

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XIII



EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

13^a ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

13ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2023

97 f.: il

DOI: 10.37423/2023.edcl709

ISBN: 978-65-5367-310-6

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2023.edcl709>

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

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo 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

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Wesley Pacheco Calixto

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

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

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

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

MSc Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

CAPÍTULO 1	5
MODELAGEM DA REMOÇÃO DE CORANTE REATIVO EM COLUNA DE LEITO FIXO EMPACOTADA COM DIFERENTES MATERIAIS ADSORVENTES	
Andressa Regina Vasques Mendonça Rodrigo Pereira Campêlo Natália Stefânia Gomes Paulo de Assis Lago Eduardo Oliveira Resende Júnior DOI 10.37423/230407519	
CAPÍTULO 2	13
BIO-ÓLEO DA PIRÓLISE RÁPIDA COMO PRECURSOR DE FIBRA DE CARBONO	
Gino Capobianco Diana Cristina Prochnow Vélez Sidnei Antonio Pianaro Wahington Luiz Esteves Magalhaes DOI 10.37423/230407526	
CAPÍTULO 3	21
MODELAGEM, SIMULAÇÃO, PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA E CONTROLE NÃO LINEAR NO ESPAÇO DE JUNTAS DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS - EPSON	
Flávio Luiz Rossini Bruno Suracci de Lima João Henrique Dias Corrêa João Marcos Pericharo Lopes Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa Yuri Ruzzene Barrozo DOI 10.37423/230407596	
CAPÍTULO 4	42
ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO EM COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND: OPORTUNIDADES DE PESQUISA	
Ricardo Augusto dos Santos Horta Júnia Nunes de Paula Rogério Cabral de Azevedo DOI 10.37423/230407620	
CAPÍTULO 5	70
PLANO DE AÇÃO PARA A ELABORAÇÃO DO PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO PRÉDIO DA PREFEITURA MUNICIPAL DE MONTES CLAROS-MG	
Luiza Eduarda Torres Pires Sheila Cristina Martins Pereira DOI 10.37423/230407643	

OSCULATORY METHOD FOR ROOT-FINDING

Sérgio Mário Lins Galdino

Jornandes Dias da Silva

Cícero José da Silva

Willames de Albuquerque Soares

DOI 10.37423/230407644

Capítulo 1



10.37423/230407519

MODELAGEM DA REMOÇÃO DE CORANTE REATIVO EM COLUNA DE LEITO FIXO EMPACOTADA COM DIFERENTES MATERIAIS ADSORVENTES

Andressa Regina Vasques Mendonça

Universidade de Brasília

Rodrigo Pereira Campêlo

Universidade de Brasília

Natália Stefânia Gomes

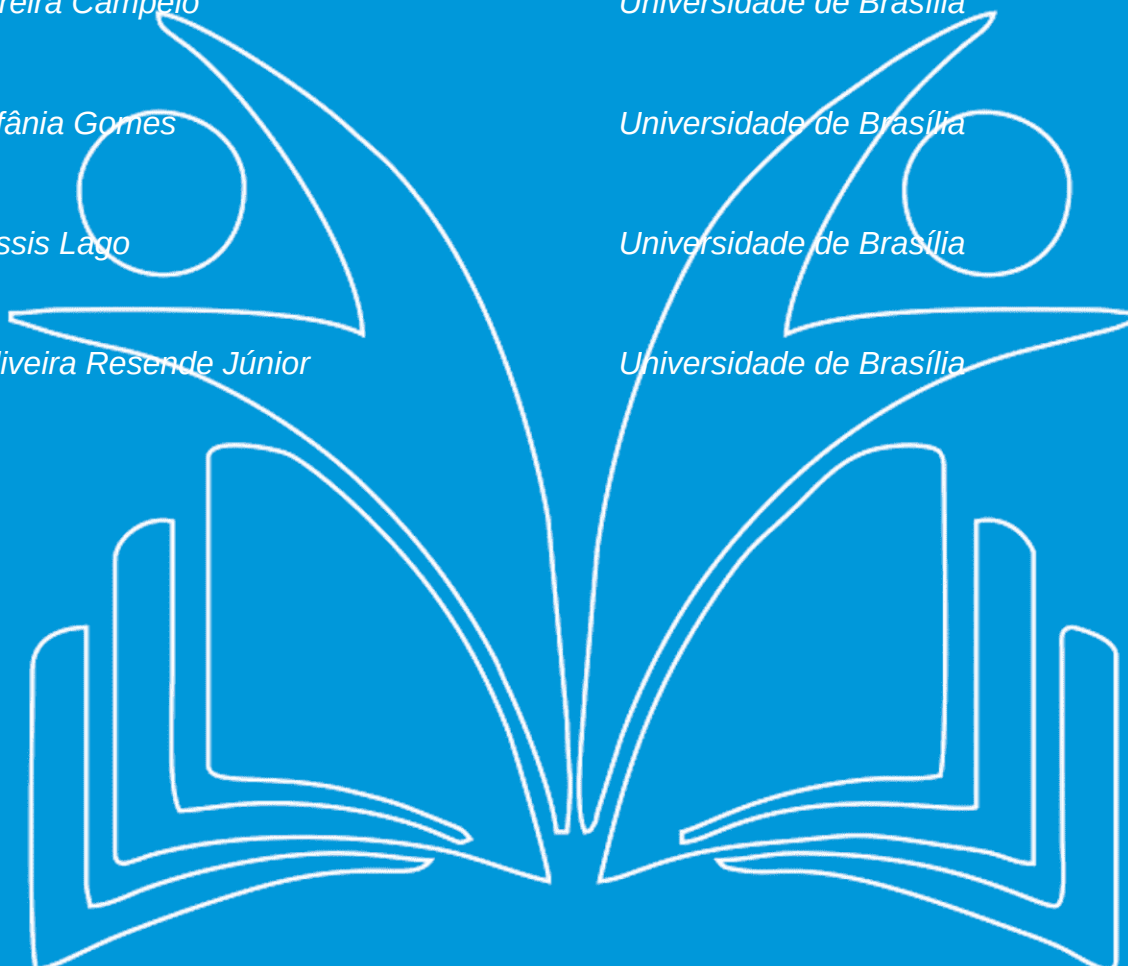
Universidade de Brasília

Paulo de Assis Lago

Universidade de Brasília

Eduardo Oliveira Resende Júnior

Universidade de Brasília



Resumo: O projeto de uma coluna de leito fixo é um tanto complexo, verificando-se assim a importância dos modelos matemáticos no projeto deste processo de separação, pois estes reduzem os custos de implantação de tal operação. Assim, o estudo objetivou modelar o processo de adsorção de corante em coluna de leito fixo empacotada com diferentes materiais adsorventes como o carvão ativado comercial, adsorvente têxtil e adsorvente proveniente de lodo da estação de tratamento de água (ETA). Colunas de adsorção foram operadas na vazão de 2,5 mL/min contendo uma massa de adsorvente de 8,2 g e concentração de entrada de 50 mg/L e curvas de ruptura foram obtidas. Todos os dados foram modelados matematicamente por meio de modelos descritos na literatura e parâmetros importantes do processo de transferência de massa foram interpretados. Dados de porcentagem de remoção apontam que o adsorvente de ETA obteve um tempo de ruptura de 47,5 h, tempo 5,25 vezes superior ao carvão ativado e 47,5 vezes maior que o têxtil.

Palavras-chave: Adsorção, coluna de leito fixo, modelagem matemática

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil brasileira é fundamental na estratégia de desenvolvimento da política industrial. Porém, os efluentes líquidos das indústrias têxteis contêm alto teor de corantes e compostos orgânicos que causam sérios problemas de poluição à vida aquática em lagos, rios e mares, sendo que esses mesmos corantes são difíceis de remover dos efluentes por serem estáveis a luz, ao calor e biologicamente não-degradáveis. Assim, torna-se necessário o tratamento do efluente gerado. Neste sentido, processos de adsorção têm sido empregados [1] [2].

A coluna de adsorção de leito fixo é formada por uma coluna que contém sólido adsorvente que irá remover a substância desejada diluída em um fluido [3].

Em geral, não se opera uma coluna até o esgotamento, mas até um ponto de saturação onde o efluente tem uma concentração permissível. Essa concentração pode ser observada na curva de ruptura, ou breakthrough, sendo referida como concentração de breakthrough. As curvas de breakthrough são expressas em termos de concentração normalizada (definida como sendo a razão entre a concentração de soluto à saída da coluna e a concentração de soluto à entrada) em função do tempo, da vazão ou em função do volume de efluente [4] [5] [1].

Para a predição e compreensão das curvas de breakthrough, ou curva de ruptura, têm sido propostos diversos modelos matemáticos, como o de Thomas (Eq. 1) e Bohart-Adams (Eq. 2) [4].

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{Th} q_0 m_c}{Q} - k_{Th} C_0 t\right)} \quad (1)$$

Onde, k_{Th} é a constante de Thomas, em L/min.mg; q_0 é a quantidade máxima de soluto adsorvida, em mg/g; m_c é a massa de adsorvente na coluna, em g; C é a concentração e C_0 é a concentração inicial em mg/L e Q é a vazão em L/min^[5].

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(k N_0 \frac{Z}{u} - k C_0 t\right)} \quad (2)$$

Onde, k é a constante cinética de Bohart-Adams, em L/min.mg; N_0 é a capacidade de adsorção por unidade de volume do leito, em mg/L; Z é a altura do leito em cm; e u é a velocidade superficial em m/min^[5].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizados uma coluna de adsorção com 9 cm de diâmetro externo e 30 cm de altura, alimentada por uma bomba peristáltica com uma solução de corante reativo RR2. Para a produção dos adsorventes ETA, lodo da estação de tratamento de água da CAESB-DF foi coletado. Para a ativação, solução de ácido acético 1M e K_2CO_3 . Foi utilizado um forno do tipo mufla e uma mesa agitadora com controle de temperatura. Além disso, foram utilizados adsorvente de lodo da indústria têxtil fornecido pela UFSC e Carvão Ativado granular comercial.

2.2. METODOLOGIA

O lodo residual de ETA após coletado foi seco ao sol, a fim de estabilizá-lo microbiologicamente. Em seguida, moído e peneirado para selecionar uma granulometria de 400 μ m. Então, o material foi impregnado com carbonato de potássio e levado à mufla por duas horas, depois ativado quimicamente reagindo em solução de ácido acético por 2h. Finalmente, o material foi filtrado com água destilada até a estabilização do pH. Foi realizada a análise de ponto de carga zero (pcZ) de todos os adsorventes. Para a realização do ensaio em coluna, foi utilizada solução de corante reativo RR2 50mg/L a pH 4,4 alimentada numa vazão de 2,5mL/min. As curvas de ruptura foram modeladas com os modelos de Thomas e Yoon Nelson, como descrito por Oliveira (2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. PONTO DE CARGA ZERO (PH_{PCZ})

O ponto de carga zero foi calculado para os adsorventes, como mostra a tabela 1:

Tab. 1. Ponto de carga zero dos adsorventes.

	ETA	CC	AT
pH _{PCZ}	6,41	6,22	6,29

Os resultados obtidos mostraram que ambos adsorventes possuem carga de superfície levemente básica. O fator da carga de superfície pode ser determinante para a compreensão do fenômeno da adsorção de corantes reativos. Uma maior presença de óxidos e heteroátomos na superfície do adsorvente, levam a um desvio maior da neutralidade da carga. Por esse motivo, adsorventes dos lodos de ETA e Têxtil possuem carga mais básica em comparação ao carvão comercial, mais próximo

de 6,0. Quanto mais básico o ponto de carga zero da superfície, maior sua afinidade com cátion, enquanto superfícies ácidas possuem afinidade com ânions. O corante RR2 é formado por 2 grupos SO_3^- . Para a adsorção desse corante por adsorventes de superfície básica, o pH da solução cumpre papel fundamental, pois os íons H^+ em solução são adsorvidos à superfície do sólido e por sua vez, aproximam os íons do corante reativo por balanceamento das cargas. Esse fenômeno é conhecido como 'fenômeno da dupla camada elétrica' [6].

3.2. CURVAS DE RUPTURA E MODELAGEM MATEMÁTICA

As figuras 1, 2 e 3 mostram, a curva de ruptura de Carvão Comercial (CC), Têxtil (AT) e ETA:

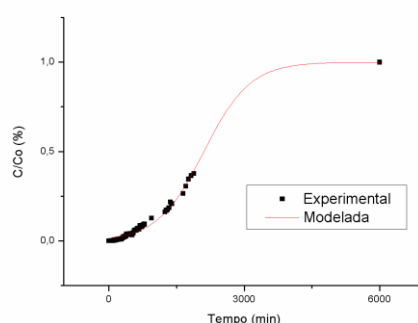


Fig. 1. Curva de Ruptura CC

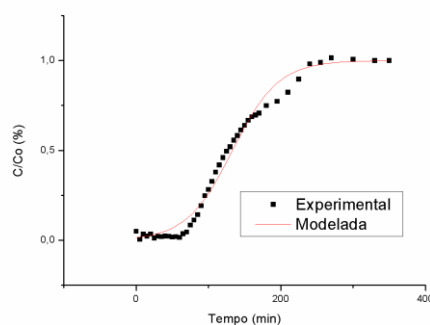


Fig. 2. Curva de Ruptura AT

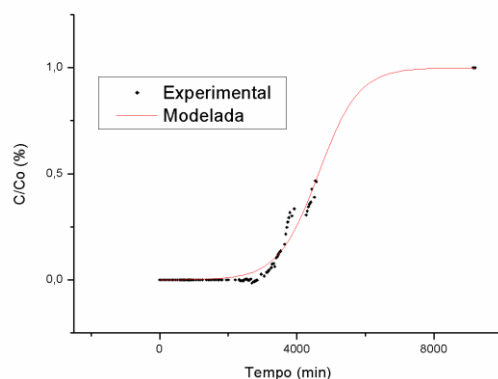


Fig. 1. Curva de Ruptura ETA

Os modelos de Thomas e Bohart-Adams convergiram entre si na modelagem da curva, devido à semelhança dos modelo e à boa adequação aos pontos experimentais. O último ponto das curvas de ETA e CC foram estimados para que fosse possível a modelagem. Os parâmetros dos modelos de Thomas e Bohart-Adams são mostrados nas tabelas 2 e 3:

Tab. 2. Parâmetros dos modelos de Thomas.

Parâmetros	ETA	CC	AT
K_{TH}	3,41e-5	3,89e-5	6,27e-4
Q_0	86,74	39,06	2,47
R^2	0,96	0,98	0,98

Tab. 3. Parâmetros dos modelos de Bohart-Adams.

Parâmetros	ETA	CC	AT
K_{BA}	3,41e-5	3,89e-5	6,27e-4
N_0	1156,5	420,82	32,94
R^2	0,96	0,98	0,98

Nota-se que os valores para os parâmetros cinéticos, com o mesmo sentido físico, convergem para ambos os modelos. Para o modelo de Thomas, a quantidade adsorvida Q_0 foi superior para o ETA. No caso do modelo de Bohart-Adams, o parâmetro N_0 refere-se à capacidade de adsorção por unidade de volume de leito, em mg de corante por litro de coluna empacotada, sendo extremamente útil para um possível dimensionamento, também apontando a superioridade do ETA, como conferido nas figuras 1, 2 e 3, que mostram que o tempo de ruptura também foi superior para ETA, seguido por CC e AT. A concentração de ruptura da coluna foi definida em 1ppm. Os respectivos tempos de ruptura verificados estão na tabela 4:

Tab. 4. Pontos de Ruptura

	ETA	CC	AT
Tempo (min)	2960	320	62

4. CONCLUSÕES

O adsorvente ETA apresentou capacidade superior de adsorção em relação ao têxtil e ao carvão comercial, apontando a eficácia do processo de ativação e preparação desse adsorvente a partir do lodo residual. Os modelos matemáticos possibilitaram um bom entendimento das curvas de ruptura, apresentando parâmetros plausíveis e com boa capacidade de predição para as curvas descritas, a partir dos quais torna-se possível a compreensão do fenômeno e seu dimensionamento para escala industrial. A capacidade adsortiva foi verificada positivamente para todos os adsorventes.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Química (IQ-UnB), Laboratório de Materiais e Combustíveis (LMC) e Laboratório de Tecnologias Químicas (LATEC).

REFERÊNCIAS

- [1] VASQUES, A.R. Caracterização e Aplicação de Adsorvente para Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis em Batelada e Colunas de Leito Fixo. Dissertação de mestrado. Florianópolis, 2008.
- [2] SOARES, J.L. Remoção de corantes têxteis por adsorção em carvão mineral ativado com alto teor de cinzas. Dissertação de mestrado. Florianópolis, 1998.
- [3] ALMEIDA, A.M. Estudo numérico de colunas de adsorção de leito fixo. Dissertação de mestrado. Curitiba, 2012.
- [4] OLIVEIRA, P. Remoção de azul de metileno numa coluna de adsorção com enchimento de casca de noz carbonizada. Tese De Mestrado. Porto, 2009.
- [5] OLIVEIRA, R. Adsorção de alumínio em sistema contínuo por coluna de leito fixo utilizando carvão ativado. Dissertação de Mestrado. Uberlândia, 2014.
- [6] VASQUES, A.R; SOUZA, S.M.G.U.; VALLE, J.A.B.; SOUZA, A.A.U. Application of ecological adsorbent in the removal of reactive dyes from textile effluents. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. v.84 p.1146-1155. 2009.

Capítulo 2



10.37423/230407526

BIO-ÓLEO DA PIRÓLISE RÁPIDA COMO PRECURSOR DE FIBRA DE CARBONO

Gino Capobianco

*Unidade de Ensino superior Vale do Iguaçu
S/A -UGV-Centro Universitario*

Diana Cristina Prochnow Vélez

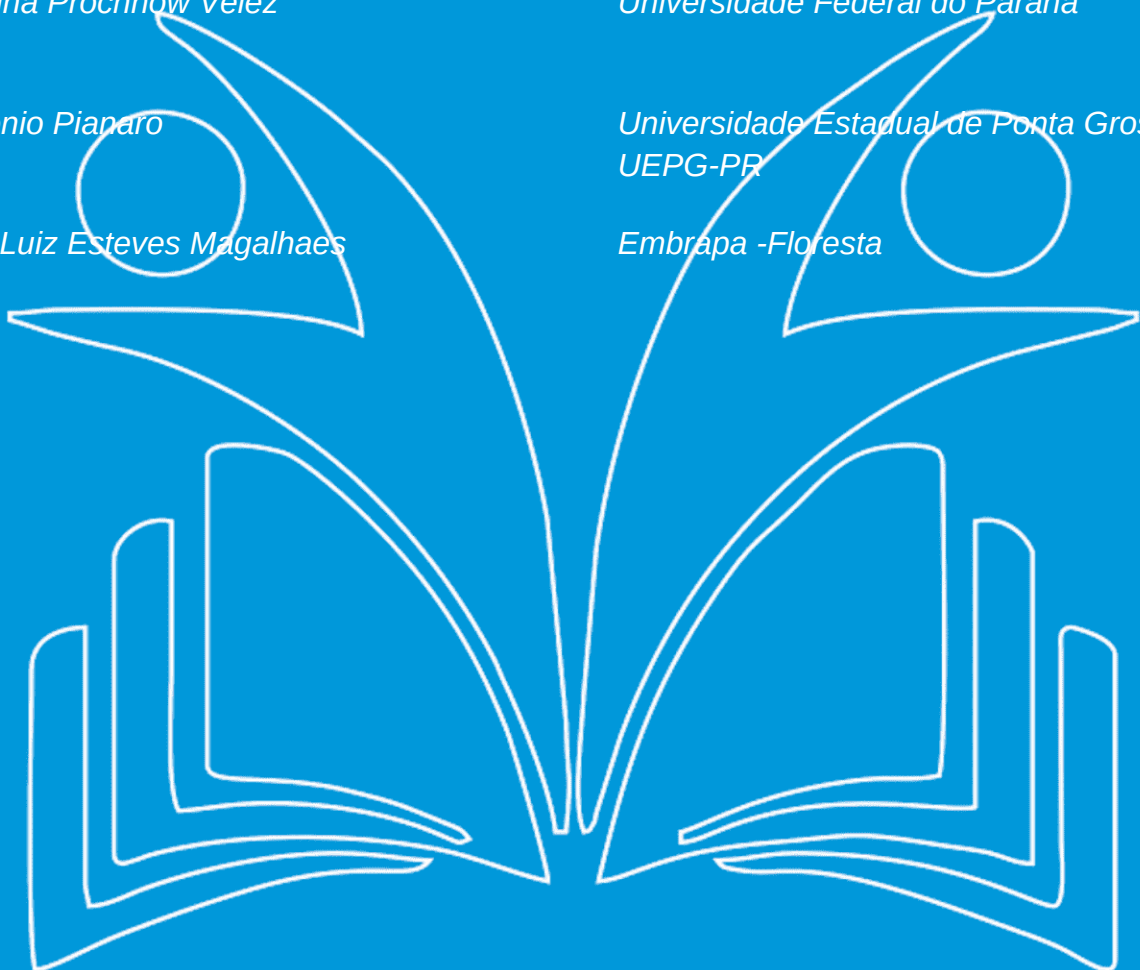
Universidade Federal do Paraná

Sidnei Antonio Pianaro

*Universidade Estadual de Ponta Grossa -
UEPG-PR*

Wahington Luiz Esteves Magalhaes

Embrapa -Floresta



Resumo: O bio-óleo da pirólise rápida foi utilizado como precursor para fibra de carbono. A polimerização do bio-óleo foi conduzida por meio de tratamento térmico para remoção de compostos voláteis. O piche resultante foi submetido a fiação em uma fieira monofilamento. A temperatura do ponto de amolecimento foi o parâmetro para determinar a temperatura ideal para fiação. Aditivos como lignina kraft e álcool furfurílico conferiam ao bio-óleo melhor fiabilidade, enquanto que o bio-óleo sem aditivos não apresentou formação uniforme de fios. Os fios foram submetidos a tratamento de estabilização oxidativa para evitar sua fusão durante a carbonização. As amostras apresentaram um incremento do teor de oxigênio após estabilização e alcançaram 90 % de carbono após submetidos a 1000 °C.

Palavras-chave: Bio-óleo, fibra de carbono, tratamento térmico, lignina kraft, álcool furfurílico.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal da técnica de pirólise rápida é condensar uma biomassa qualquer em um produto líquido, por meio da sua pirólise a temperaturas em torno de 500 °C e curto tempo de residência (~segundos) dos vapores[1]. Trabalhos com fibra de carbono a partir de lignina kraft, Alcell, pirolítica, e alcatrão de eucalipto se mostraram viáveis pelo baixo custo e elevado teor de carbono[2]–[4]. Neste trabalho, resíduos da madeira de eucalipto rejeitados no processo de produção de papel e celulose foram submetidos a pirólise rápida e resultaram na produção de bio- óleo, gases incondensáveis e finos de carvão. O bio-óleo foi utilizado como precursor para a produção de fibra de carbono.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

O bio-óleo foi obtido por meio de uma planta-piloto de pirólise rápida (Bioware). O reator de operação é do tipo leito fluidizado e a temperatura foi 550 °C, com tempo de residência dos vapores de 5 seg. A biomassa submetida ao processo foram finos da madeira de eucalipto rejeitados durante o seu cavaqueamento.

