica Siqueira de. Mecânica dos solos. Brasília: NT Editora, 2015.

SOUZA, Rafaela Faciola Coelho de. Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a técnica da transferência de vapor. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

TENÓRIO, Eduardo Antônio Guimarães. Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

Capítulo 3

10.37423/260611096

ESTUDO DA COMPOSTAGEM DOMÉSTICA COMO INSTRUMENTO DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E MELHORIA DA QUALIDADE DE VIDA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Juliana Lima da Silva — *Universidade Federal de Pernambuco*

Robson José Silva Robson José Silva — *Universidade Federal Rural de Pernambuco*

Ana Leticia Ramos Bezerra — *Universidade Federal de Pernambuco*

Ketlyn Jaquelize Lima Sousa — *Universidade Federal de Campina Grande*

Cláudio Luis Aráujo Neto — *Universidade Federal do Maranhão*

Amanda Paiva Farias — *Universidade Federal de Campina Grande*

Adla Jamilly Vieira Felipe — *Universidade Federal de Campina Grande*

Gabriel Araújo Paes Freire — *Universidade Federal de Campina Grande*

Áurea Kelly Jordão Borges de Araújo — *Universidade Federal de Campina Grande*

Pablo Rafael Ferreira Ramos — *Universidade Estadual da Paraíba*

RESUMO

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, no Brasil, em 2017, cerca de 55% do lixo produzido é composto por resíduos orgânicos e a atual disposição desses resíduos no ambiente vem sendo responsável por impactos deletérios para o homem e ecossistema. Com isso, a compostagem é um dos meios mais efetivos para a reciclagem de resíduos orgânicos, pois além de ser uma forma sustentável de destinação desses resíduos, o uso do seu subproduto no solo pode manter estável os níveis de acidez e favorecer às práticas agrícolas. Existem diferentes métodos de compostagem, sendo a compostagem doméstica uma alternativa vantajosa para o tratamento da parcela orgânica dos resíduos domiciliares, visto que a instalação do sistema e o uso do composto final ocorre no mesmo local onde o resíduo é produzido. O composto orgânico final é um material rico em macro e micronutrientes, com aplicação satisfatória, como fertilizante ou adubo, em horticulturas. A horticultura orgânica é destinada ao cultivo de hortaliças, leguminosas, grãos, entre outros alimentos saudáveis que contribuem para saúde e bem estar dos seus usuários. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi estudar a compostagem doméstica como instrumento de sustentabilidade ambiental e melhoria da qualidade de vida.

Palavras-chaves: compostagem; compostagem doméstica; horticultura orgânica; sustentabilidade ambiental.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país fortemente populoso, apresentando, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015), 84,72% da população brasileira concentrada em áreas urbanas, onde são geradas estimativamente 29 milhões de toneladas anuais de resíduos orgânicos que são depositados erroneamente em lixões, ou dispostos em aterros sanitários, representando risco à saúde da população e ao meio ambiente. Diante da enorme geração de resíduos orgânicos, um dos grandes desafios para o ser humano atualmente é destinação correta deste resíduo WANGEN e FREITAS, 2010). Embora a problemática dos resíduos orgânicos apresente caráter global, sua amenização pode ser de maneira individual, com a pratica da compostagem.

Segundo Bueno et al. (2008), a compostagem é uma forma natural e econômica de reciclar matéria orgânica, definida como a decomposição e estabilização biológica de substratos orgânicos produzindo um produto final estável, livre de patógenos e que possa ser aplicado de forma benéfica na cultura de plantas. Embora possa ser operada pelo próprio gerador, a compostagem requer dedicação e conhecimento do processo para a satisfação efetiva dos usuários e continuidade do uso, bem como seu sucesso (SILVA et al., 2013). Por isso, é de extrema importância conhecer quais são os fatores que influenciam no processo, para que ao final da compostagem, obtenha-se um composto orgânico de qualidade.

A compostagem também se caracteriza por ser um processo puramente microbiológico. Sua eficiência depende das ações e interações dos microrganismos que por sua vez dependem da ocorrência de condições favoráveis como temperatura, umidade, aeração, pH, tipo de resíduos orgânicos existentes, relação carbono/nitrogênio (C/N), granulometria do material e dimensões das leiras aplicadas (BIDONE, 2001).

Normalmente, o tempo de compostagem, incluindo as fases de degradação e maturação, é de 120 a 130 dias (TEIXEIRA et. al., 2004). O composto maduro obtido ao final do processo apresenta características nutricionais relevantes, podendo ser aplicado na fertilização do solo, favorecendo assim, a horticultura orgânica, a jardinagem e até a melhoria da geração de renda para os praticantes (LIMA et. al., 2008).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi estudar os conceitos da compostagem, as particularidades da compostagem doméstica e a sua utilização como instrumento de sustentabilidade ambiental e melhoria da qualidade de vida, por meio de uma revisão bibliográfica criteriosa.

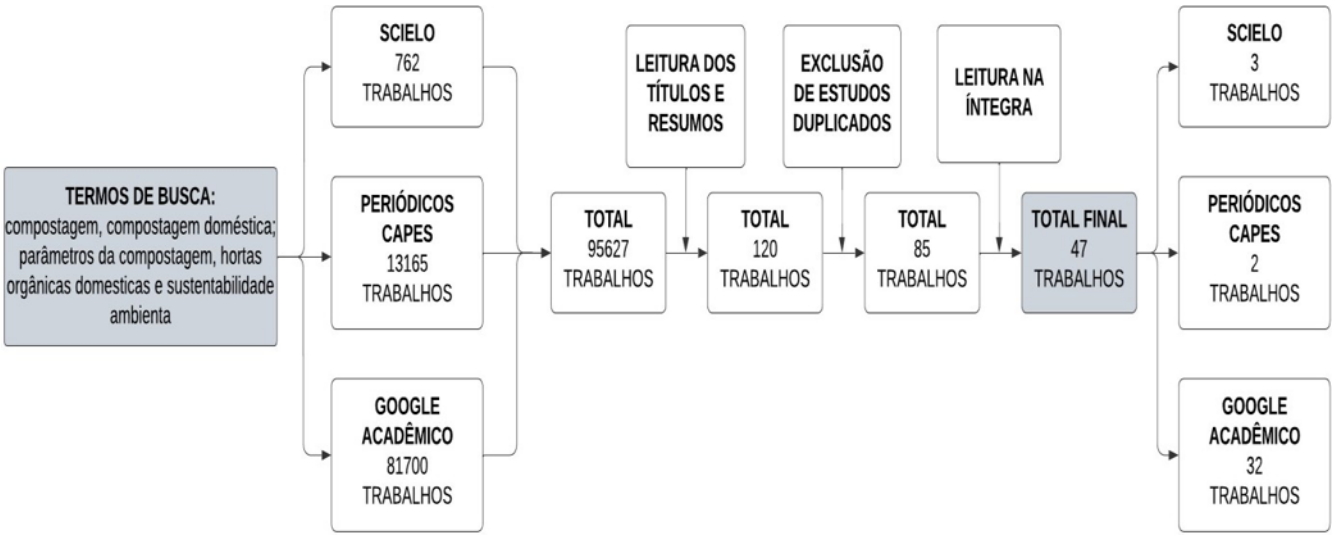
METODOLOGIA

A pesquisa é caracterizada como revisão sistemática de caráter descritivo, tratando-se de um resumo das evidências relacionadas a um tema específico, a partir da utilização de métodos sistematizados de busca, análise crítica e síntese do conteúdo selecionado (SAMPAIO e MANCINI, 2007). Além disso, expõe as características de determinada população, estabelecendo correlações entre variáveis e definindo sua natureza (VERGARA, 2004).

Para fundamentação desse trabalho, as buscas foram realizadas em três bases de dados eletrônicas Google Acadêmico, Periódicos CAPES e SciELO no períodoentre Novembro e Dezembro de 2022. Para uma melhor sistematização da pesquisa foram utilizados filtros divididos em: (a) Assunto principal: compostagem, compostagem doméstica; parâmetros da compostagem, hortas orgânicas domésticas e sustentabilidade ambiental; (b) idiomas: português e inglês; (c) tipo de documento: monografias, dissertações, artigos, manuais, teses e livros; (d) ano de publicação: de 1972 a 2022.

Inicialmente, foram encontrados 95.627 trabalhos acadêmicos, sendo 765 no SciElo, 13.165 no Periódico CAPES e 81.700 no Google Acadêmico. Após uma avaliação mais criteriosa, foram selecionados 47 trabalhos para fundamentação desse estudo, sendo 3 no SciElo, 2 no Periódico CAPES e 32 no Google Acadêmico, conforme detalha a Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de fluxo de seleção de trabalhos acadêmicos.



Fonte: A autora, 2023.

REFERENCIAL TEÓRICO

Devido ao crescimento populacional, o aumento substancial da geração de resíduos sólidos urbanos tem se tornado uma grande problemática ambiental. A coleta e a disposição final destes resíduos representam um problema de difícil solução, com grandes riscos de poluição do solo e das águas, trazendo implicações inclusive na qualidade de vida da população (NÓBREGA et al., 2007).

Segundo ABNT NBR 10004, os resíduos sólidos são definidos como:

- Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Esses resíduos podem ser classificados de acordo com: a atividade que lhe deu origem, suas características, seus constituintes e seus impactos na saúde e meio ambiente. A ABNT NBR 10004 classifica-os da seguinte forma:

- Resíduos perigosos, denominados como resíduos classe I;

- Resíduos não perigosos, denominados como resíduos classe II, esses subdivididos em classe II A (resíduos não inertes) e classe II B (resíduos inertes).

Resíduos sólidos orgânicos domiciliares

Segundo Besen (2011), a composição geral dos resíduos pode ser representada pelas parcelas de matéria orgânica, materiais recicláveis e materiais diversos, sendo a matéria orgânica composta por material biodegradável. Segundo o Decreto-Lei nº 152/2002, são considerados biodegradáveis os resíduos que podem ser sujeitos a decomposição anaeróbia ou aeróbia (Figura 2).

Figura 2 - Resíduos biodegradáveis



Fonte: Adaptado de Rocha, 2007.

Segundo Reis (2006), os restos de alimentos, juntamente com todo o material sólido de origem orgânica (vegetal ou animal) gerados nos domicílios, constituem os resíduos sólidos orgânicos domiciliares, parcela considerável dos resíduos biodegradáveis. O autor ainda ressalta que os resíduos originados nas residências familiares típicas, contêm, em média, 67,0% de restos de alimentos, 19,8% de papéis, 6,5% de plásticos, 3,0% de vidros e 3,7% de metais.

Atualmente, os resíduos sólidos orgânicos domiciliares são depositados em aterros sem a possibilidade de um reaproveitamento adequado, contudo, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) estabelece que somente devem ser enviados para aterros sanitários os resíduos que não tenham mais nenhuma possibilidade de recuperação ou reciclagem, ou seja, os rejeitos.

Segundo a Política Nacional de Resíduos sólidos (PNRS, 2010), os resíduos sólidos orgânicos domiciliares apresentam várias implicações com relação a exploração dos aterros e lixões, tais como: produção de biogás, que inclui compostos que atuam ao nível do efeito estufa; produção de lixiviados, que alteram a qualidade das águas superficiais e subterrâneas; e proliferação de vetores, que servem como intermediários na propagação de doenças como: dengue, malária, febre amarela, Zika, Chikungunya.

Na tentativa de equacionar esse problema, vários métodos de tratamento e disposição de resíduos orgânicos foram e vêm sendo pesquisados em todo o mundo (VERGNOUX et al., 2009). Nesse sentido, a compostagem orgânica surge como uma técnica ambientalmente correta na busca por amenizar os grandes problemas enfrentados nos lixões e aterros sanitários.

Compostagem

Segundo Cotta et al. (2015), a compostagem é um processo biológico de decomposição aeróbia controlada, por meio da ação de microrganismos, que resulta na estabilização da matéria orgânica. Os microrganismos utilizam a matéria orgânica como fonte de energia e nutrientes, promovendo a mineralização e humificação dos resíduos.

No processo de compostagem existem diferentes comunidades de microrganismos que decompõem a matéria orgânica e produzem CO2, água, calor e húmus, acabando por produzir, finalmente, o composto orgânico estável. Sob condições ideais, a compostagem ocorre através de três fases consecutivas: mesofílica, termofílica e maturação (SILVA et al., 2013).

A fase mesofílica é caracterizada como o início da decomposição da matéria orgânica, liberando calor e vapor d'água, com formação de ácidos e toxinas de curta duração (CARVALHO, 2015). Essa fase pode durar de 2 a 5 dias e atingir temperaturas de 40ºC (KIEHL, 1985). Em seguida, ocorre a fase termofílica, onde a degradação é feita de forma ativa, ou seja, as reações bioquímicas são mais intensas e prevalecem os fungos e bactérias denominadas termofílicos, capazes de sobreviverem em temperaturas entre 65°C e 70°C. Segundo Carvalho (2015), pode durar de 60 a 90 dias, tempo que está diretamente ligado a fatores ambientais, quantidade dos resíduos, população microbiana e balanço de nutrientes.

A última fase é denominada de maturação ou humificação, onde acontece a diminuição da temperatura pela redução da atividade dos microrganismos, degradação de substâncias orgânicas mais resistentes e perda de umidade. Essa fase pode durar entre 30 a 60 dias (CARVALHO, 2015). A maturação do composto ocorre quando a decomposição microbiológica se completa e a matéria orgânica é transformada em um material rico em nutrientes, denominado composto orgânico ou composto estabilizado.

Segundo Silva et al. (2013), o composto orgânico apresentará coloração escura e odor similar ao de terra, podendo ser utilizado como corretivo orgânico para o solo. Além disso, representa uma fonte consistente de macro e micronutrientes, principalmente de N, P, Ca, Mg, K, Cu, Zn. Esses macros e micronutrientes são essenciais para o bom desenvolvimento das plantas e para a formação de mudas, frutos e flores saudáveis (SILVA et al., 2013).

O composto estabilizado quando aplicado como corretivo orgânico, aumenta a retenção de água e a capacidade de infiltração, melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, especialmente em solos argilosos (SANTOS, 2001). Sua aplicação na horticultura é bastante ampla, destacando-se o cultivo de hortaliças, leguminosas, grãos e plantas medicinais, contribuído para a melhoria da qualidade de vida a partir da produção de uma alimentação mais saudável e nutritiva.

Fatores de influência na eficiência da compostagem

Conforme Peixoto (1988), a eficiência do processo de compostagem se baseia na interdependência e no inter-relacionamento dos seguintes fatores: microrganismos, relação C/N, aeração, pH, granulometria, temperatura, umidade e condutividade elétrica.

Microrganismos

Os microrganismos são os principais responsáveis pela conversão da matéria orgânica em composto orgânico. Bactérias, fungos, vírus, algas, protozoários, nematóides, vermes, insetos e suas larvas participam ativamente da degradação da matéria orgânica. Agentes bioquímicos como enzimas e hormônios também contribuem nesse processo.

As bactérias são os microrganismos responsáveis por cerca de 90% do processo de degradação. São encontradas em maior quantidade tanto na fase mesófilica quanto na termófilica, (KIEHL, 1985). As bactérias mesófilas são encarregadas pela decomposição de compostos de estrutura mais simples (açúcares, amidos, proteínas e outros), além de iniciarem a produção de calor e ajudarem no crescimento das bactérias termófilas (FERNÁNDEZ, 2008).

Já as bactérias termófilas são responsáveis pela degradação dos compostos mais complexos. Dentre elas, se destacam os actinomicetos, importantes na eliminação de patógenos presentes no processo (KIEHL, 1985).

Relação C/N

A eficiência de um processo de compostagem é diretamente proporcional à eficiência com que os microrganismos conseguem captar e metabolizar os nutrientes (PEDROSA et al. 2020).

Os microrganismos necessitam da presença de macro e micro nutrientes para suas atividades metabólicas. Dentre os nutrientes utilizados, carbono (C) e nitrogênio (N) são de extrema importância. O C é fonte de energia e unidade estrutural básica das moléculas orgânicas, promovendo o crescimento microbiano. Já o N é essencial na síntese proteica (proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas e coenzimas) (BATISTA; BATISTA, 2007).

A relação C/N é um índice utilizado para avaliar os níveis de maturação de substâncias orgânicas e seus efeitos no crescimento microbiológico (VALENTE et al. 2009). Ela depende da dosagem dos materiais adicionados nas composteiras. Geralmente, resíduos palhosos, como vegetais secos, são fontes de C, enquanto excrementos, legumes e frutas frescas, ricos em N. Relações C/N inferiores a 30/1 possuem excesso de N, e é necessária a mistura de outros materiais, ricos em C, para balancear o processo (INÁCIO; MILLER, 2009). Nesse sentido, a relação C/N deve ser determinada no material a ser compostado, para efeito de balanço de nutrientes, e também no produto final, para efeito de qualidade do composto (VALENTE et al.,2009).

Quando presente em condições aeróbias, parte do C é liberada na forma de CO2 e o restante é utilizado com o N durante o processo de crescimento microbiano (BATISTA; BATISTA 2007). No decorrer do processo, o consumo de C pelos microrganismos é aproximadamente 15 a 30 vezes maior do que o de N (KIEHL, 2004). Dessa forma, a mistura tem o valor inicial de 30:1, decaindo ao longo do tempo, podendo finalizar entre 10:1 a 15:1 (KUMAR et al., 2009).

O acompanhamento da relação C/N durante a compostagem permite conhecer o andamento do processo, informando quando o composto atingiu as fases ou se já está estabilizado. As relações C/N que podem ocorrer no processo são (KIEHL, 2004):

-Abaixo de 10:1: pode haver perda de N por volatilização na forma de NH3, formação de odor e presença de vetores;

-Entre 25:1 a 30:1: considerada ideal para o processo da compostagem;

-Entre 30:1 a 50:1: permite uma decomposição mais acelerada;

-Acima de 50:1: deficiência de N, tempo de maturação mais prolongado, podendo o processo não ocorrer.

Aeração

A aeração é o fator mais importante a ser considerado durante a decomposição da matéria orgânica (PEIXOTO, 1988) e é classificada como principal indicador do aumento da taxa de oxigenação, controle de temperatura, redução da liberação de odores e controle da umidade (KIEHL, 2004).

De acordo com a disponibilidade de oxigênio, a compostagem pode ser classificada como aeróbia ou anaeróbia. A compostagem aeróbia corresponde à decomposição dos substratos orgânicos na presença de oxigênio, sendo que os principais produtos do metabolismo biológico são CO_2, H_2O e energia. De outra forma, na compostagem anaeróbia, a decomposição dos substratos orgânicos ocorre na ausência de oxigênio, produzindo CH_4 e CO_2, além de produtos intermediários, como ácidos orgânicos de baixo peso molecular (PEREIRA NETO, 1996; KIEHL, 2004).

Normalmente, quando a compostagem é usada para tratar resíduos orgânicos, um ambiente aeróbio acaba sendo ideal para o desenvolvimento de microrganismos, reduzindo assim as emissões de odores e gases causadores do efeito estufa, como o metano e o óxido nitroso. Além disso, a presença de oxigênio na mistura faz com que a matéria orgânica se decomponha mais rapidamente, diferentemente da compostagem anaeróbia. Desta forma, Costa (2005) afirma que o revolvimento das leiras pode aumentar a eficiência do processo, diminuindo o tempo de compostagem.

Para promover uma aeração eficiente, o revolvimento da mistura é decidido em função de fatores como: temperatura, umidade e intervalo de dias, sendo a temperatura, um dos parâmetros mais utilizados pelos pesquisadores, já que expressa a atividade dos microrganismos no interior da massa.

Segundo Lau et al. (1992), a aeração deve ser muito bem controlada, uma vez que um suprimento excessivo de ar pode fazer com que a perda de calor seja mais intensa do que a produção de calor microbiano. Além disso, Kader et al. (2007) afirmam que a aeração excessiva pode aumentar a emissão de gases poluentes como a amônia e o óxido nitroso.

pH

O pH é um parâmetro importante porque regula o desenvolvimento de microrganismos. No entanto, como muitos microrganismos podem crescer em diferentes faixas de pH, esse fator não é limitante para o sucesso do processo.

Segundo Tuomela et al. (2000), no início da decomposição ocorre a formação de ácidos orgânicos e a incorporação de carbono orgânico ao protoplasma celular microbiano, o que torna o meio mais ácido em relação ao inicial. Esta fase é caracterizada pela intensa atividade de microrganismos mesófilos que elevam a temperatura do composto para cerca de 40-45ºC e, devido à sua atividade, também liberam carbono orgânico na atmosfera na forma de CO_2. Ainda, os ácidos orgânicos e os traços de ácidos minerais que se formam reagem com bases liberadas da matéria orgânica, gerando compostos de reação alcalina (JAHNEL et al., 1999). Concomitantemente, ocorre também a formação de ácidos húmicos, que reagem com os elementos químicos básicos, formando humatos alcalinos. Desta forma, o pH do composto aumenta a medida que o processo se desenvolve, atingindo muitas vezes, níveis superiores a 8,0 (KIEHL, 2004).

A faixa de pH considerada mais adequada para o crescimento dos microorganismos responsáveis pela compostagem está entre 5,5 e 8,5, uma vez que a maioria das enzimas encontram-se ativas nesta faixa de pH (RODRIGUES et al., 2006). No entanto, Pereira Neto (2007) aponta que a compostagem pode ser realizada em uma faixa de pH entre 4,5 e 9,5, sendo os valores extremos regulados automaticamente por microrganismos, através da degradação de compostos, produzindo subprodutos ácidos ou alcalinos, conforme as necessidades do ambiente.

Segundo Valente et al. (2009), não há problema em usar substratos com pH baixo, pois as reações químicas que ocorrem durante o processo, resultam no ajuste da acidez. Neste sentido, Isoldi (1998) afirma que as reações do tipo ácido-base e de óxido-redução são de extrema importância na compostagem. O valor do pH fornece informação sobre o estado de decomposição do composto, sendo o pH final considerado alcalino (COSTA, 2005). Segundo Kiehl (2004), o composto orgânico final pode apresentar pH entre 6,5 e 9,6.

Granulometria

Segundo Ruggieri et al. (2008), as características físicas da mistura inicial são decisivas para o bom desenvolvimento do processo de compostagem. A decomposição da matéria orgânica é um fenômeno microbiano, e sua intensidade está relacionada à área superficial específica do material compostado. Quanto menor o tamanho da partícula, maior a área atacada e digerida pelos microrganismos, e o processo de decomposição é acelerado. (FERNANDES e SILVA, 1999).

Por outro lado, Rodrigues et al. (2006) explicam que materiais com granulação muito fina geram poucos espaços porosos, dificultando a difusão de oxigênio no interior da mistura, favorecendo assim o surgimento de condições anaeróbias, levando a uma compactação e um aumento da densidade do substrato compostado (KIEHL, 2004). Com o aumento da densidade, ocorre uma diminuição na eficiência do processo, podendo estar relacionado a dificuldades na distribuição de microrganismos, enzimas e outros metabólitos microbianos devido à alta compactação e alta umidade do substrato (TUOMELA et al., 2000).

Ruggieri et al. (2008) afirma que é difícil determinar a granulometria ideal para compostagem, pois cada material possui suas particularidades. Misturar vários tipos de resíduos orgânicos de diferentes tamanhos é o método mais adequado para tentar ajustar o tamanho das partículas, favorecer a homogeneização da massa de compostagem e assim obter uma melhor porosidade. Sendo assim, os autores indicam que, as partículas devem ter entre 2 e 8 centímetros.

Temperatura

A temperatura é um importante indicador da eficiência do processo de compostagem. O calor gerado dentro da biomassa estabiliza o resíduo, facilita a evaporação da água e reduz a carga de patógenos. (BIDONE e POVINELLI, 1999).

A temperatura influencia tanto na natureza especifica da população microbiana como no tempo de decomposição (KUMAR et al., 2009). O valor médio de temperatura é de 55 ºC. Os microrganismos que participam mais ativamente do processo são os aeróbios e os facultativos, que predominam nas faixas de temperatura de 20 ºC a 45 ºC (mesófilos) e de 45 ºC a 65 ºC (termófilos). Esses microrganismos liberam energia na forma de calor, elevando a temperatura da compostagem. A degradação do substrato, por parte dos microrganismos, acarreta a diminuição da relação C/N, que se encontra entre 15/1 e 18/1 no produto final, sendo caracterizado como um material bioestabilizado (KIEHL, 2004).

Temperaturas elevadas são importantes para a ocorrência da atividade microbiana, mas temperaturas prolongadas de 70 ºC a 75 ºC podem reduzir a atividade e aumentar o potencial de perda de N (KIEHL, 2004). Nesse sentido, o controle térmico é importante para validar a fase em que o processo se encontra e seu equilíbrio biológico (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Umidade

A umidade é um fator limitante no processo de compostagem, pois a água é essencial na decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos aeróbios. A umidade e a oxigenação são dois aspectos que estão relacionados, pois dependendo da eficiência da aeração e das propriedades dos materiais compostados (estrutura e porosidade), tem-se o teor de umidade ideal no composto (BIDONE e POVINELLI, 1999).

A faixa de umidade ideal para compostagem aeróbia é entre 50-60%, diminuindo com a aeração a medida que o processo avança (KIEHL, 2004). Segundo Richard et al. (2002), valores de umidade abaixo de 30% reduzem a taxa de degradação porque a quantidade de água necessária para a atividade microbiana não é fornecida. Valores acima de 65% proporciona uma decomposição lenta, condições de anaerobiose e lixiviação de nutrientes.

Condutividade elétrica

Esse parâmetro reflete na salinidade do composto, indicando a quantidade total de sais e refletindo em sua qualidade para o uso como fertilizante. Durante a compostagem, as concentrações salinas no meio aumentam devido à decomposição da matéria orgânica, produzindo a formação de sais minerais (amônio, íons e fosfatos), e alterando a condutividade (ONWOSI et al., 2017).

A condutividade elétrica serve como indicativo dos possíveis níveis de fitotoxicidade. Segundo Kiehl (2004), elevados valores de condutividade elétrica e alta concentração de ácidos orgânicos podem atrapalhar o uso do composto orgânico como fertilizante, uma vez que a germinação de sementes pode ser inibida.

Métodos de compostagem

Existem diferentes métodos de compostagem, cada um com suas especificidades, mas com o mesmo objetivo de produzir um composto orgânico estável, rico em húmus e nutrientes minerais que possa ser utilizado como fertilizante. O Quadro 1 apresenta diferentes métodos de compostagem atualmente aplicados.

Quadro 1 - Métodos de compostagem.

Descrição dos métodos
Compostagem em composteiras caseiras
Compostagem em leiras/pilhas revolvidas (windrow)
Compostagem em leiras/pilhas estáticas aeradas (static pile)
Compostagem termofílica em leiras estáticas com aeração passiva
Vermicompostagem
Compostagem em reatores biológicos (in-vessel)
Compostagem anaeróbia

Fonte: A autora, 2023.

Compostagem em composteiras caseiras

Nesse método, a decomposição microbiológica ocorre dentro de composteiras caseiras. Para criar uma composteira caseira, é necessário escolher três recipientes de plástico iguais com tampa e monta-los de forma à acomodar todos os resíduos. O tamanho dos recipientes pode variar de acordo com a quantidade de resíduos orgânicos a serem tratados (WANGEN e FREITAS, 2010). A

Figura 3 mostra uma composteira caseira com capacidade de 15L, nas dimensões 0,43m x 0,35m x 0,44m.

Figura 3 - Exemplo de uma composteira caseira.



Fonte: Morada da floresta, 2020.

A alimentação da composteira é realizada diariamente até completar sua capacidade total. Segundo Fernández (2008), para a eficiência do processo, são necessárias intervenções periódicas, como por exemplo, revolvimento da mistura, humidificação do material, adição de materiais verdes ou castanhos para ajuste da relação C/N, entre outras. Normalmente, o tempo de compostagem em composteiras caseiras é de 120 dias (TEIXEIRA et. al., 2004).

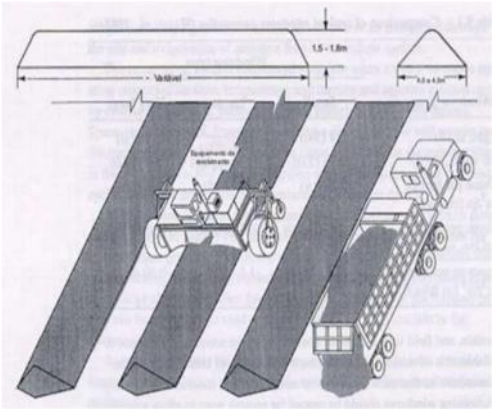
Dentre as vantagens desse método destaca-se sua aplicação em ambiente domiciliar. A composteira caseira acaba se mostrando como uma solução sustentável, simples e de baixo custo para destinação e tratamento correto dos resíduos sólidos orgânicos domiciliares.

Compostagem em leiras/pilhas revolvidas (windrow)

Consiste no método de compostagem em que o material é colocado em formato de pilhas ou leiras, sendo a oxigenação da massa de compostagem garantida por reviramento periódico das pilhas. No momento em que é feito o revolvimento, o composto entra em contato com a atmosfera rica em O2, suprindo as necessidades de aeração do processo biológico (FERNANDES e SILVA, 1999).

A altura e seção da leira dependem do resíduo estruturante e do método de construção da mesma, sendo que as de seção triangular com 1,50m a 1,80m de altura e 4,0m a 4,5m de base, são as mais comuns e que apresentam resultados comprovados, como mostra a Figura 4 (FERNANDES e SILVA, 1999).

Figura 4 - Exemplo de composteira em leiras revolvidas.



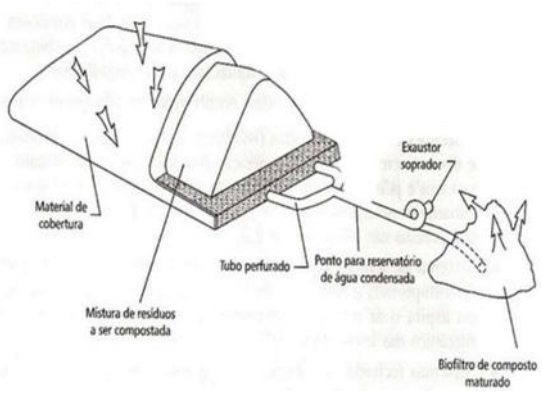
Fonte: Fernandes e Silva, 1999.

Durante a compostagem, as leiras devem ser revolvidas no mínimo três vezes por semana (KUTER, 1995), objetivando a aeração da massa de resíduos; o aumento da porosidade e homogeneização da mistura; a exposição das camadas externas às temperaturas mais elevadas do interior da leira e a diminuição do teor de umidade do composto.

Compostagem em leiras/pilhas estáticas aeradas (static pile)

Segundo Fernandes e Silva (1996), é o método de compostagem em que o material é disposto em formatos de pilhas ou leiras, sobre um sistema com um ou mais tubos perfurados. Nesse sistema, ocorre a injeção ou aspiração do ar por meio dessas tubulações, sem necessidade de movimentação mecânica das leiras, ou seja, uma vez que a mistura de resíduos é colocada sobre as tubulações de aeração, ela permanece estática até o final da fase de bioestabilização (Figura 5).

Figura 5 - Exemplo de compostagem em leiras estáticas aeradas.



Fonte: Fernandes e Silva, 1999.

Após a formação da leira é importante seu recobrimento com uma camada de aproximadamente 5 cm de resíduo estruturante ou de composto já curado. Esta prática visa isolar a mistura evitando o ressecamento superficial e a atuação de moscas, permitindo a elevação da temperatura e a eficiência de remoção de patógenos (FERNANDES e SILVA, 1999).

Os sopradores de ar na tubulação são ligados e desligados de maneira intermitente, durante a fase de bioestabilização. A aeração deve ser dimensionada objetivando satisfazer às demandas de oxigênio do processo de biodegradação aeróbia, remover o excesso de umidade e remover o excesso de calor para manter a temperatura em torno de 60 ºC (FERNANDES e SILVA, 1999).

Compostagem termofílica em leiras estáticas com aeração passiva

Segundo o Manual de Compostagem Doméstica, Comunitária e Institucional de Resíduos Orgânicos (2018), nesse método, a decomposição microbiológica da matéria orgânica depende de oxigênio e de temperaturas acima de 45°C (atingindo picos que podem chegar a mais de 70°C). A aeração se dá por convecção natural, onde o ar quente escapa pelo topo da leira e o ar frio é sugado pela base permeável da mesma, não exigindo revolvimentos ou tombamentos durante sua operação.

A arquitetura da leira é o principal fator que garante a aeração adequada do processo. Sua dimensão varia de acordo com a disponibilidade de espaço, mas é importante que sua largura não ultrapasse 2 metros, para permitir a entrada de ar em seu interior. O comprimento será de acordo com o planejamento e dinâmica do pátio de compostagem e de áreas disponíveis, geralmente variando entre 1 a 20 metros (Figura 6).

Figura 6 - Exemplo de compostagem termofílica em leiras estáticas com aeração passiva.



Fonte: Manual. Compostagem Doméstica, Comunitária e Institucional de Resíduos Orgânicos, 2017.

O Manual afirma que as leiras são feitas em formato preferencialmente retangular, e em seguida devem ser alimentadas por uma mistura de material seco e material orgânico. Normalmente, todo o processo ocorre em torno de 120 dias.

Vermicompostagem

É o método em que os microrganismos, minhocas e outros invertebrados transformam resíduos biodegradáveis em composto orgânico. O composto gerado pela vermicompostagem é denominado vermicomposto, um material escuro e natural, rico em matéria orgânica e em nutrientes, facilmente absorvido pelas plantas (AQUINO et al., 1992).

Para montar uma vermicomposteira são necessárias três caixas plásticas do mesmo tamanho, onde serão alimentadas de minhocas, terra e resíduos orgânicos. Segundo Lourenço (2010), os resíduos orgânicos devem ser depositados em fileiras sucessivamente, intercalando com uma camada de composto pronto ou húmus, isso servirá de cama para as minhocas, que migrarão por todas as caixas de forma a acelerar o processo, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de vermicomposteira.



Fonte: Semasa, 2014.

As espécies de minhoca mais adaptadas à vermicompostagem são as Epigeicas. Dentro desse grupo, a espécies Eisenia fetida, Eisenia andrei e Eudrilus eugeniae são as mais utilizadas, por alimentarem-se de resíduos orgânicos semi-crus, terem alta capacidade de proliferação e crescimento muito rápido (AQUINO, 2009).

A vermicompostagem, em comparação aos demais métodos de compostagem, acelera a estabilização da matéria orgânica e produz um composto com maior capacidade de troca catiônica e maior

quantidade de substâncias húmicas (ALBANELL et al., 1988). Segundo Aquino (2009) o processo dura cerca de trinta dias, podendo ter duração maior para os resíduos com uma relação C/N superior a 30/1.

Compostagem com reatores biológicos (in-vessel)

Segundo Fernandes e Silva (1999), a compostagem realizada em reatores biológicos, oferece a possibilidade de maior controle sobre todos os parâmetros intervenientes, onde o ciclo da fase termófilica é reduzido. Esse método é chamado de compostagem acelerada, tendo em vista que o tempo de detenção no reator biológico varia de 7 a 20 dias.

Devido à homogeneidade do meio, inclusive com relação à temperatura, a compostagem em reatores também é tida como mais eficiente no controle dos patógenos. Outra característica desta alternativa é a maior facilidade de controle de odor, uma vez que o sistema é fechado e a aeração controlada (FERNANDES e SILVA, 1999). A Figura 8 mostra um reator biológico de compostagem RCR 250, com capacidade máxima de 6000kg e dimensões de 7,40m x 2,10m x 2,40m.

Figura 8 - Exemplo de reatores biológicos (in-vessel).



Fonte: Rondon, 2022.

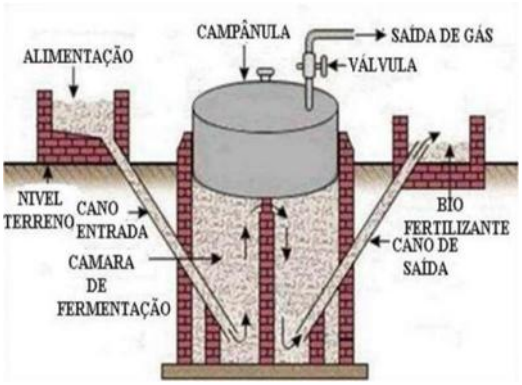
De modo geral os vários tipos de reatores se enquadram em três grandes categorias: reatores de fluxo vertical, reatores de fluxo horizontal e reatores de batelada. Nos dois primeiros casos, os resíduos passam pelos reatores em fluxo contínuo, sendo que o período de detenção é definido pela velocidade com que os resíduos percorrem o trajeto da entrada até a saída do reator. No terceiro caso, o reator recebe uma determinada quantidade de resíduos, processa-os, e quando a fase termófilica chega ao seu final, ele é aberto, descarregado em batelada, recomeçando-se o processo com novos resíduos frescos (FERNANDES e SILVA, 1999).

Compostagem anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico natural que ocorre na ausência de oxigênio molecular, no qual populações bacterianas interagem estreitamente para promover a fermentação estável e autorregulada da matéria orgânica, da qual resultam, principalmente, os gases metano e dióxido de carbono (FORESTI, 1997).

Segundo Chernicharo (2016), a digestão anaeróbia se dá pela ação de vários grupos de bactérias e acontece em quatro etapas. Nas primeiras duas etapas, a hidrólise seguida pela acidogênese, bactérias anaeróbias facultativas quebram os nutrientes em moléculas menores e formam ácidos voláteis de cadeia curta. Na terceira etapa os ácidos voláteis são transformados em ácido acético, que serve como substrato principal das bactérias metanogênicas (produtoras de metano), que ocorre na última etapa da decomposição, A Figura 9 mostra um modelo de biodigestor anaeróbio Chinês.

Figura 9 - Exemplo de biodigestor anaeróbio Chinês.



Fonte: Lustosa e Medeiros, 2014.

De acordo com KLEIN (1972), as principais vantagens da digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos são: a redução do volume para a disposição final, a conversão sem poluição do ar e a produção de composto orgânico estabilizado.

Apesar dos inúmeros métodos de compostagem disponíveis atualmente, a implantação do método ideal depende de vários fatores como: as características do ambiente, o espaço disponível para implantação, o tipo do resíduo a ser compostado, o tempo disponível para a espera do processo e a utilização do composto orgânico. Na gestão dos resíduos orgânicos domiciliares, o método que mais se adequa às condições de viabilidade prática e econômica é o de Compostagem em composteiras caseiras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Compostagem doméstica e sustentabilidade ambiental

A técnica de compostagem em composteiras caseiras é uma alternativa de tratamento a ser considerada para a reciclagem da fração que corresponde aos resíduos orgânicos domiciliares, pois caracteriza-se por um processo natural de decomposição biológica, controlável e operado in situ (GUIDONI, 1990). Segundo Andersen et al. (2011), a compostagem caseira envolve menos gastos de energia e recursos do que outras formas de utilização, uma vez que a recuperação da matéria-prima e a utilização do composto orgânico decorrem no mesmo local onde os resíduos são gerados.

Segundo Barrena (2014), para o bom desempenho da compostagem doméstica, além de controlar os parâmetros gerais que influenciam na eficiência do processo, também se faz necessário seguir alguns passos importantes, como por exemplo: verificar a localização ideal, definir a capacidade da composteira, separar os resíduos que podem ser compostados, definir a proporção da mistura dos resíduos, realizar a alimentação e o monitoramento do processo, para finalmente, obter um composto orgânico de qualidade.

Localização ideal

Segundo Souza (2001), na escolha do local a ser conduzida a compostagem deverão ser considerados os seguintes aspectos: facilidade de acesso, ocorrência de sol e sombra, proteção contra vento e contra a infiltração da água das chuvas. Estes aspectos são importantes, já que terão influência sobre as condições básicas para o processo de compostagem da matéria orgânica (OLIVEIRA et al., 2004).

Se a composteira ficar demasiadamente exposta ao sol, os resíduos orgânicos poderão secar excessivamente, além de poder prejudicar os microrganismos que atuam no processo (fungos, bactérias e actinomicetos), cuja maioria não sobrevive sob temperaturas superiores a 70 °C. Por outro lado, se a composteira ficar excessivamente à sombra, o resíduo tenderá a ficar muito úmido, o que também não é desejável (ANDERSEN et al., 2011).

Composteira

Para criar uma composteira caseira, é necessário escolher três recipientes de plástico iguais com tampa. Segundo Wangen e Freitas (2010), esse recipiente pode ser de qualquer tipo e formato, com o tamanho compatível à quantidade de resíduos orgânicos a serem tratados, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Ordem para montagem de uma compostagem caseira.



Fonte: Silva, 2018.

O procedimento de montagem se dará da seguinte forma:

- No balde 1 é necessário fazer um furo na lateral inferior que possibilite a implantação de uma torneira para retirada do chorume produzido durante o processo. Além disso, a tampa deve ser aberta para a passagem do chorume do balde 2;

- No balde 2 deverão ser feitos pequenos furos no fundo e sua tampa deverá ser aberta para a passagem do chorume do balde 3. Além disso, para garantir a circulação do ar, é necessário fazer pequenos furos nas laterais da parte superior;

- No balde 3 deverá ser feito furos no fundo e nas laterais do balde, assim como foi feito no balde 2. Porém, nesse caso, a tampa deve permanecer inteira para fechar a composteira.

Uma vez confeccionada a composteira, poderá então, dar início ao processo de compostagem. Como mostra a Figura 10, o balde 1 é destinado para o recebimento do chorume e os baldes 2 e 3, são destinados para os resíduos orgânicos introduzidos no processo de compostagem.

Resíduos que podem ser compostados

Segundo Andersen et al. (2012), o resíduo utilizado é a maior variável no processo de compostagem doméstica, por se tratar de um resíduo individual, ele é diferente em cada domicílio. Os resíduos que podem ser compostados classificam-se de forma simplificada em verdes e castanhos. Os verdes são os que têm maior proporção de nitrogênio, já os castanhos são os que contém maior proporção de carbono e são denominados de substrato aerador.

Os resíduos verdes podem ser constituídos principalmente de cascas e sobras de frutas, legumes, alimentos cozidos, entre outros. Esses resíduos são de rápida decomposição e representam a maioria dos resíduos na fração orgânica dos resíduos sólidos orgânicos domiciliares (KLIOPOVA e STANEVIČIŪTĖ, 2013).

Segundo Adhikari et al. (2013), a utilização de podas de jardim trituradas, grama, folhas secas, lascas de madeiras são exemplos de resíduos castanhos. O seu uso é indicado no ajuste da umidade por se tratarem de materiais secos e de estrutura mais rígida, que por sua vez, diminuem a compactação da massa em degradação, e assim, facilitam a aeração (CHANG e CHEN, 2010).

Segundo Colón et al. (2010), diferente da compostagem em grande escala, nesse sistema é importante uma maior seleção dos materiais orgânicos utilizados, evitando alimentos que exalam odores desagradáveis na sua degradação. O Quadro 2 traz um resumo dos tipos de resíduos que podem ser implementados no sistema e os que devem ser evitados.

Quadro 2 - Relação de resíduos para compostagem.

Pode	Moderadamente	Não Pode
Futas	Frutas cítricas	Carnes
Legumes	Alimentos cozidos	Bolo
Verduras	Guardanapos	Pão
Grãos e sementes	Ervas medicinais	Ossos de carne
Sachê de chá	Plantas verdes	Peixes e espinhas
Ervas e especiarias	-	Pimenta, alho e cebola
Borra e filtro de café	-	Óleo e gorduras
Cacas de ovos	-	Iorgutes e caldos em geral
Casca de amendoim	-	Fezes de animais domésticos
Folhas secas	-	Serragem de madeira tratada

Fonte: Adaptado do Manual de Compostagem Doméstica com Minhocas, 2018.

A classificação desses materiais é importante para determinar a proporção ideal dos resíduos em mistura, tendo como finalidade promover uma maior eficiência do processo.

Proporção de Resíduos em Mistura

Segundo Adhikari et al. (2013), a proporção entre a mistura de resíduos e substrato aerador, está entre os critérios de manejo que devem ser estabelecidos na compostagem domiciliar, pois, de maneira geral, ajudam no desenvolvimento microbiano, aceleram o processo e diminuem as possíveis emissões de gases poluentes, lixiviado, atração de vetores e maus odores. Quanto maior for a variedade dos resíduos, maior sua eficiência, pois mais tipos de microrganismos entrarão em ação, aumentando as possibilidades de obter um composto mais equilibrado.

Segundo Oliveira et al. (2008), os materiais ricos em carbono fornecem à matéria orgânica energia necessária para a decomposição. Já os materiais ricos em nitrogênio contribuem no crescimento dos microrganismos, acelerando os processos. A Tabela 1 apresenta a relação C/N de alguns resíduos adequados para compostagem domiciliar.

Tabela 1 - Relação Carbono/Nitrogênio de resíduos comuns para compostagem domiciliar.

Material	Relação C/N
Cascas de frutas e vegetais	25/1
Resíduos de cozinha	15/1 a 40/1
Fibras de abacaxi	44/1
Bagaço de laranja	18/1
Cascas e palhas de arroz	39/1
Borra de café	25/1
Gramas batatais	36/1
Lascas de madeira	48/1
Serragem de madeira	865/1

Fonte: Adaptado de Adhikari et al. 2013.

Vale ressaltar, segundo Kiehl (2004), que uma boa razão C/N é cerca de 30/1. Pesquisas mostram que para o composto orgânico final, a relação C/N deve encontrar-se abaixo de 22/1, esse é um indicador importante da estabilização do material.

Alimentação e monitoramento do processo

Segundo Fernández (2008), para que o processo de compostagem se desenrole em boas condições e para que a sua transformação se abrevie, é necessário assegurar que os microrganismos estejam em

condições ideais para se multiplicar e decompor a matéria orgânica presente. Para isso, é necessário um monitoramento constante de alguns processos como por exemplo: estabelecer o tempo ideal de revolvimento, controlar a umidade do material, observar a ocorrência de atração de vetores no decorrer das fases do processo, e por fim, identificar a maturação do composto orgânico.

Segundo Souza et al. (2001), o revolvimento do material tem como finalidade a liberação do calor do núcleo interno, promoção da aeração, controle da umidade e eliminação do mau cheiro. De acordo com Pereira Neto (1996), o composto deve ser revolvido a cada três dias. Além disso, se o mesmo apresentar umidade excessiva (entre 60 e 70%), deve-se revolver a cada dois dias por 4 a 5 vezes durante mais ou menos 12 dias. Se ocorrer baixa umidade (abaixo de 40%), é necessário a humidificação do material.

Medeiros (2016) descreve que durante o processo de compostagem é possível observar formação de larvas e geração de odor, mas isso pode ser mitigado através do revolvimento do material. Além disso, Souza et al. (2001) afirma que na etapa de maturação ocorre uma diminuição de volume, variando entre 30 a 70% e formação do chorume.

No decorrer do processo de compostagem poderão surgir alguns problemas, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Principais problemas, causas e soluções durante o processo de compostagem.

Problema	Causa provável	Solução
Temperatura elevada (+70°C)	Pilha muito grande	Diminuir o tamanho da pilha
	Arejamento insuficiente	Revolver o material
Processo lento (superior a 130 dias)	Demasiado castanhos	Adicionar verdes, adicionar água e revirar o material
	Materiais muito grandes	Cortar os materiais em tamanhos menores e revolver a mistura
Temperatura baixa (não chega a aquecer)	Pilha muito pequena	Aumentar o volume da pilha
	Humidade insuficiente	Adicionar água
	Arejamento insuficiente	Revolver o material
	Falta de verdes	Adicionar verdes
Cheiro a podre	Humidade excessiva e/ou compactação	Adicionar castanhos e revolver o material
Cheiro a amónia	Demasiado verdes	Adicionar castanhos e revolver o material
Pragas	Resto de carne, peixe, laticínios, gordura ou abertura na composteira	Retirar esses materiais, cobrir com terra ou folhas/ fazer reparos na composteira

Fonte: Adaptado de Pereira Neto, 1996.

As soluções dos problemas são simples e se forem feitas de maneira correta, o composto orgânico final terá uma qualidade nutricional adequada.

Composto final

Segundo Teixeira et. al. (2004), o composto orgânico estabilizado não degrada mais, mesmo depois de revolvido. Suas propriedades variam com a natureza do material original, as condições em que ocorre a compostagem e o grau de decomposição. Em termos gerais, apresenta coloração escura, cheiro e aparência de terra, textura solta, baixa relação C/N e alta capacidade de troca catiônica e absorção de água (Figura 11).

Figura 11 - Exemplo de um composto orgânico.



Fonte: Horta e flores, 2018.

Segundo Inácio e Miller (2009), o composto orgânico final pode ser classificado como fertilizante orgânico ou adubo orgânico. O fertilizante orgânico é definido como o material resultante da compostagem que atende a todas as especificações das normas brasileiras em relação à concentração de nutrientes. Já o adubo orgânico, é o material resultante da compostagem que não atinge os padrões estabelecidos nas normas brasileiras. Vale ressaltar que ambos os materiais exercem efeitos positivos na sua aplicação ao solo, sendo seu uso indicado no cultivo de hortaliças, leguminosas, grãos e plantas medicinais.

O órgão que controla e fiscaliza a composição química desse tipo de material é o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que regulamenta através da Instrução Normativa Nº 25 de 2009 as características físicas, químicas, de armazenamento e de rotulagem dos fertilizantes agrícolas. A Normativa estabelece teores mínimos para 4 macronutrientes (N, S, Ca e Mg) e para 8 micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn, Mo, Cl, B e Ni), conforme Tabela 4.

Tabela 2 - Teores totais mínimos dos nutrientes em fertilizantes orgânicos simples, mistos ou compostos, sólidos para aplicação direta no solo.

Nutrientes	Teor total mínimo (% em massa)
Carbono Organico (CO)	15,000
Nitrogênio (N)	0,500
Cálcio (Ca)	1,000
Magnésio (Mg)	1,000
Enxofre (S)	1,000
Boro (B)	0,030
Cloro ©	0,100
Cobre (Cu)	0,050
Ferro (Fe)	0,200
Manganês (Mn)	0,050
Molibdênio (Mo)	0,005
Níquel (Ni)	0,005
Zinco (Zn)	0,100

Fonte: Adaptado de BRASIL – MAPA, 2009.

Tais teores são estipulados de acordo com a classe e o tipo de fertilizante que está sendo tratado. O composto obtido de resíduos domiciliares orgânicos enquadra-se como fertilizante “Classe C”, uma vez que no processo produtivo, a matéria-prima decorre do lixo domiciliar e o produto final apresenta características que permitem sua aplicação segura na horticultura e agricultura (MAPA, 2019).

Sallin et al. (2019) realizou a compostagem de resíduo orgânico domiciliar e constatou que o composto orgânico produzido atendia aos requisitos mínimos exigidos pela normativa nº 25/2009 do MAPA, se classificando como fertilizante Classe C. Vale destacar, os valores mínimos de nitrogênio e carbono orgânico, que foram de e 2,47% e 20,64%, respectivamente.

Cruz e Silva (2021), realizando o processo de compostagem residencial no período de pandemia do COVID-19, obteve um composto orgânico com valor de pH 8,8, sendo considerado alcalino. Além disso, o fósforo, potássio e cálcio, tiveram resultados significativos, sendo 228 mg/dm³, 15 cmolc/dm³ e 8,40 cmolc/dm³, respectivamente. Em termos gerais, as concentrações de macro e micronutrientes demonstraram resultados satisfatórios em termos de fertilidade, sendo o composto classificado como adubo orgânico. Os Autores ainda realizaram o uso do adubo no cultivo de mudas de couve, demonstrando a viabilidade da aplicação do composto em mini horta.

Alguns estudos precursores compararam o NPK (fertilizante químico convencional) com o adubo orgânico oriundo da compostagem, a partir de suas aplicações em plantio de culturas. Schuphan (1974), por exemplo, realizou este estudo comparativo no plantio de espinafre, batata, cenoura e

repolho, e constatou, após o período de 12 anos de pesquisa, que os alimentos cultivados com a aplicação de adubação orgânica obtiveram acréscimos na matéria seca, proteína, vitamina C, açúcares totais, metionina, ferro, potássio, cálcio e fósforo. Concomitantemente, foi verificado o decréscimo de sódio e nitrato.