A lignina kraft foi fornecida pela Suzano Papel e Celulose (São Paulo) e, álcool furfurílico (98 %) foi obtido à Sigma Aldrich.

2.2. METODOLOGIA

A etapa de polimerização foi conduzida dentro de um reator aquecido por manta térmica a uma temperatura de até 200°C e tempo de 2 horas para o bio-óleo aditivado com lignina kraft e álcool furfurílico na proporção de 10 % em peso. Para o bio-óleo sem aditivos o tratamento foi conduzido por um tempo de 3 e 6 horas. Após a polimerização, foi conduzida análise do ponto de amolecimento pelo método “anel e bola” conforme norma ABNT-NBR 6560. A fiação do piche foi conduzida em seguida por meio de um reator com um furo de 0,45mm conectado a uma bobina girando entre 200 rpm a 900 rpm, como mostrado na Fig. 1.

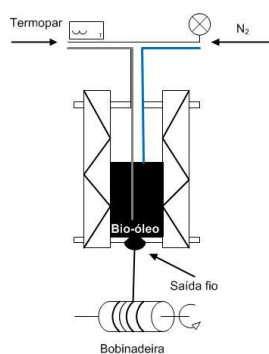


Fig. 1. Esquema da fieira monofilamento.

Os fios foram submetidos a estabilização térmica a uma taxa de aquecimento a 0,1 °C/min até 270 °C e mantidos nesta temperatura por 2 horas. A carbonização foi conduzida sob atmosfera de nitrogênio nas temperaturas de 750 °C e 1000 °C.

A análise elementar foi realizada no equipamento modelo Vario Macro Cube. O teor de cinzas seguiu a norma ASTM D482-13.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O bio-óleo resultante da pirólise rápida é um líquido viscoso e de cor marrom escura. O conteúdo de oxigênio relativamente elevado (39 %) comprova que o bio-óleo consiste de uma mistura complexa de variados compostos oxigenados, e isto influencia na produção de fibra de carbono. O conteúdo de carbono (54 %) é favorável para matéria-prima de fibra de carbono. O conteúdo de cinzas (1,27 %), relativamente elevado, é resultado do processo ineficiente da separação entre leito de areia, o carvão e os gases condensáveis durante a pirólise rápida.

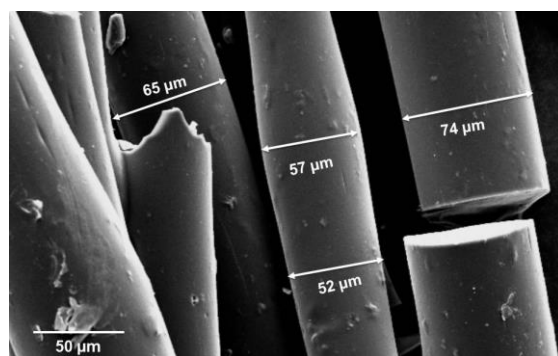
O objetivo da polimerização é aumentar o conteúdo de carbono por meio de tratamento térmico do bio-óleo. Nas primeiras horas do tratamento térmico ocorre liberação de compostos mais leves presentes no bio-óleo. Em seguida, ocorre aumento da viscosidade pelo incremento no ponto de amolecimento. O bio-óleo deve apresentar característica termoplástica para o processo posterior de fiação. O tratamento de 6 horas apresentou ponto de amolecimento de 124 °C (Tab. 1). Mas, uma temperatura maior de ponto de amolecimento torna difícil a fiação do piche de bio-óleo. A adição de aditivos durante a polimerização do bio-óleo abaixou o ponto de amolecimento, mas permitiu uma fiação uniforme do piche.

Tab. 1. Ponto de amolecimento das amostras tratadas a 200 °C.

Amostras	Tempo de tratamento (horas)	Ponto de amolecimento (°C)
BO	6	124
BO	3	99
BO-LG	2	87
BO-AF	2	63

***BO**: bio-óleo sem aditivos; **BO-LG**: bio-óleo aditivado com lignina kraft e **BO-AF**: álcool furfurílico.

A temperatura de fiação foi entre 45 °C a 50 °C maior que o ponto de amolecimento. A pressão ideal de nitrogênio para extrusão dos fios foi 2 bar. Pois uma pressão inferior não foi suficiente para expelir o piche, e com uma pressão maior, os fios não enrolam na bobina. A velocidade do enrolamento influenciou parcialmente no diâmetro dos fios. Para o bio-óleo aditivado com álcool furfurílico, uma velocidade maior no enrolamento produziu fibras com diâmetros menores. No entanto, esse comportamento não foi observado para as fibras aditivadas com lignina kraft. Os fios foram submetidos ao processo de estabilização oxidativa, com a finalidade de evitar a fusão das fibras durante a carbonização. Como o diâmetro das fibras fiadas foi bastante superior ao diâmetro de uma fibra de carbono comum, as reações de oxidação durante a estabilização não se completaram de forma satisfatória (Fig.2).

**Fig. 2.** Microscopia eletrônica de varredura de fibras estabilizadas.

Mesmo assim, foi possível obter fibras infusíveis e que mantiveram sua forma durante a carbonização. No entanto, foi observada uma perda de peso durante a estabilização, que foi atribuído a evaporação de compostos voláteis e degradação de cadeias laterais presentes na estrutura química do bio-óleo. Testes preliminares foram conduzidos afim de explorar o tempo de residência e a temperatura na carbonização. Foi observado que a temperatura é um fator mais significativo que o tempo de

residência das fibras na carbonização pois, maior a temperatura, maior a perda de peso. As fibras aditivadas com lignina kraft e álcool furfurílico apresentaram resultados de rendimento significativos. A lignina kraft apresenta em sua estrutura química unidades fenil propano e radicais oxigenados ligados a estas unidades. Durante a carbonização em altas temperaturas, ocorre maior liberação de gases como CO e CO₂, e por isso o rendimento é menor. O álcool furfurílico possui uma estrutura química mais simples, basicamente composto de carbono e heteroátomos de oxigênio e mais um radical hidroximetil. Desse modo, na carbonização os rendimentos são um pouco mais elevados, pois não ocorre a saída de gases do mesmo modo como as fibras aditivadas com lignina kraft.

A análise elementar das amostras mostrou o comportamento do incremento de oxigênio após a etapa da estabilização oxidativa, como também o incremento de carbono na carbonização como mostrado na Tab. 2.

Tab. 2. Análise elementar das amostras após tratamentos térmicos.

Tratamento térmico	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Polimerização 200°C / 2 horas				
BO-AF	70,1	6,3	23,2	0,2
BO-LG	70,8	6,1	22,6	0,2
Estabilização 270°C / 2 horas				
BO-AF	69,0	4,8	25,7	0,2
BO-LG	67,9	4,6	26,9	0,2
Carbonização 1000°C				
BO-AF	82,2	0,2	16,1	1,1
BO-LG	90,4	1,3	1,2	1,1

* **BO-LG:** bio-óleo aditivado com lignina kraft e **BO-AF:** álcool furfurílico.

Como pode ser observado, houve um incremento no conteúdo de oxigênio durante a estabilização e conseqüentemente uma diminuição relativa no conteúdo de carbono, que comprova a perda de massa durante o processo. Na carbonização houve um incremento significativo no conteúdo relativo de carbono. Se observa que o conteúdo de carbono é maior nas fibras aditivadas com lignina kraft. Durante a carbonização ocorre aromatização das unidades fenil propano e por isso o conteúdo de carbono aumenta. Já o conteúdo de carbono das fibras aditivadas com álcool furfurílico foi

relativamente menor, pois a presença do heteroátomo de oxigênio na estrutura do álcool furfurílico impede a reestruturação em cadeias aromáticas.

4. CONCLUSÕES

O bio-óleo pode ser um precursor viável para produção de fibras de carbono. Foi observado que tratamentos térmicos aumentaram o conteúdo de carbono no bio-óleo, mas para melhorar a fiabilidade foi necessária a adição de aditivos. Foi alcançado um conteúdo de 90 % de carbono na carbonização para as fibras aditivadas com lignina kraft, enquanto que as fibras aditivadas com álcool furfurílico incrementaram o carbono a 82 %.

AGRADECIMENTOS

CAPES/MEC-PNPD nº 02549/09-3

CNPq processo 406897/2013-1, Uepg, Ufpr, Embrapa Floresta, Uniguaçu.

REFERÊNCIAS

- [1] BRIDGWATER, A.V.; MEIER, D.; RADLEIN, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Org. Geochem.*, vol. 30, no. 12, pp. 1479–1493, 1999.
- [2] PRAUCHNER, M.J.; PASA, V. M. D.; OTANI, S; OTANI, C. Biopitch-based general purpose carbon fibers: Processing and properties. *Carbon N.Y.*, vol. 43, no. 3, pp. 591–597, 2005.
- [3] MAINKA, H. et al. Lignin – an alternative precursor for sustainable and cost-effective automotive carbon fiber. *J. Mater. Res. Technol*, vol. 4, no. 3, pp. 283–296, 2015.
- [4] QIN, W.; KADLA, J.F. Carbon Fibers on Pyrolytic Lignin. *J. Applied Polym. Scien.*, vol. 126, E203-E212, 2012.
- [5] ABNT, NBR. 6560 Materiais betuminosos-Determinação do ponto de amolecimento-Método do anel e bola. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 2005.
- [6] ASTM D482-13, Standard Test Method for Ash from Petroleum Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

Capítulo 3



10.37423/230407596

MODELAGEM, SIMULAÇÃO, PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA E CONTROLE NÃO LINEAR NO ESPAÇO DE JUNTAS DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS - EPSON

Flávio Luiz Rossini

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná
campus Campo Mourão*

Bruno Suracci de Lima

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná
campus Campo Mourão*

João Henrique Dias Corrêa

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná
campus Campo Mourão*

João Marcos Perissaro Lopes

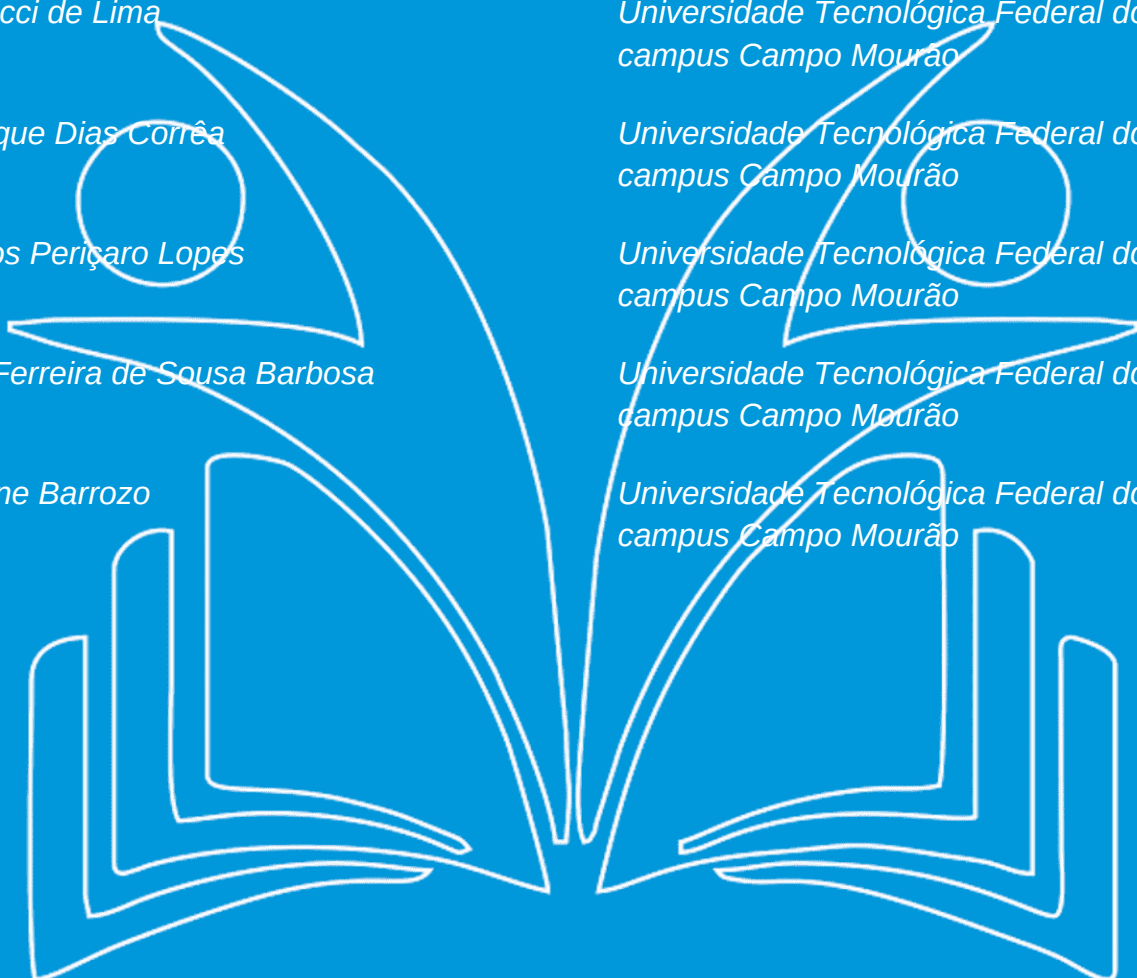
*Universidade Tecnológica Federal do Paraná
campus Campo Mourão*

Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná
campus Campo Mourão*

Yuri Ruzzene Barrozo

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná
campus Campo Mourão*



Resumo: O artigo propôs a modelagem matemática, planejamento de trajetória e controle não linear do robô manipulador SCARA T3 401SS da fabricante Epson. A Confederação Nacional Da Indústria (CNI) desenvolveu uma pesquisa sobre os resultados das empresas que adotaram conceitos da Indústria 4.0, sendo os resultados divulgados no ano de 2018, as quais usam extensivamente robôs em suas plantas fabris. No Brasil existem cerca de 1.595 unidades com robôs instalados. Assim, desenvolveu-se os modelos estático e dinâmico do referido robô, os quais foram utilizados para realização do planejamento de trajetória e do sistema de controle não linear particionado baseado em modelo no espaço de juntas. A partir dessa proposta, construiu-se o código no ambiente do software MATLAB®. Em seguida, realizou-se a simulação e foram obtidos os resultados numérico, quanto a posição, velocidade e aceleração do efetuador em relação a base fixa do robô, no contexto da modelagem estática e dinâmica. Por meio da descrição matemática e da simulação computacional, os resultados se mostraram coerentes e promissores, os quais têm a finalidade de contribuir com estudantes e profissionais da área que buscam modelos e comportamentos temporais, a fim de checagem, comparação e implementar em novas tecnologias embarcadas. Assim como, avaliar qual melhor desempenho do sistema robótico.

Palavras-chave: Robô Scara T3 401SS, Modelagem Cinemática, Modelagem Dinâmica, Sistema de Controle Não Linear.

INTRODUÇÃO

Desde 2010, a demanda por robôs industriais aumentou consideravelmente, devido à tendência de automação e inovação tecnológica industrial e uso da robótica, devido ao surgimento do conceito de Indústria 4.0. Após a queda no número de instalações de robôs em 2019, por conta da guerra comercial entre China e Estados Unidos da América, o número de instalações de robôs tornou a crescer em 2020, apesar da situação de pandemia global, e atingiu o número de 383.545 unidades instaladas. No Brasil, entretanto, esse número caiu de 1.833 para 1.595 unidades instaladas [1].

Apesar do Brasil não estar entre os maiores consumidores de robôs do mundo, assim como de plantas industriais instaladas, a robótica ainda é uma área que demanda de conhecimento e desenvolvimento, pois o uso da robótica está diretamente relacionada à competitividade da indústria [1], frente ao mercado global. De acordo com a pesquisa da Confederação Nacional da Indústria (CNI), as empresas que adotaram os conceitos da Indústria 4.0 obtiveram melhores resultados do que possuíam anteriormente [2].

Em certas situações, a intervenção humana se torna limitada ou impossível, tais com condições ambientais, incapacidade física, alta precisão de execução, fator de escala de força ou de movimento, etc. Dessa forma, torna-se atrativo o uso de sistemas robóticos, o qual surge como uma possível solução no meio industrial. Ao considerar o fator de escala, destaca-se o uso da força em aplicações industriais, como no caso da manipulação de equipamentos de dobra de chapas metálicas, usados na indústria automobilística. Existem outras aplicações de extrema precisão, onde o robô se movimenta a partir do rastreamento de trajetória, sendo essas preestabelecida para execução da respectiva tarefa. Desse modo, o uso de manipuladores robóticos se torna atrativo e motiva tanto o desenvolvimento de máquinas como o aperfeiçoamento de sistemas que visam auxiliar o homem em suas atividades de projeto e desenvolvimento [3].

Ao considerar o cenário de crescimento e aplicação da robótica, há necessidade de desenvolvimento de várias frentes dessa área, tais como: campo teórico e frente de projeto e construção dos mecanismos. No artigo [4], apresentou-se a modelagem de um robô PUMA com seis graus de liberdade e a construção de um aplicativo para planejamento de trajetória. Em outro artigo [5], mostrou-se a modelagem, simulação e controle de trajetória de um robô SCARA. Há outros artigos, nos quais os autores se dedicaram a estabelecer as bases matemáticas de robôs manipuladores [6] [7] [8] [9] [10][11], assim como robôs móveis com pernas [12] [13].

Nesse contexto, o presente artigo desenvolveu um estudo de caso aplicado ao Robô Manipulador Scara T3 401SS da fabricante EPSON [14]. A partir das notas de aula da disciplina de Introdução à Robótica do curso de Engenharia Eletrônica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Campo Mourão [15], realizaram-se as modelagens da cinemática direta e da dinâmica do robô, além da aplicação de uma estratégia de controle não linear de posição.

MÉTODOS

DESCRIÇÃO DO MODELO

Considerou-se o robô SCARA modelo T3 401SS da fabricante Epson para a modelagem matemática, a qual incluem o modelo estático, representado pela cinemática direta, e a descrição dinâmica, além da estratégia de controle. Toda modelagem matemática e o controle foram baseados na literatura do CRAIG [16]. O referido robô possui três graus de liberdade, na qual duas juntas são rotativas e a última é prismática, abreviado por RRP ou 2RP, ilustrado na Figura 1.

Para melhor inferir sobre o modelo matemático, desenvolveu-se um esquema mecânico em duas dimensões do robô, estabeleceu-se a hipótese de simetria em relação ao eixo X, conforme ilustrado na Figura 2. Na referida figura, observam-se os elos e juntas com os respectivos Sistemas de Referência (SR){ i }, com $i = 1, 2, 3, 4$, localizados na origem de cada elo ou corpo rígido do robô.

A. POSIÇÃO DO SR{ i }

Nesta subseção, são apresentadas as posições dos SR{ i } em relação ao SR{ $i - 1$ }, com $i = 1, 2, 3, 4$. A partir do estabelecimento do SR{0} como origem e fixo, os demais SR são móveis e foram obtidos conforme descrito:

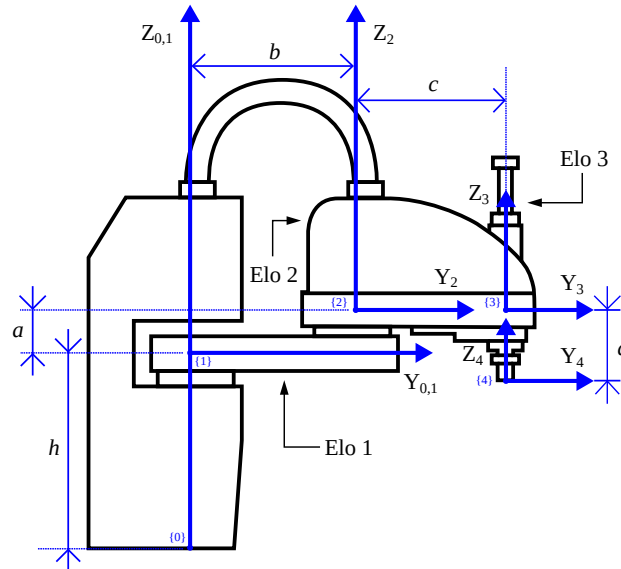
$${}^0P_1 = [0 \quad 0 \quad h]^T \quad (1)$$

$${}^1P_2 = [0 \quad b \quad a]^T \quad (2)$$

Figura 1. Robô Epson modelo T3 401SS, Seiko Epson Corporation [17].



Figura 2. Modelo mecânico 2D.



$${}^2P_3 = [0 \quad c \quad 0]^T \quad (3)$$

$${}^3P_4 = [0 \quad 0 \quad -d]^T \quad (4)$$

sendo d o movimento prismático do SR {3}.

Orientação do SR{i}

Para descrição completa de um SR, além da posição há necessidade da orientação do mecanismo. Assim, realizaram-se as projeções dos SR{i} em relação ao SR{i - 1}, com $i = 1, 2, 3, 4$, expresso como:

$${}^{i-1}_iR = \begin{bmatrix} X_i X_{i-1} & Y_i X_{i-1} & Z_i X_{i-1} \\ X_i Y_{i-1} & Y_i Y_{i-1} & Z_i Y_{i-1} \\ X_i Z_{i-1} & Y_i Z_{i-1} & Z_i Z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A projeção do SR{1} em relação ao SR{0} em torno do eixo Z, expressada por:

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

sendo $\cos(\theta_1) = c_1$ e $\sin(\theta_1) = s_1$.

Analogamente para o SR{2} em relação ao SR{1} em torno do eixo Z, obtida por:

$${}^1_2R = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

sendo $\cos(\theta_2) = c_2$ e $\sin(\theta_2) = s_2$.

No SR{3} em relação ao SR{2} ocorre o movimento prismático ao longo do eixo Z, portanto a matriz rotacional é igual a identidade de ordem 3, dada por:

$${}^2_3R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Por fim, o SR {4} em relação ao SR {3} em torno do eixo Z, a matriz rotacional e obtida como:

$${}^3_4R = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

sendo $\cos(\theta_4) = c_4$ e $\sin(\theta_4) = s_4$.

Para descrição completa da Cinemática Direta do robô, o vetor de posição, Eqs. (1)-(4), e a matriz rotacional, Eqs. (6)-(9), dos respectivos SR devem ser concatenados numa estrutura única, denominada de Equação Transformação (ET). A forma geral da ET é dada por:

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} {}^{i-1}_iR & {}^{i-1}_iP_i \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

A seguir são listadas as ETs para cada elo, Eq. (10), com $i = 1,2,3,4$, da forma:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

CINEMÁTICA

Cinemática é a área do conhecimento que trata do assunto sem considerar as forças que o causam, essa trata apenas da posição, velocidade, aceleração ao longo do tempo e demais derivadas, a partir da geometria. Nesta etapa serão consideradas as posições e orientações dos SR do robô em uma configuração estática, afim de determinar a posição dos elos em relação ao SR {0}.

A. CINEMÁTICA DIRETA

A Cinemática Direta (CD), corresponde a descrição matemática estática do robô, essa descrição possui como variáveis independentes e como variáveis dependentes a posição cartesiana do SR .

Afim de localizar o efetuador final, SR{4}, em relação a base fixa do robô, SR{0}, realizou-se a multiplicação das ETs, Eqs. (11)-(14), da forma:

$${}^0_4T = {}^0_1T({}^1_2T({}^2_3T({}^3_4T))) \quad (15)$$

A ET, mostrada na Eq. (15), possui estrutura da forma:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} {}^0_4R & {}^0P_4 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

sendo, por inspeção, possível identificar a matriz rotacional equivalente, , assim como a localização do efetuador do robô, 0P_4 .