Zaparoli e Barros (2015), também realizaram tal comparação, avaliando a viabilidade econômica da substituição de fertilizantes químicos minerais por compostos orgânicos na agricultura. Para tanto, foram utilizadas as variáveis de custos e benefícios na produção. Como resultado, constatou-se uma economia monetária de 22,23% do uso do composto em relação ao fertilizante.

Em termos gerais, é importante destacar a qualidade e a eficiência nutricional do composto. Além de ser economicamente viável, é um recurso sustentável, por apresentar grande destaque na aplicação de hortas orgânicas residenciais.

Hortas orgânicas e qualidade de vida

Hortas orgânicas

Segundo o Jornal Agrícola (2013), a horta orgânica consiste no cultivo de hortaliças, leguminosas, grãos, temperos e ervas medicinais, de forma ecologicamente correta e sem o uso de agrotóxicos. Ou seja, é uma maneira de plantar que não agride o meio ambiente e nem oferece risco aos praticantes e consumidores.

Ao contrário de alimentos processados e industrializados que carregam em sua composição inúmeros ingredientes químicos, a horta orgânica dispõe de alimentos saudáveis, ricos em nutrientes. Além disso, é capaz de proporcionar um ambiente agradável, com bom aspecto visual e otimização de espaços, como cozinha e varanda (PETZ, 2022).

As hortas orgânicas residenciais podem ser suspensas, cultivadas no jardim, quintal ou até mesmo em pequenos vasos dentro de casa, desde que estejam em local que facilite a irrigação, controle e manutenção. A Figura 12 mostra um exemplo de uma horta orgânica em pequeno espaço na varanda.

Figura 12 - Exemplo de horta orgânica residencial.



Fonte: Petz, 2022.

De acordo com Petz (2022), construir uma horta em casa não é difícil, porém é preciso um bom planejamento para garantia de uma boa produção. Começando do zero, é importante o uso de sementeiras, até que as mudas criem folhas e sejam transferidas para o vaso. Isso vai garantir o melhor aproveitamento das sementes, ao passo que fortalece as plantas e garante seu bom desenvolvimento.

Segundo Guerra (2020), cada planta tem seu clima ideal de cultivo. Então, para um bom desempenho da horta, é necessário escolher os vegetais adequados. Por exemplo, o rabanete cresce melhor no frio, enquanto a berinjela é mais fácil de ser cultivada em lugares quentes. Além disso, o tempo de dedicação disponível também influencia na escolha do que plantar. O cultivo de hortaliças pode ser uma alternativa viável quando se tem pouco tempo disponível, pois a maioria delas tem um tempo curto para colheita. Na Tabela 5 é possível observar o ciclo de diversas hortaliças.

Tabela 3 - Ciclos de hortaliças.

Hortaliças	Meses próprios para plantio	Germinação (dias)	Colheita (dias)
Abóbora	set. a nov.	10	150
Abobrinha	set. a dez.	10	80
Alho	mar. a jul.	15	150
Beterraba	ano todo	12	90
Batatinha	jan./fev./ago./set.	15	120
Cenoura	ano todo	12	90
Ervilha	mar a jun.	10	100
Espinafre	ano todo	14	90
Mostarda	ano todo	6	70
Nabo	ano todo	8	70
Pepino	set. a nov.	7	90
Rabanete	ano todo	5	30
Salsa	ano todo	15	90

Fonte: Adaptado de Amaro et al., 2007.

Para que o cultivo seja realizado de forma eficiente, a irrigação deve ser realizada nos horários mais frescos do dia, sendo eles antes das 10 horas da manhã e depois das 16 horas. A rega da horta deve ser realizada uma ou duas vezes por semana, de forma intensa e, nos demais dias, de forma moderada. A água deve ser direcionada diretamente nas raízes, evitando ao máximo molhar as folhas, pois elas podem sofrer queimaduras quando as gotículas nelas depositadas são expostas à irradiações solares intensas (GUERRA, 2020).

É importante ressaltar que o cultivo de vegetais orgânicos garante uma alimentação saudável, livre de intervenções químicas, rica em sabor e nutrientes, favorável a uma boa qualidade de vida (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Qualidade de vida

O Brasil vem enfrentando um processo de transição nutricional nos últimos anos, sendo caracterizado pela presença de desnutrição, obesidade e doenças carenciais específicas ligadas à má alimentação (IBGE, 2019). Fatores ambientais, psicológicos e econômicos, possuem influência direta ou indireta na ingestão alimentar, onde o fator econômico, muitas vezes, determina a quantidade e a qualidade dos alimentos consumidos pela população (JOMORI; PROENÇA, CALVO, 2008).

Segundo IBGE (2019), atualmente, 60,3% da população brasileira adulta estão com excesso de peso e 25,9% dessas pessoas são obesas. Além disso, 75% das mortes no Brasil são ocasionadas por doenças

crônicas não transmissíveis, como o câncer e o diabetes, que têm como uma das causas a má alimentação e o consumo de produtos gerados com fertilizantes químicos, alimentos ultraprocessados, entre outros.

Com o intuito de promover saúde, segurança alimentar e nutricional, o Ministério da Saúde publicou, em 2014, o Guia Alimentar para a População Brasileira, ressaltando as primeiras diretrizes alimentares oficiais à população. O guia apresenta um conjunto de informações, recomendações e estratégias visando práticas alimentares apropriadas. Apesar do cenário nacional ainda apresentar debilidades quanto à prática sustentável, o guia recomenda enfaticamente o consumo de alimentos orgânicos como princípio básico da saúde.

O consumo de alimento orgânico é capaz de proporcionar maior concentração de nutrientes necessários ao indivíduo, promovendo crescimento, manutenção dos tecidos, desenvolvimento, resistência à doenças e contribuindo para a saúde e bem estar, conforme ODS 11 da Agenda 2030 (ONU, 2015).

Baudry et al. (2018), realizaram uma pesquisa com cerca de 70.000 adultos acompanhados pelo período de 5 anos e reportaram que os consumidores de produtos orgânicos têm 25% menos cânceres do que as pessoas que não comem esses tipos de alimentos. Os cientistas concluíram que os adultos que se alimentavam de frutas, verduras, laticínios, carne e outros alimentos orgânicos tiveram uma queda acentuada na incidência de linfomas (redução de 76%), linfomas Hodgkin (redução de 86%) e câncer de mama na pós-menopausa (redução de 34%).

Vale salientar, que a maior parte dos participantes da pesquisa (78%) eram mulheres, com idade média de 44 anos. Os cientistas ainda afirmam que uma dieta orgânica pode reduzir o risco de câncer principalmente pela ausência de pesticidas, disruptores endócrinos ou hormônios que imitam a função estrogênica e desempenham um papel causal no câncer de mama.

Conforme a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (AIRC, 2015) órgão da Organização Mundial da Saúde (OMS), três pesticidas comumente usados na agricultura brasileira, são classificados como prováveis carcinógenos humanos. São eles: glifosato, malation e diazinon, apontados como agentes do linfoma.

Tortorella et al. (2017), analisando os hábitos alimentares de portadores de diabetes melittus, em um Centro de Saúde da Família na cidade de Chapecó/SC, percebeu que uma alimentação desequilibrada e o consumo de produtos processados foram um dos principais motivos para o descontrole da doença.

Considerando que o portador de diabetes melittus está exposto a risco de adoecimento decorrente de respostas fisiológicas à alimentação e a atividade física, Tortorella et al. (2017), ainda propõem intensificar o desenvolvimento da educação em saúde com base no guia alimentar do Ministério da Saúde. A alimentação equilibrada está intimamente ligada à redução de internações por descompensação diabética, complicações cardiovasculares, redução dos casos de cânceres e combate a obesidade (TORTORELLA et al., 2017).

Com isso, é fácil perceber que uma alimentação saudável aliada à prática regular de atividade física é fundamental para uma boa saúde e qualidade de vida. Dentro desse contexto, a compostagem pode contribuir positivamente na parcela de uma alimentação saudável através da prática do uso do composto orgânico na horticultura.

CONCLUSÃO

A compostagem doméstica é um dos mais efetivos meios de tratamento e reaproveitamento de resíduos orgânicos residenciais. Além de ser uma forma sustentável de destinação adequada, o composto orgânico produzido estimula a prática de horticultura.

Diversos fatores podem influenciar no sucesso da compostagem, no entanto, é por meio da educação ambiental que este processo cresce e se consolida, oferecendo aos envolvidos o conhecimento necessário para transformar resíduos em recurso, e ensinando a importância do meio ambiente e gestão dos resíduos orgânicos.

O composto orgânico resultante da compostagem doméstica é comprovadamente nutritivo e econômico. Sua utilização em hortas orgânicas produz um alimento saudável, capaz de reduzir doenças crônicas, favorecer a qualidade de vida e estimular práticas cada vez mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em:https://analiticaqmcresiduos.paginas.uf sc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.

ADHIKARI, B. K. et al. Emissões de gases influenciadas pela configuração do sistema de compostagem doméstica. Jornal de gestão ambiental, v. 116, p. 163-171, fev. 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0301479712006366. Acesso em: 12 mar. 2023.

ALBANELL, E.; PLAIXATS, J.; CABRERO, T. Alterações químicas durante a vermicompostagem (Eisenia fetida) de esterco ovino misturado com resíduos industriais de algodão. Biologia e fertilidade dos solos, v. 6, p. 266-269, 1988. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/B F00260823. Acesso em: 12 mar. 2023.

ANDERSEN, Jacob Kragh et al. Compostagem doméstica como uma opção alternativa de tratamento para resíduos domésticos orgânicos na Dinamarca: uma avaliação ambiental usando modelagem de avaliação do ciclo de vida. Gestão de resíduos, v. 32, n. 1, p. 31-40, jan. 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0956053X11003953. Acesso em: 12 mar. 2023.

ANDERSEN, Jacob Kragh et al. Balanços de massa e inventário do ciclo de vida da compostagem caseira de resíduos orgânicos. Gestão de resíduos, v. 31, n. 9-10, p. 1934-1942, set./out. 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0956053X11002248. Acesso em: 12 mar. 2023.

BARRENA, Raquel et al. Compostagem caseira versus compostagem industrial: Influência do sistema de compostagem na qualidade do composto com foco na estabilidade do composto. Gestão de Resíduos, v. 34, n. 7, p. 1109-1116, jul. 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0956053X14000609. Acesso em: 12 mar. 2023.

BAUDRY, Julia et al. Associação da frequência do consumo de alimentos orgânicos com o risco de câncer: resultados do estudo de coorte prospectivo. Nutri Net-Santé. JAMA Internal Medicine. v. 178, n. 12, p.1597-1606, 2018. Disponível em: https://jamanetwork.com/journals/jamainte rnalmedicine/fullarticle/2707948. Acesso em: 12 fev. 2023.

BATISTA, J. G. F.; BATISTA, E.R.B. Compostagem: Utilização de compostos em horticultura. Universidade dos Açores, Centro de Investigação e Tecnologias Agrárias dos Açores.2007. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/C ompostagem.html?id=bGt6OgAACAAJ&r edir_esc=y. Acesso em: 12 fev. 2023.

BESEN, Gina Rizpah. Coleta seletiva com inclusão de catadores: construção participativa de indicadores e índices de sustentabilidade. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da USP, 2011. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/19 0333/mod_resource/content/1/GinaRizpah Besen.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.

BIDONE, F. R. A; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 1999. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/001045974. Acesso em: 12 mar. 2023.

BIDONE, Francisco Antonio. Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: eliminação e valorização.

FINEP/PROSAB, Brasília, 216 p., 2001. Disponível em: http://www.livroaberto.ibict.br/handle/1/643. Acesso em: 12 de mar. 2023.

BRASIL. Estatuto Da Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Circular técnica nº 29/2009/RJ. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, dez. 2009. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bit stream/doc/664309/1/CIT2909.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e das outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, nº 147, 02 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato 2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 12 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Instrução Normativa SDA nº 25, de 23 de julho de 2009. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 28 de jul. 2009. Disponível: https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assunt os/insumosagropecuarios/insumosagricolas/fertilizantes/legislacao/in-25-de23-7-2009-fertilizantesorganicos.pdf/view. Acesso em: 12 fev. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação / Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, Serviço Social do Comércio. Brasília, DF: MMA, 2017. p.168. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato 2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 12 mar. 2023.

BUENO, P. et al. Otimizando parâmetros de compostagem para conservação de nitrogênio em compostagem. Tecnologia de Biorecursos, v. 99, n. 11, p. 5069-5077, 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0960852407008152. Acesso em: 12 mar. 2023.

CARVALHO, Carlos Rosemberg Borges de. Compostagem de resíduos verdes e orgânicos alimentares. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: http://www.coc.ufrj.br/es/documents2/mest rado/2015/2574-carvalho-crb-tm-15-pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

CHERNICHARO, C. A. L. Biomassa nos sistemas anaeróbios. In: CHERNICHARO, C. A. L. Série de Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamentode Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, v. 4, p. 85-88, cap.3. 1997. Disponível em: https://www.digitalwater.com.br/wp-content/uploads/2020/03/conteudo_livro_L ODOS_ATIVADOS.pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

CHANG, James I.; CHEN, YJ. Efeitos de agentes de volume na compostagem de resíduos alimentares. Tecnologia de biorrecursos, v. 101, n. 15, p. 5917-5924, ago. 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0960852410003159. Acesso em: 12 mar. 2023.

COTTA, Jussara Aparecida de Oliveira et al. Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, p. 65-78, jan./mar. 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/fpHLHL3mst Pscjq5NHwJnYx/abstract/?lang=pt. Acesso em: 30 mar. 2023.

COLÓN, Joan et al. Avaliação ambiental da compostagem doméstica. Recursos, Conservação e Reciclagem, v. 54, n. 11, pág. 893-904, 2010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0921344910000261. Acesso em: 15 fev. 2023.

COSTA, M. S. S. M. Caracterização dos rejeitos de novilhos superprecoces: reciclagem energética e de nutrientes. 2005. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2005. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handl e/11449/101718/costa_mssm_dr_botfca.pd f?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 30 mar. 2023.

CRUZ, A. V. S.; SILVA, R. J. Gestão de resíduo sólido orgânico residencial em período de pandemia Covid-19. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2021. Disponível em: https://repository.ufrpe.br/bitstream/12345 6789/2719/1/TCC_art_AnaVit%c3%b3ria deSouzaCruz.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

FERNÁNDEZ, H. T. M. Produção de biofertilizantes por degradação microbiológica de resíduos orgânicos. In: FIGUEREDO, B. V. M. et al. Microorganismos e Agrobiodiversidade: O novo desafio para a agricultura, Editora Agro livros, p. 353 – 373, 2008.

FERNANDES, Fernando; SILVA, Sandra Márcia Cesário Pereira da. Manual prático para a compostagem de biossólidos. Londrina: Instituto de Pesquisas Agronômicas do Paraná, 1999. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/66 33104/mod_resource/content/1/Livro_Com postagem.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

FORESTI, E. Fundamentos do Processo de Digestão Anaeróbia. In: FORESTI, E. Sistemas de Tratamento Anaeróbio. Curso De Tratamento Biológico De Resíduos, 1997, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: UFSC, p. 1 -12, 1997. 1 pen drive.

GUIDONI, L. L. C. Compostagem de resíduo orgânico domiciliar e casca de arroz. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br/esa/files/2016/03/T CC-Lucas-Guidoni.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

INÁCIO, C. T., MILLER, P. R. M. Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 156 p., 2009. Disponível em: file:///C:/Users/julyl/Downloads/Composta gem-ciencia-e-pratica-para-a-gestao-de-residuos-organicos-2009%20(2).pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, 2015. Disponível em: https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html. Acesso em: 20 jan. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Obesidade mais do que dobra na população com mais de 20 anos, 2019. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noti cia/2020-10/ibge-obesidade-mais-do-que-dobra-na-populacao-com-mais-de-20-anos. Acesso em: 20 jan. 2023.

ISOLDI, L. A. Remoção de nitrogênio de águas residuárias da industrialização de arroz por tecnologias performantes. Tese (Doutorado em Biotecnologia). Centro de Biotecnologia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas. 152p., 1998. 1 pen drive.

JAHNEL, M.C.; MELLONI, R.; CARDOSO, J. B. N. Maturidade do composto de lixo. Scientia Agricola, 56:301-304, 1999. Disponível em: https://www.scielo.br/j/sa/a/kWDpCnYcJ9 vq9WxFJZqzCFc/?lang=pt. Acesso em: 20 jan. 2023.

JOMORI, M. M.; PROENÇA, R. P.; CALVO, M.C. M. Determinantes de escolha alimentar. Revista de Nutrição, v. 21, n. 1, p. 63-73, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rn/a/kgXSTmYNgr jFQjCY9HWGPgv/. Acesso em: 8 jan. 2023.

KADER, N. A. E. et al. Revolvimento, compactação e adição de água como fatores que afetam as emissões gasosas na compostagem de dejetos agrícolas. Tecnologia de Biorecursos, v. 98, n. 14, p. 2619-2628, out. 2007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852406003725. Acesso em: 8 jan. 2023.

KIEHL, Edmar José. Fertilizantes Orgânicos. São Paulo, n. 1, 1985. Disponível em: https://www.estantevirtual.com.br/livros/ed mar-jose-kiehl/fertilizantes-organicos/1096136760. Acesso em: 27 mar. 2023.

KIEHL. Edmar José. Manual de compostagem: maturação e qualidade de composto. EMBRAPA, São Paulo, n. 4, p. 173, 2004. Disponível em: https://limpezapublica.com.br/manual-de-compostagem-maturacao-e-qualidade-do-composto/. Acesso em: 27 mar. 2023.

KLEIN, S. A. Anaerobic digestion of solid waste. Compost Scie, Emmaus. v. 13, n. 1, p. 6-11, 1972. 1 pen drive. KLIOPOVA, Irina; STANEVIČIŪTĖ,

Kamilė Evaluation of Green Waste Composting Possibilities. Environ. Res. Engineering and Manage, v. 65, n. 3, pág. 6-19, 2013. Disponível em: https://erem.ktu.lt/index.php/erem/article/v iew/4680/2899. Acesso em: 27 mar. 2023.

KUMAR, Shefali et al. Fuzzy filtering for robust bioconcentration factor modeling. Environmental Modelling & Software, n. 24, p. 44-53, 2009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S136481520800087X. Acesso em: 27 mar. 2023.

KUTER, G. A. Biosolids composting. Water Environmental Federation, Alexandria, VA, 187 p., 1995. 1 pen drive.

LAU, Af K. et al. Experimentos de aeração para compostagem de dejetos suínos. Tecnologia de Biorecursos, v. 41, n. 2, pág. 145-152, 1992. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/096085249290185Z. Acesso em: 27 mar. 2023.

LIMA, Josanidia et al. Rede de cooperação no êxito de iniciativas voltadas para a utilização de composto orgânico na produção de hortaliças por pequenos agricultores em Camaçari-Ba. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 3, n. 3, p. 47-52, 2008. Disponível em: https://orgprints.org/id/eprint/27470/1/Lim a_Rede.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

MEDEIROS, Rachel Araújo. Sistema de compostagem de resíduos orgânicos oriundos de uma instituição de longa permanência para idosos. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: https://antigo.monografias.ufrn.br/handle/1 23456789/3369. Acesso em: 10 abr. 2023.

NÓBREGA, Rafaela Simão Abrahão et al. Utilização de biossólido no crescimento inicial de mudas de aroeira (Schinus terebynthifolius Raddi). Revista Árvore, v. 31, p. 239-246, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rarv/a/BVjgxzND8 cFrcTQk84WFH7s/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 30 mar. 2023.

OLIVEIRA, F. N. S.; LIMA, H. J. M.; CAJAZEIRA, J. P. Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos. Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, n. 89, 17 p., 2004. Disponível em:http://cnpat.embrapa.br/publica/pub/Se rDoc/doc_89.pdf. Acesso em: 06 abr. de 2023. OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.;

GARCEZ, T. B. Compostagem. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008. Disponível em: https://bit.ly/2GOI84v. Acesso em: 06 fev. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf. Acesso em: 20 mar. 2023.

ONWOSI, C.O et al. Composting tecnology in waste stabilization: On the methods challenges and future prospects. Journal of Environmental Management, Espanha, v.190, p.140-157, abr. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0301479716310349. Acesso em: 20 mar. 2023.

PEDROSA, T. D. et al. Análise da viabilidade técnica da compostagem para produção de adubo orgânico. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 11, p.182-191, 2020. Disponível em: file:///C:/Users/julyl/Downloads/scientia,+ Gerente+da+revista,+t+ARTIGO+3743+-+2020-03-28.pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

PEIXOTO, R. T. G. Compostagem: opção para o manejo orgânico do solo. Londrina: IAPAR, 46 p., 1988. Disponível em: https://library.wur.nl/WebQuery/titel/511552. Acesso em: 30 mar. 2023. PEREIRA NETO, J. T. Manual de Compostagem. Belo Horizonte: UNICEF, 1996.

PEREIRA NETO, J.T. Manual de compostagem: processo de baixo custo. Minas Gerais: UFV. Viçosa, 81p., jan. 2007.

PORTUGAL. Decreto Lei Nº 152/2002 de 23 de maio de 2002. Diário da República, 1ª série (119), p. 4680-4699. Portugal: Ministério do Ambiente, 2002. Disponível em:https://www.asf.com.pt/Biblioteca/Cata logo/winlibimg.aspx?skey=FD347D4CE22 B4C86B507AFD89AB353B1&doc=12218&img=704. Acesso em: 30 mar. 2023.

RUGGIERI, L. T. et al. A study on air filled porosity evolution in sludge composting. Int. J. Environ. Waste Manage, 2008. Disponível em: http://www.sciencedirect.com. Acesso em: 30 mar. 2023. REIS, M.F.P. et al. A produção de composto orgânico em uma unidade de triagem e compostagem. Revista Brasileira de Agroecologia, Rio Grande do Sul, v. 1, n. 1, p. 1057-1060, 2006. Disponível em: https://revistas.aba-agroecologia.org.br/rbagroecologia/article/ view/6206. Acesso em: 01 demar. 2023.

RODRIGUES, Mário Sérgio et al. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. Gestão de Resíduos na agricultura e agroindústria. Botucatu: FEPAF, p. 63-94, 2006. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/inf oteca/bitstream/doc/663578/1/Compostagem-ciencia-e-pratica-para-a-gestao-de-residuos-organicos-2009.pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

SALLIN, Valéria Pancieri. Caracterização de nutrientes e fungos presentes em composto de resíduo orgânico urbano de Montanha, ES. Anais [...]. Espírito Santo: Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, 2019. Disponível em: file:///C:/Users/julyl/Downloads/cassiasoar es,+Sallin1%20(1).pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

SAMPAIO, Rosana Ferreira; MANCINI, Marisa Cotta. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. Brazilian Journal of Physical Therapy, v. 11, p. 83-89, fev. 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbfis/a/79nG9Vk3s yHhnSgY7VsB6jG/?lang=pt&format=htm. Acesso em: 27 mar. 2023.

SANTOS, L. M. C. Resíduos com interesse agrícola: Evolução de parâmetros da sua compostagem. Bragança, n.1, 2001. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10 198/209/1/56%20-%20Res%c3%adduos%20com%20interess e%20agr%c3%adcola.pdf. Acesso em: 30 mar. 2023. SCHUPHAN, W. Valor nutricional das culturas influenciado por tratamentos de fertilizantes orgânicos e inorgânicos: resultados de 12 anos de experimentos com vegetais (1960-1972). Qualitas Plantarum, v. 23, p. 333-358, 1974. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/B F01095422. Acesso em: 30 mar. 2023.

SILVA, P.R.D. et al. Processo de estabilização de resíduos orgânicos. Vermicompostagem versus compostagem. Química Nova, São Paulo, v. 36, n. 5, p. 640-645, 2013. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/8NDC3SbS8jz YqwSpLBDNzDQ/?lang=pt. Acesso em: 30 mar. 2023.

SOUZA, F. A. et al. Compostagem. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico nº 50/2001/RJ. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 11 p., dez. 2001. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitst ream/CNPAB-2010/27180/1/cot050.pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

TEIXEIRA, L. B. et al. Processo de compostagem, a partir de lixo orgânico urbano, em leira estática com ventilação natural. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Agrobiologia. Circular Técnica nº 33/2004/PA. Belém: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 8 p., out. 2001. Disponível

em:https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/407137/1/Circ.tec.33.pdf. Acesso em: 01 de mar. 2023.

TORTORELLA, C. C. S. et al. Tendência temporal da prevalência de hipertensão arterial sistêmica e diabetes mellitus entre adultos cadastrados no Sistema Único de Saúde em Florianópolis, Santa Catarina, 2004-2011. Epidemiologia e Serviços de Saúde, v.26, p.469-480, 2017. Disponível em:https://www.scielo.br/j/ress/a/zhHLPQ 4fr39Hsw8LqtXkWDF/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 30 mar. 2023.

TUOMELA, M. et al. Biodegradação de lignina em um ambiente de compostagem: uma revisão. Tecnologia de biorrecursos, v.72, n. 2, p. 169-183, 2000. Disponível em:https://www.sciencedirect.com/science/ article/abs/pii/S0960852499001042. Acesso em: 30 mar. 2023.

VALENTE, Beatriz Simões et al. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. Archivos de zootecnia, v. 58, n. 224, p. 59-85, 2009. Disponível em: https://www.uco.es/ucopress/az/index.php/ az/article/view/5074/3285. Acesso em: 30 mar. 2023.

VERGARA, S.C. Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2004. Disponível em: https://madmunifacs.files.wordpress.com/2 016/08/vergara-mc3a9todos-de-pesquisa-em-administrac3a7ao-sylvia-vergara.pdf. Acesso em: 30 mar. 2023.

VERGNOUX, A.; GUILIANO, M.; LEDRÉAN, Y. et al. Monitoring of the evolution of an industrial compost andprediction of some compost properties by NIR spectroscopy. Science ofthe Total Environment, v. 409, p. 2390-2403, 2009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/arti cle/abs/pii/S0048969708012795. Acesso em: 30 mar. 2023.