DESCRIÇÃO DA TRAJETÓRIA

Nesta seção, descreveu-se a trajetória do referido robô, a partir do uso da Eq. (16).

A trajetória do robô deve possuir movimento suave, isso é necessário para que o manipulador não tenha movimentos bruscos, os quais podem acarretar em vibrações ou danos no sistema. Para tender a restrição de movimento suave, usou-se o polinômio do terceiro grau, da forma:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (17)$$

sendo $\theta(t)$ o valor do ângulo da junta em função do tempo t , a_i , com $i = 0,1,2,3$, são os parâmetros do polinômio para que o movimento seja suave.

A primeira deriva da Eq. (17), a qual corresponde a equação de velocidade do mecanismo, obtida por:

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (18)$$

A derivada da Eq. (18), sendo essa a equação de aceleração, expressada por:

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t \quad (19)$$

Estabelecidas das Eqs. (17)-(19), em seguida foram impostas as restrições de posição e velocidade, como:

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (20)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \quad (21)$$

$$\dot{\theta}(0) = 0 \quad (22)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (23)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (23)$$

sendo t_f tempo final do movimento, θ_0 ângulo inicial e θ_f ângulo final, além das velocidades inicial e final nulas.

Para determinar os parâmetros a_i , com $i = 0,1,2,3$, foram substituídas as condições Eqs. (20)-(23), nas Eqs. (17)-(19), ao manipular obteve-se:

$$\alpha_0 = \theta_0 \quad (24)$$

$$\alpha_1 = 0 \quad (25)$$

$$\alpha_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \quad (26)$$

$$\alpha_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \quad (27)$$

A partir dos parâmetros determinados, Eqs. (24)-(27), tornase possível realizar o planejamento de trajetória do efetuador do robô, conforme será ilustrado na Seção de Resultados.

DINÂMICA

A dinâmica é a área do conhecimento que considera as forças necessárias para causar o movimento. Neste contexto existem dois problemas relacionados a dinâmica do robô, a saber: (i) a partir de um ponto de trajetória encontrar o vetor τ necessário para os torques das juntas; e (ii) com o vetor de torque τ encontrar a trajetória do robô.

A. DISTRIBUIÇÃO DE MASSA

Para iniciar o estudo do movimento, torna-se necessário analisar a distribuição de massas dos elos e consequentemente os tensores de inercia, que podem ser definidos em relação a qualquer $SR\{i\}$, com $i = 0, \dots, 4$. No caso do robô SCARA, adotou-se o SR de cada elo localizado no Centro de Massa (CM) do corpo, além de considerar cada corpo análogo a um paralelepípedo, maciço e rígido. O CM pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k \\ l \\ q \end{bmatrix} \quad (28)$$

sendo k o comprimento ao longo do eixo X_i , l é a largura ao longo do eixo Y_i e q é a altura do paralelepípedo ao longo do eixo Z_i .

O tensor de inércia para cada corpo rígido, $i = 1, 2, 3$, pode ser obtido por:

$${}^c I_i = \begin{bmatrix} \frac{m_i}{12}(q_i^2 + l_i^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_i}{12}(k_i^2 + q_i^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_i}{12}(l_i^2 + k_i^2) \end{bmatrix} \quad (29)$$

sendo m a massa do elo.

B. ALGORITMO DINÂMICO ITERATIVO DE NEWTON-EULER

Para obtenção das equações dinâmicas do robô, aplicou-se o algoritmo iterativo de Newton-Euler. Assim, determinaram-se as equações de torque τ para cada junta do robô do elo $i = 0 \rightarrow n - 1$.

A equação de velocidade angular:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (30)$$

sendo ${}^{i+1}\omega_{i+1}$ a velocidade angular do elo $\{i + 1\}$ em relação ao SR $\{i + 1\}$ e ${}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$ eixo de rotação do elo $\{i + 1\}$, nesse caso.

A equação de aceleração angular:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (31)$$

sendo ${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1}$ a aceleração angular do elo $\{i + 1\}$ em relação ao SR $\{i + 1\}$.

A equação de aceleração linear:

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R^i (\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + \omega_i \times (\omega_i \times {}^iP_{i+1})) + \dot{v}_i \quad (32)$$

sendo ${}^{i+1}\dot{v}_{i+1}$ a aceleração linear do elo $\{i + 1\}$ em relação ao SR $\{i + 1\}$.

A equação da aceleração linear do CM:

$${}^{i+1}\dot{v}_{ci+1} = {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{ci+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times (\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{ci+1}) + \dot{v}_{ci+1} \quad (33)$$

sendo ${}^{i+1}\dot{v}_{ci+1}$ a aceleração linear do elo $\{i + 1\}$ em relação ao seu CM e ${}^{i+1}P_{ci+1}$ o vetor posição do CM do elo $\{i + 1\}$. A equação da força:

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{ci+1} \quad (34)$$

sendo ${}^{i+1}F_{i+1}$ a equação de força em relação ao SR $\{i + 1\}$.

A equação do torque:

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (35)$$

sendo ${}^{i+1}F_{i+1}$ a equação de torque em relação ao SR $\{i + 1\}$ e ${}^{Ci+1}I_{i+1}$ o tensor de inercia do elo $\{i + 1\}$.

Para juntas prismáticas, deve-se usar as equações correspondentes as eqs. (31) e (32), respectivamente:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i\omega_i \quad (36)$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = & {}^{i+1}_i R \left({}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times \left({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1} \right) + {}^i\dot{v}_i \right) + \dots \\ & \dots 2 {}^{i+1}\omega_{i+1} \times \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (37)$$

Após a realização das iterações descritas pelas Eqs. (31)(35), finalizou-se algoritmo de Newton-Euler com as interações do elo $i = n \rightarrow 1$, assim houve a decomposição dos torques τ_i .

A equação de força:

$${}^if_i = {}^{i+1}_i R {}^{i+1}f_{i+1} + {}^iF_i \quad (38)$$

sendo if_i a força na junta $\{i\}$.

A equação de torque:

$${}^in_i = {}^iN_i + {}^{i+1}_i R {}^{i+1}n_{i+1} + {}^iP_{Ci} \times {}^iF_i + {}^iP_{i+1} \times {}^{i+1}_i R {}^{i+1}f_{i+1} \quad (39)$$

sendo in_i o torque na junta $\{i\}$.

A equação de torque decomposto sobre eixo de rotação ou translação:

$$\tau = {}^in_i^T {}^i\hat{Z}_i \quad (40)$$

sendo τ_i o torque orientado na junta $\{i\}$.

Após realizar as iterações para fora, Eqs. (31)-(35), e para dentro, Eqs. (38)-(40), são apresentados os torques calculados referentes a cada junta, sendo τ_1 e τ_2 os torques realizados nas juntas 1 e 2, respectivamente, e o τ_3 a força aplicada a junta prismático:

$$\begin{aligned} \tau_1 = & (m_1 b_{cm}^2 + {}^e I_{ZZ1}) \ddot{\theta}_1 + (m_2 (b^2 + 2bc_{cm}c^2 + c_{cm}^2) + {}^e I_{zz2}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ & \dots (m_2 (bc_{cm}c^2 + c_{cm}^2) + {}^e I_{zz2}) \ddot{\theta}_2 + (m_3 (b^2 + 2bcc^2 + c^2) + {}^e I_{zz3}) \ddot{\theta}_1 + \dots (41) \\ & \dots (m_3 (bcc_2 + c^2) + {}^e I_{zz3}) \ddot{\theta}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & (m_2 (bc_{cm}c_2 + c_{cm}^2) + {}^e I_{zz2}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ & \dots (m_3 (bcc_2 + c^2) + {}^e I_{zz3}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ & \dots (m_3 c^2 + {}^e I_{zz3}) \ddot{\theta}_2 + (m_2 c_{cm}^2 + {}^e I_{zz2}) \ddot{\theta}_2 + \dots (42) \\ & \dots (m_2 bc_{cm}s_2) \dot{\theta}_1^2 + (m_2 bc_{cm}s_2) + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \dots \\ & \dots (m_3 bcs_2) \dot{\theta}_1^2 + (m_3 bcs_2) + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

$$\tau_3 = m_3 \ddot{d} - m_3 g \quad (43)$$

Podem-se adequar as Eqs. (41)-(43) na forma de equação geral, expressada por:

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (44)$$

sendo τ o vetor de torques ($n \times 1$), $M(\theta)$ a matriz de inércia do manipulador ($n \times n$), $V(\theta, \dot{\theta})$ é o vetor dos termos Centrífgos e de Coriolis ($n \times 1$) e $G(\theta)$ é um vetor dos termos de Gravidade ($n \times 1$). Nota-se que os termos são dependentes de θ (posição), $\dot{\theta}$ (velocidade) e $\ddot{\theta}$ (aceleração).

No caso do robô SCARA modelo T3 401SS, a matriz de inérica, $M(\theta)$, da Eq. (44) se torna:

$$\begin{aligned} A_1 = & {}^e I_{zz1} + {}^e I_{zz2} + {}^e I_{zz3} + b_{cm}^2 m_1 + \dots (45) \\ & \dots m_3 (b^2 + 2bcc_2 + c^2) + m_2 (b^2 + 2bc_{cm}c_2 + c_{cm}^2) \end{aligned}$$

$$B_1 = {}^cI_{zz2} + {}^cI_{zz3} + m_3(c^2 + bcc_2) + m_2(c_{cm}^2 + bc_{cm}c_2) \quad (46)$$

$$C_1 = 0 \quad (47)$$

$$M_1 = [A_1 \quad B_1 \quad C_1] \quad (48)$$

$$A_2 = {}^cI_{zz2} + {}^cI_{zz3} + m_3(c^2 + bcc_2) + m_2(c_{cm}^2 + bc_{cm}c_2) \quad (49)$$

$$B_2 = {}^cI_{zz2} + {}^cI_{zz3} + m_3c^2 + m_2c_{cm}^2 \quad (50)$$

$$C_2 = 0 \quad (51)$$

$$M_2 = [A_2 \quad B_2 \quad C_2] \quad (52)$$

$$A_3 = 0 \quad (53)$$

$$B_3 = 0 \quad (54)$$

$$C_3 = m_3 \quad (55)$$

$$M_3 = [A_3 \quad B_3 \quad C_3] \quad (56)$$

A matriz M será composta pelas Eqs. (48), (52) e (56), expresso por:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (57)$$

Analogamente para o vetor $V(\theta, \dot{\theta})$, Eq. (44), obtém-se:

$$V_1 = 0 \quad (58)$$

$$V_2 = (bcm_3s_2 + bc_{cm}m_2s_2)\dot{\theta}_1^2 + (bcm_3s_2 + bc_{cm}m_2s_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \quad (59)$$

$$V_3 = 0 \quad (60)$$

$$V = [V_1 \quad V_2 \quad V_3] \quad (61)$$

O último vetor, $G(\theta)$, da Eq. (44), obtém-se:

$$G_1 = 0 \quad (62)$$

$$G_2 = 0 \quad (63)$$

$$G_3 = -gm_3 \quad (64)$$

$$G = [G_1 \quad G_2 \quad G_3] \quad (65)$$

Para realizar a simulação, torna-se necessário isolar a variável $\ddot{\theta}$ da Eq. (44), da forma:

$$\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1}(\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)) \quad (66)$$

Para executar a iteração ponto a ponto, discretizou-se o tempo para realizar a integração numérica, a partir da Eq. (66), obtém-se:

$$\dot{\theta} = \dot{\theta} + T_x \ddot{\theta} \quad (67)$$

$$\theta = \theta + T_x \dot{\theta} \quad (68)$$

sendo T_x a taxa de amostragem.

Na próxima seção, será usada a Equação (44) para realização do controle do robô manipulador.

CONTROLE NÃO LINEAR

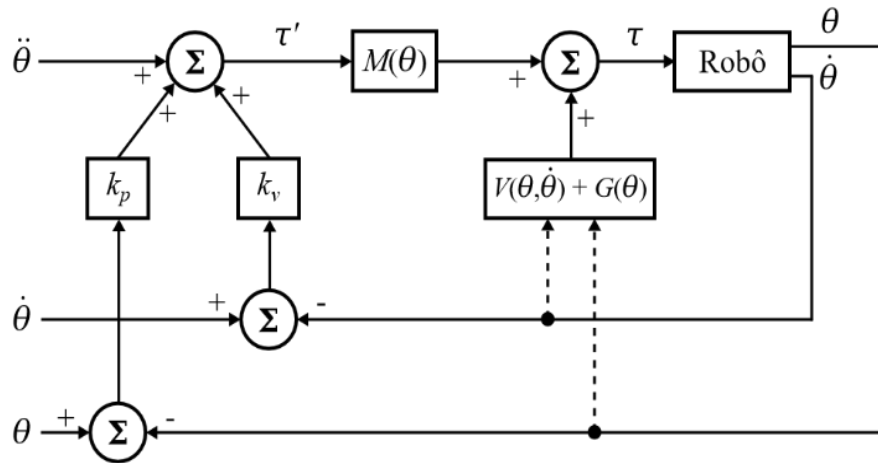
Concluída a modelagem dinâmica, deseja-se que os elos do robô manipulador sigam determinadas trajetórias. Desse modo, realiza-se o controle de torque dos atuadores de forma a alcançar a posição final desejada de maneira suave.

Existem estratégias de controle aplicadas aos manipuladores robóticos, essas podem ser classificadas como lineares ou não lineares. Para o caso de não linearidades tênues, torna-se possível a linearização local, obtém-se modelos lineares que aproximam as equações não lineares na vizinhança do ponto de

operação. Contudo, o problema de controle de um robô manipulador não é adequado para essa abordagem.

Portanto, busca-se uma lei de controle a qual não negligência as não linearidades intrínsecas do robô de modo que o sistema de controle seja criticamente amortecido, sendo descrito pelo sistema em malha aberta na Equação (44).

Figura 3. Diagrama de controle em malha fechada



Fonte: Adaptado de [16]

Na Figura 3, representa-se o diagrama de controle em malha fechada do sistema.

A partição da lei de controle, obtém-se o seguinte modelo:

$$\tau = \alpha \tau' + \beta \quad (69)$$

sendo $\alpha = M(\theta)$, $\beta = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$, e τ' a partição do servo expressa por:

$$\tau' = \ddot{\theta} + k_v \dot{e} + k_p e \quad (70)$$

sendo k_p é o ganho de posição, k_v é o ganho de velocidade, e é o erro de posição e e' é o erro de velocidade, dado por:

$$e = \theta_f - \theta_a \quad (71)$$

O erro de velocidade, e' , expresso por:

$$\dot{e} = \dot{\theta}_f - \dot{\theta}_a \quad (72)$$

sendo θ_f é a posição final desejada, θ_a a posição atual do robô, $\dot{\theta}_f$ a velocidade final desejada e $\dot{\theta}_a$ a velocidade atual do robô. Os parâmetros k_p e k_v , são calculados com base nas especificações de desempenho do projeto.

Quanto a implementação computacional, discretiza-se Eqs. (44), em seguida: (i) determinam-se as variáveis de posição (θ), velocidade ($\dot{\theta}$) e aceleração ($\ddot{\theta}$); (ii) calculam-se os erros de posição (e) e velocidade ($\dot{e}$), descrito na Eq. (71); (iii) calcula-se a partição do servo (τ'), conforme Eq.o (70); e (iv) computa-se a equação de malha aberta, de acordo com a Equação (69).

Afim de implementar a lei de controle, isolou-se $\ddot{\theta}$ na Equação (44), como segue:

$$\ddot{\theta} = \alpha^{-1}(-\beta + \tau) \quad (73)$$

Nesta etapa da iteração, realizou-se a integração numérica e obtém-se $\dot{\theta}$ e θ , como expresso nas equações (67) e (68).

Realimenta-se as variáveis de $\dot{\theta}$ e θ e retorna-se o laço iterativo até que a condição de parada seja alcançada.

RESULTADOS

Os resultados foram obtidos a partir do software MATLAB®. Realizaram-se as simulações de trajetória e controle, a partir dos valores de posição, velocidade e aceleração desejadas para cada elo, $i = 1,2,3$, com os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.

Elos	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
m_i (Kg)	1,2	4,0	0,4
$CM_i(m)(10^{-3})$	$b_{cm} = 112,5$	$c_{cm} = 87,5$	170,0
$k_i(m)(10^{-3})$	90	129	8,57
$l_i(m)(10^{-3})$	$b = 225$	$c = 175$	8,57
$q_i(m)(10^{-3})$	35	176	340,7
$c_{lxxi} (10^{-6})$	10400	38100	3900
$c_{lyyi} (10^{-6})$	900	16000	3900
$c_{lzzi} (10^{-6})$	11000	33300	4,8963
θ_i Inicial (rad)	0	0	0
$\dot{\theta}_i$ Inicial (rad/s)	0	0	0
θ_i Final (rad)	π	$-\pi$	0,15
$\dot{\theta}_i$ Final (rad/s)	0	0	0
$\ddot{\theta}_i$ Final (rad/s ²)	0	0	0
g (m/s ²)	9,8	9,8	9,8
kp_i	1	0,25	4
kvi	2	1	4
T_{xi} (s)	0,001	0,001	0,001

A. GERAÇÃO DA TRAJETÓRIA

Gerou-se o gráfico da trajetória, com as condições apresentadas nas Eqs. (17)-(19), para determinar os coeficientes descritos nas Eqs. (24)-(27). Nas Figuras 4-6, ilustram-se os comportamentos temporais dos elos $i = 1, 2, 3$.

Figura 4. Trajetória Elo 1.

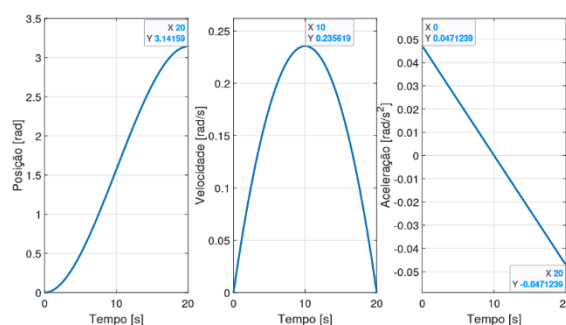


Figura 5. Trajetória Elo 2.

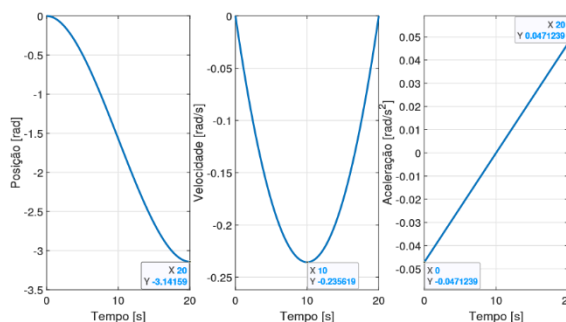
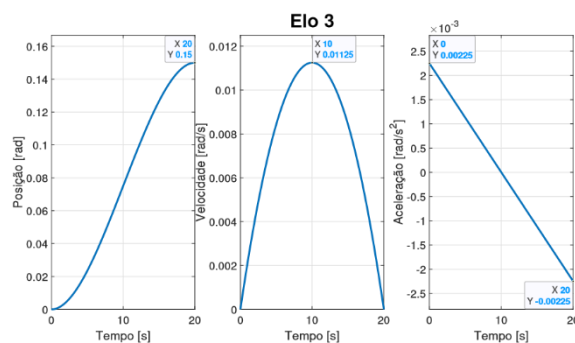


Figura 6. Trajetória Elo 3.



B. CONTROLE

Na etapa de controle, calcularam-se as Eqs. (57), (61) e (65), as quais compõem a dinâmica do robô e computouse o sistema de controle em malha fechada. Para simulação, foram usados os parâmetros apresentados na Tabela I e tempo de amostragem de 0,001s. Nas Figuras 7-9, ilustram-se os resultados numéricos quanto ao comportamento temporal dos elos do robô RRP.

Figura 7. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 1.

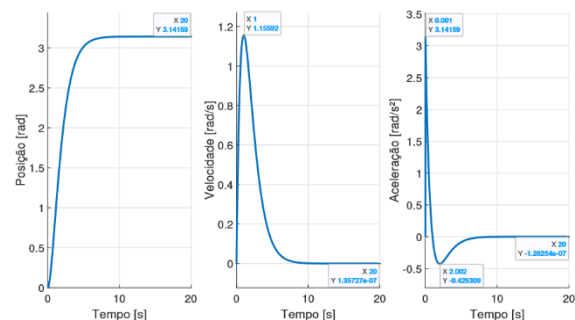


Figura 8. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 2.

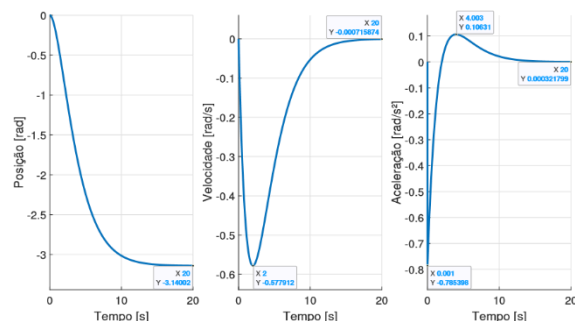
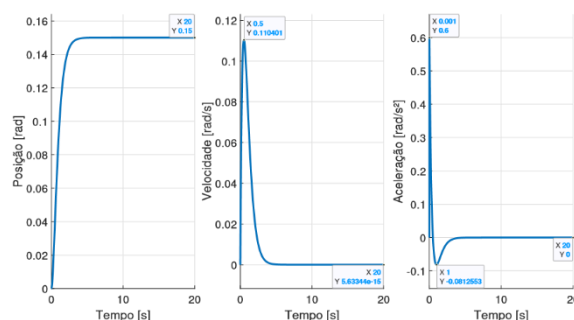


Figura 9. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 3.



CONCLUSÃO

O presente artigo, desenvolveu-se a modelagem matemática da cinemática e da dinâmica do robô SCARA T3 401SS da empresa EPSON, assim como avaliou-se a trajetória e sistema de controle não linear. A dinâmica foi realizada a partir do método iterativo de Newton-Euler, o qual forneceu o conjunto de equações de torque, o qual posteriormente foi usado para controle dos atuadores.

Realizou-se a simulação e análise dos gráficos de posição, velocidade e aceleração das juntas, afim de verificar a coerência dos resultados obtidos, sendo esses checados para o referido robô manipulador.

Validou-se a modelagem por meio dos resultados, dessa forma se evidenciou a possível utilização desse modelo para simulação e projeto de robôs com juntas rotativas e prismática, uma vez que o modelo matemático é genérico. Dessa forma possibilita a adequação dos parâmetros de outros robôs com estrutura análoga, isso auxilia profissionais da área a verificação teórica dos resultados, antes da aplicação ou mesmo construção física do mecanismo.