ZAPAROLI, Murilo Rezende; BARROS, RT de V. Viabilidade do uso de resíduos orgânicos na agricultura como composto para melhoria de sua gestão mediante agregação de valor. In: Congresso brasileiro de gestão ambiental. 2015. p. 2015. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabal hos2016/III-040.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

Capítulo 4

10.37423/260611100

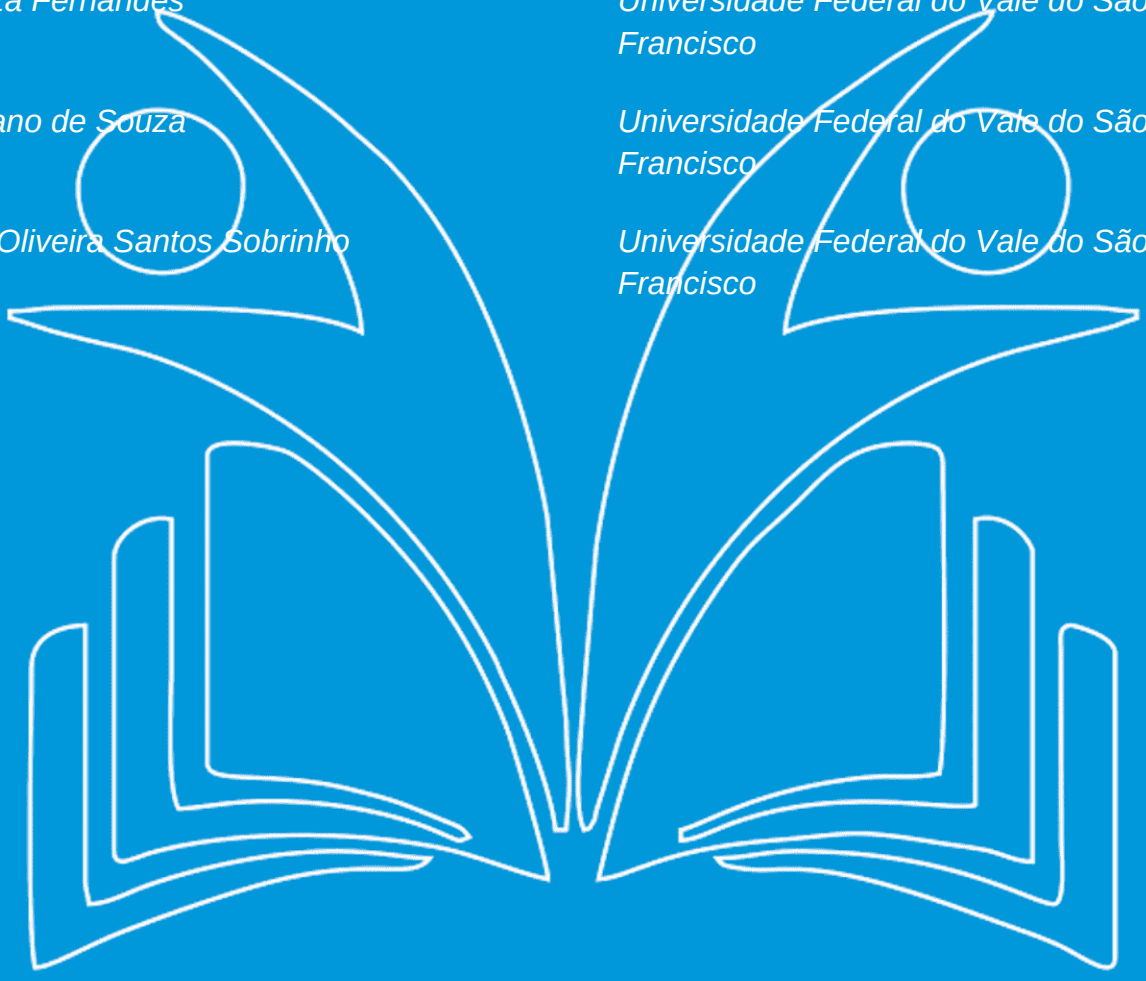
LOGÍSTICA REVERSA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ALTERNATIVAS PARA A INDÚSTRIA BRASILEIRA E VALE DO SÃO FRANCISCO

Elvis Gustavo Silva Araújo — *Universidade Federal do Vale do São Francisco*

Flávio Souza Fernandes — *Universidade Federal do Vale do São Francisco*

Lucas Soriano de Souza — *Universidade Federal do Vale do São Francisco*

Manoel de Oliveira Santos Sobrinho — *Universidade Federal do Vale do São Francisco*



RESUMO

Este artigo realiza uma análise das alternativas para a implementação da logística reversa de painéis fotovoltaicos no Brasil, considerando os aspectos regulatórios, os modelos de coleta e reaproveitamento, bem como a viabilidade econômica associada ao processo. Busca-se, assim, contribuir para o debate sobre soluções que conciliem a expansão da energia solar com a preservação ambiental e a criação de valor econômico.

Palavras-chave: Reciclagem de painéis fotovoltaicos; Logistica reversa; Viabilidade econômica da reciclagem de painéis fotovoltaicos no Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial na adoção de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica, impulsionado pela busca por fontes renováveis e limpas, apresenta um novo e significativo desafio ambiental: a gestão dos resíduos gerados pelo descarte de painéis ao final de sua vida útil. Com uma vida útil média de 20 a 25 anos, a crescente quantidade de módulos a serem descomissionados nos próximos anos torna a logística reversa uma necessidade crítica para o setor. A destinação correta desses resíduos é fundamental para mitigar impactos ambientais, recuperar materiais de alto valor agregado e promover uma transição para um modelo baseado na economia circular (SANTOS; FARIAS, 2025; OLIVEIRA; SILVA; BALAN, 2023).

No Brasil, um dos principais desafios reside na infraestrutura incipiente para a coleta e processamento desses resíduos. Além disso, a regulamentação para o descarte e a reciclagem ainda é limitada e carece de políticas públicas específicas para o setor. Atualmente, a gestão desses resíduos é regulamentada de forma mais genérica pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 e pelo Decreto nº 10.240 de 2020, que estabelecem a responsabilidade compartilhada e a logística reversa para produtos eletroeletrônicos de uso doméstico (USTULIN, 2024; GODOY, 2024). Contudo, a ausência de normas específicas dificulta a implementação de práticas eficientes e uniformes em larga escala (SANTOS; FARIAS, 2025).

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo discutir alternativas para a implementação da logística reversa de painéis fotovoltaicos no Brasil, considerando os aspectos regulatórios, os modelos de coleta e reaproveitamento, bem como a viabilidade econômica associada ao processo. Busca-se, assim, contribuir para o debate sobre soluções que conciliem a expansão da energia solar com a preservação ambiental e a criação de valor econômico.

2 REGULAMENTAÇÃO E POLÍTICAS DE INCENTIVO NO BRASIL

O crescimento exponencial da energia solar fotovoltaica no Brasil, impulsionado por metas de sustentabilidade e pela busca por fontes de energia mais limpas e baratas, traz consigo um desafio futuro de grande magnitude: a gestão dos resíduos de painéis solares ao fim de sua vida útil. Atualmente, o país carece de uma regulamentação

específica para a reciclagem e a logística reversa desses equipamentos, um cenário que acende um alerta entre pesquisadores e legisladores e que pode comprometer a sustentabilidade de toda a cadeia produtiva.

2.1 A Insuficiência da Legislação Vigente

Estudos recentes, como o realizado por pesquisadores da UFMS (Souza, 2023), indicam que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), embora seja um marco legal importante, mostra-se ineficiente para endereçar as particularidades dos painéis fotovoltaicos. A falta de diretrizes claras sobre a responsabilidade de cada ator na cadeia – fabricantes, importadores, distribuidores, consumidores e o poder público – somada à ausência de incentivos fiscais e financeiros, cria um vácuo regulatório que desestimula a estruturação de um sistema de logística reversa economicamente viável.

A complexidade e o custo do processo de reciclagem dos painéis, que envolve a separação de materiais como vidro, alumínio, silício e metais pesados, demandam tecnologias avançadas e investimentos significativos. Sem uma regulamentação que impulsione a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem mais eficientes e seguras, o descarte inadequado em aterros sanitários torna-se o caminho mais provável, com potenciais riscos de contaminação ambiental.

2.2 Iniciativas Legislativas: Em Busca de um Marco Regulatório

Atento a essa lacuna, o Congresso Nacional tem debatido propostas para a criação de um marco regulatório específico para a logística reversa de painéis fotovoltaicos. Uma das principais iniciativas é o Projeto de Lei 998/24, que tramita na Câmara dos Deputados. A proposta visa instituir a Política de Incentivo ao Desenvolvimento da Logística Reversa de Painéis Fotovoltaicos, com o objetivo de fomentar o reaproveitamento, a reciclagem e o descarte ambientalmente adequados desses materiais.

O texto do projeto prevê a criação de uma série de instrumentos para viabilizar a circularidade na cadeia fotovoltaica, entre eles:

- Fundos e linhas de financiamento: Destinados a apoiar pesquisas, o desenvolvimento de novas tecnologias e a implementação de infraestrutura para a reciclagem.

- Incentivos fiscais e tributários: Para empresas que investirem em processos de logística reversa e reciclagem, tornando a atividade mais atrativa economicamente.

- Sistemas de certificação: Para garantir a rastreabilidade e a destinação correta dos painéis descartados.

- Responsabilidade compartilhada: Definição clara das obrigações de cada elo da cadeia produtiva no ciclo de vida dos painéis.

A expectativa é que a aprovação de uma legislação específica para o setor não apenas minimize os impactos ambientais associados ao descarte dos painéis solares, mas também, que possa abrir novas oportunidades de negócio e promover a geração de empregos em uma economia verde e circular. A regulamentação é vista como um passo fundamental para assegurar que a transição energética no Brasil seja verdadeiramente sustentável em todas as suas etapas.

3 MODELOS DE COLETA, TRANSPORTE E REAPROVEITAMENTO

A operacionalização da logística reversa de painéis fotovoltaicos (FV) exige a integração eficiente entre as etapas de coleta, transporte, triagem e reaproveitamento. No contexto brasileiro, caracterizado por dimensões continentais, a estruturação desses modelos enfrenta o desafio de conectar os pontos de geração de resíduos às plantas de reciclagem (ROCHA; NETO; OLIVEIRA, 2024). Para regiões de alta irradiância e geração solar como o Vale do São Francisco, a definição de um modelo logístico otimizado é determinante para a viabilidade do sistema e para a transição efetiva para a economia circular (SANTOS, 2025).

3.1 Estratégias de Coleta e a Realidade do Vale do São Francisco

A etapa de coleta é o primeiro gargalo do sistema e deve ser segmentada de acordo com a origem do resíduo. A literatura aponta que a ausência de normas específicas dificulta a implementação de práticas uniformes, exigindo que a coleta seja adaptada às particularidades locais.

No Vale do São Francisco, que concentra grandes usinas (Geração Centralizada) e um número crescente de sistemas residenciais (Geração Distribuída), o modelo deve ser híbrido. Para a Geração Distribuída, a dispersão dos resíduos impõe um desafio logístico que, segundo Ustulin (2024), é agravado pela falta de clareza na responsabilidade dos atores da cadeia na atual Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A solução técnica recomendada envolve a criação de Ecopontos Regionais, mitigando o risco

de descarte em aterros comuns e permitindo a segregação inicial necessária para os processos de recuperação subsequentes.

3.2 O Desafio do Transporte e a Consolidação de Carga

O transporte representa um componente crítico dos Custos Operacionais (OPEX) em projetos de reciclagem. De acordo com a modelagem proposta por Sukaviriya e Ratanakuakangwan (2025), a viabilidade econômica de uma planta de reciclagem é altamente sensível aos custos variáveis, sendo que, o transporte inadequado pode inviabilizar o lucro operacional, exigindo que a recicladora capture uma fatia de mercado (market share) de pelo menos 15% para garantir retorno.

Considerando as projeções de Rocha, Neto e Oliveira (2024), que estimam um acúmulo de 12,9 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos no Brasil até 2040, o volume justifica investimentos em infraestrutura. No entanto, a dispersão territorial exige uma estratégia de "Hubs". Para o Vale do São Francisco, propõe-se a atuação como um Hub Regional de Consolidação.

Neste modelo, ao invés do transporte fracionado de longa distância para o Sudeste, os resíduos seriam consolidados localmente. Isso se alinha aos achados de Granata et al. (2022), que indicam que a sustentabilidade financeira, especialmente para painéis com menor teor de prata, depende de grandes volumes processados (acima de 18.000 a 43.000 toneladas/ano) para diluir os custos fixos e logísticos.

3.3 Tecnologias de Reaproveitamento e Triagem

A escolha da tecnologia de reaproveitamento define o valor agregado do produto final e o retorno financeiro do sistema. As referências analisadas apresentam uma dicotomia entre processos mecânicos e processos químicos de alta recuperação:

1. Reciclagem Mecânica: Focada na trituração e separação física. Segundo Sukaviriya e Ratanakuakangwan (2025), este método possui menor barreira de entrada (CAPEX mais baixo), mas sua receita é limitada à recuperação de materiais de menor valor, como vidro e alumínio, exigindo alta eficiência operacional para manter uma Taxa Interna de Retorno (TIR) atrativa.

2. Reciclagem Química e Alta Pureza: Em contraste, Lim et al. (2022) demonstram que processos envolvendo delaminação química e eletrodeposição permitem recuperar materiais críticos, como o silício e a prata, com pureza superior a 86%. Em suas simulações, essa rota tecnológica alcançou uma

TIR de 28,2% e um payback inferior a um ano, desde que o custo logístico de entrada seja subsidiado ou otimizado.

Para o cenário brasileiro e regional, a integração dessas visões sugere que o Vale do São Francisco deve focar na triagem e processamento mecânico preliminar (reduzindo volume e recuperando vidro), enviando apenas as frações ricas em metais para refinarias especializadas. Essa abordagem responde à necessidade de maximizar a recuperação de prata para compensar os custos do sistema, ao mesmo tempo em que aproveita o volume massivo projetado por Rocha et al. (2024).

4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A viabilidade econômica da logística reversa e reciclagem de painéis fotovoltaicos (FV) não deve ser analisada apenas sob a ótica da venda de materiais recuperados, mas sim através do equilíbrio entre CAPEX (Despesas de Capital), OPEX (Despesas Operacionais) e o volume de resíduos processados (Economia de Escala). A literatura recente aponta que a rentabilidade é altamente sensível à tecnologia empregada e à concentração de materiais valiosos, especificamente a prata.

4.1 Modelagem de Custos e Receitas

A estrutura de custos de uma planta de reciclagem pode ser dividida entre métodos mecânicos e processos de alta recuperação (químicos/térmicos).

Segundo Sukaviriya e Ratanakuakangwan (2025), que modelaram uma planta de reciclagem mecânica, a viabilidade do projeto depende drasticamente da quota de mercado (market share) que a recicladora consegue captar. Em seus estudos, uma planta só atinge um Valor Presente Líquido (VPL) positivo e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 8% ao capturar pelo menos 15% do mercado de resíduos disponíveis, processando cerca de 750 toneladas/ano. O modelo de regressão linear proposto por estes autores indica que os custos operacionais (OPEX) crescem linearmente com o volume, mas o custo fixo de investimento em maquinário (trituradores, separadores eletrostáticos) exige volume para ser diluído.

Por outro lado, Lim et al. (2022) analisaram um processo mais complexo envolvendo delaminação química e eletrodeposição para recuperar silício e prata com alta pureza. Embora o custo energético e químico seja maior, a receita gerada pela recuperação de 86% da prata e 97% do alumínio permitiu,

em simulação industrial, uma TIR de 28,2% e um payback inferior a um ano. Contudo, é crucial notar que este cenário otimista assume que a coleta dos resíduos é subsidiada, ou seja, o custo logístico de trazer o painel até a planta não recai totalmente sobre o reciclador.

4.2 O Fator Crítico: Prata e Economia de Escala

A análise de Granata et al. (2022) introduz uma variável crítica para a indústria brasileira: a concentração de prata nos módulos. Módulos mais antigos possuem maior teor de prata (0,2%), tornando a reciclagem economicamente sustentável sem a necessidade de taxas externas se o volume processado exceder 18.000 toneladas/ano.

Entretanto, para módulos mais modernos ou de filme fino, onde a concentração de prata cai para cerca de 0,05%, a receita da venda de materiais não cobre os custos operacionais. Nesse cenário de "baixo valor", Granata et al. (2022) demonstram que a reciclagem só se torna viável mediante a cobrança de uma "taxa de reciclagem" (PV fee) paga pelo gerador do resíduo, variando entre 200 a 600 dólares por tonelada, a menos que a planta processe volumes massivos superiores a 43.000 toneladas/ano.

4.3 Aplicação ao Cenário Brasileiro

Trazendo para a realidade nacional, Rocha, Neto e Oliveira (2024) projetam que o Brasil alcançará uma capacidade instalada de 192 GW até 2040, gerando um montante acumulado de aproximadamente 12,9 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos.

Este dado é fundamental para a análise de viabilidade. Cruzando a projeção de Rocha et al. (2024) com os limiares de rentabilidade de Granata et al. (2022) e Sukaviriya e Ratanakuakangwan (2025), observa-se que:

1. Volume Suficiente: O Brasil terá volume suficiente para sustentar plantas de reciclagem de escala industrial (>20.000 t/ano) na próxima década, superando a barreira da economia de escala.

2. Desafio Logístico: O grande volume projetado por Rocha et al. (2024) está disperso em um território continental. Como o modelo de Sukaviriya (2025) aponta que o OPEX é sensível a custos variáveis (como transporte), a viabilidade no Brasil dependerá da criação de centros de consolidação de carga antes do envio para reciclagem.

3. Necessidade de Regulação: Considerando que grande parte dos novos painéis instalados no Brasil possui menor teor de prata (tecnologias mais eficientes), o modelo de Granata (2022) sugere que o mercado brasileiro não se sustentará apenas com a venda de materiais. Será necessária a implementação de uma "Eco-taxa" ou logística reversa pré-paga, similar à WEEE europeia, para cobrir o gap financeiro entre o custo de processo e o valor recuperado.

A análise conjunta das fontes indica que a reciclagem de painéis FV no Brasil é tecnicamente viável e terá insumo (resíduo) abundante. Economicamente, no entanto, ela apresenta um risco financeiro se baseada apenas na recuperação de materiais (vidro e alumínio). A sustentabilidade financeira do setor dependerá da adoção de tecnologias que recuperem a prata e o silício (como proposto por Lim et al.) combinadas a um modelo regulatório que subsidie a coleta e o transporte, visto que o valor intrínseco dos materiais, isoladamente, muitas vezes não cobre o custo logístico em países de grande extensão territorial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo corrobora com a estruturação da logística reversa de painéis fotovoltaicos no Brasil. É um imperativo ambiental e uma oportunidade econômica estratégica, especialmente para polos de geração como o Vale do São Francisco.

No âmbito regulatório, confirma-se a ineficiência da atual Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para lidar com as especificidades do setor, gerando um vácuo de responsabilidade e insegurança jurídica. A viabilidade do sistema depende, portanto, da aprovação de marcos legais específicos, como o PL 998/24, que instituem a Responsabilidade Estendida do Produtor e mecanismos de incentivo fiscal essenciais para atrair investimentos privados.

Logisticamente, as dimensões continentais do país impõem o transporte como uma barreira financeira crítica (OPEX). Para o Vale do São Francisco, conclui-se que o modelo de envio direto para reciclagem no Sudeste é inviável. A solução mandatória é a implementação de Hubs Regionais de Consolidação, atuando na compactação e pré-processamento local para otimizar o frete e diluir custos fixos.

Economicamente, o cenário é desafiador, mas positivo. Embora a redução do teor de prata nos módulos modernos ameace a rentabilidade baseada apenas na venda de materiais, o volume massivo projetado de 12,9 milhões de toneladas de resíduos até 2040 garante a economia de escala industrial.

O equilíbrio financeiro exigirá, contudo, a adoção de tecnologias de alta recuperação (químicas) combinadas a "eco-taxas" antecipadas para custear a logística.

Em suma, a implementação de um sistema de logística reversa no Vale do São Francisco compensa e é tecnicamente viável, posicionando a região como pioneira na economia circular do Nordeste. Entretanto, essa viabilidade não é espontânea: ela condiciona-se à articulação imediata de um tripé formado por incentivo regulatório estatal, logística regionalizada (Hubs) e tecnologia de alta eficiência. Sem a aprovação do PL 998/24 (que cria as taxas/fundos) e sem o pré-processamento local, a conta não fecha.

REFERÊNCIAS

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Projeto cria política para incentivar reciclagem de painéis fotovoltaicos. Notícias – Portal da Câmara dos Deputados, 25 jun. 2024. Disponível em: https://www.camara.leg.br/noticias/1049829-projeto-cria-politica-para-incentivar-reciclagem-de-paineis-fotovoltaicos. Acesso em: 27 set. 2025.

GRANATA, G. et al. Recycling of solar photovoltaic panels: techno-economic assessment in waste management perspective. Resources, Conservation and Recycling, v. 187, 106579, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132384. Acesso em: 24 nov. 2025.

SOUZA, V. et al. Reciclagem de resíduos fotovoltaicos: mecanismos de gerenciamento e políticas públicas no estado brasileiro. In: Meio ambiente, tecnologias e demandas contemporâneas para o desenvolvimento sustentável. Vol. 1. Editora e-Publicar, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). Advances in Photovoltaic Module Recycling: Literature Review and Update to Empirical Life Cycle Inventory Data and Patent Review. Report IEA-PVPS T12-28:2024. 2024. Disponível em: IEA-PVPS-T12-28-2024-Report-PV-Recycling-LCI_EPRI.pdf. Acesso em: 24 nov. 2025.

LIM, M. S. W. et al. Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules. Journal of Cleaner Production, v. 340, 130796, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130796. Acesso em: 24 nov. 2025.

NEVES, Lívia. Brasil precisa de regulamentação específica para reciclagem de painéis, dizem pesquisadores. PV Magazine Brasil, 2 jul. 2024. Disponível em: https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/07/02/brasil-precisa-de-regulamentacao-especifica-para-reciclagem-de-paineis-dizem-pesquisadores. Acesso em: 27 set. 2025.

OLIVEIRA, Elaíne Vieira de. Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração. 2021. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/65187/1/2021_tcc_evoliveira.pdf. Acesso em: 27 set. 2025.

ROCHA, A. G.; NETO, A. B.; OLIVEIRA, B. G. de. Waste in the photovoltaic energy chain in Brazil: potential for the circular economy. Revista de Gestão Social e Ambiental (RGSA), v. 18, n. 10, p. 1–24, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-035. Acesso em: 24 nov. 2025

SUKAVIRIYA, S.; RATANAKUAKANGWAN, S. Optimizing sustainable solar panel recycling: A feasibility study of mechanical recycling method. E3S Web of Conferences, v. 629, 06002, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562906002. Acesso em: 24 nov. 2025.

SANTOS, C. A. L. dos. Reciclagem de painéis fotovoltaicos: uma visão geral sobre métodos e legislações a respeito do tema. 2025. Artigo (Especialização em Energia Fotovoltaica) – Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), Campus Pesqueira, 2025.

USTULIN, Gabriela. Resíduos de módulos fotovoltaicos: uma análise do cenário legislativo no Brasil e no mundo. 2024. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, 2024.

Disponível em: https://repositorio.unesp.br/items/346f5837-dff3-4e41-9492-431fdfba6a67. Acesso em: 30 Nov. 2025.

Capítulo 5

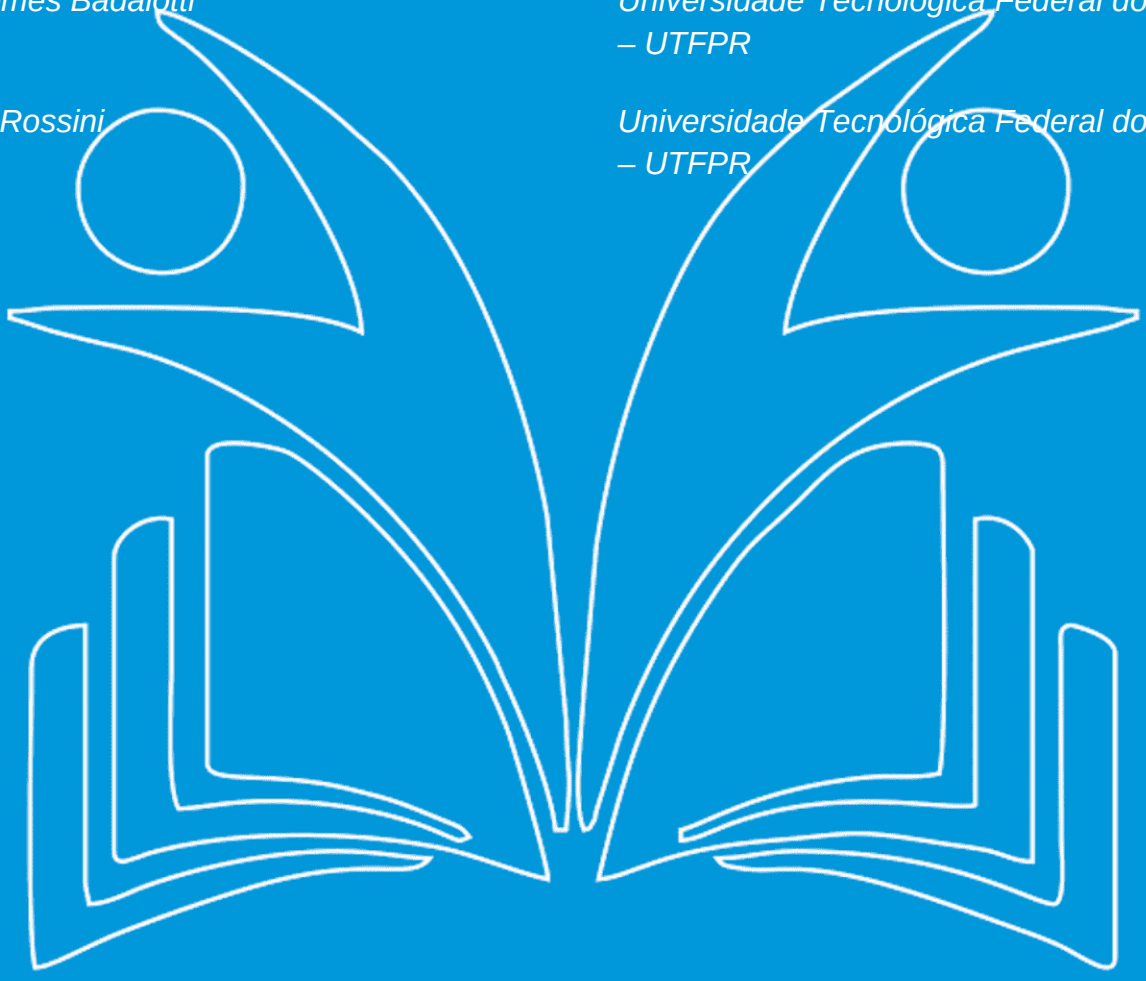
10.37423/260711108

MODELAGEM DE UM CIRCUITO RLC CHAVEADO DE DUAS MALHAS E VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL VIA MATLAB/SIMULINK®

Júlio Cesar Batista de Souza
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Samara Gomes Badalotti
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Flávio Luiz Rossini
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR



RESUMO

Por meio da modelagem e análise matemática, realizou-se uma simulação computacional da tensão no capacitor de um circuito RLC (com resistências, indutor e capacitor) que possui duas estágios de funcionamento devido à operação de uma chave. Para resolver o circuito, aplicaram-se as Leis de Kirchhoff e, em seguida, a Transformada de Laplace. Após resolver a matemática, encontrou-se a equação final no domínio do tempo. Para verificar a convergência dos cálculos, testou-se o circuito nos programas MATLAB® e Simulink®. Os resultados demonstram a validação por meio do gráfico oriundo dos cálculos analíticos sobrepôs-se à curva do simulador.