Logo, notou-se a distinção entre os resultados simulados e apresentados nas Figuras 4-6, quanto comparados aos resultados ilustrados nas Figuras 7-9, uma vez que são usados os modelos estático e dinâmico, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] IFR (1993-2021). World Robotics: Industrial Robots. Frankfurt am Main: VDMA Services GmbH, p. 1214. Disponível em: <https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf> Acessado em 06 de julho de 2022
- [2] CNI – Confederação Nacional da Indústria. Investimentos em indústria 4.0 / Confederação Nacional da Indústria. Brasília, 2018. Disponível em: <https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/8b/0f/8b0f5599-9794-4b66-ac83-e84a4d118af9/investimentos_em_industria_40_junho2018.pdf>. Acessado em 06 de julho de 2022
- [3] CHAGAS, Fábio Suim. Manipulador Bilateral com Realização Háptica. 2005. Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia. Disponível em: <<http://www.comp.ime.br/pos/modules/files/dissertacoes/2005/2005FabioChagas.pdf>> Acessado em 07 de julho de 2022.
- [4] SOUZA, Eber Delgado de; ROSSINI, Flávio Luiz; OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de. Desenvolvimento De Um Aplicativo No Ambiente App Designer Do Software Matlab® Para Planejamento De Trajetória Do Robô PUMA 560. Engenharia Elétrica e De Computação: Docência, Pesquisa e Inovação Tecnológica 1, no. 1 (2023): 87–109. doi:10.22533/at.ed.4652316018.
- [5] ROSSINI, Flávio Luiz; LOPES, João Marcos Pericharo; ABREU, Leonardo de Melo; BARBOSA, Reginaldo Ferreira de Sousa; OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de. Modelagem, Simulação e Controle De Trajetória Do Robô Manipulador SCARA SR-6 IA Através De Um Aplicativo MATLAB®. Ciências Exatas Estudos e Desafios (V.1) 1 (2022): 30. doi:10.35587/brj.ed.0001995.
- [6] ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Matemática da Dinâmica do Robô Manipulador RC 180, Empresa EPSON, via Formulação Lagrangiana. II Simpósio De Tecnologia e Engenharia Eletrônica - II SIMTEEL, 2014.
- [7] MARTINES, Francine; MELO, Larissa; CHICHANOSKI, Gustavo; MUNARINI, Bruno; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Matemática da Cinemática Direta do Robô Manipulador SCARA Modelo G-10/G-20. V Ciclo De Palestras: Perspectivas Matemáticas - V CIPEM, 2015.
- [8] PENHA, Bruno Schuavab; QUEIROZ, Mariana Emer; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem e Análise da Cinemática Direta e Inversa de Manipulador Robótico com Cinco Juntas Rotativas. III Simpósio De Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL, 2016.
- [9] FUDOLI, Fábio; BLESSA, Lucas; SOUZA, Júlio; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Da Cinemática Direta e Inversa Do Robô SCARA EPSON G10-851S. III Simpósio De Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL, 2016.
- [10] SANTOS, Matheus Araújo dos; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Matemática e Simulação Da Cinemática Direta Do Robô Manipulador Com Seis Juntas Rotativas - 6 GL. III Simpósio De Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL, 2016.
- [11] ABREU, Leonardo De Melo; ROSSINI, Flávio Luiz; OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de. Modelagem Cinemática de um Robô Modelo SCARA e Desenvolvimento de Aplicativo para Análise Gráfica. Anais Do(a) Anais Do XII Seminário De Extensão e Inovação XXVII Seminário De Iniciação Científica e Tecnológica Da UTFPR, n.d. doi:10.29327/1152426.1-2.

- [12] OLIVEIRA, L. F. P.; ROSSINI, F. L.; SILVA, M. F.; MOREIRA, A. P. Modeling, Simulation and Implementation of Locomotion Patterns for Hexapod Robots, 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), Resistencia, Argentina, 2020, pp. 1-1, doi: 10.1109/ARGENCON49523.2020.9505570.
- [13] OLIVEIRA, L. F. P.; ROSSINI, F. L. Modeling, Simulation and Analysis of Locomotion Patterns for Hexapod Robots, in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 2, pp. 375-383, Feb. 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8327389.
- [14] SEIKO EPSON CORPORATION. Epson T-Series Robot Manual. Rev. 12, 2020. Disponível em: <[https://files.support.epson.com/far/docs/epson_t-series_robot_manual_\(r12\).pdf](https://files.support.epson.com/far/docs/epson_t-series_robot_manual_(r12).pdf)> Acessado em 06 de julho de 2022.
- [15] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Coordenação do curso de Engenharia Eletrônica. Disponível em: <https://portal.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/graduacao/campo-mourao/cm-engenharia-eletronica> Acessado em 06 de julho de 2022.
- [16] CRAIG, J. J.. Robótica. 3ª edição, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2012.
- [17] SEIKO EPSON CORPORATION. Robôs SCARA All in One Epson Synthis T3. Disponível em <<https://epson.com.br/Paraempresas/Rob%C3%B3tica/Rob%C3%B4s-SCARA/Rob%C3%B4s-SCARA-All-In-One-Epson-Synthis-T3/p/RT3-401SS>> Acessado em 2 de julho de 2022

Capítulo 4



10.37423/230407620

ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO EM COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND: OPORTUNIDADES DE PESQUISA

Ricardo Augusto dos Santos Horta

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Júnia Nunes de Paula

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Rogério Cabral de Azevedo

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*



Resumo: Nos últimos anos tem crescido o interesse da indústria da construção e de órgãos do governo ligados à infraestrutura no desenvolvimento de materiais mais duráveis e de maior desempenho mecânico. Dentre estes materiais, destacam-se os compósitos de cimento reforçados com óxido de grafeno (GO). Como uma nova classe de nanomaterial em escala bidimensional, o GO tem recebido destaque em vários campos de aplicação na área de engenharia civil, devido à sua elevada superfície específica, boa dispersão em água, elevada condutividade térmica e elétrica, elevado módulo de elasticidade, além de excelente resistência à tração e flexão. A adição de GO permite a substituição parcial do cimento em matrizes cimentícias, visando tornar o concreto um material com menor carga de poluentes associada à sua produção. Com o objetivo de investigar as alterações nas propriedades mecânicas e reológicas de materiais cimentícios com adição de GO, realizou-se, neste trabalho, uma revisão sistêmica de literatura com base na metodologia ProKnow-C, (*Knowledge Development Process – Constructivist*). Por meio desta metodologia, foram selecionados 13 artigos de relevância e reconhecimento científico a partir de uma amostra bruta de 954 artigos. O portfólio bibliográfico obtido foi analisado sob a ótica de sete lentes de pesquisa: técnicas de dispersão, meio de dispersão, testes de caracterização, teor ótimo de adição, relação água-cimento, comportamento reológico e propriedades mecânicas. A combinação de variáveis que conduziu aos melhores resultados de resistência mecânica foi: uso de pasta de cimento, uso de ultrassom e aditivo plastificante para a dispersão do GO e relação água/cimento próxima a 0,4. Os teores de GO que conduziram aos melhores resultados de resistência à compressão e tração foram de 0,03% e 0,05%, respectivamente. Com este trabalho, busca-se incentivar o uso dos processos estruturados para a seleção e evidênciação de artigos, criando referenciais teóricos consistentes para o suporte de pesquisas futuras.

Palavras-chave: Nanomateriais. Compósitos de cimento. Óxido de grafeno. Comportamento reológico. Propriedades mecânicas.

1.INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem havido um interesse crescente da indústria da construção e de órgãos do governo ligados à infraestrutura no desenvolvimento de materiais mais resistentes e de maior durabilidade, capazes de reduzir o impacto ambiental das edificações.

Estima-se que a construção civil seja responsável pelo consumo de 40% de todas as matérias primas do mundo, além de contribuir com 40-50% de todas as emissões globais de gases de efeito estufa e chuva ácida na atmosfera. Ao longo dos anos, estas emissões resultaram em alterações no meio ambiente e no clima, a ponto de a qualidade de vida no planeta estar ameaçada. Eventos climáticos extremos como ondas de calor, tempestades e inundações têm aumentado de intensidade e atingido os grandes centros urbanos com bastante frequência. Frente à emergência da crise ambiental, o setor da construção civil é convocado a adequar seus processos produtivos a este novo paradigma [1].

Os materiais compósitos de base cimentícia, incluindo pasta de cimento, argamassa e concreto, são os materiais mais comumente utilizados na construção civil. No entanto, a sua natureza frágil, elevada dureza, baixa resistência à tração e a propensão às fissuras são fatores-chave que comprometem a durabilidade e resultam em altos custos de manutenção das estruturas. Neste sentido, diversos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos, com o objetivo de encontrar materiais que possam controlar o desenvolvimento de fissuras nos compósitos cimentícios, e, dessa forma, possibilitar o aumento do tempo de vida útil das edificações e reduzir a frequência dos ciclos construtivos, o que, por si só, já representa um grande avanço do ponto de vista ambiental [2]

Materiais de reforço como barras de aço, fibras de aço, carbono, vidro e polímeros foram extensivamente aplicados em concretos. Embora estes materiais possam melhorar bastante a resistência do concreto como um todo, a alta fragilidade e fraturas associadas a esta propriedade ainda ocorrem, resultando na baixa durabilidade das estruturas [3]. Os nanomateriais (nano sílicas, nanotubos de carbono e derivados do grafeno) podem fornecer uma solução melhor do que as fibras tradicionais por meio do reforço na nanoescala e alocação de uma área de superfície específica muito maior para interação na matriz de cimento [4].

Dentre os nanomateriais, o óxido de grafeno (GO) apresenta um enorme potencial para aplicação nos compósitos de cimento. O GO consiste em uma estrutura plana de átomos de carbono interligados em formato hexagonal, com orbitais hibridizados sp^2 e sp^3 [5]. Segundo LU et al. [6], o GO é um material

hidrofílico devido à presença de grupos funcionais de oxigênio (epoxílico, hidroxílico e carboxílico) no plano basal e bordas de sua estrutura molecular, como pode ser visto na Figura 1:

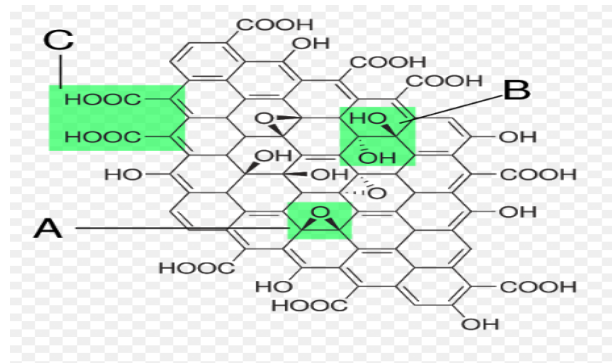


Figura 1: Representação da estrutura molecular do óxido de grafeno, com grupos funcionais de oxigênio (A - epoxílico, B - hidroxílico e C - carboxílico).

O óxido de grafeno é sintetizado a partir do grafite, sendo que o processo de produção mais comum é denominado Método de Hummers. Este método envolve três etapas: oxidação, purificação e dispersão ultrassônica [7]. As transformações que ocorrem durante a conversão do grafite em óxido de grafeno, no nível molecular, podem ser melhor visualizadas na Figura 2:

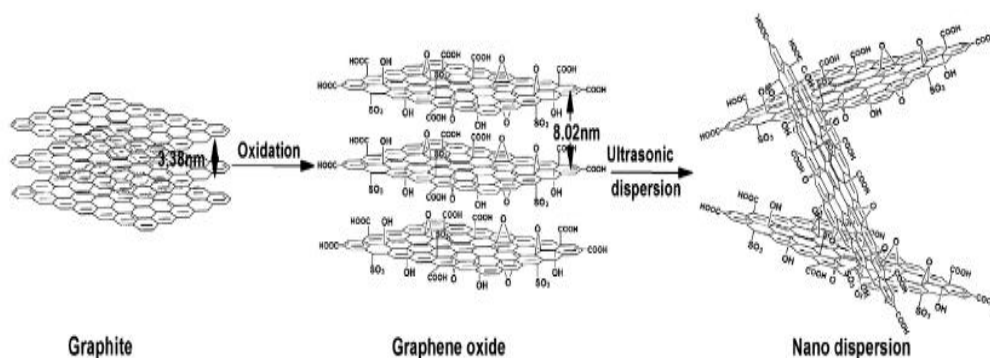


Figura 2: Método de Hummers para a obtenção do GO.

Como uma nova classe de nanomaterial em escala bidimensional, o GO tem recebido grande atenção em vários campos de aplicação na área de engenharia civil, devido à sua elevada superfície específica, boa dispersão em água, elevada condutividade térmica e elétrica, elevado módulo de elasticidade, além de excelente resistência à tração e flexão [2] [8] [9] [10].

Segundo YANG et al. [2], a incorporação do óxido de grafeno aos materiais cimentícios ajuda a promover a sustentabilidade na construção civil com o seguinte potencial de contribuições:

- Menor consumo de cimento (a adição do GO permite a substituição parcial do cimento em matrizes cimentícias, tornando o concreto um material com menor carga de poluentes associada à sua produção);
- Promoção de arquiteturas com design inovador, a partir da elaboração de estruturas com menor peso próprio;
- Aumento da capacidade de carga das estruturas em concreto (principalmente a resistência à tração, combatendo diretamente a fragilidade destes materiais);
- Aumento da durabilidade das estruturas em concreto, por meio da redução da porosidade e da permeabilidade da matriz cimentícia;
- Elevação da capacidade de resistência ao fogo das estruturas devido à alta condutividade térmica.

Contudo, tem-se conhecimento de que a adição de nanomateriais em compósitos de cimento pode provocar a redução de parâmetros reológicos destes materiais, tais como fluidez e trabalhabilidade, devendo ser realizada em quantidades limitadas. Isso ocorre devido à grande área de superfície específica dos nanomateriais, que exige mais água para molhar sua superfície reduzindo assim o conteúdo de água livre necessário para a lubrificação. Além disso, os nanomateriais possuem a tendência de reaglomeração, o que, quando ocorre em larga escala, resulta na menor fluidez dos materiais cimentícios [7] [11] [12].

Com base nisto, buscou-se, neste trabalho, a identificação das melhores práticas adotadas na literatura bem como oportunidades de pesquisa relacionadas à obtenção de compósitos de cimento com adição de GO. Para isso, analisou-se um portfólio bibliográfico relevante e de prestígio científico sob a ótica de 7 lentes de pesquisa: técnicas de dispersão, meio de dispersão, testes de caracterização, teor ótimo de adição, relação água/cimento, comportamento reológico e propriedades mecânicas.

2.REFERENCIAL TEÓRICO

O método de revisão bibliográfica realizado neste trabalho foi o ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist), desenvolvido pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão da Universidade Federal de Santa Catarina (LabMCDA/UFSC) [13].

A aplicação deste método tem o objetivo de selecionar e analisar quantitativamente artigos de prestígio científico e relevantes sobre o tema: adição de óxido de grafeno em compósitos de cimento.

As justificativas para a escolha desse método são a necessidade de se fazer uma seleção de artigos de maneira sistemática, eficiente e imparcial, bem como o amplo reconhecimento deste método pela literatura [14] [15] [16] [17].

A Tabela 1 tem o objetivo de explicitar o enquadramento metodológico utilizado nesta pesquisa, segundo os aspectos nele descritos.

Tabela 1: Resumo do enquadramento metodológico.

Visão do conhecimento	Construtivista
Natureza da pesquisa	Pesquisa descritiva
Natureza dos artigos	Estudo de caso e experimental
Lógica da pesquisa	Dedutiva
Processo de pesquisa	Coleta de dados em fontes secundárias
Abordagem	Qualitativa e quantitativa
Resultado da pesquisa	Pesquisa aplicada
Procedimentos técnicos	Pesquisa Bibliográfica
Instrumento de intervenção	ProKnow-C

Considerando as principais informações que se julgou importantes para o tema de pesquisa, a aplicação do método permitiu a obtenção de um portfólio bibliográfico relevante e de prestígio científico. Detalhes sobre as etapas de execução do método de revisão sistemática da literatura são descritos na Tabela 2:

Tabela 2: Etapas do processo de revisão literária Proknow-C.

ETAPAS	CARACTERÍSTICAS DAS ETAPAS
Primeira etapa: Identificação do tema/problema de pesquisa	- Definição, de maneira clara e restrita, o tema/problema de pesquisa. - Definição das palavras-chave relacionadas ao tema de pesquisa (as palavras-chave devem delimitar o tema de pesquisa e conduzir a uma busca objetiva por soluções para aquilo que se deseja compreender).
Segunda etapa: Seleção das bases de dados	- Combinação das palavras-chave e pesquisa nas bases de dados relacionadas à Engenharia Civil. - Filtragem nos bancos de dados. Filtros utilizados: tipo do documento: artigo; período: publicações dos últimos 10 anos (2009-2019); área do conhecimento: engenharia. - Ordenação das bases de dados de acordo com a quantidade de artigos encontrados (do maior para o menor) e seleção das bases de dados mais relevantes.
Terceira etapa: Filtragem do banco de artigos bruto	- Filtragem pelo <i>software</i> Mendeley (exclusão de títulos repetidos). - Leitura criteriosa dos títulos encontrados e exclusão dos títulos que não são alinhados com o tema de pesquisa. - Busca da quantidade de citações (<i>Google Scholar</i>) dos artigos, ordenando-os de maneira decrescente. Seleção dos artigos que representam o acumulado de até 85% do total de citações. - Avaliação do resumo dos artigos selecionados, exclusão dos artigos cujos resumos não estão alinhados com o tema de pesquisa.
Quarta etapa: Re-análise e validação final	- Identificação dos artigos recentes (não selecionados no item 8, com título alinhado com o tema de pesquisa – item 7) escritos por autores dos artigos já selecionados, publicados nos últimos dois anos, e avaliação de seus resumos, excluindo os que não estiverem alinhados com o tema de pesquisa. - Leitura na íntegra dos artigos pré-selecionados, seleção daqueles que são alinhados com o tema de pesquisa e definição do portfólio bibliográfico.
Quinta etapa: Extração dos dados	- Definição das lentes de pesquisa, que irão orientar a busca pelo conhecimento, bem como auxiliar na solução do problema de pesquisa e na identificação dos pontos fortes e oportunidades (lacunas) dos artigos do portfólio. - Ordenação, categorização e resumo dos dados obtidos para cada lente.
Sexta etapa: Interpretação dos resultados	- Análise das informações obtidas. - Discussão dos resultados encontrados. - Levantamento dos pontos fortes dos artigos analisados e lacunas de pesquisa existentes. - Apresentação de sugestões para pesquisas futuras.
Sétima etapa: Apresentação da revisão/Documentação	Apresentação das etapas percorridas e principais resultados evidenciados pelo método.

Neste trabalho foram definidas 7 lentes de pesquisa, as quais são identificadas no Tabela 3.

Tabela 3: Lentes de pesquisa utilizadas na análise sistêmica do portfólio bibliográfico.

ID	Lentes	O que procurar
11	Técnicas de dispersão	Quais técnicas foram empregadas para a dispersão do GO?
22	Meio de dispersão	Qual a matriz de cimento (pasta, argamassa ou concreto) utilizada no experimento?
3	Testes de caracterização	Quais testes físicos e químicos foram aplicados para a caracterização dos compósitos cimentícios com adição de GO?
44	Teor ótimo de adição	Qual o teor ótimo de adição do GO para a maximização das propriedades mecânicas do compósito cimentício?
55	Relação água/cimento	Qual a relação água/cimento utilizada no preparo dos corpos de prova?
6	Comportamento reológico	Quais os parâmetros reológicos analisados? Quais as técnicas empregadas?
77	Propriedades mecânicas	Quais os ensaios de resistência mecânica realizados? Quais os ganhos de resistência obtidos?

Cada uma destas lentes retrata uma perspectiva diferente de estudo e juntas elas fornecem o estado atual do conhecimento sobre a adição do óxido de grafeno em compósitos de cimento. Por meio destas lentes foram selecionadas e extraídas as informações de interesse dos artigos do portfólio.

3. DESENVOLVIMENTO

As palavras-chave utilizadas para a busca dos artigos foram divididas em três eixos principais: material estudado, matriz cimentícia e propriedades analisadas. Esta divisão pode ser vista no Tabela 4:

Tabela 4: Palavras-chave utilizadas.

Material estudado	Matriz cimentícia	Propriedades analisadas
<i>Graphene oxide</i>	<i>Cement paste</i> <i>Mortar</i> <i>Concrete</i>	<i>Rheological propertires</i> <i>Mechanical properties</i>

A busca dos artigos nas bases de dados relacionadas à área de engenharia civil, por meio das combinações de palavras-chave (6 combinações) evidenciou as bases com maior relevância para o tema, com base na quantidade de artigos retornados. Dos 954 artigos retornados, 859 (cerca de 90% do total) pertenciam a 4 bases de dados (listadas na Tabela 5).

Tabela 5: Resultado da etapa de seleção das bases de dados.

BASES DE DADOS	Nº DE ARTIGOS	Nº DE ARTIGOS ACUMULADO
<i>Science Direct</i>	674	674
<i>Compendex</i>	84	758
<i>Scopus</i>	51	809
<i>Web of Science</i>	50	859
TOTAL =		859

Uma vez selecionadas as bases de dados mais relevantes, realizou-se o processo de busca de artigos nestas bases, filtragem e delimitação do portfólio bibliográfico, seguindo o procedimento técnico descrito anteriormente na Tabela 2. O resultado final deste processo é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Resultado do processo de busca e seleção de artigos nas bases de dados.

Etapas do método Proknow-C	Número de artigos selecionados
Busca de artigos	954
Seleção dos artigos das bases de dados mais relevantes	859
Identificação de títulos alinhados com o tema de pesquisa	160
Banco de artigos após eliminação de repetições	75
Artigos com reconhecimento científico (nº de citações)	22
Artigos com resumo alinhado com o tema de pesquisa	20
Re-análise (inclusão de artigos recentes, de autores relevantes, com título e resumo alinhados)	0
Banco de artigos após leitura completa	13

O portfólio bibliográfico obtido, contendo os 13 artigos selecionados, pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7: Resumo do portfólio bibliográfico obtido.

ID	Título	Autores
11	Effect of graphene oxide nanosheets of microstruture and mechanical properties of cement composites	LV <i>et al.</i> [3]
22	Reinforcing effects of graphene oxide on Portland cement paste	GONG <i>et al.</i> [11]
33	Nanocomposite of cement/graphene oxide - Impact on hydration kinetics	HORSZCZARUK <i>et al.</i> [18]
44	Reactive molecular dynamics and experimental study of graphene-cement composites: Structure, dynamics and reinforcement mechanisms	HOU <i>et al.</i> [8]
55	Effect of graphene oxide on the mechanical behavior of strain hardening cementitious composites	LU <i>et al.</i> [6]
66	Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement	LV <i>et al.</i> [19]
77	Mechanical properties and microstruture of a graphene oxide cement composite	PAN <i>et al.</i> [7]
88	Influence of graphene oxide as dispersed phase in cement mortar matrix in defining the crystal patterns of cement hydrates and its effect on mechanical, microstructural and crystallization properties	SHARMA e KOTHIYAL [20]
99	Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro- and macro-properties of cementitious materials	TONG <i>et al.</i> [21]
110	Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strenght of cement	WANG Q. <i>et al.</i> [22]
111	Study on the three dimensional mechanism of graphene oxide nanosheets modified cement	WANG, M. <i>et al.</i> [23]
112	Investigation of the effectiveness of PC@GO on the reinforcement for cement composites	ZHAO <i>et al.</i> [24]
313	Mechanical behavior and toughening mechanism of polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide reinforced cement composites	ZHAO <i>et al.</i> [10]

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas a análise bibliométrica e a análise sistêmica dos artigos do portfólio bibliográfico.

4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Neste tópico é realizada uma análise bibliométrica dos artigos, buscando-se identificar os autores, periódicos e trabalhos científicos que apresentaram maior relevância para o tema de pesquisa.

4.1.1 AUTORES RELEVANTES

Analizando a Tabela 7, pode-se perceber que os autores Shenghua Lv e Li Zhao são os que mais se destacaram em publicações sobre o tema, sendo os únicos a possuir duas produções científicas dentre os autores dos artigos selecionados.

4.1.2 RELEVÂNCIA DOS PERIÓDICOS

A Tabela 8 apresenta os periódicos nos quais os artigos do portfólio bibliográfico foram publicados, bem como suas respectivas classificações definidas pela CAPES e fatores de impacto JCR.

O JCR (*Journal Citation Reports*) é um índice vinculado à base de dados Web of Science que calcula o impacto dos periódicos de acordo com o número de citações recebidas [25]. Este índice foi utilizado complementarmente à classificação CAPES, pois alguns periódicos não apresentavam classificação, segundo esta instituição, para área de Engenharias I.

Tabela 8: Relevância dos periódicos.

Periódicos	Nº de artigos	Classificação CAPES	Fator de impacto (JCR)
<i>Construction & Building Materials</i>	6	A1	3,485
<i>Cement & Concrete Composites</i>	2	A1	4,660
<i>Carbon</i>	1	ND ¹	7,082
<i>Composites Part B: Engineering</i>	1	A1	4,920
<i>Journal of Materials in Civil Engineering</i>	1	A1	1,763
<i>New Carbon Materials</i>	1	ND	1,171
<i>RSC Advances</i>	1	B1	2,936

Analizando a Tabela 8, pode-se perceber que os periódicos nos quais os artigos foram publicados possuem nível de excelência, já que todos pertencem ao estrato de referência da CAPES, sendo classificados em A1 ou B1 de acordo com o sistema de classificação *qualis*-periódicos [26]. Observa-se também que os periódicos listados possuem fatores de impacto JCR significativos, todos superiores a 1,0 [25].

Destacam-se os periódicos *Construction & Building Materials*, no qual foi encontrado o maior número de artigos do portfólio, bem como o periódico *Carbon*, que apresenta o fator de impacto JCR mais significativo.

4.1.3 RELEVÂNCIA DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO OBTIDO

A aplicação do método Proknow-C permitiu a obtenção de um portfólio bibliográfico relevante e de prestígio científico, fato demonstrado não apenas pela classificação CAPES dos artigos, como também pelo número de citações (segundo o *Google Scholar*) que estes artigos receberam desde a sua publicação, como mostra a Figura 3:

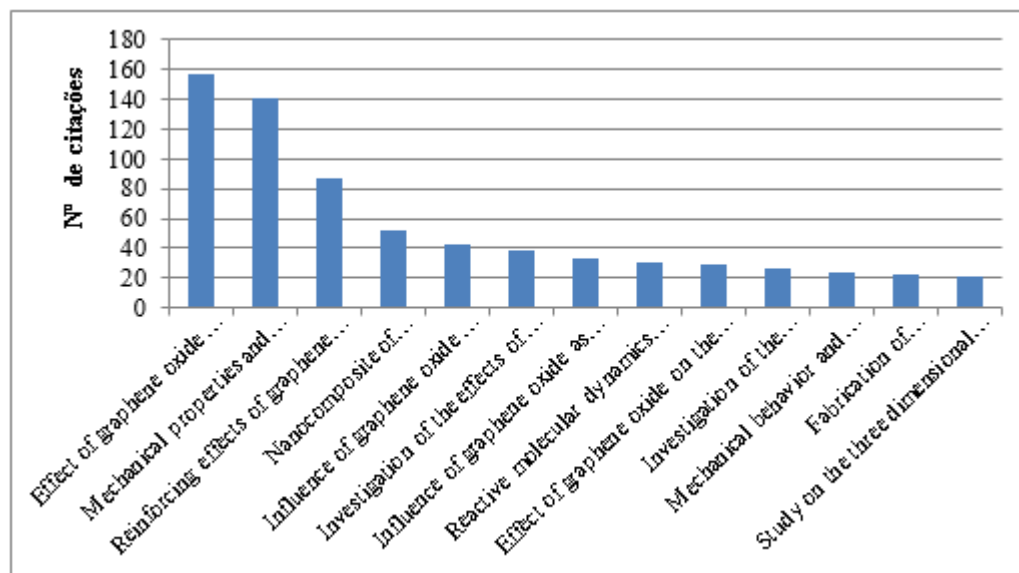


Figura 3: Reconhecimento científico dos artigos.

Analisando a Figura 3 percebe-se que todos os artigos do portfólio apresentam um número satisfatório de citações (igual ou superior a 20). Além disso, 4 dos 13 artigos obtidos apresentam um número elevado de citações (superior a 50).

O artigo *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites* se destaca pelo maior número de citações dentre os artigos selecionados (total de 157), o que pode ser justificado pelo seu conteúdo técnico e científico de alto impacto e também pelo fato deste artigo ser o mais antigo do portfólio (publicado em 2013), sendo considerado um artigo de referência na área.

Os artigos *Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite*, *Reinforcing effects of graphene oxide on Portland cement paste* e *Nanocomposite of cement-graphene oxide-Impact on hydration kinetics* também apresentaram números de citações significativos, iguais a 141, 87 e 52, respectivamente.

As análises da Tabela 8 e da Figura 3 demonstram a qualidade dos artigos selecionados como portfólio bibliográfico e colocam em destaque a eficiência do método de revisão bibliográfica utilizado neste

trabalho. O Proknow-C mostrou ser uma ferramenta muito útil, capaz de delimitar a pesquisa e, de maneira imparcial, gerar resultados e informações precisas sobre um tema em específico.

4.2. ANÁLISE SISTÊMICA DO PORTFÓLIO SEGUNDO AS LENTES DE PESQUISA

A Tabela 9 a seguir apresenta os principais resultados obtidos na literatura (portfólio bibliográfico):

Tabela 9: Resumo dos principais resultados encontrados na literatura.

ID	Autores (ano)	Meio de dispersão	Técnica de dispersão	Testes de caracterização	Teor ótimo de GO	a/c	Mini-slump (redução percentual no diâmetro de espalhamento em relação à REF.)	Aumento percentual máximo obtido em relação à REF.			
								R compressão	R tração direta	R tração na flexão	Módulo de Young
1	GONG <i>et al.</i> (2015)	Pasta de cimento	Ultrassom e agitador mecânico	MIP, TGA, mini-slump, X-ray fluorescence	0,03%	0,5	34,62%	46%	50%	NA	NA
2	HOU <i>et al.</i> (2017)	Pasta de cimento	Agitador mecânico	Calorimetria, Micro-Raman, SEM, XPS, reactive	0,16%	NA	NA	3,21%	NA	11,62%	NA
3	LV <i>et al.</i> (2016)	Pasta de cimento	Ultrassom e aditivo PC	FTIR, AFM, SEM, XRD	0,03%	0,29	44,12%	56,5%	NA	77,6%	NA
4	PAN <i>et al.</i> (2013)	Pasta de cimento	Ultrassom e agitador mecânico	Mini-slump, TEM, SEM, ultrasonic pulse	0,05%	0,5	41,7%	33%	NA	58%	NA
5	WANG Q. <i>et al.</i> (2015)	Pasta de cimento	Aditivo PC	SEM, nitrogen adsorption, AFM, X-ray fluorescence	0,05%	0,5	NA	40,4%	NA	90,5%	NA
6	WANG M. <i>et al.</i> (2016)	Pasta de cimento	Ultrassom, agitador mecânico e aditivo PC	FTIR, TEM, AFM, SEM, DSC, TGA, XPS	0,03% / 0,04%	0,33	Redução observada quando %GO>0.03%	25,28% (0,04% GO)	NA	56,62% (0,03% GO)	NA
7	HORSZCZA RUK <i>et al.</i> (2015)	Argamassa	Ultrassom	AFM, Raman, XRD, TEM, SEM	NA	0,57	NA	NA	NA	NA	1-10 para 5-20GPa

8	LU <i>et al.</i> (2016)	Argamassa	Centrifugação e aditivo PC	TEM, SEM, Raman, FTIR, XPS	0,08%	0,2	NA	24,8%	37,7%	80,6%	NA
9	LV <i>et al.</i> (2013).	Argamassa	Ultrassom e aditivo PC	SEM, EDS, AFM, FTIR, XRD	0,03%	0,37	NA	38,9%	78,6%	60,7%	NA
10	TONG <i>et al.</i> (2016)	Argamassa	Ultrassom e aditivo superplastificante	SEM, AFM, Raman	0,10%	0,54	NA	13,2%	NA	NA	NA
11	WANG Q. <i>et al.</i> (2015)	Argamassa	Aditivo PC	SEM, nitrogen adsorption, AFM, XPS	0,05%	0,37	NA	24,4%	NA	70,5%	NA
12	ZHAO <i>et al.</i> (2016)	Argamassa	Ultrassom e aditivo PC	XRD, TEM, SEM, TGA, FTIR	0,022%	0,42	18,32%	27,64%	NA	26,74%	NA
13	ZHAO <i>et al.</i> (2017)	Argamassa	Ultrassom e aditivo PC	SEM, TEM, XRD, XPS	0,022%	0,42	13,79%	34,10%	NA	30,37%	32,37%

NA: não se aplica

PC: poli-carboxilato

REF: pasta de cimento de referência

Analisando a Tabela 9, pode-se perceber que os experimentos 1, 3, 5, 8 e 9 foram os que apresentaram os melhores resultados em relação à resistência mecânica.

De maneira geral, a combinação de parâmetros de entrada que conduziu aos melhores resultados de resistência mecânica é: uso de pasta de cimento, uso da técnica de ultrassonificação e aditivo plastificante para a dispersão do GO, bem como relação água cimento próxima a 0,4. O teor de GO que conduziu aos melhores resultados de resistência à compressão foi de 0,03%, enquanto o teor de GO que conduziu aos melhores resultados de resistência à tração foi de 0,05%.

Nos tópicos seguintes é realizada uma análise sistêmica do portfólio bibliográfico obtido, buscando-se identificar os pontos fortes e oportunidades (lacunas) dos artigos, de maneira a auxiliar na condução de pesquisas futuras relacionadas ao tema. A análise sistêmica foi realizada sob a ótica de sete lentes de pesquisa (técnicas de dispersão, meio de dispersão, testes de caracterização, teor ótimo de adição, relação água-cimento, comportamento reológico e propriedades mecânicas). Cada uma dessas lentes foi aplicada sobre a totalidade dos artigos identificados na Tabela 7.

4.2.1 TÉCNICAS DE DISPERSÃO

A Figura 4 apresenta as principais técnicas de dispersão de GO utilizadas nos trabalhos e sua frequência relativa de ocorrência. Vale ressaltar que, em vários experimentos, foram empregadas duas ou mais técnicas de dispersão.

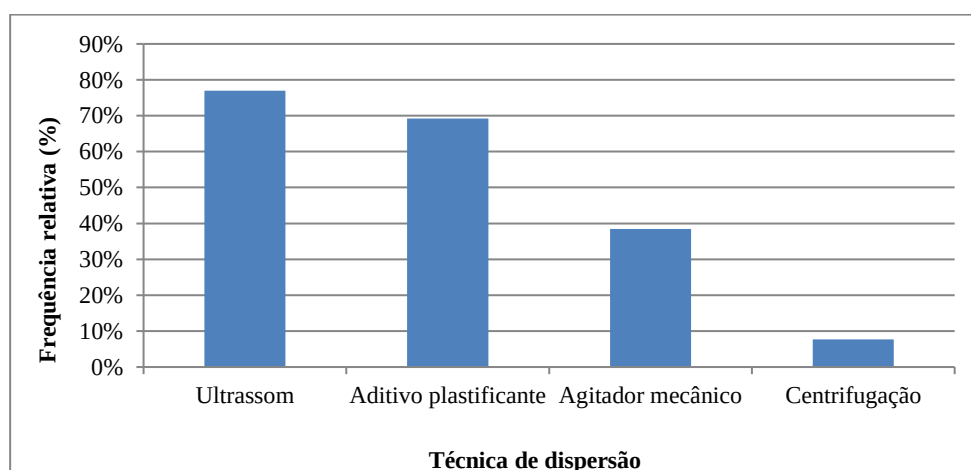


Figura 4: Técnica de dispersão empregada nos experimentos x frequência relativa de ocorrência (%).

Como se pode observar, a técnica de ultrassonificação é a mais frequente utilizada nos trabalhos, e se mostrou a mais eficiente, junto ao aditivo plastificante, na obtenção de GO disperso em matrizes cimentícias.

A técnica de ultrassonificação consiste em submeter uma solução de GO em um aparelho de ultrassom de alta frequência, responsável pelo enfraquecimento e consequente ruptura das ligações intermoleculares, promovendo a dispersão das folhas de GO. É caracterizada por sua elevada eficiência e rapidez (o tempo de ultrassonificação varia de 15 a 40 minutos, a depender da concentração da solução).

Os aditivos plastificantes mais utilizados para a dispersão de GO foram policarboxilatos. Estes aditivos permitem a redução no consumo de água sem causar a redução na fluidez dos compósitos cimentícios, proporcionando microestruturas menos porosas e favorecendo a resistência mecânica.

Como oportunidade futura de pesquisa, propõe-se mesclar diferentes técnicas de dispersão para permitir maiores concentrações de GO, bem como o emprego de outros aditivos químicos, tais como isopropanol, lignosulfonato, polinaftaleno sulfonato, entre outros na dispersão do GO.

4.2.2 MEIO DE DISPERSÃO

A Figura 5 apresenta os meios de dispersão utilizados nos experimentos:

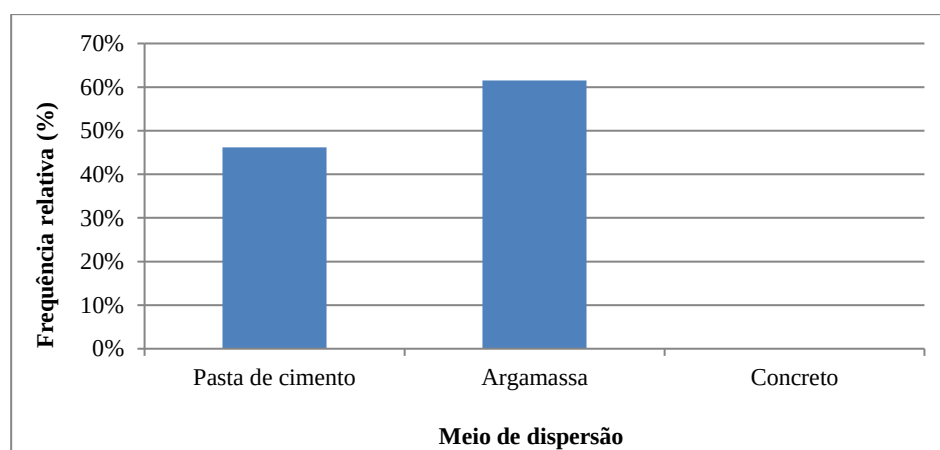


Figura 5: Meios de dispersão empregados nos experimentos x frequência relativa de ocorrência (%).

Como se pode observar na Figura 5, a matriz cimentícia mais utilizada nos experimentos é a argamassa, seguida pela pasta de cimento. Não foram encontrados testes com adição de GO em concreto, o que pode ser explicado pelos seguintes fatores:

- O agregado graúdo aumenta significativamente a zona de transição na interface pasta–agregado, podendo provocar interferências na análise dos resultados. Por essa razão, muitos autores optam pela utilização de pastas de cimento ou argamassa em seus experimentos.

- A dispersão do GO em concretos é mais difícil de ser alcançada, devido ao maior grau de saturação da matriz (pasta de cimento).

Os melhores resultados de resistência mecânica foram obtidos em experimentos que utilizaram como meio de dispersão pastas de cimento, como mostrado na Tabela 9.

Como oportunidade para pesquisas futuras, propõe-se a execução de experimentos com dispersão de GO em concreto, utilizando para isso aditivos plastificantes de alta eficiência.

4.2.3 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO

A Figura 6 apresenta os principais testes de caracterização física e química realizados nos experimentos e sua frequência relativa de ocorrência.

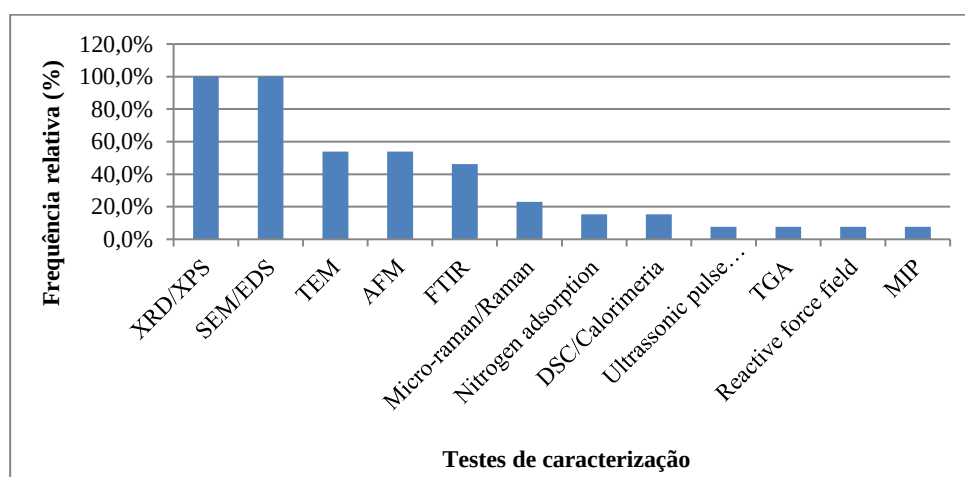


Figura 6: Testes aplicados nos experimentos x frequência relativa de ocorrência (%).

A análise da Figura 6 permite inferir que os testes de caracterização física e química mais realizados nos experimentos são os de difração de raios-X (XRD/XPS) e de microscopia (SEM/EDS, TEM e AFM), seguidos pelo ensaio FTIR. Como oportunidade para pesquisas futuras, sugere-se a execução dos ensaios de ultrasonic pulse velocity, TGA, reactive force field e MIP, pouco realizados nos trabalhos.

Além destes testes, podem ser realizados ensaios de determinação da área específica, pois a adição de nanomateriais ao cimento aumenta significativamente a área específica do compósito gerado, necessitando de uma maior quantidade de água para cobrir e molhar a superfície das partículas. Como resultado, a disponibilidade de água para lubrificação na pasta de cimento é reduzida e a força de atrito entre as partículas aumenta. Consequentemente, os parâmetros reológicos da pasta de cimento, tais como tensão de escoamento e viscosidade, também aumentam.

4.2.4 TEOR ÓTIMO DE ADIÇÃO DE GO

A Figura 7 apresenta a frequência relativa de ocorrência dos percentuais ótimos de adição de GO, encontra-dos nos experimentos:

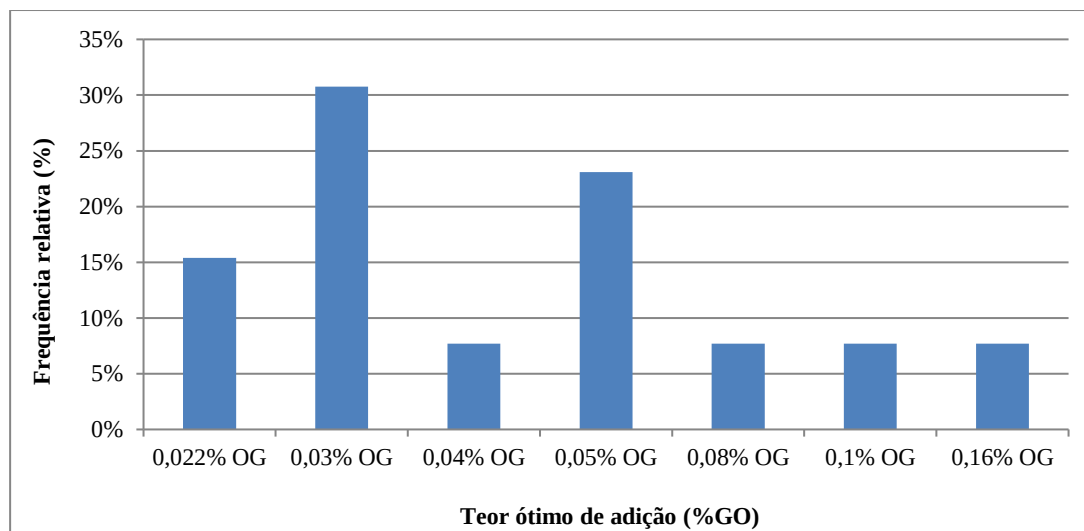


Figura 7: Teor ótimo de adição (%GO) x frequência relativa de ocorrência (%).

Como se pode perceber, o teor ótimo de adição de GO mais frequente encontrado nos trabalhos é de 0,03%, seguido pelo teor de 0,05%

Identificou-se, pela análise da Tabela 9, que o teor de GO que conduz aos melhores resultados de resistência à compressão é de 0,03%, enquanto o teor de GO que conduz aos melhores resultados de resistência à tração é de 0,05%.

Os aumentos verificados na resistência à compressão dos compósitos cimentícios com adição de GO podem ser explicados por vários fatores, dentre eles, destacam-se:

- Efeito nanofiller (o GO é capaz de preencher os poros na microestrutura do compósito cimentício, proporcionando a densificação e uma estrutura com menos defeitos, o que favorece a resistência à compressão) [6];
- O GO catalisa a reação de hidratação do cimento. Grupos funcionais de oxigênio (principalmente –OH e –COOH) presentes na estrutura molecular do GO funcionam como sítios de adsorção tanto para moléculas de água como para componentes do cimento (C2S e C3S, C3A e C4AF), facilitando a reação de hidratação e a nucleação dos cristais de C-S-H. Além disso, o mecanismo de adsorção de água na superfície das moléculas de GO permite a redução no conteúdo de água livre, o que também favorece a redução da porosidade e aumento na resistência mecânica [9];

- O GO regula a formação dos cristais de C-S-H em um arranjo regular e alinhado, permitindo melhorias na estrutura porosa e obtenção de um maior grau de compactação [22];
- O GO possui elevada superfície específica para interação com os produtos de hidratação do cimento [9].

Os aumentos verificados na resistência à tração e módulo de elasticidade dos compósitos cimentícios com adição de GO podem ser explicados por vários fatores, sendo os principais os seguintes:

- O GO proporciona o intertravamento da matriz do cimento, devido à sua morfologia rugosa [7];
- O GO possui elevada resistência à tração e flexibilidade, características que tornam este material capaz de restringir a iniciação e a propagação das fissuras no compósito cimentício em uma escala nanométrica. As fissuras passam a ocorrer de maneira tortuosa e com menor espessura, reduzindo a possibilidade de ocorrência de falhas (ruptura) do material [7] [25].

Como oportunidade futura de pesquisa, propõe-se a execução de mais ensaios explorando os teores de 0,03 e 0,05% de GO. Também podem ser realizados ensaios visando determinar o teor ótimo de adição de GO em relação ao comportamento reológico dos compósitos cimentícios.