Palavras-chave: Circuito RLC; Transformada de Laplace; MATLAB®.

1 INTRODUÇÃO

A matemática é uma ferramenta essencial na engenharia moderna. A representação do mundo real através de números e equações permite prever o funcionamento de um projeto antes da sua construção [1]. Na engenharia elétrica, a análise de circuitos utiliza as Leis de Kirchhoff para compreender a distribuição da tensão pelos componentes. Frequentemente, essa prática gera equações matemáticas complexas que evidenciam a variação da energia ao longo do tempo [2].

No entanto, a resolução destas equações é frequentemente complexa e demorada, especialmente em circuitos maiores ou com chaves que ligam e desligam partes do circuito. A Transformada de Laplace, ferramenta matemática utilizada na modelagem de circuitos, transforma equações complexas (diferenciais) em contas simplificadas (algébricas), o que facilita a obtenção do resultado final do circuito [2].

Atualmente, diversos estudos evidenciam que a união dos cálculos analíticos via Transformada de Laplace com simulações computacionais proporciona excelentes resultados acadêmicos e práticos. Destacam-se, neste contexto, os trabalhos desenvolvidos pelo professor Flávio Luiz Rossini e seus discentes na UTFPR, que utilizam este método para estudar o comportamento de sistemas dinâmicos e circuitos elétricos.

Pesquisas recentes realizadas, apresentam um simulador computacional dedicado à análise de respostas transitórias em circuitos RLC série [5]. Seguindo uma abordagem semelhante, [6] empregaram os softwares MATLAB® e LTspice® para validar o equacionamento diferencial e a solução de circuitos RLC paralelos. Além destes, a aplicação da Transformada de Laplace também tem sido estendida para a resolução de sistemas de malhas múltiplas e complexas, conforme demonstrado por [3] e [4]. O conjunto dessas pesquisas reforça a importância de testar a matemática no computador. A utilização de programas como o MATLAB® e o Simulink® como meio de confirmação das equações desenvolvidas no papel consolida a aliança entre a teoria e a simulação computacional, prática que se mostra essencial para o desenvolvimento de projetos de engenharia seguros e confiáveis.

Com base nesta mesma ideia, o presente artigo tem como objetivo modelar e simular o funcionamento de um circuito elétrico (RLC) de duas malhas. O circuito liga-se a uma fonte de energia e possui uma chave que se fecha a meio do processo. O estudo foca-se na observação da mudança de tensão no capacitor durante dois estágios: primeiro, quando a chave está aberta e, segundo, após o fecho da chave (o que retira uma das resistências do ramo).

Para isso, o relatório mostra o passo a passo completo dos cálculos matemáticos com o auxílio da Transformada de Laplace. A análise tem o cuidado de incluir a tensão já guardada nos componentes antes da chave ser fechada. Após a obtenção da equação final, o resultado foi submetido a testes nos programas MATLAB® e Simulink®. Esta etapa serve para garantir que os cálculos manuais coincidem exatamente com a simulação.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Nesta seção, apresenta-se a base teórica necessária para o desenvolvimento da modelagem matemática do circuito elétrico proposto. Detalham-se as leis físicas que regem a distribuição de energia no circuito e as ferramentas matemáticas aplicadas para a resolução das equações diferenciais resultantes [1, 2].

Para facilitar a compreensão das equações apresentadas ao longo deste relatório, a Tabela 1 reúne todos os símbolos, grandezas e as suas respectivas unidades de medida no Sistema Internacional (SI).

Tabela 1 – símbolos e grandezas

Símbolo	Grandeza física / descrição	Unidade de medida (SI)
t	Tempo contínuo	Segundo (s)
s	Variável complexa de Laplace	Radianos por segundo (rad/s)
$v(t)$	Tensão elétrica no domínio do tempo	Volt (V)
$i(t)$	Corrente elétrica no domínio do tempo	Ampère (A)
$V(s)$	Tensão elétrica no domínio da frequência	Volt por segundo
$I(s)$	Corrente elétrica no domínio da frequência	Ampère por segundo
R	Resistência elétrica	Ohm (Ω)
L	Indutância	Henry (H)
C	Capacitância	Farad (F)
$\mathcal{L}$	Operador da Transformada de Laplace	
$\mathcal{L}^{-1}$	Operador da Transformada Inversa de Laplace	

2.1 Análise de Malhas e as Leis de Kirchhoff

A análise de malhas é um método sistemático utilizado para determinar as correntes que circulam em caminhos fechados de um circuito elétrico. Este método baseia-se diretamente na Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT) [2].

Conforme descrito por [2], a LKT estabelece que o somatório algébrico das tensões (quedas e elevações de potencial) em qualquer malha fechada de um circuito é sempre igual a zero. Matematicamente, a LKT expressa-se pela seguinte equação:

$$\sum_{k=1}^{n} v_k(t) = 0 \qquad (1)$$

Onde $v_k(t)$ representa a tensão no k-ésimo elemento da malha no instante t, e n é o número total de elementos presentes nesse caminho fechado.

Ao aplicar esta lei, assume-se um sentido de circulação arbitrário para a corrente da malha e somam-se as quedas de tensão em cada componente passivo, igualando-as às tensões fornecidas pelas fontes ativas.

2.2 Modelagem dos Elementos Passivos e a Transformada de Laplace

Para resolver circuitos compostos por resistores, indutores e capacitores (RLC), é necessário compreender a relação entre tensão e corrente em cada um destes elementos no domínio do tempo e, posteriormente, aplicar a Transformada de Laplace para simplificar a resolução [1].

2.2.1 Resistor

$$v(t) = R \cdot i(t) \qquad (2)$$

Ao aplicar a Transformada de Laplace em ambos os lados da Equação (2), a relação mantém-se linear e algébrica no domínio da frequência complexa s:

$$V(s) = R \cdot I(s) \qquad (3)$$

2.2.2 Indutor

O indutor armazena energia na forma de campo magnético. A tensão nos terminais de um indutor é proporcional à taxa de variação da corrente elétrica que o atravessa [2]:

$$v(t) = L\frac{di(t)}{dt} \qquad (4)$$

A aplicação da Transformada de Laplace sobre a derivada da corrente introduz a necessidade de avaliar o estado de energia anterior do componente [1]. A equação resultante no domínio da frequência é:

$$V(s) = sL \cdot I(s) - L \cdot i(0) \qquad (5)$$

Nesta equação, o termo sL representa a impedância indutiva, enquanto o termo $L \cdot i(0)$ atua como uma fonte de tensão virtual que representa a energia armazenada no indutor no instante imediatamente anterior à análise.

2.2.3 Capacitor

O capacitor armazena energia na forma de campo elétrico. A tensão nos seus terminais depende da acumulação de carga ao longo do tempo, o que se traduz na integral da corrente elétrica [2]:

$$v(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(\tau)d\tau + v(0) \qquad (6)$$

Onde $v(0)$ é a tensão armazenada no capacitor no instante inicial. Segundo Ogata [1], ao aplicar a Transformada de Laplace à Equação (6), a operação de integração no tempo transforma-se numa divisão por s no domínio da frequência:

$$V(s) = \frac{1}{sC}I(s) + \frac{v(0)}{s} \qquad (7)$$

O termo $\frac{1}{sC}$ corresponde à impedância capacitiva. O termo $\frac{v(0)}{s}$ atua como uma fonte de tensão contínua em série, representando a condição inicial de tensão do capacitor.

2.3 Resolução de Sistemas Lineares pelo Método de Cramer

Após a modelagem das malhas no domínio de Laplace, as equações agrupadas formam um sistema linear algébrico de duas incógnitas (I_1 e I_2). Para a resolução deste sistema, utiliza-se a Regra de Cramer [1]. O sistema matricial possui o seguinte formato padrão:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(s) \\ V_2(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Calcula-se inicialmente o determinante da matriz principal (Δ):

$$\Delta = a_{11} \cdot a_{22} - a_{21} \cdot a_{12} \quad (9)$$

Para determinar a corrente da malha desejada, substitui-se a coluna correspondente pela matriz dos termos independentes (V_1 e V_2) para obter o seu determinante específico (por exemplo, ΔI_2). A corrente final no domínio de Laplace é dada pela razão matemática:

$$I_2(s) = \frac{\Delta I_2}{\Delta} \quad (10)$$

2.4 Frações Parciais e a Transformada Inversa

A resposta obtida via Regra de Cramer apresenta-se como a razão entre dois polinómios complexos, $P(s)\ e\ Q(s)$. Para converter a função de volta para o domínio do tempo contínuo, utiliza-se o método de expansão em frações parciais [1, 2]:

$$\frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s+a} + \frac{A_3}{s+b} \quad (11)$$

Onde $A_1, A_2\ e\ A_3$ são os resíduos calculados e as raízes do denominador são reais e distintas (característica de circuitos superamortecidos). Uma vez separada a expressão, a Transformada Inversa de Laplace ($\mathcal{L}^{-1}$) é aplicada a cada termo utilizando pares de transformadas padrão [1]. As transformadas inversas aplicadas neste desenvolvimento para as respostas do tipo degrau e exponencial são, respetivamente:

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{K}{s}\right\} = K \cdot u(t) \quad (12)$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{K}{s+a}\right\} = K \cdot e^{-at} \cdot u(t) \quad (13)$$

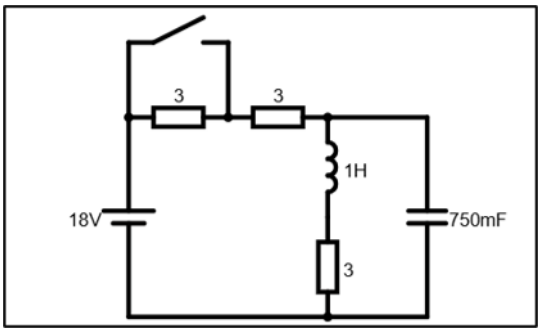
Onde K representa o resíduo constante e a a raiz do polinómio. Esta formulação matemática garante e justifica o decaimento suave e sem oscilações na resposta transitória final do circuito [2].

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Fundamentação e parâmetros do circuito

Este documento detalha o equacionamento de um circuito RLC de duas malhas, submetido a uma fonte de tensão em degrau e a um evento de chaveamento, como a representação na Figura 1.

Figura 1 – Circuito esquemático



Fonte: autoria própria(2026)

Os parâmetros estabelecidos são:

- Resistores: $R_1 = 3\Omega, R_2 = 3\Omega$ e $R_3 = 3\Omega$
- Indutor: $L = 1H$
- Capacitor: $C = 0{,}75F$
- Fonte de Tensão: $Vcc(t) = 18(t-1)\,V$
- Chaveamento: Uma chave em paralelo com o resistor R_1 é fechada no instante $t = 50s$, colocando este componente em curto-circuito.

O problema é dividido em duas fases distintas, limitadas pelos eventos no tempo.

3.2 Fase 1: antes do fechamento da chave

No intervalo $1s \leq t < 50s$, a chave está aberta. A fonte "enxerga" os resistores R_1 e R_2 em série, resultando em uma resistência de entrada equivalente de 6Ω. Como a fonte é ligada em $t = 1s$, o circuito parte do repouso, o que significa que as condições iniciais de energia no indutor e no capacitor são nulas: $iL(1) = 0$ e $vC(1) = 0$.

Para facilitar a manipulação algébrica, adota-se o instante $t = 1s$ como a origem temporal para a Transformada de Laplace ($t_0 = 0$), lembrando-se de aplicar o atraso $(t - 1)$ na resposta final no domínio do tempo. Sendo assim, a fonte $18u(t)$ transformada para o domínio de Laplace é $\frac{18}{s}$.

3.2.1 Modelagem das equações de malha

Aplicou-se a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT) em cada malha, adotando o sentido horário para as correntes $I_1(s)\ e\ I_2(s)$.

Na malha 1 (esquerda), a tensão fornecida pela fonte é igual à soma das quedas de tensão nos resistores $R_1 + R_2$, no indutor L e no resistor R_3. Note que o ramo central é percorrido pelas duas correntes em sentidos opostos, dessa forma.

$$(R_1 + R_2)I_1(s) + sL[I_1(s) - I_2(s)] + R_3[I_1(s) - I_2(s)] = \frac{18}{s} \qquad (14)$$

Substituíram-se os valores dos componentes na Equação (14), originando a Equação (15):

$$6I_1(s) + 1[I_1(s) - I_2(s)] + 3[I_1(s) - I_2(s)] = \frac{18}{s} \qquad (15)$$

Evidenciaram-se os termos $I_1(s)\ e\ I_2(s)$ da Equação (15), o que resultou na Equação (16):

$$(s + 9)I_1(s) - (s + 3)I_2(s) = \frac{18}{s} \qquad (16)$$

Na malha 2 (direita), não há fontes ativas nesta malha. A soma das quedas de tensão no ramo central e no capacitor deve ser zero, conforme descrito pela Equação (17):

$$R_3[I_2(s) - I_1(s)] + sL[I_2(s) - I_1(s)] + \frac{1}{sC}I_2(s) = 0 \qquad (17)$$

Substituíram-se os valores dos componentes na Equação (17), obtendo-se a Equação (18):

$$3[I_2(s) - I_1(s)] + s1[I_2(s) - I_1(s)] + \frac{4}{s3}I_2(s) = 0 \qquad (18)$$

Evidenciaram-se os termos $I_1(s)\ e\ I_2(s)$ na Equação (18), chegou-se à Equação (19):

$$-(s + 3)I_1(s) + \left(s + 3 + \frac{4}{3s}\right)I_2(s) = 0 \qquad (19)$$

3.2.2 Aplicação do Método de Cramer

A partir das Equações (16) e (19), construiu-se o sistema linear na forma matricial, apresentado na Equação (20):

$$\begin{bmatrix} s+9 & -(s+3) \\ -(s+3) & s+3+\frac{4}{3s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{18}{s} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (20)$$

Calculou-se o determinante da matriz principal (Δ) na Equação (21), ao multiplicar a diagonal principal e subtrair o produto da diagonal secundária:

$$\Delta = (s+9)\left(s+3+\frac{4}{3s}\right) - [-(s+3)]^2 \qquad (21)$$

Com a expansão dos termos da Equação (21), obteve-se a Equação (22):

$$\Delta = \left(s^2+3s+\frac{4}{3}+9s+27+\frac{12}{s}\right) - (s^2+6s+9) \qquad (22)$$

Agruparam-se os termos semelhantes na Equação (22) para simplificar o determinante principal, resultando na Equação (23):

$$\Delta = 6s+\frac{58}{3}+\frac{12}{s} \qquad (23)$$

Realizou-se o Mínimo Múltiplo Comum (MMC) na Equação (23) para unificar a expressão de Δ, como mostra a Equação (24):

$$\Delta = \frac{18s^2+58s+36}{3s} \qquad (24)$$

Em seguida, para encontrar a corrente da malha 2 (necessária para calcular a tensão no capacitor), calculou-se o determinante ΔI_2, substituindo a segunda coluna pela matriz dos termos independentes, conforme a Equação (25):

$$\Delta I_2 = \begin{bmatrix} s+9 & \frac{18}{s} \\ -(s+3) & 0 \end{bmatrix} \qquad (25)$$

O cálculo do determinante da Equação (25) resulta em:

$$\Delta I_2 = (s+9)(0) - \left(\frac{18}{s}\right)[-(s+3)] \qquad (26)$$

O que resulta na Equação (27):

$$\Delta I_2 = \frac{18(s+3)}{s} = \frac{18s+54}{s} \qquad (27)$$

Aplicou-se a Regra de Cramer para obter $I_2(s)$, dividindo ΔI_2 (Equação 27) por Δ (Equação 24), obtendo-se a Equação (28):

$$I_2(s) = \frac{\Delta I_2}{\Delta} = \frac{\frac{18s+54}{s}}{\frac{18s^2+58s+36}{3s}} \qquad (28)$$

Simplificou-se a Equação (28), ao anular o 's' do denominador e multiplicar os termos extremos, o que gerou a Equação (29):

$$I_2(s) = \frac{3(18s+54)}{18s^2+58s+36} \qquad (29)$$

Dividiu-se numerador e denominador da Equação (29) por 18 para obter o polinômio no denominador, resultando-se na Equação (30):

$$I_2(s) = \frac{3s+9}{s^2+\frac{29}{9}s+2} \qquad (30)$$

3.2.3 Tensão no Capacitor e Frações Parciais

A tensão no capacitor no domínio da frequência é dada pela lei de Ohm generalizada $Vc(s) = Zc(s) \cdot I_2(s)$, conforme a Equação (31):

$$Vc(s) = \frac{1}{sC} I_2(s) = \frac{4}{3s}\left(\frac{3s+9}{s^2+\frac{29}{9}s+2}\right) \qquad (31)$$

Multiplicaram-se os termos da Equação (31) para encontrar a Função de Transferência final da tensão, apresentada na Equação (32):

$$Vc(s) = \frac{4s+12}{s(s^2+\frac{29}{9}s+2)} \qquad (32)$$

Para aplicar a Transformada Inversa na Equação (32), fez-se necessário expandir essa expressão em frações parciais. Primeiro, igualou-se o polinômio de segundo grau do denominador a zero (Equação 33) e aplicou-se a fórmula de Bhaskara (Equação 34):

$$s^2 + \frac{29}{9}s + 2 = 0 \qquad (33)$$

$$s = \frac{-\frac{29}{9} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{29}{9}\right)^2 - 4(1)(2)\right)}}{2} \qquad (34)$$

As raízes reais e distintas obtidas foram:

$$s_1 = -0{,}839 \qquad e \qquad s_2 = -2{,}383$$

Com base nestas raízes, reescreveu-se a Equação (32) no formato de frações parciais, originando a Equação (35):

$$Vc(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + 0{,}839} + \frac{C}{s + 2{,}383} \qquad (35)$$

Calculou-se o resíduo A (Regime Permanente) ao multiplicar a Equação (32) por s e avaliando em $s = 0$, como mostra a Equação (36):

$$A = \frac{4s + 12}{\left(s^2 + \frac{29}{9}s + 2\right)}\bigg|_{s=0} = \frac{12}{2} = 6 \qquad (36)$$

Calculou-se o resíduo B ao multiplicar por $(s + 0{,}839)$ e ao avaliar na raiz $s = -0{,}839$, obtendo-se a Equação (37):

$$B = \frac{4(-0{,}839) + 12}{(-0{,}839)(-0{,}839 + 2{,}383)}\bigg|_{s=-0{,}839} = -6{,}671 \qquad (37)$$

Calculou-se o resíduo C ao multiplicar por $(s + 2{,}383)$ e avaliando na raiz $s = -2{,}383$, conforme a Equação (38):

$$C = \frac{4(-2{,}383) + 12}{(-2{,}383)(-2{,}383 + 0{,}839)}\bigg|_{s=-2{,}383} = 0{,}671 \qquad (38)$$

3.2.4 Solução no Domínio do Tempo

Substituíram-se os resíduos encontrados (A, B e C) na Equação (35) e aplicou-se a Transformada Inversa de Laplace ($\mathcal{L}^{-1}$), resultando na Equação (39):

$$vc(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{6}{s} - \frac{6{,}671}{s + 0{,}839} + \frac{0{,}671}{s + 2{,}383}\right\} \qquad (39)$$

Readequando a resposta temporal para incorporar o atraso da fonte que ligou em $t = 1$, obteve-se a Equação (40), que descreve a tensão na Fase 1:

$$vc(t) = \left[6 - 6{,}671e^{-0{,}839(t-1)} + 0{,}671e^{-2{,}383(t-1)}\right]u(t-1)\ V \qquad (40)$$

3.3 Após o fechamento da chave

No instante $t = 50s$, considera-se que o circuito já atingiu o seu regime permanente em relação à fase anterior. O fechamento da chave coloca R_1 em curto-circuito, eliminando-o. A resistência equivalente de entrada passa a ser apenas $R_2 = 3\Omega$.

3.3.1 Definição das Condições Iniciais

Para resolver o novo sistema transiente, determinaram-se as condições iniciais de energia no momento do chaveamento. Em regime DC, o capacitor atua como circuito aberto e o indutor como curto-circuito.

A tensão no capacitor assume o valor constante do resíduo A (Equação 36) da fase anterior, conforme a Equação (41):

$$vc(50) = 6V \qquad (41)$$

A corrente no indutor percorre apenas as resistências $R_1, R_2\ e\ R_3$. Logo, calcula-se a corrente inicial pela Equação (42):

$$iL(50) = \frac{Vcc}{R1 + R_2 + R_3} = \frac{18}{3+3+3} = 2A \qquad (42)$$

Para simplificar a notação de Laplace, assumiu-se a mudança de variável $t' = t - 50$.

3.3.2 Modelagem das Equações de Malha com Energia Armazenada

No domínio de Laplace, a energia armazenada nos componentes reativos gera fontes virtuais.

A derivada da corrente no indutor se torna: $L\frac{di}{dt} \rightarrow sLI(s) - Li(0)$

A integral da corrente no capacitor se torna: $\frac{1}{C}\int idt \rightarrow \frac{I(s)}{sC} + \frac{vc(0)}{s}$

Na malha 1 (esquerda): Aplicou-se a LKT, agora contendo a fonte virtual do indutor devido à sua corrente inicial de $2A$, originando a Equação (43):

$$R_2\, I_1(s) + \left[sL\big(I_1(s) - I_2(s)\big) - Li(0)\right] + R_3\big(I_1(s) - I_2(s)\big) = \frac{18}{s} \qquad (43)$$

Substituíram-se os valores na Equação (43) ($R_2 = 3, L = 1, i(0) = 2, R_3 = 3$), resultando na Equação (44):

$$3\, I_1(s) + s\big(I_1(s) - I_2(s)\big) - 2 + 3\big(I_1(s) - I_2(s)\big) = \frac{18}{s} \qquad (44)$$

Agruparam-se os termos da Equação (44), movendo a condição inicial constante para o lado direito, o que gerou a Equação (45):

$$(s+6)I_1(s) - (s+3)I_2(s) = \frac{18}{s} + 2 = \frac{2s+18}{s} \qquad (45)$$

Na malha 2 (direita) aplicou-se a LKT. Ao percorrer o indutor no sentido da Malha 2, a corrente está contra o fluxo estabelecido $i(0)$, portanto o sinal da condição inicial é invertido. Incluiu-se também a tensão inicial do capacitor, conforme expresso na Equação (46):

$$\frac{1}{sC}I_2(s) + \frac{vc(0)}{s} + R_3\big(I_2(s) - I_1(s)\big) + \left[sL\big(I_2(s) - I_1(s)\big) - \big(-Li(0)\big)\right] = 0 \qquad (46)$$

Substituíram-se os valores ($C = 0{,}75, vc(0) = 6$) na Equação (46), originando a Equação (47):

$$\frac{4}{3s}I_2(s) + \frac{6}{s} + 3\big(I_2(s) - I_1(s)\big) + s\big(I_2(s) - I_1(s)\big) + 2 = 0 \qquad (47)$$

Agruparam-se os termos da Equação (47), movendo as condições iniciais para o lado direito da igualdade, resultando na Equação (48):

$$-(s+3)I_1(s) + \left(s + 3 + \tfrac{4}{3s}\right)I_2(s) = -\tfrac{6}{s} - 2 = -\tfrac{2s+6}{s} \qquad (48)$$

3.3.3 Nova Aplicação do Método de Cramer

A partir das Equações (45) e (48), o novo sistema matricial constitui-se pela Equação (49):

$$\begin{bmatrix} s+6 & -(s+3) \\ -(s+3) & s+3+\dfrac{4}{3s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{2s+18}{s} \\ -\dfrac{2s+6}{s} \end{bmatrix} \qquad (49)$$

Calculou-se o novo determinante principal Δ através da Equação (50):

$$\Delta = (s+6)\left(s + 3 + \frac{4}{3s}\right) - (s+3)^2 \qquad (50)$$

Expandindo-se a Equação (50), obteve-se a Equação (51):

$$\Delta = \left(s^2 + 9s + \frac{58}{3} + \frac{8}{s}\right) - (s^2 + 6s + 9) \qquad (51)$$

Que, simplificada, resulta na Equação (52):

$$\Delta = \frac{9s^2 + 31s + 24}{3s} \qquad (52)$$

Calculou-se o determinante da malha 2 (ΔI_2) através da Equação (53):

$$\Delta I_2 = \begin{bmatrix} s+6 & \frac{2s+18}{s} \\ -(s+3) & -\frac{2s+6}{s} \end{bmatrix} \qquad (53)$$

A partir do desenvolvimento do determinante da Equação (53), gerou-se a Equação (54):

$$\Delta I_2 = (s+6)\left(-\frac{2s+6}{s}\right) - [-(s+3)]\left(\frac{2s+18}{s}\right) \qquad (54)$$

Com a simplificação dos termos da Equação (54), obteve-se o resultado expresso na Equação (55):

$$\Delta I_2 = \frac{(-2s^2 - 18s - 36) + (2s^2 + 24s + 54)}{s} = \frac{6s + 18}{s} \qquad (55)$$