4.2.5 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO

A Figura 8 apresenta os fatores água/cimento (a/c) utilizados nos experimentos e sua frequência relativa de ocorrência:

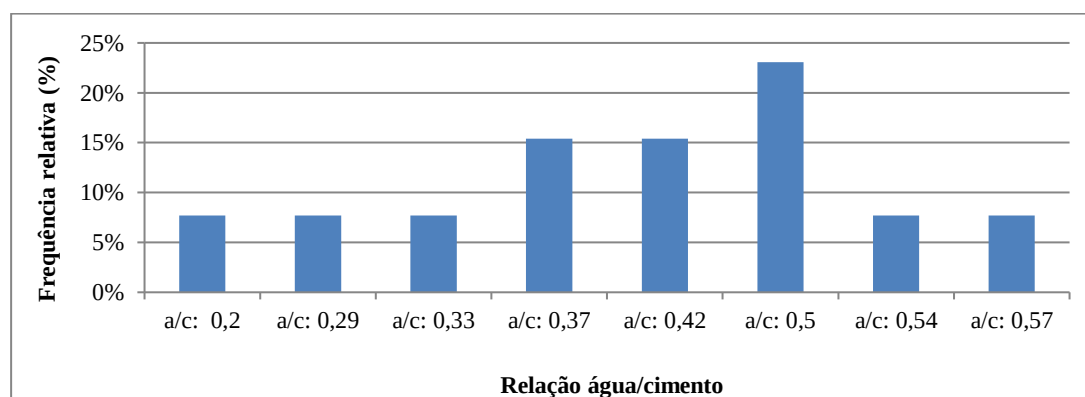


Figura 8: Relação água/cimento (a/c) x frequência relativa de ocorrência (%).

Como se pode observar, o fator a/c mais utilizado nos trabalhos é de 0,5, em seguida estão os fatores a/c de 0,42 e 0,37.

Analisando a Tabela 9, pode-se perceber que a relação água/cimento associada aos melhores resultados de resistência mecânica nos experimentos situa-se no intervalo de 0,37 a 0,42. Quando se utiliza

relações água/cimento muito baixas (menores que 0,3), sem o uso de aditivos plastificantes, a quantidade de água adicionada pode ser insuficiente para a hidratação completa das partículas de cimento, o que resulta em materiais com menor resistência mecânica. Na situação oposta, quando se utiliza relações água/cimento muito elevadas (maiores que 0,5), a tendência é de aumento na porosidade e ocorrência de defeitos na microestrutura do material cimentício, o que faz com que a ruptura por esforços de tração e compressão ocorra em valores muito menores de tensão aplicada.

Nota-se, pela Tabela 2, que na grande maioria dos experimentos os autores fizeram o uso de aditivos plastificantes. Para se obter uma pasta de cimento com adição de GO com fluidez adequada, sem o uso de aditivos plastificantes, é necessário utilizar uma relação água/cimento próxima a 0,5. Com o uso de aditivos plastificantes, pode-se reduzir o fator água/cimento para valores próximos a 0,4.

4.2.6 PROPRIEDADES REOLÓGICAS

A Figura 9 apresenta as principais propriedades reológicas investigadas nos experimentos e sua frequência relativa de ocorrência:

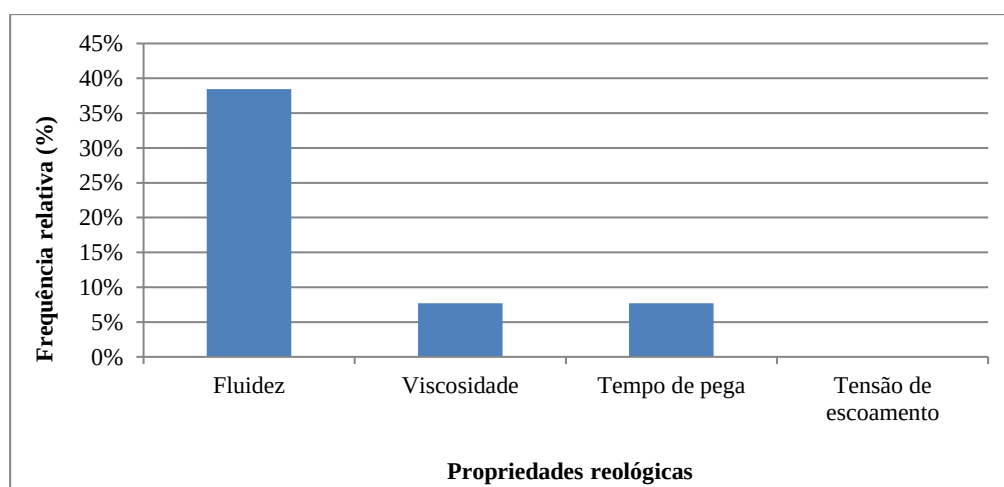


Figura 9: Propriedades reológicas investigadas x frequência relativa de ocorrência (%).

Pela Figura 9 percebe-se que a fluidez, parâmetro investigado por meio do teste de minislump, é o mais explorado nos trabalhos.

Por meio do minislump, mediu-se o diâmetro de espalhamento das amostras de referência e das amostras com adição de GO. Pela análise da Tabela 9, pode-se concluir que há uma redução evidente na fluidez das pastas quando o teor de GO aplicado ultrapassa 0,03% em relação à massa de cimento. Os estudos conduzidos por [11]), [19] e [7] apresentaram, como resultado, reduções no diâmetro de

espalhamento das pastas superiores a 30%, quando teores GO iguais/superiores a 0,03% foram empregados.

O teste de slump é caracterizado como uma técnica de baixo custo, prática e sensível a mudanças na tensão de escoamento. No entanto, ele não fornece nenhuma informação sobre as características do material cimentício sob diferentes condições de cisalhamento, visto que se trata de um ensaio monoponto [27].

Como oportunidade futura de pesquisa, propõe-se realização de ensaios utilizando o reômetro, equipamento que possibilita a medição de parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento das amostras para diferentes condições de cisalhamento.

4.2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Figura 10 apresenta as principais propriedades mecânicas analisadas nos experimentos e sua frequência relativa de aplicação:

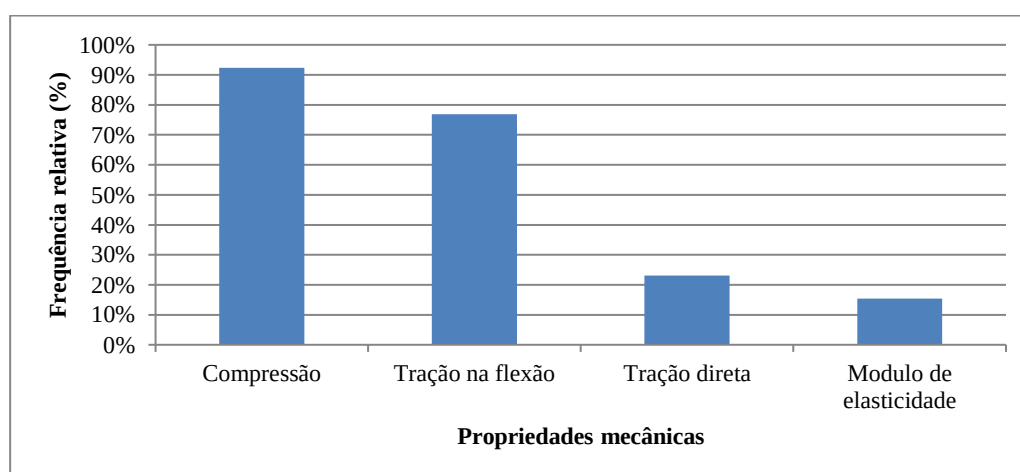


Figura 10: Propriedades mecânicas analisadas x frequência relativa de ocorrência (%).

Analisando a Figura 10, percebe-se que os testes de resistência à compressão foram realizados na grande maioria dos experimentos.

Os testes de resistência de tração direta e determinação do módulo de elasticidade foram pouco explorados nos experimentos. Isto se deve às seguintes dificuldades na realização destes ensaios:

- Difícil preparação (usinagem) das amostras com a precisão geométrica exigida;

- As cerâmicas, de uma maneira geral, possuem resistência à tração direta muito baixa, em função disto, muitas vezes falham após deformações da ordem de 0,1% exigindo perfeito alinhamento das amostras para o ensaio de tração direta;
- Processo de fixação dos corpos de prova, realizado por meio de mordentes, induz a formação de fissuras no material cerâmico, que interferem nos resultados de tração.

Como sugestão para pesquisas futuras, propõe-se a realização de ensaios de tração por compressão diametral. Estes ensaios fornecem resultados com menor índice de erros do que os ensaios de tração direta, em função de não apresentarem as causas de desvios de resultado listadas anteriormente. Além disso, devem ser realizadas mais investigações sobre a influência de GO no módulo de elasticidade dos materiais cimentícios.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um processo estruturado de pesquisa acadêmica para composição de um referencial teórico: o ProKnow-C. Este processo permitiu a obtenção de um portfólio bibliográfico abrangente, representativo e relevante sobre os efeitos da adição do óxido de grafeno em compósitos de cimento Portland.

O procedimento ProKnow-C possibilitou, em sua fase inicial, selecionar, a partir de uma amostra bruta de 954 artigos, os 13 artigos mais relevantes que apresentavam as alterações nas propriedades mecânicas e reológicas de materiais cimentícios com adição de GO. O processo de seleção de artigos evidenciou o estágio atual do conhecimento acadêmico sobre o tema de pesquisa.

Por meio da análise bibliométrica, a segunda fase do ProKnow-C, foram evidenciados os autores Shenghua Lv e Li Zhao, que apresentaram o maior número de produções científicas relacionadas ao tema de pesquisa dentre os autores dos artigos selecionados. Os periódicos *Construction and Building Materials* e *Carbon* apresentaram o maior número de artigos publicados e o fator de impacto JCR mais significativo, respectivamente. O artigo *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites* foi aquele que apresentou o maior número de citações dentre os artigos selecionados, sendo considerado um artigo de referência em se tratando da adição de óxido de grafeno em compósitos de cimento.

A terceira fase do ProKnow-C consistiu na análise sistêmica dos artigos, tendo sido realizada a partir da visão particular de conhecimento do pesquisador. Essa visão é estruturada em sete lentes de pesquisa: técnicas de dispersão, meio de dispersão, testes aplicados, teor ótimo de adição, relação

água/cimento, propriedades reológicas e propriedades mecânicas de compósitos de cimento com adição de GO.

Os procedimentos realizados na análise sistêmica proporcionada pelas sete lentes de pesquisa (critérios de avaliação) permitiram a identificação dos pontos fortes (melhores práticas) e oportunidades de pesquisa relacionadas à incorporação de óxido de grafeno em compósitos de cimento Portland, os quais podem auxiliar na condução de pesquisas futuras. Tais informações são retratadas, de maneira resumida, na Tabela 10:

Tabela 10: Pontos fortes e oportunidades de pesquisa identificadas na análise sistêmica.

ID	Lentes	Pontos fortes	Oportunidades
1	Técnicas de dispersão	Ultrassonificação e aditivo plastificante foram as técnicas de dispersão que conduziram aos melhores resultados de resistência mecânica.	Mesclar diferentes técnicas de dispersão para permitir maiores concentrações de GO. Verificar a eficiência de outros aditivos na dispersão do GO, como isopropanol, lignosulfonato ou polinaftaleno sulfonato.
2	Meio de dispersão	Pasta de cimento é o meio de dispersão em que foram obtidos os melhores resultados de resistência mecânica.	Conduzir estudos com adição de GO em concretos, utilizando aditivos dispersantes de alta eficiência.
3	Testes de caracterização	Difração de raios-X (XRD/XPS), microscopia (SEM/EDS, TEM e AFM), e FTIR são os testes de caracterização mais utilizados nas análises.	Realizar mais ensaios de <i>ultrasonic pulse velocity</i> , <i>TGA</i> , <i>reactive force field</i> e <i>MIP</i> . Além destes testes, também podem ser realizados ensaios de determinação da área específica.
4	Teor ótimo de adição	Os teores de 0,03% e 0,05% de GO são os que conduziram aos melhores resultados de resistência à compressão e tração, respectivamente.	Conduzir mais estudos empregando teores de 0,03% e 0,05% de GO. Determinar o teor ótimo de adição do GO também em relação ao comportamento reológico.
5	Relação água/cimento	Relação água/cimento entre 0,37 e 0,42 foram as que conduziram aos melhores resultados de resistência mecânica.	Para se obter uma pasta de cimento com adição de GO com fluidez adequada, sem o uso de aditivos plastificantes, é necessário utilizar uma relação água/cimento próxima a 0,5. Com o uso de aditivos plastificantes, pode-se reduzir o fator água/cimento para 0,4.
6	Comportamento reológico	Fluidez é o parâmetro reológico mais investigado nos experimentos. Teste de <i>slump</i> é a ferramenta de análise mais executada.	Realização de ensaios de reometria rotacional de fluxo por meio de um reômetro, equipamento que possibilita a medição de parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento das amostras, para vários valores de tensão e taxa de cisalhamento aplicadas.
7	Propriedades mecânicas	Ensaio de resistência à compressão e resistência à tração na flexão são os mais utilizados.	Realizar ensaios de tração por compressão diametral e mais investigações sobre a influência de GO no módulo de elasticidade dos materiais cimentícios.

A combinação dos parâmetros de entrada que conduziu aos melhores resultados de resistência mecânica, conforme identificados na análise da Tabela 9, foram: uso de pasta de cimento, uso da técnica de ultrassonificação e aditivo plastificante para a dispersão do GO e relação água/cimento próxima a

0,4. O teor de GO que conduziu aos melhores resultados de resistência à compressão foi de 0,03%, enquanto o teor de GO que conduziu aos melhores resultados de resistência à tração foi de 0,05%. Estes parâmetros podem ser utilizados como base para experimentos futuros envolvendo a adição de GO em compósitos de cimento.

Com este trabalho, busca-se incentivar o uso dos processos estruturados para a seleção e evidênciação de artigos, criando referenciais teóricos consistentes para o suporte de pesquisas futuras.

Dentre as limitações deste trabalho, destacam-se a indisponibilidade de conteúdo integral de alguns artigos nas bases de dados selecionadas, bem como o caráter subjetivo do processo de análise sistêmica, que é vinculado aos valores, preferências e conhecimento prévio do pesquisador. Tais fatores resultaram na restrição do campo amostral de pesquisa.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] YEPES, Victor; Alcalá González , J . 2014. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. v. 19, p. 3–12, 2014.
- [2] YANG, Haibin et al. Composites : Part A A critical review on research progress of graphene / cement based composites. *Composites Part A*, v. 102, p. 273–296, 2017.
- [3] LV, Shenghua et al. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 121–127, 2013.
- [4] QURESHI & PANESAR. Conference. A review : the effect of graphene oxide on the properties of cement-based composites. 2017.
- [5] MOHAMMED, A. et al. Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties. *Construction and Building Materials*, v. 84, p. 341–347, 2015.
- [6] LU, Cong et al. Effect of graphene oxide on the mechanical behavior of strain hardening cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 457–464, 2016.
- [7] PAN, Zhu; HE, Li; QIU, Ling; KORAYEM, Asghar Habibnejad; et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. *Cement and Concrete Composites*, v. 58, p. 140–147, 2015.
- [8] HOU, Dongshuai et al. Reactive molecular dynamics and experimental study of graphene-cement composites: Structure, dynamics and reinforcement mechanisms. *Carbon*, v. 115, p. 188–208, 2017.
- [9] LIN, Changqing; WEI, Wei; HU, Yun Hang. Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v. 89, p. 128–133, 2016.
- [10] ZHAO, Li et al. Mechanical behavior and toughening mechanism of polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide reinforced cement composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 113, p. 308–316, 2017.
- [11] GONG, Kai; ASCE, S M; et al. Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 2, p. 1-6, 2015.
- [12] SHANG, Yu et al. Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 20–28, 2015.
- [13] AFONSO et al. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo Proknow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 5, n. 2, p. 47, 2017.
- [14] AZEVEDO, RGOério Cabral De; ENSSLIN, Leonardo; JUNGLES, Antônio Edésio. A Review of Risk Management in Construction: Opportunities for Improvement. *Modern Economy*, v. 05, n. 04, p. 367–383, 2014.

- [15] CHAVES, Leonardo Corrêa et al. Sistemas de apoio à decisão: mapeamento e análise de conteúdo. *Revista Eletrônica de Ciência Administrativa*, v. 12, n. 1, p. 6–22, 2012.
- [16] LACERDA, RGOério Tadeu de Oliveira; ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gestão & Produção*, v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012.
- [17] WAICZYK, Cleomir; ENSSLIN, Eduardo Rolim. Avaliação de produção científica de pesquisadores: mapeamento das publicações científicas. *Revista Contemporânea de Contabilidade*, v. 10, n. 20, p. 97–112, 2013.
- [18] HORSZCZARUK, Elżbieta et al. Nanocomposite of cement/graphene oxide – Impact on hydration kinetics and Young’s modulus. *Construction and Building Materials*, v. 78, p. 234–242, 2015.
- [19] LV, S.H. et al. Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 66, p. 1–9, 2016.
- [20] SHARMA, Snigdha; KOTHIYAL, N. C. Influence of graphene oxide as dispersed phase in cement mortar matrix in defining the crystal patterns of cement hydrates and its effect on mechanical, microstructural and crystallization properties. *RSC Advances*, v. 5, n. 65, p. 52642–52657, 2015.
- [21] TONG, Teng et al. Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro- and macro-properties of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 102–114, 2016.
- [22] WANG, Qin et al. Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement. *New Carbon Materials*, v. 30, n. 4, p. 349–356, 2015.
- [23] WANG, Min et al. Study on the three dimensional mechanism of graphene oxide nanosheets modified cement. *Construction and Building Materials*, v. 126, p. 730–739, 2016.
- [24] ZHAO, Li et al. Investigation of the effectiveness of PC@GO on the reinforcement for cement composites. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 470–478, 2016.
- [25] INCITES JOURNAL CITATION REPORTS. Disponível em: <<https://jcr.clarivate.com/>>. Acesso em out. 2018.
- [26] PLATAFORMASUCUPIRA.Qualisperiodicos.Disponívelem:<<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf?conversatio>>. Acesso em out. 2018.
- [27] RAUCCI, J. S. et al. Effect of mixing method on the mini-slump spread of Portland cement pastes. *Re-vista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 2, p. 410–431, 2018.

NOTAS

¹ND: classificação não definida pela CAPES para a área de Engenharias I, mas classificado como A1 para engenharias II, III e interdisciplinar.

²XRD: X-Ray diffraction; XPS:X-ray photoelectron spectroscopy; SEM: Scanning electronic microscopy; EDS: Energy dis-persion spectroscopy; TEM: Transmission electronic microscopy; AFM: Atomic force microscopy; FTIR: Fourier transmis-sion infrared; DSC: Differential spectroscopy calorimetry; TGA:ThermGOravimetric analysis; MIP:Mercury intrusion po-rosimetry.

Capítulo 5



10.37423/230407643

PLANO DE AÇÃO PARA A ELABORAÇÃO DO PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO PRÉDIO DA PREFEITURA MUNICIPAL DE MONTES CLAROS-MG

Luiza Eduarda Torres Pires

Universidade Estadual de Montes Claros

Sheila Cristina Martins Pereira

Universidade Estadual de Montes Claros



Resumo: Uma preocupação ambiental mundial é o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos que necessitam de gerenciamento mais sustentável, visto que muitos municípios brasileiros já não possuem mais áreas para a disposição final dos resíduos sólidos. Este artigo estuda a geração de resíduos sólidos do prédio sede da Prefeitura Municipal de Montes Claros, uma vez que esta instituição pública tem papel fundamental no progresso da cidade e não deve ignorar sua posição de geradora de resíduos, bem como a necessidade de um gerenciamento adequado dos resíduos para garantir o manejo e a disposição final dentro dos padrões normativos exigidos. Diante disso, o estudo tem como objetivo estruturar um plano de ação para a elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – PGRS no âmbito do prédio sede da Prefeitura de Montes Claros e, a partir das propostas de medidas corretivas e procedimentos de intervenção na forma como se apresenta o manejo atual, torná-lo instrumento de gestão e preservação da saúde e do meio ambiente. A partir de consultas a livros, dissertações e legislações, reuniram-se informações que somadas às visitas ao local de estudo possibilitaram um diagnóstico abordando a quantificação e composição gravimétrica dos resíduos gerados no prédio. Por meio de uma amostra de cinco dias, verificou-se que 66,50% dos resíduos gerados eram potencialmente recicláveis, enquanto 33,50% eram materiais orgânicos ou rejeitos. Com base nisso, pode ser estruturado um plano palpável para todas as etapas de gerenciamento dos resíduos, incluindo propostas de minimização da geração, de melhorias na segregação e disposição final, e de um processo de educação ambiental dos funcionários da instituição.

Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos. Resíduos sólidos urbanos. Gestão ambiental.

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações compartilhadas por todo o mundo atualmente é o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos que necessitam de destinação sustentável, técnico e ambientalmente adequada. As indústrias têm criado produtos cada vez menos duráveis (obsolescência programada), promovendo o consumismo, o uso progressivo e irresponsável dos recursos, o desperdício e o acúmulo dos resíduos.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), estima-se que cada brasileiro gera, em média, 0,99 kg.hab/dia e que a coleta de resíduos domiciliares e públicos no território brasileiro em 2019 tenha atingido um montante anual de 65,11 milhões de toneladas, equivalente a 178,4 mil toneladas por dia e a um aumento de 3,7% em relação ao ano de 2018. Os impactos ambientais, sociais, econômicos e de saúde pública causados pela disposição inadequada desses resíduos nas áreas urbanas afetam negativamente o desenvolvimento de todo o país. Considerando que o gerenciamento de resíduos sólidos é uma poderosa ferramenta de intervenção em prol da preservação do meio ambiente (MARSARO, 2009) e que cabe ao poder público incentivar sempre boas práticas, uma oportunidade de ação exemplar é iniciar e fazer cumprir a implantação de planos de gerenciamento em prédios públicos.

Conforme Lima (2002), o termo “Gerenciamento de Resíduos Sólidos” se refere a decisões estratégicas relacionadas aos aspectos institucionais, financeiros, ambientais, tecnológicos e operacionais, que envolvem fatores administrativos, de desempenho e qualidade, e orientam a organização disposta a fazer os procedimentos de gestão: segregação, estocagem, coleta, transporte e, em alguns casos, recuperação de energia. Por isso, a elaboração e execução de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos demonstra o empenho da instituição para alcançar avanços no processo de gestão dos resíduos sólidos conforme proposto pelas legislações ambientais, tornando-a referência no enfrentamento de desafios ambientais para redução de resíduos.

Acrescenta-se ainda como benefícios da gestão de resíduos sólidos a economia pela redução no consumo de energia e materiais, e redução dos riscos de penalidades pela geração de ameaças ao meio ambiente. Segundo Reis (2013), o entendimento do problema permite que se formulem os objetivos e as estratégias para que se possa atingir uma efetiva gestão de resíduos sólidos.

É fato que há poucos trabalhos nessa área voltados para Prefeituras Municipais que sirvam para auxiliar as pesquisas, mas sabe-se que a implantação de um gerenciamento de resíduos em qualquer local reduz o volume de materiais enviados para os aterros sanitários e são economicamente importantes para arrecadação no município, a venda dos materiais classificados como recicláveis. Além disso, ações

ambientalmente corretas como essa contribuem para a construção de uma imagem positiva da gestão pública para a sociedade, pois é sabido que prédios públicos são grandes geradores de resíduos e os líderes municipais devem compreender a problemática dos resíduos sólidos de modo geral.