Obteve-se $I_2(s)$ dividindo a Equação (55) pela Equação (52), conforme apresentado na Equação (56):

$$I_2(s) = \frac{\frac{6s+18}{s}}{\frac{9s^2 + 31s + 24}{3s}} = \frac{18s + 54}{9s^2 + 31s + 24} \qquad (56)$$

3.3.4 Cálculo Completo da Tensão no Capacitor

Na fase transitória com energia pré-armazenada, a tensão total no capacitor não depende apenas da corrente injetada, mas também da sua tensão inicial mantida, conforme expressa a Equação (57):

$$Vc(s) = \frac{1}{sC} I_2(s) + \frac{vc(50)}{s} \qquad (57)$$

A substituição da Equação (56) e da condição inicial na Equação (57) originou a Equação (58):

$$Vc(s) = \frac{4}{3s}\left(\frac{2s+6}{s^2 + \frac{31}{9}s + \frac{8}{3}}\right) + \frac{6}{s} \qquad (58)$$

Realizou-se a soma algébrica via MMC na Equação (58) para obter uma única fração polinomial, o que gerou as Equações (59) e (60):

$$Vc(s) = \frac{8s + 24 + 18\left(s^2 + \frac{31}{9}s + \frac{8}{3}\right)}{3s\left(s^2 + \frac{31}{9}s + \frac{8}{3}\right)} \qquad (59)$$

$$Vc(s) = \frac{18s^2 + 70s + 72}{3s\left(s^2 + \frac{31}{9}s + \frac{8}{3}\right)} \qquad (60)$$

A partir da simplificação do numerador da Equação (60) por 3, obteve-se a Equação (61):

$$Vc(s) = \frac{6s^2 + \frac{70}{3}s + 24}{s\left(s^2 + \frac{31}{9}s + \frac{8}{3}\right)} \qquad (61)$$

Encontraram-se as raízes do novo denominador aplicando-se a fórmula de Bhaskara, expressa na Equação (62):

$$s^2 + \frac{31}{9}s + \frac{8}{3} = 0 \qquad (62)$$

As raízes resultantes da Equação (62) são:

$$s_3 = -1{,}175 \quad e \quad s_4 = -2{,}269$$

Com estes valores, aplicou-se a expansão por Frações Parciais na Equação (61), obtendo-se o formato da Equação (63):

$$Vc(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + 1{,}175} + \frac{C}{s + 2{,}269} \qquad (63)$$

Calculou-se o resíduo A (Regime Permanente) da Equação (63), resultando na Equação (64):

$$A = \frac{s(6s^2 + 23{,}33s + 24)}{s(s^2 + 3{,}44s + 2{,}66)}\bigg|_{s=0} = \frac{72}{8} = 9 \qquad (64)$$

Calculou-se o resíduo B ao multiplicar por $(s + 1{,}175)$ e avaliando na raiz $s = -1{,}175$, conforme a Equação (65):

$$B = \frac{6s^2 + 23{,}33s + 24}{s(s + 2{,}269)}\bigg|_{s=-1{,}175} = -3{,}784 \qquad (65)$$

Calculou-se o resíduo C ao multiplicar por $(s + 2{,}269)$ e avaliando na raiz $s = -2{,}269$, como demonstrado na Equação (66):

$$C = \left.\frac{6s^2 + 23{,}33s + 24}{s(s + 1{,}175)}\right|_{s=-2{,}269} = 0{,}784 \qquad (66)$$

3.3.5 Solução Final no Domínio do Tempo

Aplicou-se a Transformada Inversa de Laplace $(\mathcal{L}^{-1})$ e realocou-se a variável temporal para refletir o evento ocorrido em $t = 50s$, resultando na equação final do circuito (Equação 67):

$$vc(t) = \left[9 - 3{,}784e^{-1{,}175(t-50)} + 0{,}784e^{-2{,}269(t-50)}\right]u(t-50)V \qquad (67)$$

A aplicação do método de malhas em conjunto com a Transformada de Laplace mostrou-se uma ferramenta excepcionalmente robusta para o equacionamento deste circuito. O tratamento rigoroso das condições iniciais permitiu realizar a transição perfeita entre as duas fases de operação. A resposta analítica corrobora o comportamento físico esperado: uma resposta inicial superamortecida convergindo para $6V$, seguida de um novo degrau de carga após o chaveamento, atingindo a estabilidade máxima em $9V$.

4 *SCRIPT* IMPLEMENTADO

4.1 SIMULAÇÃO E ANÁLISE COMPUTACIONAL DO CIRCUITO RLC

Para validar a modelagem matemática realizada no domínio de Laplace, implementou-se e simulou-se o circuito a partir dos *softwares* Simulink e MATLAB®.

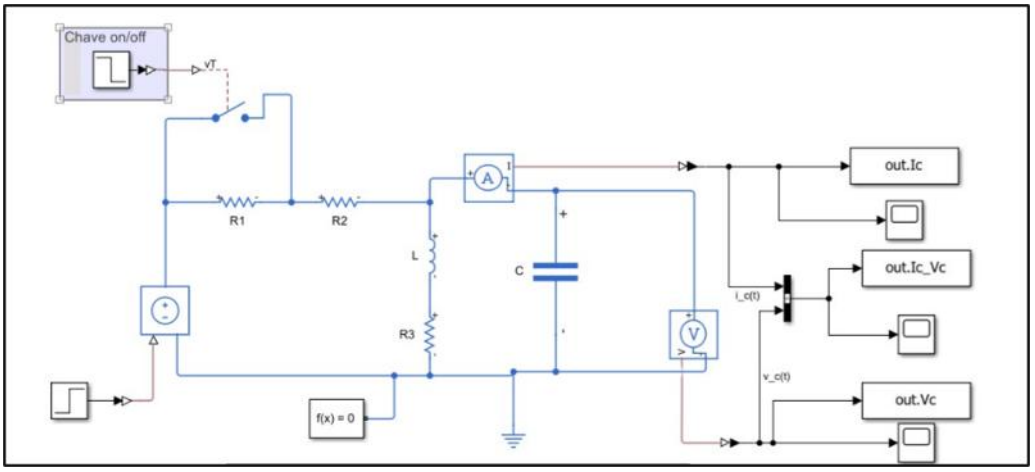
A análise computacional permitiu confrontar a resposta analítica com a resposta numérica do sistema dinâmico de segunda ordem. Dessa forma, avaliou-se o comportamento da tensão no capacitor frente aos degraus de excitação e à comutação da chave.

4.1.1 DINÂMICA DO CIRCUITO SIMULADO

O circuito em estudo representado na Figura 2 possui três regimes operacionais distintos. Eles são definidos pela atuação da fonte de alimentação e pelo estado da chave comutadora, que está disposta em paralelo com o resistor R_1.

Os parâmetros físicos do sistema foram fixados nas seguintes magnitudes: $R_1 = R_2 = R_3 = 3\,\Omega, L = 1\,H\ e\ C = 0{,}75\,F$. O sistema foi observado em três fases contínuas.

Figura 2 – Circuito representado no Simulink®



Fonte: autoria própria (2026)

O primeiro momento corresponde à Fase 0 (Regime desenergizado, 0 ≤ t < 1 s). Neste período, o circuito permanecia em repouso absoluto. A fonte de tensão, definida matematicamente pela função 18u(t-1) V, ainda não havia atuado no sistema.

Dessa forma, assumiram-se condições iniciais estritamente nulas para os elementos armazenadores de energia. Logo, a tensão no capacitor e a corrente no indutor partiram do repouso (vc(0) = 0 V e iL(0) = 0 A).

A dinâmica seguinte é a Fase 1 (Chave Aberta, 1 ≤ t < 50 s). Exatamente no instante t = 1 s, aplicou-se um degrau de excitação com amplitude de 18 V. Durante este período, a chave manteve-se aberta, fazendo com que a resistência equivalente em série da malha incluísse o componente R_1.

Como consequência dessa topologia, o sistema respondeu de forma estritamente sobreamortecida. A tensão no capacitor convergiu de maneira assintótica e sem a presença de sobressinais.

Esse comportamento físico é justificado pelas raízes reais e negativas encontradas na sua equação característica. Os polos do sistema para esta fase foram calculados em s_1 = -0,839 e s_2= -2,383.

Por fim, observou-se a Fase 2 (Chave Fechada, t ≥ 50 s). Ao atingir o instante t = 50 s, a chave comutou para o estado fechado. Essa ação mecânica provocou o curto-circuito imediato do resistor R_1.

Essa alteração abrupta na topologia do circuito reduziu a resistência equivalente da malha. Essa mudança deflagrou um novo regime transitório no sistema, culminando na elevação da tensão de regime permanente armazenada no capacitor.

4.1.2 UTILIZAÇÃO COMPUTACIONAL DOS SOFTWARES MATLAB® E SIMULINK®

Para a validação do modelo matemático e a geração do gráfico comparativo, adotou-se uma abordagem integrada. Utilizou-se a ferramenta Simulink® para a modelagem física do circuito e o MATLAB® para o processamento numérico.

O procedimento metodológico computacional foi dividido em duas etapas operacionais, as quais são detalhadas a seguir.

4.2 Modelagem Física e Simulação no Simulink®

A primeira etapa consistiu na síntese do diagrama de blocos no ambiente Simulink. Para isso, recorreu-se às bibliotecas especializadas de sistemas elétricos, como o Simscape Electrical.

Inicialmente, alocaram-se os componentes passivos da malha: blocos de resistores (R_1, R_2, R_3 = 3 Ω), um indutor (L = 1 H) e um capacitor (C = 0,75 F).

Para a excitação do sistema, utilizou-se uma fonte de tensão controlada (Controlled Voltage Source). Comandou-se essa fonte por um sinal de degrau (Step) configurado com um tempo de acionamento de 1 s e amplitude final de 18 V.

Na sequência, realizou-se a configuração da comutação. Para simular o curto-circuito sobre o resistor R_1 no instante t = 50 s, posicionou-se uma chave ideal em paralelo a este componente. Governou-se o acionamento da chave por um segundo bloco Step, parametrizado para emitir o pulso exatamente aos 50 s.

Por fim, processou-se a etapa de medição e exportação de dados. Acoplou-se um sensor de tensão em paralelo ao capacitor e direcionou-se o seu sinal de saída a um bloco To Workspace.

Dessa forma, exportaram-se os dados numéricos de tensão e o vetor de tempo diretamente para a área de trabalho do MATLAB. Executou-se a simulação com um tempo total de 80 s, o que garantiu a captação completa do último regime permanente.

4.2.1 Algoritmo de Processamento e Plotagem no MATLAB®

Após a execução da simulação física, elaborou-se um script no MATLAB. O objetivo consistiu em carregar os dados numéricos e sobrepô-los às equações matemáticas deduzidas analiticamente. O código-fonte estruturado é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Script de extração de dados e processamento gráfico no MATLAB.

```
% --- 1. EXTRAÇÃO DOS DADOS DO SIMULINK ---
t = out.tout;
if isa(out.Vc, 'timeseries')
    V = out.Vc.Data;
else
    V = out.Vc;
end

% --- 2. VETORES DE TEMPO E EQUAÇÕES TEÓRICAS ---
% Fase 0: Antes de ligar a fonte (0s a 1s)
t_desligado = 0:0.01:1;
vc_desligado = zeros(size(t_desligado));

% Fase 1: Chave Aberta (1s a 50s)
t0 = 1:0.01:50;
vc0 = 6 - 6.671 .* exp(-0.839 .* (t0 - 1)) + 0.671 .* exp(-2.383 .* (t0 - 1));

% Unindo Fase 0 e Fase 1 para o gráfico
t_fase1 = [t_desligado, t0];
vc_fase1 = [vc_desligado, vc0];

% Fase 2: Chave Fechada (50s a 80s)
tf = 50:0.01:80;
vcf = 9 - 3.784 .* exp(-1.175 .* (tf - 50)) + 0.784 .* exp(-2.269 .* (tf - 50));

% --- 3. PLOTAGEM E FORMATAÇÃO GRÁFICA ---
figure(1);
clf;

% Configuração de fundo branco e textos pretos
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
set(gca, 'Color', [1 1 1], 'XColor', [0 0 0], 'YColor', [0 0 0], 'GridColor', [0.5
0.5 0.5]);
hold on;
grid on;
```

```
% Plotagem das Curvas
plot(t, V, 'g', 'LineWidth', 4);
plot(t_fase1, vc_fase1, 'k', 'LineWidth', 2);
plot(tf, vcf, 'k--', 'LineWidth', 2);

% Rótulos e Legenda
title('Tensão no capacitor', 'Color', [0 0 0], 'FontSize', 12);
xlabel('Tempo (s)', 'Color', [0 0 0]);
ylabel('Amplitude (V)', 'Color', [0 0 0]);
xlim([0 80]);
ylim([0 10]);

legend('Simulink', 'Analítica chave aberta', 'Analítica chave fechada', ...
       'Location', 'southeast', 'TextColor', [0 0 0], 'Color', [1 1 1]);
hold off;
```

Inicialmente, o algoritmo realiza a extração e o tratamento dos dados através do resgate do vetor de tempo gerado pelo Simulink. Implementou-se uma estrutura condicional do tipo *if...else* para acessar os dados de tensão de forma segura.

Na sequência, procedeu-se com a implementação computacional das equações analíticas. Para representar fielmente os eventos transientes, particionou-se a análise temporal em três vetores distintos, com a utilização de incrementos de $0{,}01\ s$.

Para a Fase 1, definiu-se um vetor operando de 1 a $50\ s$. Programou-se a equação resultante da expansão em frações parciais com o uso de operadores ponto (.*), essenciais na sintaxe do MATLAB para executar multiplicações elemento a elemento.

Com o objetivo de facilitar a plotagem geométrica, concatenaram-se os vetores das Fases 0 e 1 em uma única variável contínua. Para a Fase 2, estabeleceu-se um domínio de 50 a $80\ s$ e alocou-se a respectiva equação deduzida para o sistema no período pós-comutação.

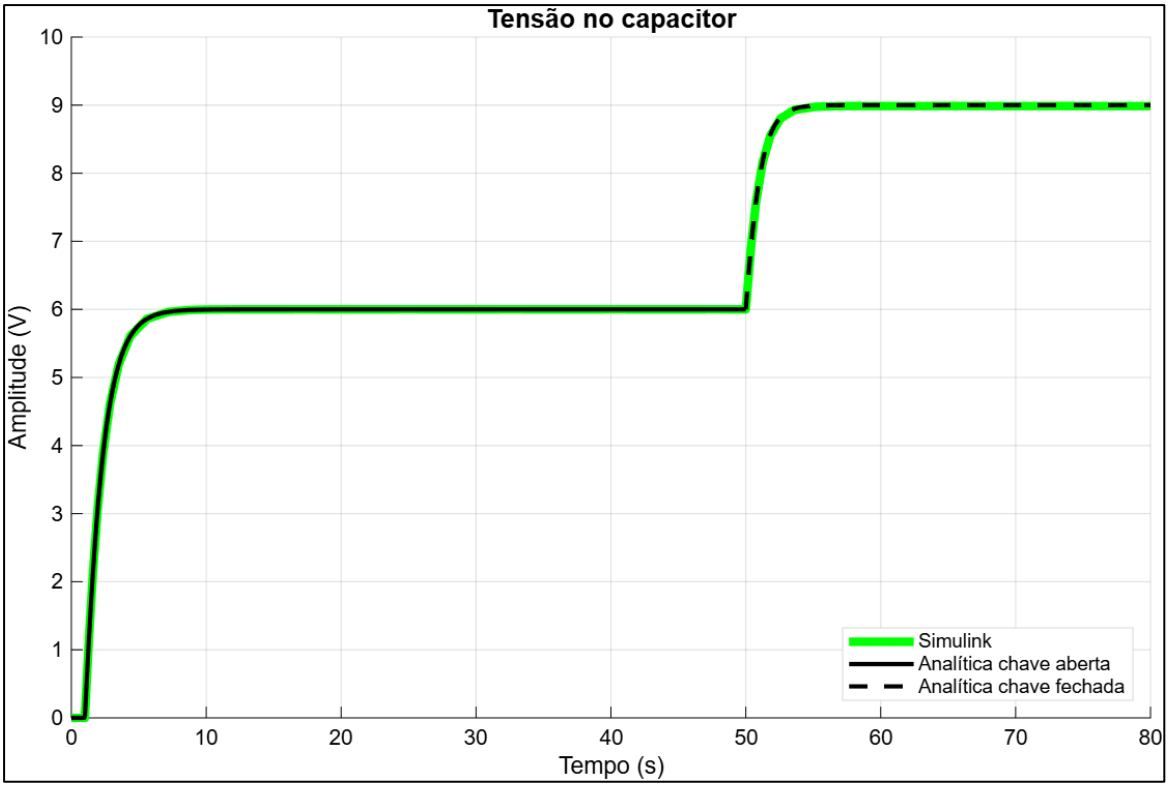
Dedicou-se a etapa final do *script* à renderização e formatação gráfica, de modo a compor uma figura alinhada aos rígidos padrões de trabalhos acadêmicos. Acionou-se a função *plot* para traçar a curva extraída do Simulink em cor verde, para servir como modelo real de base.

Com a ativação do comando *hold on*, sobrepuseram-se as soluções teóricas. Traçou-se a resposta da Fase 1 em linha preta contínua, enquanto a da Fase 2 recebeu formatação tracejada, o que criou um contraste visual expressivo.

5 RESULTADOS

A Figura 3 apresenta o comportamento dinâmico da tensão no capacitor em função do tempo. O gráfico estabelece o comparativo direto entre os dados numéricos obtidos pela simulação numérica e as curvas teóricas advindas da modelagem analítica.

Figura 3 – Resposta temporal da tensão no capacitor: comparação entre o modelo simulado e analítico.



Fonte: Autoria própria (2026).

Preliminarmente, constata-se uma exata aderência topológica e quantitativa entre as curvas apresentadas. Essa sobreposição convalida as equações matemáticas deduzidas via Transformada de Laplace e atesta a ausência de desvios significativos decorrentes do método de simulação.

Na análise da dinâmica temporal do circuito, o intervalo inicial confirma o estado de repouso do sistema, com condições nulas. No instante $t = 1\ s$, a aplicação do degrau de excitação deflagra o primeiro regime transitório.

Conforme previsto algebricamente pelas raízes reais e negativas da equação característica, o sistema exibe uma resposta estritamente sobreamortecida. Observa-se que a tensão se eleva de forma assintótica, desprovida de oscilações ou sobressinais.

Aproximadamente em $t = 10\ s$, as componentes exponenciais de decaimento extinguem-se, e o circuito atinge seu primeiro estado de regime permanente. Sob a ótica da análise em corrente contínua, o indutor assume o comportamento de um curto-circuito e o capacitor, de um circuito aberto.

Consequentemente, a malha puramente resistiva limita a corrente total a $2A$. O gráfico ratifica este modelo estacionário, com a tensão convergindo e estabilizando-se em $6V$, valor correspondente à queda no resistor R_3.

Posteriormente, o instante $t = 50\ s$ é marcado por uma abrupta perturbação topológica devido à comutação da chave. De acordo com o princípio de continuidade, a tensão no capacitor não sofre descontinuidades abruptas, o que é verificado pela transição suave no gráfico.

Contudo, a remoção de R_1 altera as propriedades amortecedoras do circuito, induzindo um segundo regime transitório. Neste novo estágio, a corrente fornecida pela fonte eleva-se para $3A$, impondo um novo patamar de estabilidade ao sistema.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento metodológico deste ARTIGO permitiu alcançar com êxito todos os objetivos propostos, o que demonstrou a eficácia da modelagem matemática de um circuito RLC submetido a evento de chaveamento. Através da aplicação rigorosa das Leis de Kirchhoff e da Transformada de Laplace, encontrou-se o comportamento dinâmico da tensão no capacitor para os diferentes estágios de operação do sistema, ao converter um problema diferencial complexo numa solução algébrica precisa no domínio do tempo. Por fim, a validação computacional realizada através dos *softwares* MATLAB® e Simulink® corroborou integralmente as formulações teóricas, uma vez que a curva gerada pelo equacionamento analítico se sobrepôs à resposta numérica simulada, fato que validou o modelo e comprovou a importância fundamental da aliança entre a teoria matemática e a simulação computacional na prática da engenharia.

REFERÊNCIAS

[1] OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

[2] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. Fundamentos de circuitos elétricos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

[3] SEIFERT, N.; ROSSINI, F. L. Modelagem dinâmica de circuito elétrico passivo no domínio do tempo contínuo e análise por meio dos softwares Matlab® e Multisim. In: BARBOSA, F. C. (org.). Engenharia: a máquina que constrói o futuro. 17. ed. Piracanjuba: Conhecimento Livre, 2023. p. 211-239.

[4] SILVA, V. A. et al. Aplicação da Transformada de Laplace para a modelagem a análise de um circuito RLC de três malhas. In: SEMINÁRIO DE EXTENSÃO E INOVAÇÃO DA UTFPR, 13., 2023, Ponta Grossa.

[5] PAWELSKI, L.; SILVA JUNIOR, P. R. M.; ROSSINI, F. L. Desenvolvimento de um Aplicativo Simulador de Entrada-Saída Periódica de Circuito Elétrico RLC Série. In: SEMINÁRIO DE EXTENSÃO E INOVAÇÃO (SEI) E SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA (SICITE) DA UTFPR, 11., 2021, Guarapuava. Anais... Guarapuava: UTFPR, 2021.

[6] LUZ, E. C.; ROSSINI, F. L. Modelagem, Solução e Análise de Circuito RLC Paralelo via Transformada de Laplace e uso dos Softwares Matlab® e LTspice®. ResearchGate, 2023. Disponível no perfil do autor.

Link para consulta: https://www.researchgate.net/profile/Flavio-Rossini/research

Capítulo 6

10.37423/260711113

PERFIL DOS EGRESSOS COMO SUBSÍDIO À AVALIAÇÃO DE CURSOS DE GRADUAÇÃO: UM ESTUDO NA LICENCIATURA EM MATEMÁTICA DA UFCG – CAMPUS CUITÉ (PB)

Alecxandro Alves Vieira — *Universidade Federal de Campina Grande*

Paulo César Macedo Dantas — *Universidade Federal de Campina Grande*



RESUMO

Considerando a relevância do acompanhamento de egressos para os processos de avaliação interna e externa das instituições de educação superior, no âmbito do Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES), este estudo tem como objetivo caracterizar o perfil dos egressos do curso de Licenciatura em Matemática da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus Cuité-PB, abragendo aspectos sociodemográficos, trajetória acadêmica, inserção profissional e percepções acerca da formação recebida. Trata-se de uma pesquisa de levantamento transversal, de natureza quantitativa, com caráter exploratório e descritivo. Os resultados indicam que o perfil dos egressos difere entre os turnos, com predominância de homens no diurno e mulheres no noturno, sendo majoritariamente pardos, residentes na Paraíba, com participação em programas de formação docente, tempo de conclusão próximo ao limite máximo previsto. Observa-se também a continuidade da formação em nível de pós-graduação, com destaque para o mestrado acadêmico entre os egressos do diurno e a especialização entre os do noturno. As experiências formativas e a infraestrutura foram bem avaliadas, embora persistam desafios na articulação entre teoria e prática. No âmbito profissional, verifica-se predominância de atuação no ensino de Matemática, sobretudo no Ensino Médio, com rápida inserção no mercado de trabalho e predominância de vínculos públicos. Conclui-se que o curso tem sido eficaz na promoção de uma formação docente consistente, com impactos positivos na inserção profissional. Como desdobramento, propõe-se o desenvolvimento de painéis interativos para subsidiar o monitoramento institucional e a tomada de decisões baseada em evidências.

Palavras-chave: Egressos. Autoavaliação institucional. SINAES. Formação docente.

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos modelos de gestão nas Instituições de Ensino Superior (IES), motivada pelo crescente interesse em sistematizar a avaliação como instrumento de monitoramento e fortalecimento de políticas educacionais, tem ampliado o destaque para a avaliação da qualidade das IES. Tal prática, segundo Meira e Kurcgant (2009), promove a transparência das realizações institucionais, contribuindo para o diálogo com a comunidade universitária e com a sociedade.

Com esse propósito, o Ministério da Educação (MEC) instituiu, por meio da Lei nº 10.861 de 14 de abril de 2004, o Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES). O sistema integra três modalidades avaliativas: avaliação das instituições, dos cursos e do desempenho dos estudantes, considerando dimensões como ensino, pesquisa, extensão, responsabilidade social, gestão e corpo docente (BRASIL, 2004a).

> O SINAES tem como finalidades centrais a melhoria da qualidade da educação superior, o direcionamento da expansão da oferta, o aumento da eficácia institucional e da efetividade acadêmica e social, bem como o fortalecimento dos compromissos e responsabilidades sociais das IES, valorizando sua missão pública, autonomia e identidade institucional (BRASIL, 2004a, art. 1º, § 1º).

Entre as modalidades de avaliação do SINAES, destaca-se a avaliação das IES, estruturada em duas etapas: a avaliação interna (ou autoavaliação), coordenada pela Comissão Própria de Avaliação (CPA) de cada IES; e, a avaliação externa in loco, realizada por comissões designadas pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep), para analisar a qualidade global das instituições: missão, planejamento, gestão, autoavaliação, política acadêmica, infraestrutura, responsabilidade social, além de políticas de pessoal e de atendimento aos estudantes, resultando ao final, em indicadores de qualidade das IES, como o Conceito Institucional (CI) e o Índice Geral de Cursos (IGC), graduados em cinco níveis, cujos valores iguais ou superiores a três indicam qualidade satisfatória (BRASIL, 2004a; BRASIL, 2017).

A autoavaliação caracteriza-se como um processo contínuo de reflexão institucional, permitindo identificar fragilidades, potencialidades e estratégias de aprimoramento (BRASIL, 2004b). Nesse contexto, o acompanhamento dos egressos constitui elemento fundamental, uma vez que possibilita aferir os resultados da formação a partir do percurso profissional e acadêmico daqueles que concluíram os cursos. No documento intitulado “Roteiro de Autoavaliação Institucional”, o acompanhamento dos egressos integra o núcleo básico da avaliação interna, ao lado da inserção

profissional e da participação desses sujeitos na vida acadêmica, incluindo ações de formação continuada (BRASIL, 2004b).

No âmbito da avaliação externa, a relevância do tema se expressa na nona dimensão avaliativa do SINAES, que estabelece um indicador de qualidade voltado à política de acompanhamento de egressos, que assume valor de 1 (quando inexistente) a 5 (quando plenamente satisfatória). Para cumprir bem o indicador, a instituição precisa demonstrar que coleta dados dos seus egressos e utiliza essas informações para ajustar cursos, programas e sua integração com o mercado de trabalho (BRASIL, 2006, 2017).

A literatura reforça a importância desse acompanhamento para a qualificação dos processos avaliativos. Para Lousada e Martins (2005), se uma das finalidades universitárias é formar profissionais aptos ao exercício laboral, torna-se imprescindível que a instituição receba retorno sobre a qualidade dos diplomados. Meira e Kurcgant (2009) destacam que os egressos vivenciam demandas complexas no mundo do trabalho, possibilitando avaliar a coerência entre as competências desenvolvidas e as requeridas profissionalmente. Michelan et al. (2009) acrescentam que a opinião dos egressos subsidia decisões estratégicas institucionais em áreas como planejamento, compromisso social e gestão acadêmica.

Apesar do consenso teórico sobre sua relevância e de seu reconhecimento como indicativo de qualidade no âmbito da avaliação do SINAES, de acordo com estudos apresentados por Andriola (2014), Paul (2015) e Heringer et al. (2018), muitas IES brasileiras carecem de ações efetivas na implementação do acompanhamento de egressos, o que evidencia a necessidade de fortalecer essas práticas para garantir a qualidade das instituições e de seus cursos.

Diante desse panorama e visando suprir tal necessidade no âmbito do curso de Licenciatura em Matemática da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus Cuité-PB, o presente estudo busca responder à seguinte questão-problema: Em que medida a formação oferertada pelo curso contribui para a inserção profissional e a satisfação dos egressos, e de que forma as informações decorrentes desse acompanhamento podem subsidiar a avaliação do curso no âmbito do SINAES?

Para responder à questão que orienta esta investigação, o estudo estabelece como objetivo a caracterização do perfil e da trajetória acadêmica dos egressos do referido curso, analisando sua

percepção sobre a formação recebida, a inserção no mercado de trabalho e na pós-graduação, além de suas perspectivas e interesses.

Espera-se, desse modo, que os resultados aqui apresentados possam oferecer subsídios para o aperfeiçoamento do processo formativo ofertado pelo curso, contribuindo não apenas para o seu alinhamento às demandas educacionais contemporâneas, mas também para o contínuo aperfeiçoamento de sua qualidade e missão pública voltada ao compromisso com o desenvolvimento da região do Curimataú paraibano, região marcada por desafios socioeconômicos e educacionais, onde a formação de professores de Matemática assume papel estratégico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Tipo de estudo e obtenção dos dados

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de levantamento transversal, de natureza quantitativa, com caráter exploratório e descritivo, aplicada aos egressos do curso de Licenciatura em Matemática da UFCG, campus Cuité-PB, visando identificar padrões, percepções e trajetórias relacionadas à formação acadêmica e à inserção profissional. Tal classificação fundamenta-se nos procedimentos técnicos de coleta de dados e na finalidade da investigação, conforme apresentado por Gil (2017).

O curso de Licenciatura em Matemática da UFCG, campus Cuité-PB (codigo e-MEC 99806), funciona desde 2006, nos turnos diurno (duração mínima de 8 períodos e máxima de 12 períodos) e noturno (duração mínima de 10 períodos e máxima de 15 períodos) e tem como finalidade a formação de professores para a Educação Básica, com sólida fundamentação científica, articulação entre teoria e prática e compromisso com a melhoria da qualidade do ensino público na cidade de Cuité e municípios circunvizinhos. As vagas são ofertadas anualmente por meio do Sistema de Seleção Unificada do Ministério da Educação (SISU), sendo 30 para o turno diurno e 30 para o noturno. Sua estrutura curricular contempla componentes da Matemática pura e aplicada, disciplinas pedagógicas, estágios supervisionados e atividades complementares, reafirmando princípios formativos orientados pela pesquisa, pela autonomia docente e pelo atendimento às necessidades educacionais da sociedade local (UFCG, 2019).

A pesquisa considerou como população alvo os 136 egressos do referido curso, diplomados desde a sua criação, até o período acadêmico 2022.1 (finalizado em março de 2023). Sendo 86 oriundos do curso diurno e 50 do curso noturno. Para a coleta de dados, foi elaborado um questionário estruturado, organizado em quatro seções temáticas: (i) identificação sociodemográfica, (ii) trajetória e percepção sobre a formação acadêmica, (iii) inserção no mercado de trabalho e atuação profissional e (iv) satisfação geral com o curso.

Após obtenção dos endereços eletrônicos dos referidos egressos junto à coordenação do curso, buscou-se o contato por meio de mensagem que informava acerca da pesquisa e suas finalidades, contendo ainda um link para acesso ao questionário, implementado na plataforma Google Formulários. O questionário estava munido de Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) e ficou disponível para participação dos egressos, de julho à setembro de 2024. A pesquisa foi aprovada sob o parecer consubstanciado nº 7.174.538 e CAAE 80473924.0.0000.5182, do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) do Hospital Universitário Alcides Carneiro (HUAC/UFCG), garantindo-se o cumprimento aos preceitos éticos estabelecidos pelo Conselho Nacional de Saúde (BRASIL, 2012, 2016, 2021), assim como a lei geral de proteção de dados pessoais (BRASIL, 2018).

2.2 Métodos Estatísticos

Após a finalização da etapa de coleta, os dados foram organizados e submetidos a procedimentos de higienização e validação da base de dados. Em seguida, realizou-se uma análise estatística descritiva, com apoio de tabelas de frequências, representações gráficas uni e bivariadas e cálculo de medidas descritivas (BUSSAB; MORETTIN, 2013; TRIOLA, 2013). Na análise bivariada, investigaram-se indicios de associações entre alguns dos aspectos considerados e o turno de conclusão do curso. Os dados foram analisados e compilados utilizando-se planilhas eletrônicas do software Microsoft Excel 2019.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da Amostra

O questionário foi encaminhado aos 136 egressos da população-alvo (86 do curso diurno e 50 do noturno), configurando, inicialmente, a intenção de realização de um censo. Desses, 58 indivíduos responderam voluntariamente ao instrumento, correspondendo a uma taxa de resposta global de 43%.

Ao se considerar o turno do curso, observa-se maior participação entre os egressos do período diurno, com taxa de 48% (41 de 86), enquanto, no noturno, a taxa foi de 34% (17 de 50).

As taxas de resposta, inferiores a 50%, podem estar associadas à disponibilidade dos egressos para participação ou à desatualização dos endereços eletrônicos utilizados para contato, o que pode ter limitado o alcance do instrumento. Ainda assim, esses percentuais são compatíveis com estudos brasileiros com egressos, nos quais as taxas de retorno frequentemente variam entre 20% e 50% (ANDRIOLA, 2014), sendo consideradas adequadas para análises de natureza descritiva.

Na prática, a amostra caracteriza-se como não probabilística por autoseleção (self-selection), ou voluntária, sendo composta por indivíduos que optam por participar da pesquisa por iniciativa própria, sem seleção aleatória, situação comum em levantamentos online (LOHR, 2022). Diferentemente dos métodos probabilísticos (BOLFARINE; BUSSAB, 2005), esse tipo de amostragem tende a reunir participantes mais disponíveis ou motivados, o que pode introduzir viés de seleção. Sua adoção, neste estudo, justifica-se pela dificuldade de contato com toda a população para a realização de uma seleção aleatória (GALLOWAY, 2005; TRIOLA, 2013; ALVI, 2016; LOHR, 2022).

Em decorrência dessa característica, não é possível determinar, a priori, a probabilidade de inclusão de cada unidade no conjunto amostral, o que inviabiliza a estimação de nível de confiança e limita a generalização dos resultados para a população-alvo, devendo estes serem interpretados como descritivos do grupo de respondentes (LOHR, 2022).

Ainda assim, a distribuição dos participantes entre os turnos e a presença de egressos de diferentes coortes, desde as primeiras formaturas em 2010, conferem consistência descritiva ao estudo, permitindo a identificação de indícios relevantes sobre o perfil e a trajetória formativa dos egressos do curso.

3.2 Perfil sociodemográfico e acadêmico dos egressos

Conforme a Tabela 1, observa-se que o perfil dos egressos participantes da pesquisa difere entre os turnos. No turno diurno, há predominância do sexo masculino (68,3%), enquanto no noturno verifica-se maior participação feminina (52,9%). Em relação à variável cor/raça, destaca-se a predominância de egressos autodeclarados pardos em ambos os turnos, 46,3% no diurno e 64,7% no noturno, além de

uma reduzida representatividade de pessoas que se identificam como negras (12,2% e 5,6%, respectivamente).

Quanto ao local de residência, nota-se prevalência de permanência no estado da Paraíba, tanto entre os egressos do turno diurno (75,6%) quanto do noturno (94,1%), o que indica forte vínculo regional e possível inserção profissional local. A idade média de conclusão é de 25,1 anos (dp = 5,1) no turno diurno e 27,5 anos (dp = 3,7) no noturno, revelando que os egressos do noturno tendem a concluir o curso em faixa etária mais elevada.

Ainda conforme Tabela 1, em relação ao tempo de integralização, o turno diurno apresentou média de 5,8 anos (dp = 1,2), enquanto o noturno registrou 7,5 anos (dp = 1,5), evidenciando que o tempo médio de conclusão se aproxima da duração máxima prevista para o curso, em ambos os turnos.

No que se refere à participação em programas de incentivo à formação docente, observa-se que a maioria dos egressos foi contemplada com bolsa do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID), tanto no diurno (39,0%) quanto no noturno (29,4%). Apenas uma parcela minoritária declarou não ter recebido qualquer tipo de bolsa durante a graduação (4,9% no diurno e 11,8% no noturno), o que reforça a importância dos programas de fomento na trajetória formativa dos licenciandos.

Tabela 1 – Perfil sociodemográfico e acadêmico de egressos do curso de Licenciatura em Matemática da UFCG, campus Cuité-PB, de maneira global e segundo o turno.

Variável	Categoria	Geral (n=58)	Diurno (n=41)	Noturno (n=17)
Sexo	Masculino	62,1%	68,3%	47,1%
	Feminino	37,9%	31,7%	52,9%
Cor/Raça	Pardo	51,7%	46,3%	64,7%
	Branco	36,2%	39,0%	29,4%
	Negro	10,3%	12,2%	5,9%
	Amarelo	1,8%	2,5%	0,0%
Idade de conclusão	Média ± dp (anos)	25,8 ± 4,8	25,1 ± 5,1	27,5 ± 3,7
Estado onde reside	PB	81,0%	75,6%	94,1%
	RN	13,8%	7,3%	5,9%
	PE	5,2%	17,1%	0,0%
Tempo de conclusão	Média ± dp (anos)	6,3 ± 1,5	5,8 ± 1,2	7,5 ± 1,5
	Iniciação à Docência (PIBID)	36,2%	39,0%	29,4%
	Residencia Pedagógica	15,5%	17,1%	11,8%
	Monitoria	12,1%	12,2%	11,8%

Bolsa de estudo	Iniciação Científica (PIBIC)	10,3%	9,8%	11,8%
	Outra	19,0%	17,1%	23,5%
	Nenhuma	6,9%	4,9%	11,8%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De modo geral, os resultados da Tabela 1 evidenciam diferenças estruturais entre os perfis dos egressos dos turnos diurno e noturno. Os egressos do turno diurno caracterizam-se, em média, por um perfil mais jovem, maior participação em programas acadêmicos e menor tempo de integralização do curso. Em contraste, o turno noturno reúne egressos com perfil mais maduro, menor envolvimento em atividades extracurriculares e maior tempo para conclusão da graduação, características frequentemente associadas à necessidade de conciliar estudo e trabalho.

Esses achados corroboram a literatura, que aponta diferenças relevantes nos percursos acadêmicos conforme o turno, especialmente no acesso a oportunidades formativas e nas condições de permanência, geralmente mais restritas entre estudantes do turno noturno (TERRIBILI FILHO, 2007; RISTOFF, 2014; SANTOS et al., 2020).

Nesse contexto, tais limitações podem impactar diretamente a trajetória acadêmica e o tempo de conclusão do curso. Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade de políticas institucionais que considerem as especificidades do público noturno, promovendo maior equidade no acesso às experiências acadêmicas e contribuindo para a redução de desigualdades na formação.

3.3 Percepções acerca da formação acadêmica

Para análise das percepções dos egressos acerca da qualidade da formação docente ofertada pelo curso, foi observado o grau de concordância dos mesmos em relação a um conjunto de doze assertivas, associadas a quatro dimensões temáticas, conforme quadro 1.

Quadro 1 – Dimensões avaliativas e assertivas acerca a formação acadêmica ofertada

Dimensão Avaliada	Assertivas
Estrutural e Didática	1. As condições dos laboratórios de Ensino e Informática foram adequadas; 2. O estágio supervisionado proporcionou experiências formativas diversificadas; 3. As atividades práticas permitiram relacionar teoria e prática de forma efetiva.

Cultural e Social	4. O curso promoveu atividades de cultura, lazer e interação social. 5. O curso ofereceu condições para participação em eventos científicos. 6. Foram ofertadas oportunidades de participação em projetos de pesquisa. 7. Foram ofertadas oportunidades de participação em projetos de extensão.
Gestão e Comunicação	8. A coordenação do curso mostrou-se acessível e clara na comunicação.
Pedagógica e Formativa	9. O curso desenvolveu a capacidade de pensamento crítico e reflexivo. 10. O curso contribuiu para o desenvolvimento da consciência ética profissional. 11. O curso propiciou experiências de aprendizagem inovadoras. 12. As disciplinas contribuíram para a formação integral, cidadã e profissional.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

De modo geral, os resultados indicam elevada satisfação dos egressos com a formação acadêmica em ambos os turnos, com índices de concordância superiores a 70% na maioria das assertivas (Gráfico 1). Contudo, observam-se diferenças pontuais entre os turnos diurno e noturno, especialmente quanto à intensidade das respostas das assertivas, conforme detalhado nos tópicos a seguir.

3.3.1 Dimensão Estrutural e Didática

Conforme o gráfico 1, os egressos do turno noturno avaliaram mais positivamente as condições dos laboratórios de ensino e informática (53% de concordância total) em relação ao diurno (29%). O estágio supervisionado foi bem avaliado por ambos os turnos, com destaque para o noturno (41% de concordância total e 53% parcial).

Com relação às atividades práticas, observou-se menor concordância total, especialmente no noturno (12%), com aumento das respostas neutras e parcialmente discordantes, indicando a necessidade de integração entre teoria e prática.

3.3.2 Dimensão Cultural e Social

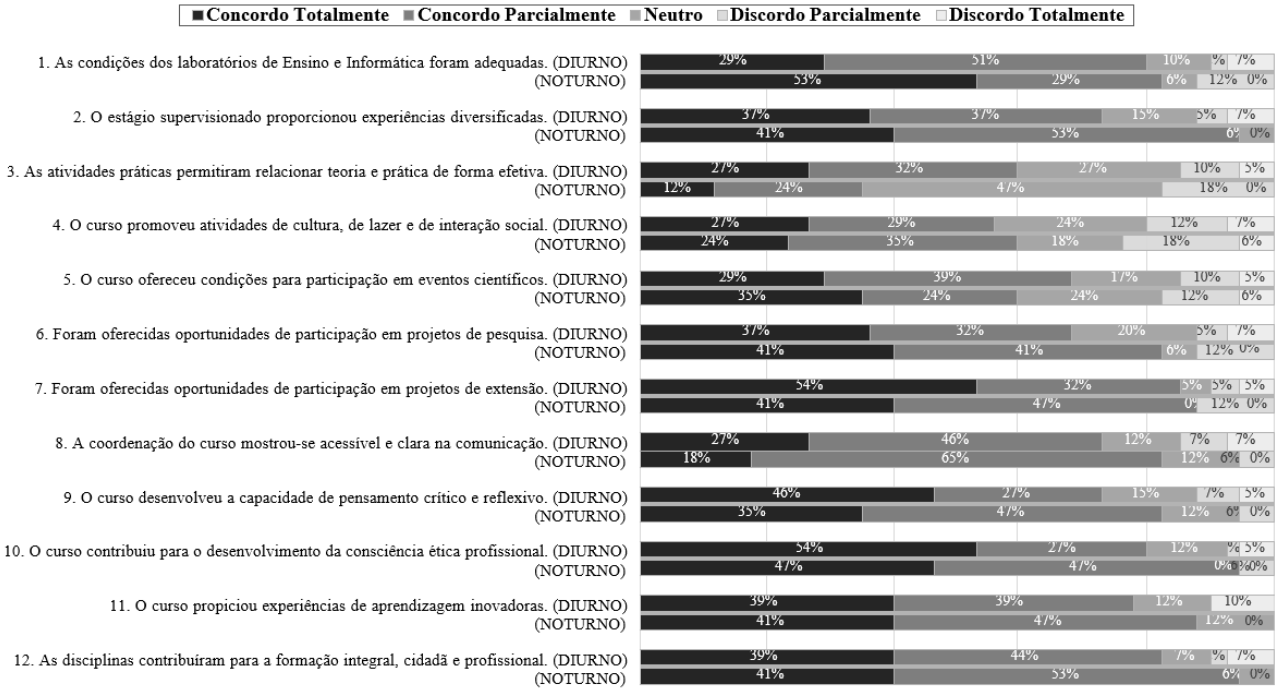
Nesta dimensão, a inserção em extensão foi melhor avaliada pelos egressos do diurno (54% de concordância total) do que pelos do noturno (41%). Em relação às oportunidades de participação em projetos de iniciação científica, os egressos do turno diurno (37%) e noturno (41%) mostraram percentuais parecidos quanto à concordância total (Gráfico 1).

A participação em eventos científicos apresentou equilíbrio entre os turnos, embora com percentuais moderados de concordância total (inferiores a 40%). Já a promoção de atividades culturais, de lazer e integração social mostrou índices reduzidos de concordância total (inferiores a 30%), sugerindo um aspecto a ser aprimorado na formação docente em ambos os turnos.

3.3.3 Dimensão de Gestão e Comunicação Institucional

A assertiva relacionada à disponibilidade e clareza das informações prestadas pela coordenação do curso apresentou resultados mais heterogêneos, com ambos os turnos apresentando baixos índices de concordância total (diurno 27% e noturno 18%) e predominância de concordância parcial (diurno 46% e noturno 65%). Embora as respostas indiquem avaliação positiva, evidenciam também a necessidade de fortalecer os canais de comunicação, especialmente no turno noturno (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Grau de concordância dos egressos em relação a formação acadêmica, turno diurno e noturno, Licenciatura em Matemática, UFCG, campus Cuité-PB, 2024



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3.4 Dimensão Pedagógica e Formativa

Conforme o gráfico 1, no turno diurno, 46% concordaram totalmente que o curso estimulou o pensamento crítico, frente a 35% no noturno. A formação ética profissional obteve 54% e 47% de

concordância total nos turnos diurno e noturno, respectivamente. A promoção de experiências inovadoras apresentou alto nível de concordância em ambos os turnos, especialmente no turno noturno (41% total e 47% parcial). Já a formação integral e cidadã apresentaram altos níveis de concordância em ambos os turnos, principalmente no noturno (53% parcial e 41% total).

De modo geral, apesar de ambos os turnos expressarem satisfação global com a formação ofertada pelo curso, o turno diurno apresentou maior intensidade de concordância total, enquanto o noturno concentrou mais respostas de concordância parcial, possivelmente em razão das condições contextuais de formação, tais como: tempo reduzido de permanência e convivência acadêmica no campus, acesso limitado aos espaços institucionais a noite, menor oferta de atividades práticas e eventos acadêmicos no período noturno, além de limitação de tempo e energia, muitas vezes ocasionada pela dupla jornada (trabalho-estudo), que impactam o rendimento, a participação e até a percepção sobre a qualidade da formação.

Sobre tais condições, Terribili Filho (2007) afirma que os danos ocasionados no entorno educacional em relação ao cotidiano do estudante do período noturno, ultrapassam apenas o impacto na sala de aula, transpassando a instituição em diversas dimensões como: corpo docente, Projeto Político-Pedagógico, currículos, políticas internas e gestão da infra-estrutura. Tais resultados sugerem que, embora ambos os turnos compartilhem a mesma proposta curricular, as experiências formativas variam em intensidade e enfoque, refletindo características próprias do perfil discente e das condições de oferta.

3.4 Pós-graduação e atuação profissional

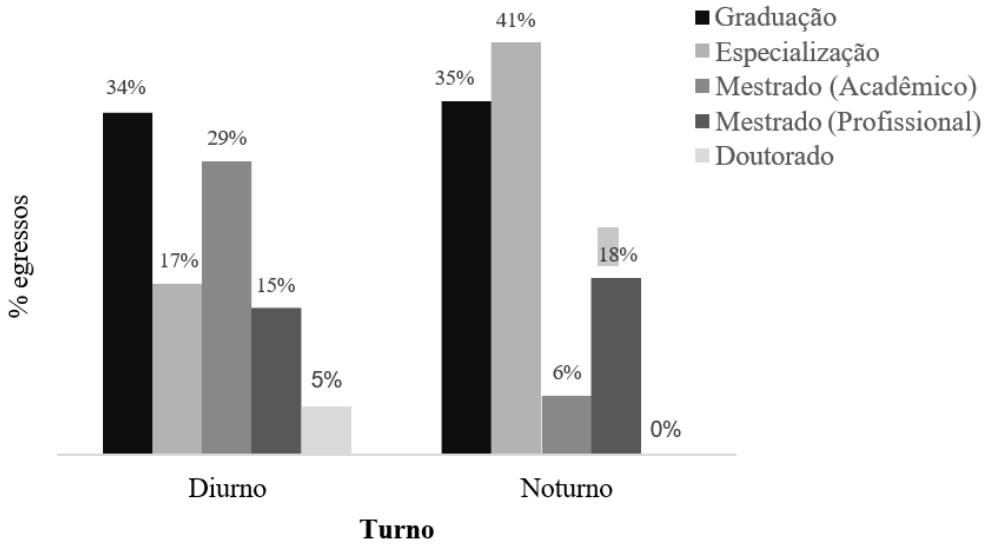
A formação docente, compreendida como um processo contínuo, não se encerra com a conclusão da graduação. Conforme o gráfico 2, tanto no turno diurno, quanto no noturno, que cerca de dois terços dos egressos possuem alguma pós-graduação como maior nível de formação acadêmica, o que indica a continuidade dos estudos por parte significativa dos egressos. Quanto ao tipo de pós-graduação concluída, identificam-se diferenças expressivas nos turnos.

No curso diurno, destaca-se o maior percentual de egressos com titulação de mestrado acadêmico (29%), seguido por especialização (17%) e mestrado profissional (15%), além de uma parcela de 5% que alcançou o doutorado. Esses dados evidenciam um perfil de continuidade formativa mais fortemente voltado à pesquisa e à carreira acadêmica.

Por outro lado, entre os egressos do turno noturno, predomina a pós-graduação lato sensu (especialização), alcançando 41% dos respondentes, e o mestrado profissional (18%), não havendo registros de doutores. Esse resultado sugere que os egressos do noturno tendem a buscar formações complementares mais voltadas à prática docente e à inserção no mercado de trabalho, em detrimento da trajetória acadêmica stricto sensu.

De modo geral, os dados indicam que, embora ambos os turnos revelem disposição para a continuidade dos estudos, o perfil formativo dos egressos do diurno se aproxima mais de uma vocação acadêmico-científica, enquanto o perfil do noturno reflete uma orientação profissional e aplicada (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Distribuição dos egressos em relação a titulação acadêmica, turno diurno e noturno, Licenciatura em Matemática, UFCG, campus Cuité-PB, 2024

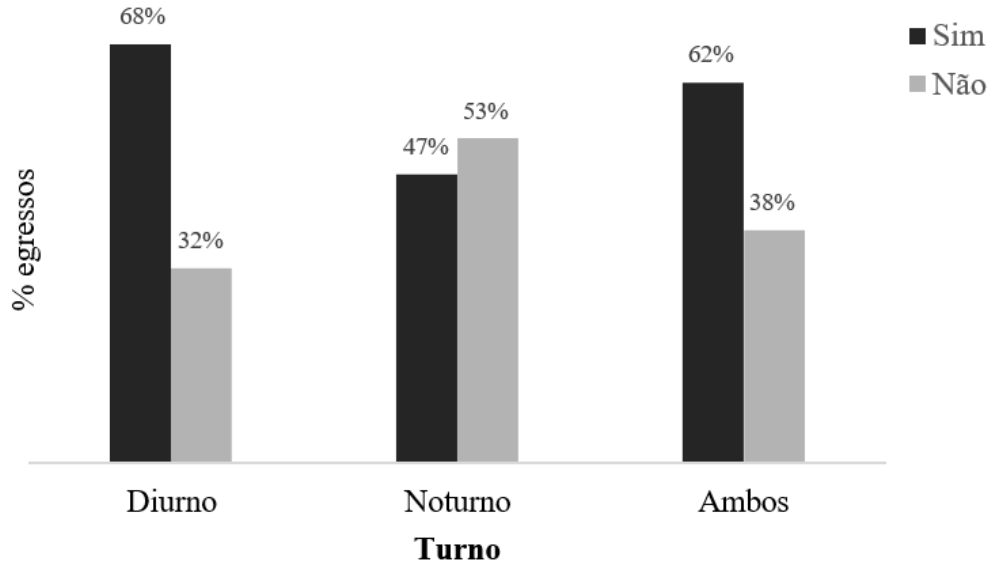


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que se refere à atuação como professor de Matemática, considerando os 58 respondentes, 62% (n=36) afirmaram estar atuando na docência da área, o que demonstra uma inserção profissional significativa. De modo comparativo, observa-se que os egressos do turno diurno apresentam maior taxa de inserção profissional (68%), enquanto no noturno esse percentual é de 47% (Gráfico 3). Essas diferenças reforçam a influência das condições contextuais de formação na consolidação da carreira docente.

Sobre os fatores que dificultaram a inserção na docência, entre os egressos que não estão atuando como professores de Matemática (n=22), 35% atribuíram essa condição à restrição do mercado de trabalho, apontando para desafios de empregabilidade específicos do campo de atuação. Esse resultado sugere que, embora a formação em Licenciatura proporcione base sólida para o exercício docente, fatores externos como a disponibilidade de vagas e condições salariais, influenciam diretamente a inserção dos egressos na carreira docente.

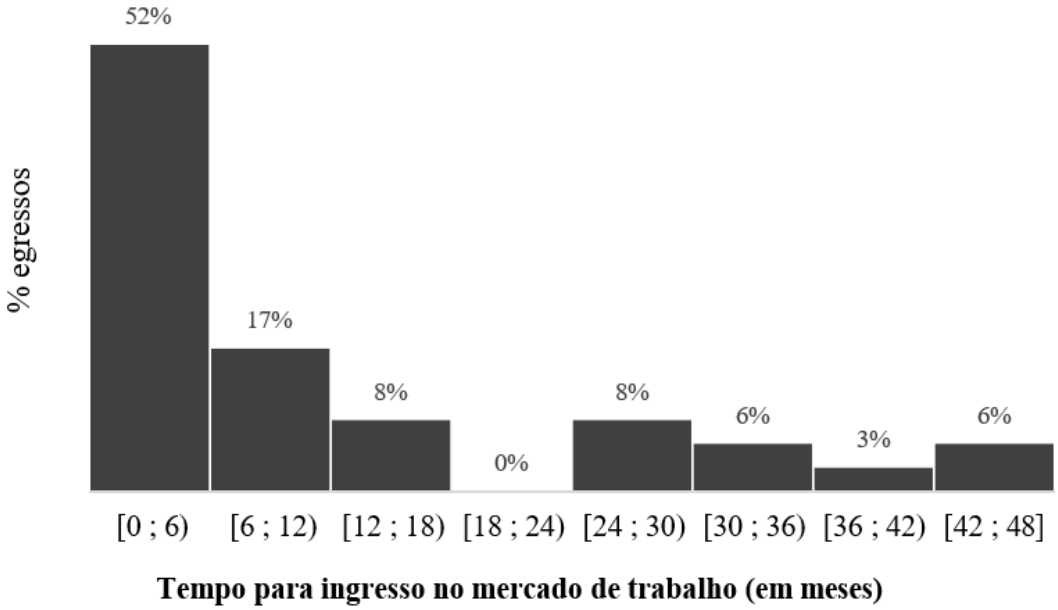
Gráfico 3 – Distribuição dos egressos em relação a atuação como professor de Matemática, segundo turno, Licenciatura em Matemática, UFCG, Cuité-PB, 2024



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Quanto ao tempo para inserção profissional dos egressos que atuam como professores de Matemática (n=36), observa-se que 52% conseguiram ingressar no mercado de trabalho ainda nos seis primeiros meses após a conclusão do curso (Gráfico 4). Esse resultado evidencia uma inserção relativamente rápida de boa parte dos licenciados na carreira docente.

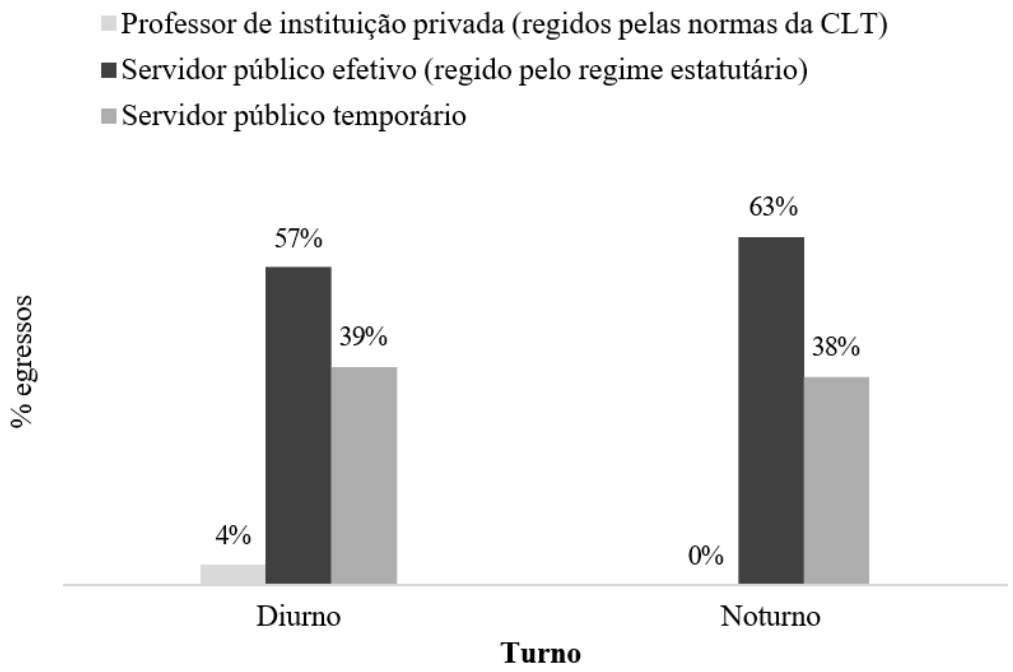
Gráfico 4 – Tempo para inserção no mercado de trabalho após a diplomação, considerando os egressos que atuam como professores, Licenciatura em Matemática, UFCG, Cuité-PB, 2024



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que se refere ao vínculo profissional dos egressos que atualmente exercem a docência, conforme apresentado no gráfico 5, independentemente do turno de formação, a maioria possui vínculo efetivo como servidor público, sendo 57% entre os egressos do curso diurno e 63% entre os do curso noturno. Em seguida, destacam-se os docentes com vínculo temporário na rede pública, representando cerca de 40% dos egressos em ambos os turnos. Nota-se ainda o baixo percentual de atuação em instituições privadas de ensino, o que reforça o predomínio da inserção dos egressos na rede pública.

Gráfico 5 – Distribuição dos egressos que estão atuando como docentes na área de Matemática, em relação ao vínculo profissional e turno, Licenciatura em Matemática da UFCG, campus Cuité-PB, 2024

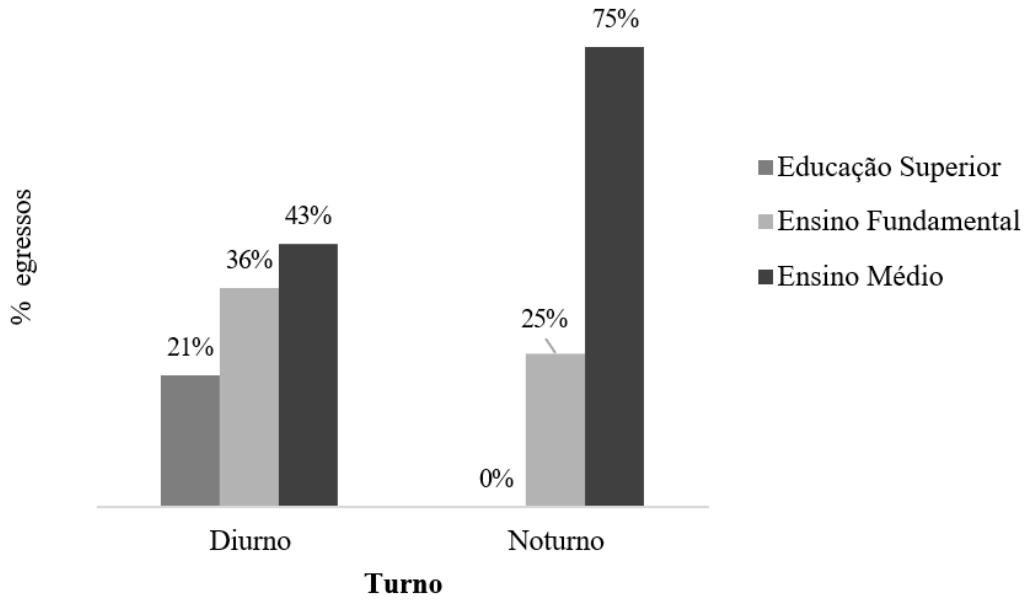


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com relação aos níveis de ensino em que os egressos estão atuando como docentes na área de Matemática, a partir do gráfico 6, observa-se que em ambos os turnos há uma predominância de atuação no Ensino Médio (43% no diurno e 75% no noturno), seguido pelo Ensino Fundamental (36% no diurno e 25% no noturno). A atuação no ensino superior foi registrada somente entre os egressos do turno diurno (21%).

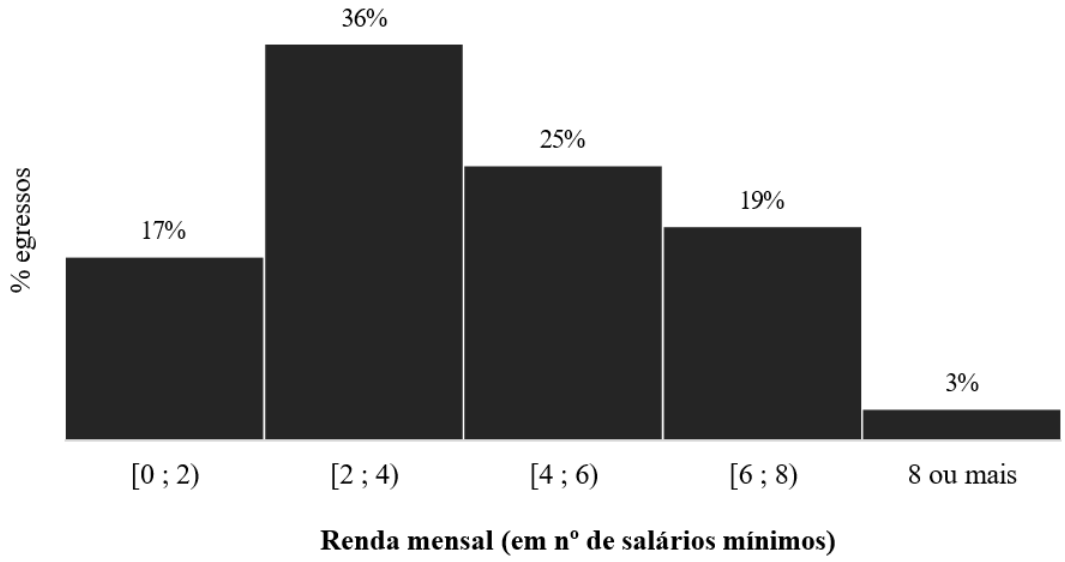
Considerando esse cenário de inserção profissional, a análise da renda mensal contribui para compreender as condições de valorização desses docentes no mercado de trabalho. Dentre os 36 egressos que estão atuando como docentes na área de Matemática, a partir do gráfico 7, observa-se que 47% declararam rendimentos iguais ou superiores a quatro salários mínimos. Esse resultado indica que cerca de metade dos profissionais apresenta remuneração compatível ou superior ao piso salarial nacional do magistério público da educação básica, fixado em R$ 4.580,57 para o ano de 2024 (BRASIL, 2024).

Gráfico 6 – Distribuição dos egressos que estão atuando como docentes na área de Matemática, em relação ao nível de ensino de atuação e turno, Licenciatura em Matemática da UFCG, campus Cuité-PB, 2024



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Gráfico 7 – Distribuição dos egressos que estão atuando como docentes na área de Matemática, em relação a renda mensal, Licenciatura em Matemática, UFCG, campus Cuité-PB, 2024



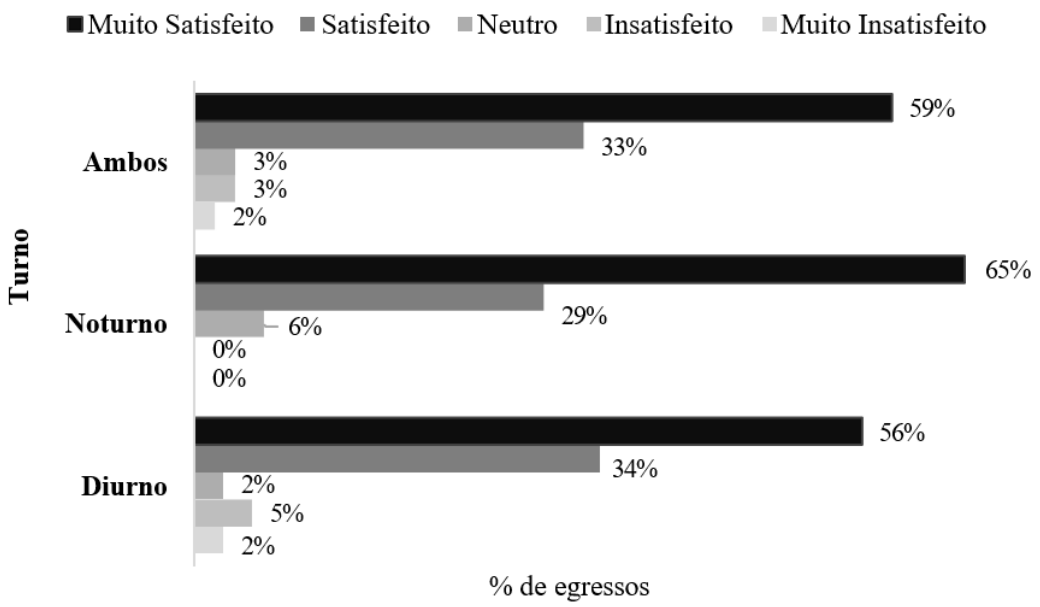
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No que se refere ao grau de satisfação geral dos egresos com o curso de Licenciatura em Matemática, UFCG, campus Cuité-PB, observa-se elevada avaliação positiva entre os egressos (Gráfico 8). De modo geral, entre os 58 respondentes, 59% dos egressos declararam-se “muito satisfeitos” e 33%

"satisfeitos", totalizando 92% de avaliações favoráveis. As categorias de avaliação negativa apresentaram baixa frequência, com 3% de insatisfeitos e 2% de muito insatisfeitos, além de 3% de respostas neutras.

Ao se considerar o turno do curso, verifica-se que os egressos do período noturno apresentam níveis ainda mais elevados de satisfação, com 65% "muito satisfeitos" e 29% "satisfeitos", não havendo registros de avaliações negativas. No turno diurno, embora também predomine a avaliação positiva, observa-se uma distribuição ligeiramente mais heterogênea, com 56% "muito satisfeitos" e 34% "satisfeitos", além de pequenas proporções de respostas neutras (2%) e insatisfeitas (7% no total).

Gráfico 8 – Satisfação geral dos egressos com a formação acadêmica ofertada pelo curso, segundo o turno, Licenciatura em Matemática da UFCG – Cuité (PB), 2024



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os elevados níveis de satisfação observados indicam que a formação ofertada pelo curso é amplamente bem avaliada pelos egressos, independentemente do turno, ainda que o grupo do noturno apresente percepção mais homogênea e positiva em relação à qualidade da formação recebida. Esse resultado está em consonância com estudos que apontam a relação entre a qualidade percebida da formação inicial e o grau de inserção e permanência na carreira docente Além disso, a predominância de avaliações positivas, particularmente entre os egressos do turno noturno, pode estar associada à valorização da formação por parte de estudantes que conciliam trabalho e estudo, o

que tende a intensificar o reconhecimento das oportunidades formativas oferecidas pela instituição (TERRIBILI FILHO, 2007; RISTOFF, 2014).

4 CONCLUSÃO

Considerando a relevância do acompanhamento de egressos para os processos de avaliação interna e externa dos cursos de graduação, no âmbito do SINAES, este estudo teve como objetivo caracterizar o perfil dos egressos do curso de Licenciatura em Matemática da UFCG, campus Cuité-PB, contemplando aspectos sociodemográficos, trajetória acadêmica, inserção profissional e percepções acerca da formação recebida.

De modo geral, os resultados indicam diferenças no perfil dos egressos entre os turnos do curso, com predominância de homens no turno diurno e mulheres no noturno, sendo majoritariamente pardos, residentes na Paraíba, com participação em programas de formação docente e tempo de conclusão próximo ao limite máximo previsto. No que se refere à formação acadêmica, observa-se elevada satisfação com o curso, especialmente quanto às experiências formativas e à infraestrutura, embora persistam desafios na articulação entre teoria e prática e na ampliação das oportunidades de integração acadêmica e cultural. Tais resultados evidenciam o papel do curso na consolidação da identidade docente e na preparação para o exercício profissional, em consonância com a literatura da área (TARDIF, 2014; GATTI et al., 2019).

As oportunidades de participação em eventos científicos, projetos de pesquisa e ações de extensão foram bem avaliadas, reforçando o compromisso do curso com uma formação abrangente. Por outro lado, aspectos relacionados à vivência cultural, lazer e integração acadêmica foram apontados como fragilidades, indicando a necessidade de maior atenção institucional. Quanto à formação acadêmica complementar, cerca de dois terços dos egressos possuem pós-graduação, com destaque para o mestrado acadêmico entre os egressos do turno diurno e para a especialização entre os do noturno, evidenciando trajetórias formativas distintas.

No campo profissional, a maioria dos egressos atua como professor de Matemática, sobretudo no Ensino Médio, com rápida inserção no mercado de trabalho e predominância de vínculos públicos efetivos. Entre os que não ingressaram na docência, a limitação do mercado foi apontada como principal fator. Esse perfil converge com estudos que destacam a atuação predominante de licenciados

na Educação Básica e sua inserção no setor público (GATTI et al., 2019), reforçando o papel do curso na formação de professores alinhada às demandas do sistema educacional brasileiro.

Em síntese, os elevados níveis de satisfação indicam que o curso tem sido eficaz na promoção de uma formação docente consistente, com impactos positivos na inserção profissional dos egressos. Ainda assim, recomenda-se atenção a aspectos relacionados à vivência universitária, à integração entre teoria e prática e ao aprimoramento do atendimento institucional.

Do ponto de vista metodológico, a adoção de amostragem não probabilística por autoseleção impõe limitações à generalização dos resultados, que devem ser interpretados no âmbito do grupo de respondentes. A taxa de resposta inferior a 50%, ainda que compatível com pesquisas dessa natureza, pode refletir fatores como disponibilidade dos egressos e desatualização das informações de contato, configurando potencial viés de não resposta. Apesar disso, a heterogeneidade da amostra quanto aos turnos e às coortes, abrangendo diferentes períodos de formação, confere robustez descritiva aos achados. Nesse sentido, embora os resultados estejam condicionados a essas limitações, eles oferecem evidências relevantes para o acompanhamento de egressos e para o aprimoramento do curso, podendo subsidiar processos de avaliação institucional e a formulação de estratégias voltadas à melhoria da formação docente.

Por fim, propõe-se, como desdobramento, o desenvolvimento de painéis dinâmicos e interativos (dashboards), a partir dos dados coletados, com o intuito de ampliar o acesso, a transparência e a utilidade das informações, subsidiando o monitoramento institucional e a tomada de decisões baseada em evidências.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/PB) pelo apoio concedido por meio de bolsa de pesquisa, a qual possibilitou o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

ALVI, M. H. A manual for selecting sampling techniques in research. MPRA Paper, Munique, 2016. Disponível em: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/70218/1/ . Acesso em: 16 nov. 2025.

ANDRIOLA, W. B. Estudo de egressos de cursos de graduação: subsídios para a autoavaliação e o planejamento institucionais. Educar em Revista, Curitiba, n. 54, p. 203-219, out./dez. 2014. Disponível em: https://www.scielo.br/j/er/a/mKkxrvs4q36g4PvkgxWbyfr/abstract/?lang=pt. Acesso em: 18 mar. 2025.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O. Elementos de amostragem. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

BRASIL. Lei nº 10.861, de 14 de abril de 2004. Institui o Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior – SINAES e dá outras providências. Brasília, DF: 2004a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.861.htm. Acesso em: 10 nov. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. Comissão Nacional de Avaliação da Educação Superior (CONAES). Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES). Orientações gerais para o roteiro da autoavaliação das instituições. Brasília, DF: INEP, 2004b. Disponível em: https://download.inep.gov.br/publicacoes/institucionais/avaliacoes_e_exames_da_educacao_superior/roteiro_de_auto_avaliacao_institucional_2004.pdf. Acesso em: 17 set. 2023.

BRASIL. Avaliação externa das instituições de educação superior: diretrizes e instrumento. Brasília: INEP; 2006. Disponível em: https://download.inep.gov.br/publicacoes/institucionais/avaliacoes_e_exames_da_educacao_superior/avaliacao_externa_das_ies_diretrizes_e_instrumento.pdf. Acesso em: 20 abr. 2024.

BRASIL. Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012. Dispõe sobre as diretrizes e normas regulamentadoras de pesquisas envolvendo seres humanos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 12, p. 59, 13 jun. 2013. Disponível em: https://conselho.saude.gov.br/resolucoes/2012/Reso466.pdf. Acesso em: 29 out. 2023.

BRASIL. Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016. Dispõe sobre as normas aplicáveis a pesquisas em Ciências Humanas e Sociais cujos procedimentos metodológicos envolvam a utilização de dados diretamente obtidos com os participantes ou de informações identificáveis. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 98, p. 44, 24 maio 2016. Disponível em: https://conselho.saude.gov.br/resolucoes/2016/Reso510.pdf. Acesso em: 01 nov. 2023.

BRASIL. Portaria nº 1.382, de 31 de outubro de 2017. Aprova, em extrato, os indicadores do Instrumento de Avaliação Institucional Externa para os atos de credenciamento, recredenciamento e transformação de organização acadêmica nas modalidades presencial e a distância, do SINAES. Brasília, DF: INEP, 2017. Disponível em: https://cpaufsc.paginas.ufsc.br/files/2017/11/MEC-Portaria-1382.2017.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Dispõe sobre a lei geral proteção de dados pessoais (LGPD) e altera a Lei nº 12.965, de 23 de abril de 2014 (Marco Civil da Internet). Brasília, DF: 2018. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Lei/L13709.htm. Acesso em: 11 out. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional de Saúde. Ofício Circular nº 2/2021/CONEP/SECNS/MS, de 24 de fevereiro de 2021. Orientações para procedimentos em pesquisas com qualquer etapa em ambiente virtual. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: https://conselho.saude.gov.br/oficios-circulares/OficioCircular2-2021.pdf. Acesso em: 01 nov. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. Portaria nº 61, de 31 de janeiro de 2024. Divulga o valor do Piso Salarial Profissional Nacional do magistério público da educação básica para o exercício de 2024. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 31 jan. 2024. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-61-de-31-de-janeiro-de-2024-540635028. Acesso em: 16 mar. 2025.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. Estatística básica. 8ª ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

GALLOWAY, A. Non-Probability Sampling. In Encyclopedia of Social Measurement, Elsevier, pages 859-864, 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123693985003820. Acesso: 13 fev. 2026.

GATTI, B. A. et al. Professores do Brasil: novos cenários de formação. Brasília: UNESCO, 2019. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367919. Acesso: 18 fev. 2026.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

HERINGER, A. A. F. et al. Acompanhamento de egressos: um cenário sobre a existência e os instrumentos utilizados pelas IES públicas brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (COBENGE), 46., 2018, Salvador. Disponível em: https://admin.abenge.org.br/dados/COBENGE18/COBENGE18_00079_00001624.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

LOHR, S.L. Sampling: Design and Analysis. Duxbury, 3nd. Edition, EUA, 2022.

LOUSADA, A. C. Z.; MARTINS, G. A. Egressos como fonte de informação à gestão dos cursos de Ciências Contábeis. Revista Contabilidade & Finanças, São Paulo, v. 16, n. 37, p. 73-84, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/rcf/v16n37/v16n37a06.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

MEIRA, M. D. D.; KURCGANT, P. Avaliação de curso de graduação segundo egressos. Revista da Escola de Enfermagem da USP, São Paulo, v. 43, n. 2, p. 481-485, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/reeusp/a/wP3QK8xNb4BtD8VFZPGdvqK/?lang=pt&format=pdf. Acesso em: 15 set. 2023.

MICHELAN, L. S. et al. Gestão de egressos em instituições de ensino superior: possibilidades e potencialidades. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO UNIVERSITÁRIA NA AMÉRICA LATINA, 9., 2009, Florianópolis. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/36720/Gest%C3%A3o%20de%20egressos%20em%20institui%C3%A7%C3%B5es%20de%20ensino%20superior%20Possibilidades%20e%20pontencialidades.pdf?sequence=1. Acesso em: 05 out. 2024.

PAUL, J. J. Acompanhamento de egressos do ensino superior: experiência brasileira e internacional. Caderno C R H, Salvador, v. 28, n. 74, p. 309-326, Maio/Ago. 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/ccrh/v28n74/0103-4979-ccrh-28-74-0309.pdf. Acesso em: 08 maio 2024.

RISTOFF, D. O novo perfil do campus brasileiro: uma análise do perfil socioeconômico do estudante de graduação. Rev. Avaliação, Campinas; Sorocaba, v. 19, n. 3, p. 723–747, 2014. Disponível em: < https://submission.scielo.br/index.php/aval/article/view/141226 > Acesso em: 15 mar. 2026.

SANTOS, D. S.; DUARTE, A. C. S.; SANTOS, D. S. Um estudo sobre o ensino superior noturno na perspectiva de estudantes trabalhadores do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas na UESB. Revista de Iniciação à Docência, v. 4, n. 2, p. 25–39, 2020. Disponível em: < https://periodicos2.uesb.br/index.php/rid/article/view/6219 > Acesso em: 18 set. 2025.

TARDIF, M. Saberes docentes e formação profissional. 17. ed., Editora Vozes, 2014.

TERRIBILI FILHO, A. Educação superior no período noturno: impacto do entorno educacional no cotidiano do estudante. 2007. 186 f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Filosofia e Ciências, Marília, 2007. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/d4083048-8c83-4361-a8f6-44a7c642d997/content. Acesso em: 20 maio 2024.

TRIOLA, F., M. Introdução à Estatística - Atualização da Tecnologia, 11. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE (UFCG). Resolução CSE/UFCG nº 08/2019. Dispõe sobre a estrutura curricular do curso de Licenciatura em Matemática da UFCG, campus Cuité-PB. Campina Grande, PB: Câmara Superior de Ensino, 2019. Disponível em: https://sods.ufcg.edu.br/index.php/camara-ensino/resolucoes?download=668:resolucao-n-08-2019&start=100. Acesso em: 20 out. 2023.



ENGENHARIA:
A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XXVI



conhecimentolivre.org/home
contato@conhecimentolivre.org
editoraconhecimentolivre