Há um distanciamento entre a compreensão e a execução de um plano de gerenciamento de resíduos e colocá-lo em prática representa uma iniciativa para o começo de uma amplificação da gestão adequada dos resíduos para mais estabelecimentos até que se alcance toda a localidade. Entende-se que a Prefeitura, seus servidores, colaboradores e visitantes representam um potencial gerador de resíduos sólidos e considerando a importância de uma instituição pública estar alinhada com normas instituídas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010), Marco Legal do Saneamento Básico (Lei Federal nº 14.026/2020) e demais políticas públicas, a presente pesquisa levantou dados e informações atualizadas em busca de responder ao seguinte problema: Qual a melhor forma para gerenciar os resíduos sólidos produzidos na sede administrativa da Prefeitura de Montes Claros?

Os gestores do município de Montes Claros tem apresentado, recentemente, iniciativas para o desenvolvimento sustentável e responsabilidade socioambiental voltada à geração de resíduos sólidos. Como iniciativa de um processo nesse sentido, instalou-se recipientes de coleta seletiva no prédio administrativo, conforme disposto no Decreto nº3.918, de 06 de novembro de 2019. Apesar disso, não há um gerenciamento regular interno que integre todos os resíduos sólidos gerados nesse local nem um plano de implantação.

Portanto, este estudo, que tem como finalidade elaborar um plano de ação para o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos do prédio da Prefeitura Municipal de Montes Claros, colaborando com informações relevantes para o acervo bibliográfico relacionado à gestão de resíduos sólidos em instituições públicas. Além disso, atende ao Decreto supracitado e contribui para a identificação de falhas e melhorias dos sistemas de manejo de resíduos. Ao identificar, qualificar e quantificar os resíduos sólidos gerados pelos servidores e demais visitantes do prédio, são propostas medidas corretivas, normas e procedimentos considerando a viabilidade econômica e estabelecendo metas prioritárias para as intervenções que também representam instrumentos de gestão e preservação da saúde pública e do meio ambiente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

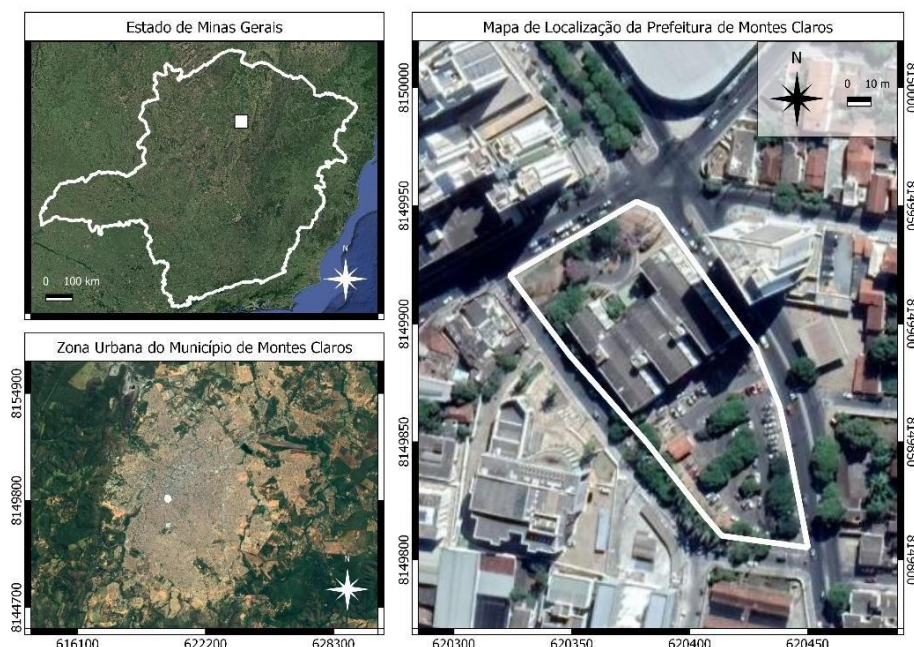
O formato de pesquisa escolhido para o desenvolvimento deste projeto foi o estudo de caso sobre o tema, de forma que estabelecesse dados e informações suficientes para conhecer, diagnosticar e propor iniciativas de gestão dos resíduos sólidos gerados.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A proposta do plano de ação para elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos foi estruturada para a sede da Prefeitura Municipal de Montes Claros (Figura 1), Minas Gerais, localizado na Avenida Cula Mangabeira, 211 - Santo Expedito, onde atualmente funcionam as Secretarias de Finanças, de Infraestrutura e Planejamento Urbano, de Planejamento e Gestão, bem como Gabinetes do Prefeito e Vice Prefeito, Ouvidoria e Almoxarifado.

O edifício possui três andares, com estrutura para salas de reuniões, departamentos administrativos, recepção e banheiros, além de abrigar aproximadamente 400 servidores. Até o corrente ano, existem apenas um decreto e duas leis municipais relacionados aos resíduos sólidos do município, nenhum desses documentos trata de uma elaboração de plano para os resíduos sólidos do prédio sede de forma específica.

Figura 1: Localização da Prefeitura estudada



Fonte: Elaborado com auxílio da ferramenta Arq GIS, tendo como base mapa do Google Earth, 2021.

2.2 COLETA DE DADOS

A partir de consultas a livros, anais de congressos, dissertações, teses, revistas e legislações específicas, foram reunidas informações sobre a gestão dos resíduos sólidos em órgãos públicos e respectivas experiências com propostas palpáveis logística e economicamente para a formulação do modelo elaborado para a prefeitura de Montes Claros.

Dentre as literaturas abordadas, é importante citar as legislações vigentes relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos: a Lei Federal nº 12.305 de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a Lei Estadual nº 18.031 de 2009 que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos; a Lei Municipal nº 5.080 de 2018 que dispõe sobre a limpeza urbana, seus serviços e o manejo de resíduos sólidos urbanos; os decretos municipais; o Manual de Orientação: Planos de Gestão de Resíduos Sólidos, obra conjunta do MMA e do ICLEI – Brasil e as normas regidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para informações relacionadas às características dos resíduos gerados, bem como as maneiras corretas de destinação final.

Fundamentando-se em uma forma participativa de diagnóstico, foi realizada busca de dados no campo durante o mês de agosto de 2021 com os responsáveis pela gerência de Serviços Gerais e pela diretoria de Infraestrutura e Planejamento da Secretaria de Serviços Urbanos, respectivamente, para coleta dos seguintes dados:

- informações sobre as atividades geradoras de resíduos;
 - informações sobre a geração de resíduos;
 - formas e frequência do processo de coleta;
 - formas de armazenamento;
 - formas de tratamento, reutilização, reciclagem ou disposição final dos resíduos dentro e/ou fora da Prefeitura;
 - informações sobre iniciativas de educação ambiental;
- Após verificar os dados da Prefeitura, foram observados in loco os procedimentos de acondicionamento, armazenamento, coleta e transporte interno, buscando:
- identificar o setor responsável por todos os processos de gerenciamento dos resíduos, seja ele terceirizado ou não;
 - identificar desperdícios de materiais na realização das atividades, se existe alguma iniciativa de minimização e se há a separação de resíduos recicláveis de não recicláveis;

- verificar a existência de cestos de lixo, coletores seletivos e sacos plásticos para acondicionamento nas fontes geradoras, e os locais de armazenamento temporário;
- identificar se é realizado algum tratamento dos resíduos;
- levantar o destino dado aos resíduos, conforme o tipo.

O procedimento adotado para a quantificação dos resíduos sólidos foi realizado na sede da Associação de Catadores Montesul onde foi disponibilizada uma balança com capacidade de 500 quilogramas durante o período de cinco dias no turno vespertino. Conhecido como método do quarteamento, foi feita a pesagem amostral dos sacos de lixo com capacidade de 50 litros gerados no prédio, bem como das frações dos resíduos separados em resíduos recicláveis e não recicláveis. Reunindo esses dados, realizou-se a classificação gravimétrica e fez-se o cálculo da quantidade de resíduos gerada na Prefeitura de Montes Claros. Esse levantamento foi feito com a utilização de equipamentos de proteção individual (EPIs) para manuseio seguro dos resíduos sólidos, em local coberto para evitar interferências climatológicas, e sob supervisão da responsável pela Associação.

2.3 ANÁLISE DE DADOS

Com os dados encontrados e o conhecimento obtido através de estudos sobre gestão dos resíduos sólidos em instituições públicas, identificou-se as condições operacionais que foram comparadas com as informações fornecidas pela Prefeitura em busca de falhas ou incoerências com o que foi observado in loco. A classificação dos resíduos, a estrutura operacional de sua geração até a destinação final e as normas regulamentadoras serviram como base para propor soluções viáveis técnica e economicamente à formulação de um sistema eficaz de gerenciamento dos resíduos do prédio.

Devido às características da composição gravimétrica levantada, os resíduos foram agrupados em resíduos comuns recicláveis (subdivididos em papel/papelão, plástico, metal e vidro) e, resíduos orgânicos e não recicláveis a fim de facilitar o direcionamento de estratégias de manejo. Com esse gerenciamento, buscou-se também apresentar gráficos ilustrativos e soluções relacionadas ao acondicionamento, à coleta, ao tratamento e destinação final, abordando:

- possibilidades de implantação de coleta seletiva e a de comercialização dos resíduos, reaproveitamento no próprio local e/ou uso racional dos materiais;
- possível sistema de acondicionamento otimizado em função do tipo do resíduo e sua classificação.

2.4 ELABORAÇÃO DO PLANO

Analizados os dados, foi possível entender os processos de forma minuciosa e, utilizando o modelo 5W2H, identificar os problemas (*What?/O quê?*), suas respectivas causas (*Why?/Por que?*), responsáveis pelas intervenções (*Who?/Quem?*) na Prefeitura (*Where?/Onde?*), bem como, apresentar propostas corretivas (*How?/Como?*) organizadas em ações de curto, médio e longo prazo (*When?/Quando?*). De modo que, o plano esteja alinhado com as possibilidades financeiras do município (*How much?/Quanto?*) e sempre aberto a ajustes, atualizações e acompanhamento para alcance de níveis avançados de gestão e adequação ambiental. Baseadas nos potenciais riscos ambientais e à segurança da comunidade do prédio, definiram-se como prioridades de curto prazo as implementações no período de até um ano, médio prazo em até dois anos e longo prazo podendo acontecer em até três anos.

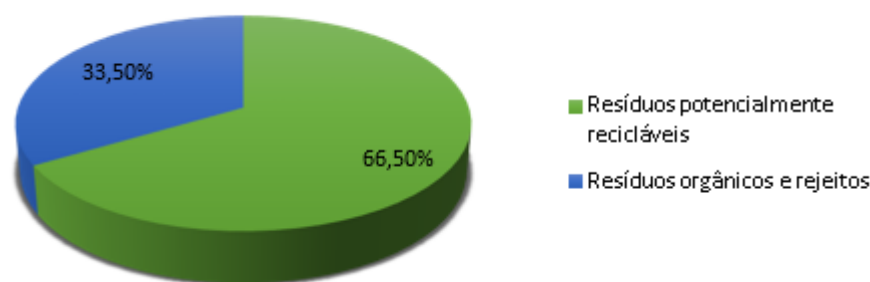
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no levantamento realizado nas visitas ao prédio sede da Prefeitura Municipal de Montes Claros, apresentam-se e discutem-se os dados obtidos por meio do diagnóstico e do estabelecimento de proposições para elaboração do plano de gerenciamento dos resíduos da instituição.

3.1 IDENTIFICAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

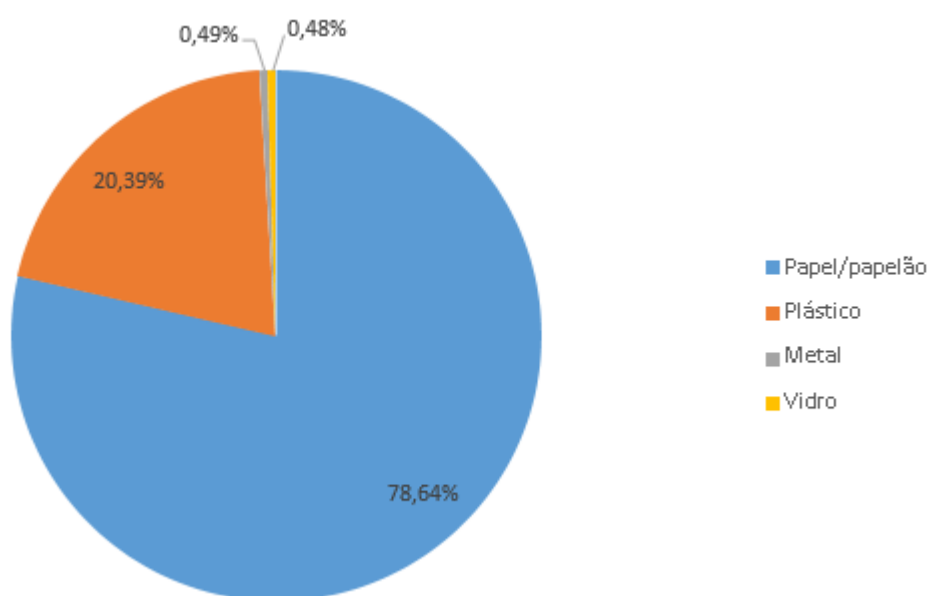
Através do levantamento *in loco*, tem-se uma amostra de 15,5 kg de resíduos sólidos gerados no prédio no período de 5 dias, da qual 10,3 kg são resíduos recicláveis classificados como resíduos classe II A (ABNT NBR 10004:2004) por suas propriedades biodegradáveis e 5,2 kg são resíduos orgânicos e rejeitos classificados como resíduos classe II A e B (ABNT NBR 10004:2004) respectivamente. Este percentual é apresentado na Figura 2, onde mostra que mais de 66% do material tem potencial para reutilização e reciclagem.

Figura 2: Distribuição de resíduos na amostra



O resultado da composição gravimétrica realizada a partir dos resíduos recicláveis estão apresentados na Figura 3, onde foram classificados como papel/papelão, plástico, metal ou vidro.

Figura 3: Composição gravimétrica dos resíduos recicláveis da amostra



Pode-se observar a predominância de papel/papelão, representando 78,64% do total de resíduos coletados refletindo a atividade geradora de resíduos de escritório como predominante no local, sendo que, entre os demais materiais, destaca-se também o plástico com 20,39% com grande variedade de artigos (copos, sacolas, pratos, entre outros). De modo geral, a servidora responsável pelo setor de coleta do prédio informou que a maior geração de resíduos é proveniente da Secretaria de Finanças. A parcela de rejeitos e resíduos orgânicos encontrada constituía restos de alimentos, restos de varrição e sacolas plásticas sujas. Os vidros (0,48%) e metais (0,49%) foram encontrados em quantidades pouco significativas. Na amostra, não foram encontrados resíduos classificados como perigosos.

3.2 INICIATIVAS DE MINIMIZAÇÃO E SEGREGAÇÃO

Nas áreas externas ao prédio, existem algumas lixeiras de coleta seletiva para acondicionamento dos resíduos, em destaque na Figura 4. É relevante constatar também que outras lixeiras já foram instaladas no interior do prédio, mas não houve uma campanha de orientação nem a sensibilização por parte dos usuários para depositar corretamente os resíduos nas suas respectivas lixeiras.

Paralelo a isso, uma prática comum em algumas secretarias é utilizar papéis inutilizados para rascunho. No setor de arquivo, há também a cultura de doar documentos após prazo de validade para uma empresa de incineração e, em todo o prédio, são utilizadas impressoras com cartuchos recarregáveis.

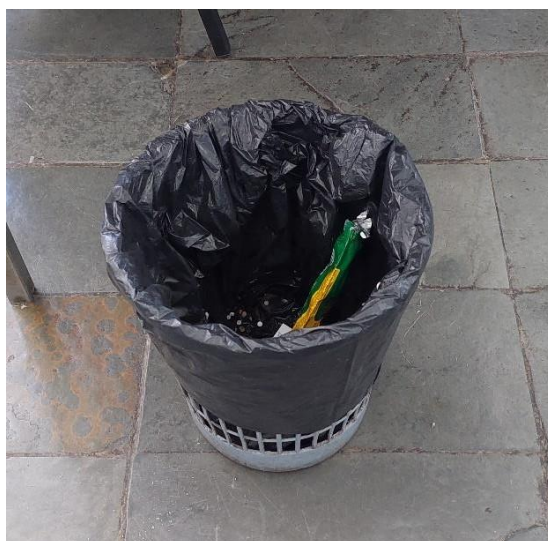
Figura 4: Contenedores instalados entre o prédio e o estacionamento



3.3 ACONDICIONAMENTO, ARMAZENAMENTO, COLETA E DESTINAÇÃO FINAL

Duas vezes ao dia, funcionários da limpeza recolhem os resíduos das secretarias e demais departamentos. O acondicionamento é feito em sacos plásticos de cor azul ou preta, conforme exposto na Figura 5.

Figura 5: Coletor para lixo



Depois, os resíduos são encaminhados para os pontos de coleta, equipados com *containers* com tampa (Figura 6) com dimensões que atendem a geração do prédio, onde permanecem até serem coletados pela empresa responsável e levados ao seu destino final. Essa coleta é realizada diariamente por meio de um veículo compactador e não há segregação dos recicláveis. Segundo constatado em visitas ao local de estudo, esses resíduos não são destinados para coleta seletiva conforme Decreto Municipal nº 3.918 de 2019, mas para o aterro sanitário licenciado de uma empresa privada, que recebe os resíduos sólidos do município de Montes Claros.

Figura 6: Ponto de acondicionamento dos resíduos do prédio



3.4 PROPOSIÇÕES

A elaboração da proposta de gerenciamento para os resíduos provenientes do prédio-sede da Prefeitura de Montes Claros se deu através da análise dos dados levantados acima explicitados, e de

aspectos técnicos, operacionais e sociais que serviram como parâmetro comparativo de decisão de escolha.

3.4.1 EDUCAÇÃO AMBIENTAL

Apesar de alguns esforços da administração da prefeitura em iniciar um programa de coleta seletiva no prédio, não houve sucesso por parte da comunidade de servidores e demais usuários. Isso se deve à falta de conscientização e orientação. Logo, propõe-se que, antecedendo à execução das orientações sobre o gerenciamento adequado, seja iniciado um processo participativo e qualificado de educação ambiental dos funcionários e contribuintes respectivamente, com o intuito de sensibilizar e fomentar ações e reflexões relacionadas ao manejo de resíduos sólidos.

É importante que o presente estudo seja apresentado aos funcionários para que todos tenham o conhecimento de todas as etapas do plano de gerenciamento e sejam orientados sobre a problemática dos resíduos, princípios do plano e meios para torná-lo efetivo no dia a dia. Também devem ser alertados sobre os riscos dos resíduos perigosos, apesar de não ter sido encontrados durante a pesagem, bem como proceder se acidentalmente ter contato com esses.

O primeiro treinamento deve ser ministrado pela autora e orientadora deste trabalho com o apoio e supervisão do Departamento de Serviços Gerais da Prefeitura de Montes Claros, em seguida deve ser repetido pela gerência do departamento no mínimo uma vez por ano.

3.4.2 GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

3.4.2.1 RESÍDUOS CLASSE II - NÃO PERIGOSOS

a) Proposta para minimização

Sugere-se que prossiga com a cultura de reutilizar os papeis descartáveis como rascunhos e, só depois de usados os dois lados que esses sejam descartados no recipiente para recicláveis. Quanto aos memorandos, circulares, ofícios e qualquer outro tipo de comunicado interno, sugere-se seu envio via correio eletrônico (e-mail), a fim de reduzir o consumo de papel e, consequentemente, geração de resíduos. Recomenda-se também:

- substituição dos copos descartáveis por copos de uso pessoal devidamente identificados, ficando o uso de descartáveis apenas para os visitantes;

- implantação de uma central de triagem temporária dos resíduos para segregação correta enquanto os usuários sejam orientados e se adaptam ao plano.

b) Segregação e acondicionamento interno

Definiu-se que os resíduos serão segregados em materiais recicláveis (papel/papelão, metal, vidro) e, os resíduos orgânicos foram considerados como rejeitos, porque a prefeitura possuía um local adequado para a compostagem dos orgânicos ou alguma associação de catadores do município especializada nesse tipo de destinação. Para o acondicionamento, propõe-se que os recipientes seletivos nos *halls* de cada andar e no interior de todas as secretarias sejam um de cor verde para os materiais recicláveis e rejeitos de cor marrom, ambos devidamente identificados com nomes. Tal especificação deve ser claramente introduzida a comunidade de servidores no programa de educação ambiental proposto pelo presente estudo.

3.4.2.2 RESÍDUOS CLASSE I - PERIGOSOS

Embora não tenham aparecido na amostra levantada, sabe-se que também são gerados no prédio pilhas e baterias, lâmpadas, entre outros resíduos perigosos que devem ser segregados e acondicionados em local distinto dos demais resíduos. Sugere-se que a coleta e o transporte desses resíduos aconteçam de forma adequada e segura, sem causar danos a embalagem e, conseqüentemente, à saúde do funcionário responsável pela coleta ou ao ambiente.

Propõe-se também a aquisição de um container exclusivo para o armazenamento dessa classificação de resíduos conforme determina a ABNT NBR 10004:2004 e é relevante ressaltar a importância do uso de EPIs como luvas, botas, máscara e roupa impermeável para manejo deste material.

3.5 ESTABELECIMENTO DE PRIORIDADE DE METAS

Na Tabela 1, tem-se o resumo das proposições do estudo e apresenta um plano de ação para correção de falhas com base no método 5W2H, incluindo as etapas essenciais para redução da geração, o descarte adequado conforme o tipo de resíduo e, por fim, a disposição final adequada dos resíduos.

Tabela 1: Plano de ação 5W2H para resolução das falhas.

<i>What</i>	<i>Why</i>	<i>How</i>	<i>When (prazo)</i>	<i>Where</i>	<i>Who</i>	<i>How Much</i>
Dificuldade para implantar iniciativas de gerenciamento adequado dos resíduos	Falta de conscientização dos servidores	Processo de educação ambiental e treinamento	2 anos	Prédio da Prefeitura de Montes Claros	Autora e orientadora deste estudo	-
Grande geração de resíduos classificados como papel	Atividade geradora predominante de escritório	Reuso de documentos com verso disponível para rascunhos e adoção de correio eletrônico para comunicação interna	1 ano	Prédio da Prefeitura de Montes Claros	Todas as secretarias	-
Grande geração de resíduos classificados como plástico	Uso comum e diário de copos e sacolas plásticas	Adoção de copos de uso pessoal devidamente identificados	1 ano	Prédio da Prefeitura de Montes Claros	Todas as secretarias	-
Falta de padronização para descarte de resíduos	Falta de conscientização dos servidores	Compra e instalação de coletores e <i>containers</i>	3 anos	Prédio da Prefeitura de Montes Claros	Setor de Compras	R\$ 32105,84
Falta de padronização para descarte de resíduos	Falta de conscientização dos servidores	Implantação de central de triagem temporária para segregação correta enquanto os usuários sejam orientados e se adaptam ao plano	2 anos	Prédio da Prefeitura de Montes Claros	Departamento de Serviços Gerais	-
Destinação final incorreta dos resíduos recicláveis gerados	Atrasos administrativos	Destinação dos resíduos recicláveis a Associação de Catadores responsável	1 ano	Associação de Catadores responsável	Departamento de Serviços Urbanos	-

É importante ressaltar que o estudo dos resíduos gerados deve ser realizado periodicamente, porque sua composição e densidade podem alterar com o passar dos anos e com o incentivo a modificar a educação ambiental da comunidade do prédio. Desta forma, a gestão poderá tomar decisões adequadas de acordo com os hábitos.

4 CONCLUSÃO

O gerenciamento dos resíduos sólidos é uma tarefa complexa, porque engloba um conjunto de fatores operacionais, técnicos e econômicos. Mas, paralelo a isso, para uma instituição pública representa grande impacto positivo na cultura e saúde dos seus funcionários, no meio ambiente e até no planejamento orçamentário. Com base nas discussões apresentadas, conclui-se que a sede da Prefeitura de Montes Claros não possui muitos obstáculos para se tornar um exemplo de organização sustentável para outras instituições e para a própria sociedade montesclarenses.

Já existem iniciativas de minimização de geração e os servidores possuem grande abertura para novas propostas, mas para avançar é preciso uma gestão mais incisiva. O ponto considerado mais problemático são os resíduos recicláveis que seguem sendo destinados ao aterro sanitário, enquanto existe um número significativo de Associações de Catadores disponíveis para realizar a destinação correta. Nota-se ainda a necessidade de alavancar uma melhor solução para os resíduos orgânicos do prédio, como a compostagem em alguma área disponível da instituição para servir ao prédio e, posteriormente, todo o município.

Com o plano de ação elaborado para gerenciamento adequado dos resíduos, apresenta-se soluções eficientes para melhor manejo dos resíduos recicláveis gerados e potencial para diminuir o volume de rejeitos enviados ao aterro sanitário municipal que, conseqüentemente, acarretará em aumentar a vida útil do mesmo, em economizar verbas públicas que seriam a ele direcionadas e em movimentação de mais renda para as Associações de Catadores. Ressalta-se que, para a implementação efetiva do plano de ação elaborado, são imprescindíveis investimentos cuja prioridade deverá ser entendida e planejada pela liderança municipal.

REFERÊNCIAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR nº 10004 -Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro. 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR nº 11174 - Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e III - inertes. . Rio de Janeiro. 1990.

BRASIL, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, [2010]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 13 jul. 2021.

BRASIL, Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2010. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para [...] autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Brasília: Presidência da República, [2020]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 04 ago. 2021.

LIMA, J. D. Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. Rio de Janeiro. ABES, 267 p. 2002.

MARSARO, G. C. S. Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de um Shopping Center de grande porte do estado de Goiás. 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MINAS GERAIS. Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, [2009].

Disponívelem:https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?num=18031&ano=2009&tipo=LEI&aba=js_textoAtualizado. Acesso em: 23 jun. 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. ICLEI – Brasil. Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação. Brasília, 2012.

MONTES CLAROS. Lei nº 5.080, de 10 de setembro de 2018. Dispõe sobre a limpeza urbana, seus serviços e o manejo de resíduos sólidos urbanos no município e dá outras providências. Montes Claros: Câmara Municipal, [2018]. Disponível em: <https://portal.montesclaros.mg.gov.br/lei/lei-5080-de-10-de-setembro-de-2018>. Acesso em: 24 jun. 2021.

MONTES CLAROS. Decreto nº 3.918, de 06 de novembro de 2019. Dispõe sobre a implantação da coleta seletiva nos prédios públicos sob responsabilidade da administração direta e indireta do município de Montes Claros. Montes Claros: Prefeitura Municipal de Montes Claros, [2019]. Disponível em: <https://portal.montesclaros.mg.gov.br/decreto/com-numero/decreto-n-3918-06-de-novembro-de-2019>. Acesso em: 07 abr. 2021.

REIS, M. S. et al. Plano de Gestão de Resíduos Sólidos do Centro Tecnológico – PGRS, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO.Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, 2019.

Capítulo 6



10.37423/230407644

OSCULATORY METHOD FOR ROOT-FINDING

Sérgio Mário Lins Galdino

Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco

Jornandes Dias da Silva

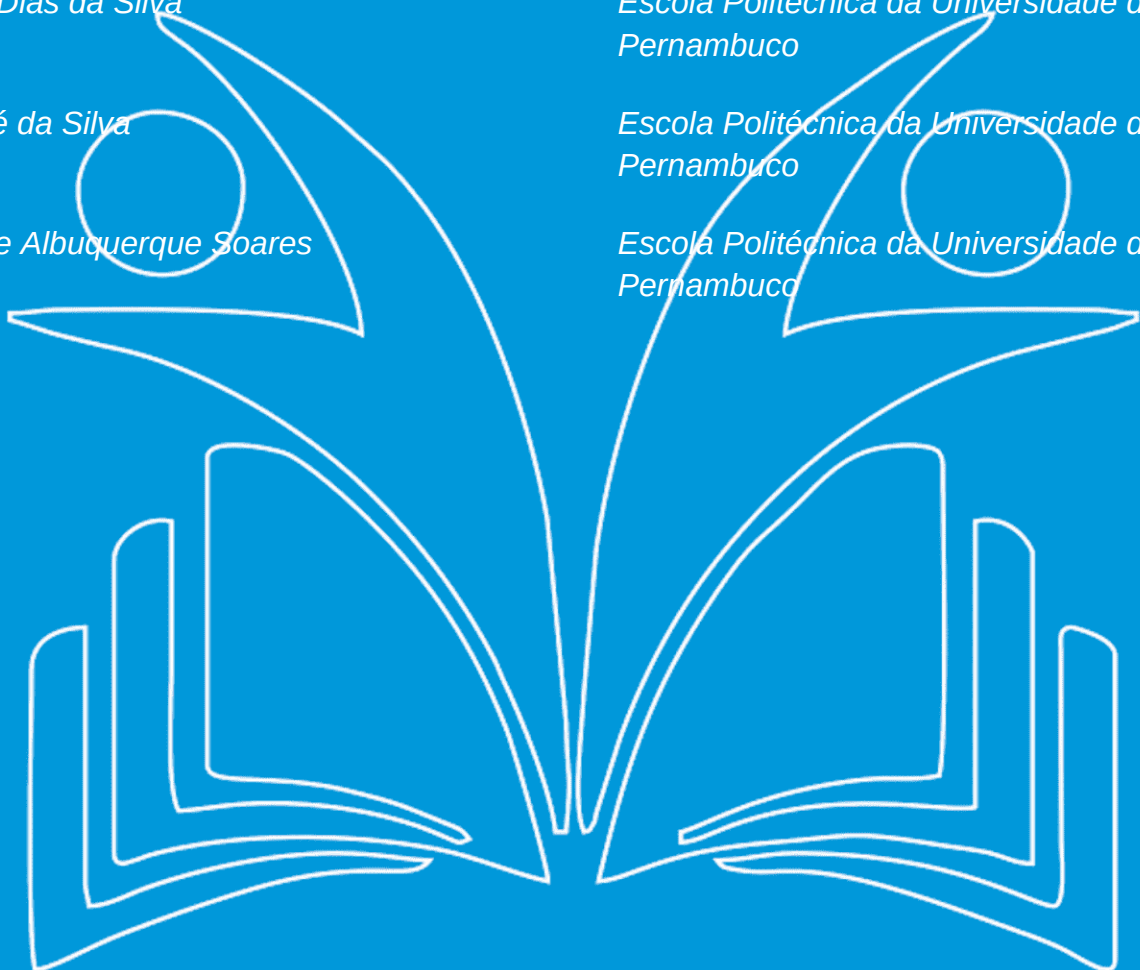
Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco

Cícero José da Silva

Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco

Willames de Albuquerque Soares

Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco



Abstract: In this paper algorithms for finding zeros of nonlinear equation is presented. We focus on the problem of finding simple zeros of $f(x)$ in a given finite, from an initial closed interval $[a, b]$ using the new, "supposed", Osculatory quadratic interpolation methods. The classical Muller root finding algorithm is a root polishing method. Here we describe the Muller and Osculatory bracketing algorithms.

Keywords: numerical methods, root-finding, nonlinear equations.

1 INTRODUCTION

Silver bullet for a root find algorithm is not the problem. Well that's the question, isn't it!

Many of the problems in Sciences and Engineering includes find a real root of a nonlinear equation $f(x) = 0$.

The regula falsi, method of false position, false position method, or method of chords is a very old method for solving an equation with one unknown, that, in modified form, is still in use. Versions of the method predate the advent of algebra and the use of equations.

Muller's method is an extension of the Secant Method, which constructs at every iteration a line through two points on the graph of $f(x)$. The secant method begins with the two initial approximations x_0 and x_1 and determines the next approximation x_2 as the intersection of the x-axis with the line through $(x_0, f(x_0))$ and $(x_1, f(x_1))$. Instead, Muller's method uses the three initial approximations x_0, x_1, x_2 and determines the next approximation x_3 by considering the intersection of x-axis with the parabola through $(x_0, f(x_0))$, $(x_1, f(x_1))$ and $(x_2, f(x_2))$ [1]. This method was first presented by D.E. Muller in 1956 [2]. The power of Muller method comes from the fact that it finds the complex roots of the functions. Muller's method is the standard root-polishing algorithm based on quadratic interpolation. In this paper we consider the problem of finding simple zeros of $f(x)$ in a given finite, closed interval $[a, b]$. The approximated value of the root is then obtained by quadratic interpolation of $y(x)$ instead of $f(x)$. Bracketing methods determine successively smaller intervals (brackets) that contain a root. They generally use the intermediate value theorem, which affirm that if a continuous function has values of opposite signs at the end points of an interval, then the function has at least one root in the interval. We focus on the case of one isolated zero in $[a, b]$ using the new, "supposed", Osculatory quadratic interpolation methods.

2 CONSTRUCTION OF NOVEL OSCULATORY METHODS

Our Osculatory quadratic interpolation methods was inspired on Akima cubic interpolation [3].

2.1 INTERPOLATION BETWEEN A PAIR OF POINS

We express a portion of the curve between a pair of data points in such a way that the curve will pass through the two points and will have at one point the slope determined by the procedure described in section 2.4. Since we have three conditions for determining the polynomial for an interval between two points (x_1, y_1) and (x_3, y_3) , i.e.

$$\begin{aligned} y(x) = y_1 \quad \text{and} \quad \frac{dy}{dx} = t_1 \quad & \text{at } x = x_1 \\ y(x) = y_3 \quad & \text{at } x = x_3 \end{aligned} \quad (1)$$

and

$$\begin{aligned} y(x) = y_1 \quad & \text{at } x = x_1 \\ y(x) = y_3 \quad \text{and} \quad \frac{dy}{dx} = t_3 \quad & \text{at } x = x_3 \end{aligned} \quad (2)$$

where t_1 and t_3 are the slopes at each point, respectively, two second-degree polynomials can uniquely be determined. Therefore, we assume that the curve between a pair of points can be expressed by a polynomial of, at most, degree two.

Furthermore, it should be stressed that using four conditions for determining the polynomial for an interval between two points (x_1, y_1) and (x_3, y_3) with two slopes at the two points t_1 and t_3 , a third-degree polynomial can be uniquely determined [3].

2.2 OSCULATORY A

The polynomial, though uniquely determined from two points, (x_1, y_1) and (x_3, y_3) , and one slope t_1 at x_1 point (1), can be written in several ways. Here we shall give the following form:

$$\begin{aligned} y(x) &= p_0 + p_1 \cdot (x - x_1) + p_2 \cdot (x - x_1)^2 \\ y'(x) &= p_1 + 2 \cdot p_2(x - x_1) \end{aligned} \quad (3)$$

From (1) we get

$$\begin{aligned} p_0 &= y_1 \\ p_1 &= t_1 \\ y_3 &= y_1 + (x_3 - x_1) \cdot t_1 + p_2 \cdot (x_3 - x_1)^2 \\ p_2 &= \frac{y_3 - y_1 - (x_3 - x_1) \cdot t_1}{(x_3 - x_1)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 OSCULATORY- B

The polynomial, though uniquely determined from two points, (x_1, y_1) and (x_3, y_3) , and one slope t_3 at x_3 point (2), will be written in the following form:

$$\begin{aligned} y(x) &= p_0 + p_1 \cdot (x - x_3) + p_2 \cdot (x - x_3)^2 \\ y'(x) &= p_1 + 2 \cdot p_2(x - x_3) \end{aligned} \quad (5)$$

From (2) we get

$$\begin{aligned} p_0 &= y_3 \\ p_1 &= t_3 \\ y_1 &= y_3 + (x_1 - x_3) \cdot t_3 + p_2 \cdot (x_1 - x_3)^2 \\ p_2 &= \frac{y_1 - y_3 - (x_1 - x_3) \cdot t_3}{(x_1 - x_3)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 SLOPE OF THE CURVE

In the osculatory interpolation, the determination of the slope involves only three points, i.e. the data point in question as a center point and two neighboring data points [3]. It is assumed that the slope of the desired curve at the data point is equal to the slope at the same point of the curve of the second-degree polynomial passing through the three points involved. From the three data points given, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , and (x_3, y_3) , the slope t at the center point (x_2, y_2) is determined by

$$\begin{aligned} t(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3) &= \frac{[(x_2 - x_1)^2(y_3 - y_2) + (x_3 - x_2)^2(y_2 - y_1)]}{[(x_2 - x_1)^2(x_3 - x_2) + (x_3 - x_2)^2(x_2 - x_1)]} \\ &= \frac{[(x_3 - x_2)m_1 + (x_2 - x_1)m_2]}{[(x_3 - x_2) + (x_2 - x_1)]}, \end{aligned}$$

where m_1 and m_2 are the slopes of line segments $\overline{12}$ and $\overline{23}$, respectively.

$$\begin{aligned}
 t_1 &= t(x_2, y_2, x_1, y_1, x_3, y_3) \\
 t_1 &= \frac{(x_1 - x_2)^2 \cdot (y_3 - y_1) + (x_3 - x_1)^2 \cdot (y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)^2 \cdot (x_3 - x_1) + (x_3 - x_1)^2 \cdot (x_1 - x_2)}; \\
 t_1 &= \frac{(x_1 - x_2) \cdot \frac{(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} + (x_3 - x_1) \cdot \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}}{(x_1 - x_2) + (x_3 - x_1)}; \\
 t_1 &= \frac{(x_1 - x_2) \cdot \frac{(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} + (x_3 - x_1) \cdot \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}}{(x_3 - x_2)}; \\
 \\
 t_3 &= t(x_1, y_1, x_3, y_3, x_2, y_2) \\
 t_3 &= \frac{(x_3 - x_1)^2 \cdot (y_2 - y_3) + (x_2 - x_3)^2 \cdot (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)^2 \cdot (x_2 - x_3) + (x_2 - x_3)^2 \cdot (x_3 - x_1)}; \\
 t_3 &= \frac{(x_3 - x_1) \cdot \frac{(y_2 - y_3)}{(x_2 - x_3)} + (x_2 - x_3) \cdot \frac{(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)}}{(x_3 - x_1) + (x_2 - x_3)}; \\
 t_3 &= \frac{(x_3 - x_1) \cdot \frac{(y_2 - y_3)}{(x_2 - x_3)} + (x_2 - x_3) \cdot \frac{(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)}}{(x_2 - x_1)};
 \end{aligned}$$

1. Chose one of the quadratic interpolatory polinomial $y(x)$, 1 or 2.

2. Starting from $I_0 = [x_1, x_3]$ interval with the condition $f(x_1) f(x_3) < 0$ we use an intermediate

approximation taken as $x_2 = \frac{(x_1 + x_3)}{2};$

3. Determining x , the value of the root $y(x) = 0$;

$$x = x_1 + \frac{-p_1 \pm \sqrt{p_1^2 - 4 * p_2 * p_0}}{2 * p_2}$$

in which $x \in [x_1, x_3];$

4. Next, we find the closed interval I_1 containing the solution of $f(x) = 0$, as follows;

- (a) if $f(x) \cdot f(x_1) < 0$ then $I_1 = [x_1, x]$;
- (b) if $f(x) \cdot f(x_3) < 0$ then $I_1 = [x, x_3]$;
- (c) if $f(x) \cdot f(x_2) < 0$ then ;
 - i. if $x < x_2$ then $I_1 = [x, x_2]$
 - ii. if $x > x_2$ then $I_1 = [x_2, x]$

Should be noted that the length of I_1 is less than or equal half of original interval I_0 in any case. Updating the initial interval with the shrinking, we repeat the above Osculatory Method to find a new narrowed interval. This progressive shrinking process is repeated until a stopping criterion is reached.

3 THE MULLER BRACKETING METHOD

The classical Muller root finding algorithm is a root polishing method [1]. Here we describe the Muller root bracketing algorithm [4]. From the initial approximations x_1 , x_2 , and x_3 where x_2

$x_2 = \frac{x_1 + x_3}{2}$ we put the quadratic interpolatory polinomial that passe through the three points $(x_1, f(x_1))$, $(x_2, f(x_2))$, and $(x_3, f(x_3))$ to be

$$y(x) = a \cdot (x - x_3)^2 + b \cdot (x - x_3) + c$$

Where $(x_1, f(x_1))$, $(x_2, f(x_2))$, and $(x_3, f(x_3))$, we have

$$y(x_1) = a \cdot (x_1 - x_3)^2 + b \cdot (x_1 - x_3) + c = f(x_1),$$

$$y(x_2) = a \cdot (x_2 - x_3)^2 + b \cdot (x_2 - x_3) + c = f(x_2),$$

$$y(x_3) = c = f(x_3),$$

and we obtain

$$\begin{aligned}
 h &= x_3 - x_1, \\
 s_1 &= y(x_1) - y(x_3), \\
 s_2 &= y(x_2) - y(x_3), \\
 a &= \frac{(2 \cdot s_1 - 4 \cdot s_2)}{h^2}, \\
 b &= \frac{(s_1 - 4 \cdot s_2)}{h}, \\
 c &= y(x_3).
 \end{aligned}$$

Table 1: Used functions for numerical comparing the root-finding methods.

n	$f_n(x)$	root ¹
1	$x^3 - 1$	1.0
2	$x^2(x^2/3 + \sqrt{2} \cdot \sin(x)) - \sqrt{3}/18$	0.3994222917109681945143142
3	$11x^{11} - 1$	0.8041330975036643237414635
4	$x^3 + 1$	-1.0
5	$x^3 - 2x - 5$	2.094551481542326591482387
6	$2 \cdot x \cdot e^{-n} + 1 - 2 \cdot e^{-n \cdot x}, (n = 5)$	0.1382571550568240759336382
7	$2 \cdot x \cdot e^{-n} + 1 - 2 \cdot e^{-n \cdot x}, (n = 10)$	0.06931408868702347330301405
8	$2 \cdot x \cdot e^{-n} + 1 - 2 \cdot e^{-n \cdot x}, (n = 20)$	0.03465735902085385136237324
9	$[1 + (1 - n)^2] \cdot x - (1 - n \cdot x)^2, (n = 5)$	0.03840255184062190047805165
10	$[1 + (1 - n)^2] \cdot x^2 - (1 - n \cdot x)^2, (n = 10)$	0.009900009998000499860041987
11	$[1 + (1 - n)^2] \cdot x^2 - (1 - n \cdot x)^2, (n = 20)$	0.002493750039062011726379261
12	$x^2 - (1 - x)^n, (n = 5)$	0.3459548158482420179582044
13	$x^2 - (1 - x)^n, (n = 10)$	0.2451223337533072399504911
14	$x^2 - (1 - x)^n, (n = 20)$	0.1649209572764409523908500
15	$[1 + (1 - n)^4] \cdot x - (1 - n \cdot x)^4, (n = 5)$	0.003617108178904063540768351
16	$[1 + (1 - n)^4] \cdot x - (1 - n \cdot x)^4, (n = 10)$	0.0001514713347838913936418667
17	$[1 + (1 - n)^4] \cdot x - (1 - n \cdot x)^4, (n = 20)$	0.000007668595122185336697465608
18	$e^{-n \cdot x} \cdot (x - 1) + x^n, (n = 5)$	0.5161535187579335664275878
19	$e^{-n \cdot x} \cdot (x - 1) + x^n, (n = 10)$	0.5395222269084158431708662
20	$e^{-n \cdot x} \cdot (x - 1) + x^n, (n = 20)$	0.5527046666784877872399358
21	$x^2 + \sin(x/n) - 1/4, (n = 5)$	0.4099920179891371316212584
22	$x^2 + \sin(x/n) - 1/4, (n = 10)$	0.4525091455776412254580672
23	$x^2 + \sin(x/n) - 1/4, (n = 20)$	0.4756268485960624131198423

1- Obtained with fsolve Maple function using 25 digits.

4 NUMERICAL RESULTS

Now we present the results of numerical experiments with root find methods. The battery of test functions are listed in Table 1. These nonlinear equations are well known (simple zeros). They are from a series of published examples (see [5, 6, 7, 8, 9]). The number of iterations is used for comparison. The Table 2 list the number of iterations for each individual root from the initial $[a, b]$ interval from: Osculatory-A, m Osculatory-b, and Muller root-finding bracketing algorithm versions.

The total number of interactions, Table 2, showed that all algorithms has the same performance. A very little difference may be caused by rounding errors from floating point arithmetic.

Raw Material of Table 2: <https://github.com/GaldinoSergio/Root-Finding>

Table 2: Number of interactions for each root-finding algorithm.

f_n	Osculatory-A Bracketing	Osculatory-B Bracketing	Müller Bracketing	$[a,b]^1$
f_1	4	5	4	$[0.6, 1.5]$
f_2	7	6	6	$[0.1, 1]$
f_3	7	7	7	$[0.1, 1]$
f_4	5	5	5	$[-1.8, -0.5]$
f_5	5	5	5	$[2, 3]$
f_6	5	5	5	$[0, 1]$
f_7	6	6	6	$[0, 1]$
f_8	6	7	6	$[0, 1]$
f_9	2	2	2	$[0, 0.2]$
f_{10}	2	2	2	$[0, 0.2]$
f_{11}	2	2	2	$[0, 0.2]$
f_{12}	6	6	6	$[0, 0.9]$
f_{13}	7	7	7	$[0, 0.9]$
f_{14}	8	7	8	$[0, 0.9]$
f_{15}	4	4	4	$[0, 0.2]$
f_{16}	3	3	3	$[0, 0.2]$
f_{17}	4	4	4	$[0, 0.2]$
f_{18}	6	6	6	$[0, 1]$
f_{19}	8	8	8	$[0, 1]$
f_{20}	9	9	9	$[0, 1]$
f_{21}	4	4	4	$[0, 1]$
f_{22}	3	4	4	$[0, 1]$
f_{23}	3	3	3	$[0, 1]$
Σ	116	118	116	

1 - Initial interval with simple zeros $\in [a,b]$.

5 CONCLUSION

The numerical results empirically show that all methods gave us similar performance. This should be explained by numerical analysis. The Osculatory-A and Osculatory-B methods should be have a more deep investigation. Future studies can include: a) root polishing algorithm versions; b) new methods of slop curve computation.

REFERENCES

[1]W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, and B. Flannery, Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, 3rd ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2007.

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XIII



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE