



ENGENHARIA MILITAR

**Mobilidade,
Contramobilidade e
Proteção**

Localização estratégica de equipamentos de monitoramento eletrônico para interceptação de fluxo evasivo em malhas rodoviárias - Pág 5

Proposta de modelos de otimização para movimentações do pessoal militar do Exército Brasileiro - Pág 18

A influência do estado de maturação de componentes na sua aprovação em projetos de novos produtos na indústria de automóveis - Pág 26

Avaliação de variáveis agronômicas e imagens do satélite Sentinel-2 para estimativa de produtividade da cana-de-açúcar a partir do algoritmo Random Forest - Pág 35

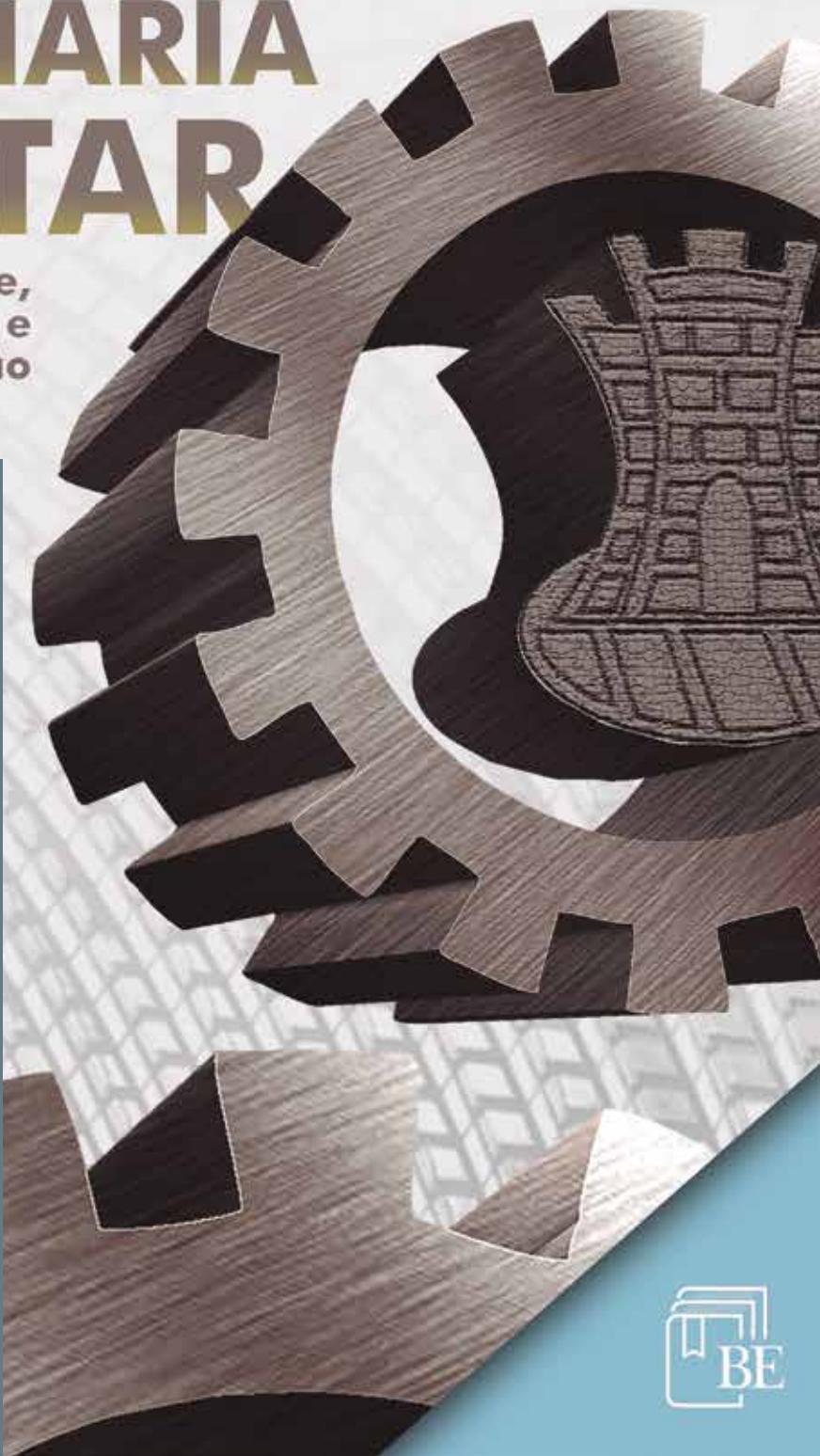
Caracterização microestrutural de niobatos de sódio pelo processo sol-gel para uso na engenharia tecidual - Pág 42

Escória de aciaria como material precursor na geopolimerização - Pág 49

Influência da adição de carbeto de titânio na densificação e microestrutura de cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e fluoreto de lítio - Pág 55

Proposta de metodologia para avaliação temporal de estações de redes de nivelamento empregando a Teoria dos Grafos - Pág 62

Avaliação dos principais modelos de admitância da sonda coaxial aberta para medidas de permissividade elétrica - Pág 70





REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

COMANDANTE DO EXÉRCITO:

Gen Marco Antônio Freire Gomes

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA:

Gen Ex Guido Amin Naves

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO E CULTURA DO EXÉRCITO:

Gen Ex Flávio Marcus Lancia Barbosa

DIRETOR DA BIBLIOTECA DO EXÉRCITO:

Cel Art Eduardo Biserra Rocha

COMANDANTE DO INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA:

Gen Bda Juraci Ferreira Galdino

DIREÇÃO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

- Diretor: Cel Art Eduardo Biserra Rocha – BIBLIEx • Editor executivo: Cel RI Leocir Dal Pai – BIBLIEx

CORPO REDATORIAL:

- Editor geral: Marcelo de Miranda Reis – IME (SE/2) • Editor adjunto: Paulo Henrique Coelho Maranhão – IME (SE/4) • Engenharia Civil, Transportes e Ciências Ambientais: Filipe Almeida Corrêa do Nascimento – IME (SE/2) • Engenharia Nuclear: Sérgio de Oliveira Vellozo – IME (SE/7) • Engenharia Elétrica: Antônio Eduardo Carrilho da Cunha – IME (SE/3) • Engenharia Mecânica: André Luiz Tenório Rezende – IME (SE/4) • Ciência dos Materiais: André Ben-Hur da Silva Figueiredo – IME (SE/8) • Ciência da Computação: Paulo Cesar Salgado Vidal – IME (SE/9) • Engenharia de Defesa: Giuseppe Miceli Junior – IME (SE/10) • Engenharia Química e Química: Kátia Regina de Souza – IME (SE/5) • Engenharia Cartográfica: Matheus Pinheiro Ferreira – IME (SE/6) • Outras áreas: Aderson Campos Passos – IME (SE/9).

EDITORES ASSOCIADOS EXTERNOS:

- Dr. André Fenili – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP • Dr. Artur Ziviani – Lab. Nacional de Computação Científica (LNCC), Petrópolis, RJ • Dr. Fernando Fachini Filho – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP • Dr. José Carlos Costa da Silva Pinto – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. José Carlos Maldonado – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP • Dr.ª Júlia Célia Mercedes Strauch – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, RJ • Dr. Luiz Pereira Calôba – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Richard Magdalena Stephan – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Webe João Mansur – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ • Dr. Carlos Alberto Nunes Consenza – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

ADMINISTRAÇÃO, REVISÃO, PROGRAMAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO:

- Coordenador: Rubenildo Python de Barros • Administração e OJS: Vanessa Ferreira Belchior, Lucas Sebastião de Paula, José Welton Moreira • Revisores: Giana Elvira de Oliveira Marquês; Junielles de Oliveira Seipel; Diego Ribeiro Ferreira Serpa • Diagramador: Luiz Tadeu Carqueija Mota

PROJETO GRÁFICO, IMPRESSÃO E DISTRIBUIÇÃO:

BIBLIEx



Desde 1949

"A Gráfica do Exército" - Compromisso com a Qualidade

Impresso na Gráfica do Exército

Al. Mal. Rondon - Setor de Garagens - QGEx - SMU - CEP: 70630-901 - Brasília - DF

Tel: 3415-4367 - Site: <http://www.graficadoexercito.eb.mil.br>

E-mail: divcmcl@graficadoexercito.eb.mil.br



REVISTA MILITAR de
CIÊNCIA e TECNOLOGIA

REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - Volume XXIX

4º Trimestre de 2022

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

EDITORA (BIBLIEx)

Palácio Duque de Caxias - Praça D. de Caxias, 25

3º andar - Ala Marcílio Dias

Centro - Rio de Janeiro-RJ

CEP 20.221-260

Tel.: (21) 2519-5707

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA - IME

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha -

Rio de Janeiro-RJ - CEP 22.290-270 -

Tel.: (21) 2546-7115

Website: <http://rmct.ime.eb.br> - Email: rmct@ime.eb.br

ACESSE NOSSAS REVISTAS DIGITAIS



Nossa capa:

Homenagem ao Corpo de Engenheiros



PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL

EDITORIAL



Caros leitores interessados na pesquisa e no desenvolvimento científico-tecnológico relacionados à Estratégia Nacional de Defesa, apresentamos a quarta edição do ano de 2022.

Na edição do último trimestre, apresentamos ao nosso público dez artigos, que trataram de assuntos de cinco áreas do conhecimento: Ciências dos Materiais, Engenharia de Computação, Engenharia Civil, Engenharia Cartográfica e Engenharia Elétrica, com destaque para pesquisa sobre a adoção de aditivos, como o pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) e o fluoreto de lítio (LiF), na proteção balística, resultando em melhorias na sinterização e densificação do material final.

Nessa edição, trazemos aos nossos leitores dez interessantes artigos com temas em cinco grandes áreas do conhecimento. A pesquisa na área de Engenharia Civil apresentou uma proposta de modelos de otimização para movimentações do pessoal militar do Exército Brasileiro. Na busca do estabelecimento e da manutenção de poder pelo estudo do Comando e Controle foi desenvolvido o artigo sobre localização estratégica de equipamentos de monitoramento eletrônico para interceptação de fluxo evasivo em malhas rodoviárias. No campo da Engenharia Mecânica foi estudada a influência do estado de maturação de componentes na sua aprovação em projetos de novos produtos na indústria de automóveis. A Engenharia Cartográfica apresentou a avaliação de variáveis agronômicas e imagens do satélite Sentinel-2 para estimativa de produtividade da cana-de-açúcar a partir do algoritmo Random Forest e uma proposta de metodologia para avaliação temporal de estações de redes de nívelamento empregando a Teoria dos Grafos. A área de Ciências dos Materiais nos brindou com a caracterização microestrutural de niobatos de sódio pelo processo sol-gel para uso na engenharia tecidual; bem como com o estudo sobre Escória de aciaria como material precursor na geopolimerização. Na pesquisa de materiais para Indústria de defesa ainda foi analisada a influência da adição de carbeto de titânio na densificação e microestrutura de cerâmicas de alumina dopadas com nióbio e fluoreto de lítio. Na pesquisa da Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações foram avaliados os principais modelos de admitância da sonda coaxial aberta para medidas de permissividade elétrica.

Os periódicos científicos trazem novas metodologias e aplicações que proporcionam melhoria a diversos processos e produtos. Esperamos que nossos artigos ajudem a academia na busca pela solução de problemas relevantes para a Sociedade e a Força Terrestre.

Boa leitura!

Marcelo de Miranda Reis

SUMÁRIO

3

Localização estratégica de equipamentos de monitoramento eletrônico para interceptação de fluxo evasivo em malhas rodoviárias
Camila Quevedo Sobrosa, Lucas Franceschi, Gustavo Garcia Otto, Amir Mattar Valente.

16

Proposta de modelos de otimização para movimentações do pessoal militar do Exército Brasileiro
Dayanna Rodrigues da Cunha Nunes, Orivalde Soares da Silva Júnior, Renata Albergaria de Mello Bandeira, Paulo Afonso Lopes da Silva, Jeronymo Mota Alves de Carvalho, Yuri Façanha Bezerra

24

A influência do estado de maturação de componentes na sua aprovação em projetos de novos produtos na indústria de automóveis.
João Paulo Dourado Rui Silva.

33

Avaliação de variáveis agronômicas e imagens do satélite Sentinel-2 para estimativa de produtividade da cana-de-açúcar a partir do algoritmo Random Forest.
Rafaella Pironato Amaro, Ana Cláudia dos Santos Luciano.

40

Caracterização microestrutural de niobatos de sódio pelo processo sol-gel para uso na engenharia tecidual
Suzana Noronha Ferreira Ribeiro Amal Elzubair Eltom, Marcelo Henrique Prado da Silva

47

Escória de aciaria como material precursor na geopolimerização
Eliziane Medeiros Santos, Flávio J. H. T. v. Ramos, Maria de Fátima V. Marques, Ricardo P. Weber

53

Influência da adição de carbeto de titânio na densificação e microestrutura de cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e fluoreto de lítio
Pedro Henrique Poubel Mendonça da Silveira, Matheus Pereira Ribeiro, Thuane Teixeira da Silva, Pedro Craveiro Rodrigues dos Santos Credmann, Paulo Roberto Rodrigues de Jesus, Alelson Vieira Gomes

60

Proposta de metodologia para avaliação temporal de estações de redes de nivelamento empregando a Teoria dos Grafos
Jessica Caroline dos Santos Siqueira, Leonardo Castro de Oliveira, Ivanildo Barbosa

68

Avaliação dos principais modelos de admitância da sonda coaxial aberta para medidas de permissividade elétrica.
Daniel Henrique da Silva Souza, José Carlos Araujo dos Santos

Localização estratégica de equipamentos de monitoramento eletrônico para interceptação de fluxo evasivo em malhas rodoviárias

Camila Quevedo Sobrosa^a, Lucas Franceschi^b, Gustavo Garcia Otto^c, Amir Mattar Valente^d,
Laboratório de Transportes e Logística - LabTrans/UFSC

^acamilaquevedosobrosa@gmail.com

^bfranceschi.lucas@gmail.com

^cotto.gus@gmail.com

^damir.valente@ufsc.br

RESUMO: No âmbito da fiscalização rodoviária, os equipamentos automatizados são capazes de ler as características dos veículos passantes, incluindo sua identificação, medidas, velocidade e peso. Embora tais equipamentos possam ser utilizados para criar malhas de monitoramento, os condutores podem, em muitos contextos, planejar suas rotas de forma a evitar a passagem por esses sistemas, sabendo a sua localização. Fluxos que podem apresentar tais tendências evasivas são, por exemplo, veículos intencionalmente sobreacarregados, furtados ou executando outras atividades ilegais. O impacto negativo desses fluxos pode ser minimizado com o uso de modelos de localização que considerem a tendência evasiva. Visto isso, este artigo apresenta um estudo de caso, no qual aplica dois modelos, que consideram o Problema de Captura de Fluxo Evasivo (EFCP), na malha rodoviária do estado do Pará. Como resultado dessa aplicação, conclui-se que dois postos de fiscalização de peso, posicionados de maneira otimizada, são capazes de reduzir satisfatoriamente o dano causado por veículos com sobre peso na infraestrutura da malha analisada

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de transporte. Fluxos evasivos. Fiscalização. Interceptação. Malhas viárias.

ABSTRACT: In the context of road enforcement, automated electronic equipment are capable of reading the characteristics of passing vehicles, including their identification, measurements, speed and weight. Although such equipment can be used to create monitoring loops, drivers can, in many contexts, plan their routes in order to avoid passing through these systems, knowing their location. Flows that may exhibit such evasive tendencies are, for example, vehicles intentionally overloaded, stolen or carrying out other illegal activities. The negative impact of these flows can be minimized by using location models that consider the driver's evasive behavior. In view of this, this article presents a case study, in which it applies two models, which consider the Evasive Flow Capture Problem (EFCP), in the road network of the state of Pará. As a result of this application, it is concluded that two weight inspection posts, optimally positioned, are able to satisfactorily reduce the damage caused by overweight vehicles in the infrastructure of the analyzed network.

KEYWORDS: Transportation systems. Evasive flow. Enforcement. Interceptation. Road networks.

1. Introdução

Veículos automotores em condições ilegais trafegando nas rodovias brasileiras representam diversos tipos de risco à segurança [1], à infraestrutura de transportes [2] e à economia [3]. Tais condições incluem velocidade excessiva, não licenciamento, excesso de peso, transporte de cargas especiais ou perigosas incorretamente acondicionadas, dentre outras situações de ilegalidade. Além disso, no planejamento estratégico dos sistemas de transporte e na gestão

da malha rodoviária, é essencial que se conheça a natureza dos fluxos viários de uma determinada região, para que se possa priorizar investimentos e realizar a fiscalização do tráfego. Ambas as tarefas estão associadas à necessidade de aferir diretamente as características dos veículos em trânsito.

Coletar dados do fluxo rodoviário de maneira direta, no entanto, não é uma tarefa trivial para as entidades brasileiras.

A malha rodoviária do Brasil é extensa, somando 1.719.991 km de rodovias [4]. Mesmo considerando

apenas as rodovias em jurisdição federal, se trata de uma malha de 75.744 km, pela qual passam fluxos dos mais variados tipos, com origens e destinos diversos.

Por isso, a utilização de equipamentos eletrônicos de monitoramento viário possui grande potencial para o controle do tráfego nas rodovias. Esses possuem a capacidade de verificar características importantes dos veículos que passam em um determinado ponto sem que o fluxo seja interrompido. Dentre as funcionalidades desses sensores está a aferição da velocidade [5], a leitura das placas, a medição das dimensões totais do veículo, a pesagem dos eixos em alta velocidade [2] e outros sistemas de identificação veicular [6].

Os condutores que trafegam com seus veículos em situação ilegal, porém, normalmente fazem isso de forma consciente [7, 8, 9]. Isso pois, transitar com sobre peso, ou sem o acondicionamento correto de cargas perigosas, por exemplo, pode trazer lucro ao transportador através da redução de seus custos (tal lucro particular é pago pela sociedade, através de custos mais elevados de manutenção da malha viária e de maiores riscos à segurança nas rodovias). Assim, a partir da instalação de equipamentos de monitoramento e fiscalização, os transportadores em situação ilegal, ao conhecerem a localização desses, buscarão alterar suas rotas, de forma a evitar que seus veículos sejam detectados.

A relação entre a decisão do lanejador da malha – de onde instalar equipamentos de fiscalização – e a decisão do transportador em situação ilegal – de trafegar evitando passar por esses dispositivos, dá origem à formulação do problema matemático de otimização conhecido como problema de captura de fluxos evasivos (*Evasive Flow Capture Problem, EFCP*) [10, 11, 12]. Nessa formulação, se busca identificar as localizações ótimas para instalar sensores de fiscalização de tal forma que o conjunto desses sistemas minimize a existência de rotas não monitoradas.

Através de um planejamento eficiente da distribuição dos sensores de monitoramento pela malha rodoviária, considerando tal tendência evasiva, é possível que seja criada uma “cerca” de dispositivos eletrônicos, através da qual todos os fluxos em uma

determinada região são interceptados pelo menos uma vez. Esse tipo de aplicação possui grande potencial para a inteligência nacional, permitindo que sejam estabelecidos sistemas de fiscalização com grande eficiência e pouca possibilidade de evasão. Além disso, considerar a tendência evasiva não aumenta significativamente o número de equipamentos a serem instalados, mas apenas otimiza a escolha dos locais para priorizar aqueles que geram a maior cobertura dos fluxos [13].

1.1 Metodologia

Com o intuito de realizar o objetivo deste trabalho, aplicação de modelos de localização de equipamentos de fiscalização de peso, foram realizadas duas etapas: revisão sistemática de literatura e implementação e aplicação dos modelos - estudo de caso.

A primeira etapa, revisão narrativa e sistemática de literatura, foi realizada com o propósito de selecionar quais seriam os modelos mais indicados para a aplicação na malha rodoviária brasileira. Nesse contexto, foram coletados trabalhos relacionados aos temas: localização de equipamentos de fiscalização, evasão pela mudança de rota e formulação matemática do EFCP e suas soluções.

Após tal revisão, os métodos propostos por Marković et al. [10] e Arslan et al. [14] foram selecionados para a aplicação prática deste trabalho. Esses foram implementados através da linguagem de programação Python e do uso das bibliotecas PuLP [15] e MIP [16], respectivamente. O primeiro passo dessa implementação foi um estudo minucioso a respeito das equações e peculiaridades dos modelos, a fim de transcrevê-los para a linguagem de programação escolhida. Posteriormente, foram inseridas nos modelos restrições personalizadas, criadas pelos autores com o intuito de adaptar os modelos à realidade das rodovias brasileiras.

Por fim, foi selecionada para o estudo de caso a malha rodoviária do estado do Pará, que mesmo com baixa densidade de rodovias, possui um fluxo de carga relevante para a região norte do Brasil.

2. Revisão sistemática sobre modelos de localização de equipamentos de fiscalização

Diferente da revisão tradicional ou narrativa, a revisão sistemática se trata de uma metodologia mais minuciosa, a qual utiliza métodos sistematizados de busca, com o intuito de avaliar a aplicabilidade e a relevância de cada um dos estudos encontrados. Esse procedimento tem a intenção de minimizar a influência do pesquisador na seleção dos trabalhos de análise, executando um processo de escolha independente da sua opinião pessoal [17].

A primeira etapa deste processo foi a formulação da questão de investigação, a qual direcionou a pesquisa. O enfoque dessa foi abranger o maior número possível de estudos relacionados ao tema e encontrar métodos que utilizassem como parâmetros dados da malha como: volumes de tráfego, número de acidentes, geometria das rodovias, natureza dos fluxos de carga, entre outros.

Posteriormente foram definidos os critérios de exclusão e inclusão de estudos, como a data de publicação (considerados apenas os publicados a partir de 2012), o idioma (inglês ou português), a disponibilidade e a relevância, medida com base na data de publicação e no número de citações. Para a realização dessas buscas foram utilizadas as bases de dados Scopus, Scielo, Web of Science, Springer e EBSCOhost, e definidas as palavras-chave:

- *Placement of automated enforcement equipment;*
- *Evasive flow capturing problem;*
- *Enforcement equipments on Highway; (location OR placement) AND (equipment OR station OR wim OR enforcement) AND (highways R roads OR motorway OR carriage-way OR freeway).*

Após essa busca, foram extraídas informações dos resultados encontrados, como título, autores, código DOI, URL para download, resumo e data de publicação. Posteriormente, foi realizada a seleção das pesquisas através de etapas de filtragem. A primeira delas foi a remoção dos duplicados, que reduziu consideravelmente a quantidade dos considerados relevantes. Feito isso, foram lidos

os títulos, realizada uma pesquisa a respeito do número de citações e descartados os publicados antes de 2019 com menos de 5 citações. Então, foram lidos os resumos e mantidos apenas os realmente coincidentes com o tema e com conteúdo completo disponível. Na **tabela 1** se encontra o número de estudos resultantes de cada etapa de seleção da revisão sistemática.

Tab. 1 - Quantitativo dos resultados obtidos nas etapas de seleção de estudos da revisão sistemática

Etapa	Nº de estudos resultantes
Busca na base de dados	7160
Exclusão dos títulos duplicados	5987
Filtragem pelos títulos relevantes	241
Classificação pelo número de citações e ano de publicação	171
Filtragem pelos resumos relevantes	55
Verificação da disponibilidade dos textos completos	54

Fonte: Os autores.

Portanto, foi realizada a leitura completa dos trabalhos selecionados, observando os métodos utilizados, os temas abordados e os resultados obtidos. Então, 25% das pesquisas corresponderam ao tema desejado, apresentadas na **tabela 2**.

Tab. 2 - Metodologias utilizadas nos estudos encontrados na revisão sistemática.

Referência	Assunto abordado	Metodologia utilizada
[19]	Fiscalização de peso	Processo Hierárquico Analítico

Referência	Assunto abordado	Metodologia utilizada		Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo de caminho mais curto
[14]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo Branch and Cut	[31]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo de caminho mais curto
[11]	Fiscalização de peso	Modelo pessimista de otimização em dois níveis e algoritmo de plano de corte	[10]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e heurística Lagrangiana
[20]	Contagem de fluxo	Algoritmo genético com chaves aleatórias viciadas	[32]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo baseado na relaxação Lagrangeana
[21]	Contagem de fluxo	Algoritmo Branch and Cut e heurística de agrupamento	[33]	Fiscalização de velocidade	Abordagem heurística baseada em algoritmo guloso
[12]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização de dois níveis e algoritmo Karush-Kuhn-Tucker	[34]	Informações sobre tráfego	Implementação de ferramenta sobre tráfego
[22]	Contagem de fluxo	Modelo bayesiano ponderado seletivo	[18]	Fiscalização de peso	Estatísticas descritivas dos dados de estações existentes
[23]	Fiscalização de peso	Processo Hierárquico Analítico	[35]	Fiscalização de peso	Algoritmo heurístico Lagrangiano
[24]	Contagem de fluxo	Meta-heurística colônia de abelhas	[36]	Contagem de fluxo	Meta-heurística colônia de formigas e soluções de Pareto
[25]	Fiscalização de emissão de gases	Modelo de programação não linear e algoritmo genético	[37]	Contagem de fluxo	Algoritmo híbrido progressivo com estrutura de cobertura de conjunto
[26]	Fiscalização de peso	Modelo simplificado de interceptação de fluxos determinísticos	[38]	Contagem de fluxo	Sistema estocástico linear discreto
[27]	Contagem de fluxo	Modelo duplamente estocástico e condicionalmente binomial			
[28]	Localização de patrulhas policiais	Modelo de programação linear inteira mista e algoritmo heurístico			
[29]	Fiscalização de peso	Modelo de otimização em dois níveis e heurística			
[30]	Contagem de fluxo	Modelo de predição híbrida com algoritmo genético			

Fonte: Os autores.

Dentre os estudos selecionados para análise, foi dada maior ênfase aos que tratavam especificamente sobre modelos de otimização da localização de equipamentos de fiscalização de peso, pelo fato de considerarem a tendência evasiva dos motoristas. Conforme uma pesquisa realizada na Polônia a respeito desses sistemas, um dos principais obstáculos enfrentados é a evasão dos motoristas que desejam evitar a vigilância. Isso ocorre principalmente pelo fato de os locais de instalação serem permanentes, o que permite a memorização desses pelos viajantes, os quais tendem a optar por rotas alternativas [18].

Entre esses estudos, destaca-se o modelo de Marković et al. [10], pela formulação matemática do EFCP. Nessa pesquisa, foram formuladas versões determinísticas e estocásticas do EFCP e proposto um modelo de otimização de dois níveis. O modelo de otimização de dois níveis, referentes aos “líderes”, tomadores de decisão, e no segundo nível as equações referentes ao comportamento dos “seguidores”, motoristas, em relação às decisões tomadas pelos “líderes”. Nesse artigo, reduziu-se o modelo de dois níveis para somente um nível, através da premissa de que tanto o líder quanto os seguidores possuem o objetivo de minimizar a distância percorrida pelos veículos em situação ilegal. Com tal redução, obteve-se a solução por meio de uma heurística Lagrangiana.

Outra pesquisa, que utiliza o modelo de otimização de dois níveis como forma de resolver o EFCP, propõe uma abordagem baseada em condições de Karush-Kuhn-Tucker [12]. Os autores afirmam que existe uma distância máxima que os motoristas estão dispostos a percorrer para evadir a fiscalização, o que depende do lucro proveniente da prática da sobrecarga e do custo do desvio realizado. Divergindo dessa teoria, outro estudo [29] supõe que não existe um limite para a distância percorrida com o intuito de evasão. Logo, o modelo proposto neste, independe dos caminhos mais curtos, utilizando uma formulação baseada em enlaces onde as variáveis de decisão são associadas.

Corroborando com tal concepção, encontrou-se um estudo que utiliza o modelo de otimização de dois níveis com um cenário pessimista, supondo que os motoristas podem optar pelos maiores e mais onerosos caminhos a fim de evadir-se da fiscalização [11]. O modelo proposto é resolvido por meio de um algoritmo de plano de corte e os autores afirmam que formulações pessimistas podem evitar uma maior quantidade de danos à rede viária que aquelas que consideram uma limitação do caminho percorrido.

Portanto, existem diversas pesquisas a respeito da localização de fiscalização de peso que utilizam o modelo de otimização de dois níveis, porém, cada

uma com a sua peculiaridade. No caso de Arslan et al. [14], não é necessário o conhecimento prévio sobre a malha viária para a criação do modelo, sendo verificados os caminhos

possíveis durante a solução, à medida em que alternativas de localização são elaboradas. Isso permite que instâncias de diferentes tamanhos possam ser otimizadas.

Como resultado da revisão sistemática, também foram encontrados estudos sobre localização de fiscalização de peso que não utilizam o modelo de dois níveis [19, 23, 26, 35]. Alguns deles [19, 23] propõem processos hierárquicos analíticos para determinar um peso para cada estrada rural, com os seus atributos associados, como: geologia, clima, condições do terreno, infraestrutura disponível, custos de construção e demolição e grau de sobre-carregamento das rodovias [23]. No caso de [35], é proposto um algoritmo heurístico Lagrangiano, combinado com um problema de p-mediana, enquanto [26] propõe um modelo simplificado de interceptação de fluxo determinístico para a resolução do problema.

Além das metodologias de localização de monitoramento de peso, foram encontrados também estudos a respeito da alocação de outros tipos de fiscalização, como é o caso de [28], que aborda o problema de máxima cobertura de roteamento de patrulha, o qual objetiva maximizar a cobertura de policiamento através do posicionamento de patrulhas policiais. Utilizando um modelo de programação linear inteira mista e um algoritmo heurístico, a conclusão obtida foi que existe um aumento da eficiência do policiamento quando o roteamento possui diferentes pontos de início, não apenas uma base de operações.

Outro dispositivo de fiscalização relevante para a segurança nas rodovias é o detector de excesso de velocidade. Um estudo sobre o assunto [33] utiliza uma abordagem matemática com o intuito de distribuir esses equipamentos, encontrando o número ideal de sensores portáteis para a melhor cobertura possível da malha rodoviária. Diferente da aferição de velocidade, encontrou-se uma pesquisa a res-

peito da distribuição de locais para inspeção dos níveis de emissão de gases nos veículos. Para isso, foi utilizado um modelo de programação matemática não linear, resolvido por algoritmo genético, o qual leva em consideração o número de agentes fiscalizadores disponíveis e a quantidade de vagas disponibilizadas para os veículos fiscalizados [25].

Outro tipo de equipamento de grande importância nas rodovias é o sensor de contagem de fluxo, o qual tem o intuito de caracterizar o tráfego rodoviário, trazendo informações valiosas para o planejamento da infraestrutura rodoviária. Nesse sentido, os estudos apresentados em [20, 21, 22, 24, 27, 30, 36, 37 e 38] abordam a localização desses dispositivos.

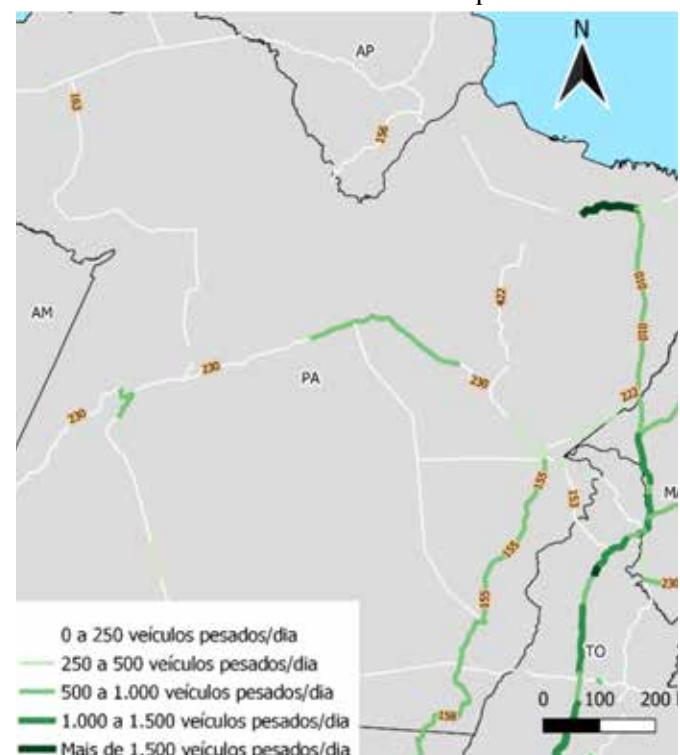
Além da localização de equipamentos rodoviários através de modelos de otimização, destaca-se uma pesquisa que utilizou SIG (Sistema de Informação Geográfica) para desenvolver um sistema de informações viárias na Índia [34]. O objetivo do estudo era preparar um mapa com todas as informações de tráfego e infraestrutura rodoviária, a fim de auxiliar na alocação de recursos para o desenvolvimento do estado.

Vistos os modelos de localização multicritérios [19, 23] e o sistema que utiliza informações geográficas [34], se destaca a metodologia do IVFP (Índice de Viabilidade de Fiscalização de Peso) [40], utilizada no Brasil, a qual não foi resultante do processo de revisão sistemática, porém alia ambos os conceitos. O IVFP consiste em um índice unificado que agrupa diversas variáveis, como volume de veículos pesados, proximidade de áreas urbanas, condições do pavimento, presença de corredores logísticos, entre outros. Esse índice permite a comparação entre diferentes trechos rodoviários, a fim de apoiar no processo de decisão dos locais mais indicados para a implantação de postos de pesagem.

3. Estudo de caso: aplicação de modelos na malha rodoviária do estado do Pará

Com base nos resultados obtidos através da revisão sistemática, optou-se por implementar os modelos propostos em Marković et al. [10] e Arslan et al. [14], com algumas adaptações para a aplicação na malha rodoviária do estado do Pará. A escolha da malha para o estudo se dá pela menor complexidade da sua composição, o que permite a maior flexibilidade na implementação dos métodos de otimização. Na **figura 1** encontra-se o mapa do Pará, com os trechos rodoviários classificados de acordo com o volume de veículos pesados, conforme dados do Programa Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) [41].

Fig 1 - Mapa do estado do Pará com destaque nos trechos de maior volume de veículos pesados.

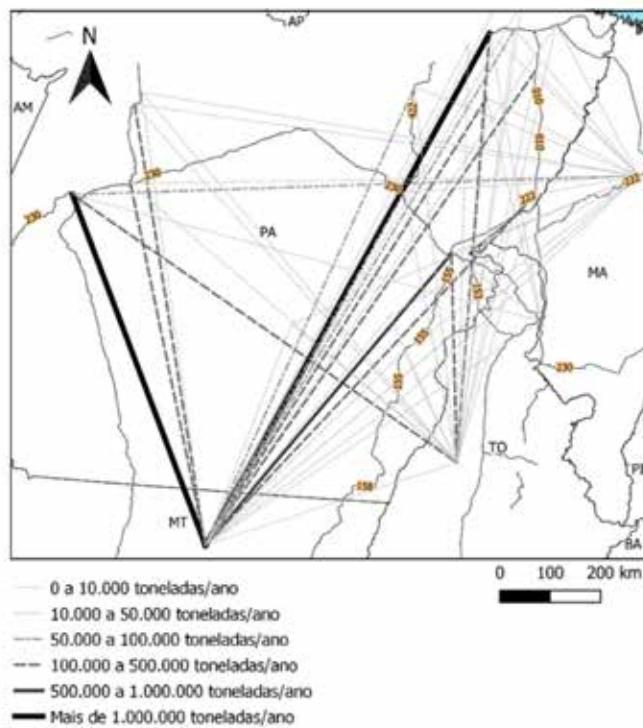


Fonte: [41] modificado pelos autores.

Observando a **figura 1**, percebe-se que os maiores volumes de veículos pesados se concentram na região leste do estado. Nota-se também outros volumes na parte mais central do mapa, porém com característica de fluxos locais, devido ao fato de não terem continuidade ao longo da rodovia.

A **figura 2** ilustra os principais fluxos de carga do estado, conforme dados de matriz origem-destino (OD) publicados pela EPL em 2016, projetados para 2020 [42].

Fig. 2 - Mapa do estado do Pará com destaque aos fluxos de carga mais significativos



Fonte: [42] modificado pelos autores.

Com base na **figura 2**, acredita-se que a maior parte dos fluxos são provenientes dos estados do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso, com destino ao porto de Belém, e também ao contrário, do porto de Belém com direção a esses estados.

A escolha dos modelos [10] e [14] para implementação no presente estudo de caso deu-se devido ao fato desses

considerarem o comportamento evasivo dos transportadores, tendo o primeiro proposto o EFCP e o segundo capaz de resolver o problema de forma exata sem a necessidade de cálculo prévio das rotas para a malha viária analisada.

Após a realização do estudo e compreensão a respeito dos modelos, esses foram implementados em Python e neles foram inseridas outras restrições, adaptando-os à realidade das rodovias brasileiras. As restrições personalizadas implementadas foram:

- Possibilidade de otimizar a localização de novos postos de pesagem, considerando que já existam sistemas semelhantes na malha viária, ou fixando locais já selecionados;
- Impossibilidade de alocar postos em arcos inválidos, ou seja, desconsiderar no processo de otimização os trechos rodoviários que não podem comportar postos de fiscalização;
- Possibilidade de utilizar um mesmo equipamento de pesagem nos dois sentidos da rodovia. Essa restrição pode ser utilizada em casos de análises em rodovias de pistas simples, por exemplo, onde seria inviável, economicamente, ser instalado um equipamento de fiscalização em apenas um dos sentidos.

Nas **equações (1) a (6)** estão explicitadas a função objetivo e as restrições do primeiro modelo de referência [10]. Já nas **equações (7) a (9) e (16) a (18)** encontram-se as restrições personalizadas inseridas aos modelos. Ressalta-se que, para o primeiro modelo, os menores caminhos entre os fluxos da malha foram calculados através da aplicação do algoritmo Dijkstra, assim como o realizado no estudo de referência [10].

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} w_{ij} + \sum_{f \in F} \sum_{p \in P_f} z_f^p c_f^p \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \geq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (2)$$

$$z_f^p \leq 1 - y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \leq |A_f^p| \cdot y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (4)$$

$$y_f \leq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P_f} z_f^p \geq 1 - y_f^p \quad \forall f \in F \quad (6)$$

$$x_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in A^D \quad (7)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall (i,j) \in A^I \quad (8)$$

$$x_{ij} = x_{ji} \quad \forall (i,j) \in A^S \quad (9)$$

Onde:

A – Conjunto de arcos definidos pelo par de nós de origem (i) e destino (j);

A^D – Conjunto de arcos (i,j) pré-definidos para a existência de fiscalização de peso;

A^I – Conjunto de arcos (i,j) considerados inválidos para a alocação de equipamentos de fiscalização;

A^S – Conjunto de arcos (i,j) nos quais a pesagem pode ser realizada nos dois sentidos da via com um único sistema;

A_f^p – Conjunto de arcos (i,j) ao longo do caminho $p \in P_f$ do fluxo $f \in F$;

c_f^p – Custo do dano associado ao fluxo não-fiscalizado f que percorre através do caminho p ;

F – Conjunto de fluxos f , definidos por nós de origem e destino e volume do fluxo;

P_f – Conjunto de caminhos possíveis p através da malha para um determinado fluxo f ;

w_{ij} – Custo de implementação de um posto de fis-

calização no arco (i,j);

x_{ij} – Variável binária que adota o valor 1 quando existe um posto de fiscalização no arco (i,j) e 0 caso contrário;

y_f^p – Variável binária que adota o valor 1 quando existe pelo menos um posto de fiscalização ao longo do caminho $p \in P_f$ do fluxo $f \in F$ e 0 caso contrário;

y_f – Variável binária que adota o valor 1 quando existe pelo menos um posto de fiscalização ao longo de todos os caminhos $p \in P_f$ e 0 caso contrário;

Z_f^p – Variável binária que adota o valor 1 caso o fluxo de viagem não seja interceptado ao longo do caminho $p \in P_f$ do fluxo $f \in F$ e 0 caso contrário.

Na **equação 1**, função objetivo, acontece a minimização do custo de implantação de postos de fiscalização de peso e dos danos excessivos gerados pelos veículos com sobre peso. Nas **equações 2, 3 e 4**, encontram-se as primeiras restrições, que arbitram: sempre que houver pelo menos um sensor em um arco da malha rodoviária, ($x_{ij} \geq 1$) ao longo de um fluxo ($y_f^p = 1$), o fluxo será considerado capturado ($z_f^p = 0$). A quarta restrição, **equação 5**, impõe que y_f só assumirá valor 1 se todos os caminhos de um fluxo forem cobertos com pelo menos um sensor de pesagem. Já na **equação 6**, última restrição, são selecionados somente os fluxos de viagem não interceptados ($z_f^p = 1$), a fim de utilizá-los no cálculo da variável de dano excessivo no pavimento.

A respeito das restrições personalizadas, a **equação 7**, coincidente com a **equação 16**, árbitra que a variável x_{ij} assumirá valor 1, caso o arco (i,j) esteja contido no conjunto de arcos pré-definidos para a fiscalização. As **equações 8 e 17** indicam que x_{ij} será igual a zero caso o arco (i,j) esteja contido no conjunto de arcos inválidos, nos quais não é possível o posicionamento de sistemas de fiscalização. Já as **equações 9 e 18** determinam que x_{ij} assumirá o mesmo valor que x_{ji} quando o mesmo sistema de pesagem precisar abranger os sentidos da rodovia.

Em seguida, encontram-se as equações do segundo modelo referência [14].

Onde:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} w_{ij} x_{ij} + \sum_{f \in F} \sum_{(i,j) \in A_f} c_f d_{ij} r_{ij}^f \quad (10)$$

s.a.

$$1 - \sum_{(i,j) \in A^p} x_{ij} \leq u_f \quad f \in F, p \in P_f \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in A_f} r_{ij}^f &= \{u_f \quad \text{se } i \\ &= s_f - u_f \quad \text{se } i \\ &= t_f \quad \text{0 caso contrário} \end{aligned} \quad (12)$$

$f \in F, i \in N_f$

$$r_{ij}^f \leq 1 - x_{ij} \quad f \in F, (i,j) \in A_f \quad (13)$$

$$u_f, r_{ij}^f \geq 0 \quad f \in F, (i,j) \in A_f \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i,j) \in A \quad (15)$$

$$x_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in A^D \quad (16)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall (i,j) \in A^I \quad (17)$$

$$x_{ij} = x_{ji} \quad \forall (i,j) \in A^S \quad (18)$$

A_f – Conjunto de arcos do menor caminho possível para o fluxo f ;

A^D – Conjunto de arcos (i,j) pré-definidos para a existência de fiscalização de peso;

A^I – Conjunto de arcos (i,j) considerados inválidos para a alocação de equipamentos de fiscalização;

A^S – Conjunto de arcos (i,j) nos quais a pesagem pode ser realizada nos dois sentidos da via com um único sistema;

c_f – Dano unitário causado pelo fluxo $f \in F$;

d_{ij} – Comprimento do arco $(i,j) \in A$;

N_f – Conjunto de nós que compõem o menor camin-

ho possível para o fluxo $f \in F$;

r_{ij}^f – Variável binária que adota o valor 1 caso o arco $(i,j) \in A$ for percorrido pelo fluxo $f \in F$; e 0 caso contrário;

S_f – Nós de origem do fluxo $f \in F$;

t_f – Nós de destino do fluxo $f \in F$;

u_f – Variável binária que adota o valor 1 caso o fluxo de viagem não seja interceptado ao longo do fluxo $f \in F$ e 0 caso contrário;

x_{ij} – Variável binária que adota o valor 1 quando existe um posto de fiscalização no arco da malha e 0 caso contrário;

w_{ij} – Custo de instalação de um posto de fiscalização no arco (i,j) .

O modelo possui como função objetivo **equação 10** a minimização dos danos na infraestrutura, causados pela prática de sobre peso não interceptada, mas também a minimização dos custos com instalação de sensores de pesagem. A respeito das restrições, a representada na **equação 11** mantém a variável u_f binária, assumindo o valor 1 se o fluxo não for interceptado, ou seja, se algum dos caminhos entre os nós origem e destino do fluxo não possuir fiscalização ($x_{ij}=0$). A **equação 12** define a continuidade dos fluxos, assegurando que os caminhos através da malha sejam compostos por arcos em sequência, partindo da origem até o destino de cada fluxo. Já a **equação 13**, restringe a seleção apenas aos arcos percorridos pelos fluxos em análise, enquanto a **equação 14** é uma restrição de não negatividade das variáveis u_f e r_{ij}^f . A **equação 15** representa o domínio da variável x_{ij} e, por fim, as **equações 16 a 18**, restrições personalizadas, foram citadas anteriormente.

Esse modelo, segundo Arslan [14], é acompanhado de um algoritmo de branch-and-cut, com geração de restrições personalizadas ao longo da solução. As restrições personalizadas, com as equações propostas no artigo, garantem que serão verificados os caminhos possíveis para os fluxos evasivos, calculando esses caminhos durante a geração de alternativas de solução para o problema. Já o algoritmo de branch-and-cut trata-se do algoritmo de branch-and-bound associado a planos de corte, os quais ramificam o problema. Logo, a função objetivo é dividida em subproblemas menores, chamados “nós da árvore” e

em cada nó, são gerados cortes, fazendo com que os sub-problemas gerem melhores limites duais.

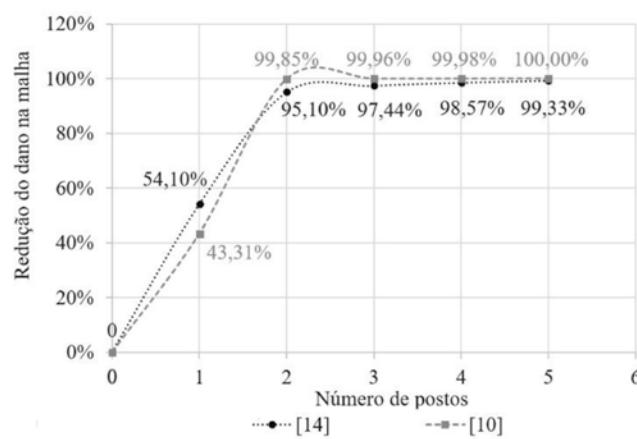
Finalizada a implementação computacional do modelo, analisou-se a malha viária do estado do Pará. Cabe ressaltar que a tolerância considerada para os caminhos percorridos pelos transportadores foi de 20%, ou seja, admitiu-se que não serão feitos desvios superiores à 1,2 vezes o caminho mais curto entre os pares OD.

Como parâmetro de análise dos modelos, foi escolhido o percentual de redução de dano na malha rodoviária. Sabe-se que a prática do sobre peso causa danos na infraestrutura, logo, é almejado que esses danos sejam reduzidos o máximo possível. Para o cálculo do dano causado pelos veículos sobrecarregados, multiplicou-se o volume estimado pela distância percorrida para cada um dos fluxos de tráfego da malha do estado. Sendo realizado o cálculo de forma específica para os fluxos capturados e não-capturados, quando instalados postos de fiscalização. Assim, foi possível identificar o percentual de redução de dano mediante a colocação dos sensores.

Na **figura 3** encontra-se um gráfico que indica o percentual de redução de dano alcançado com a adição de postos de fiscalização, para os dois modelos implementados.

Fig. 3 - Gráfico de percentual de redução de dano na malha de acordo com o número de postos de pesagem alocados na malha do Pará.

Fonte: Os autores.



Observando a **figura 3**, percebe-se que os resultados dos dois modelos testados são bastante semel-

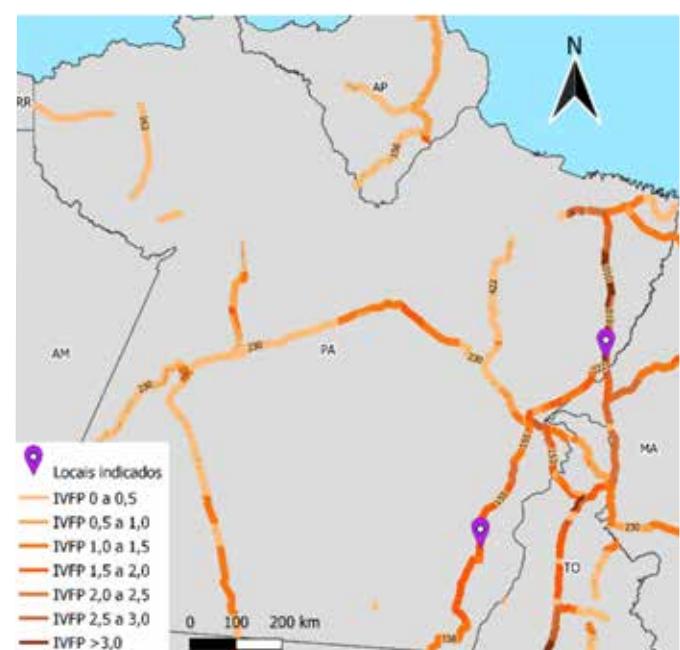
hantes, o que sugere que ambos são eficazes para a otimização de fiscalização. Porém o modelo, de Arslan [14] possui menor custo computacional, devido ao fato de não necessitar da geração prévia das rotas dos fluxos considerados.

Outra observação pertinente é a quantidade ótima de postos para o monitoramento da malha rodoviária. Percebe-se que, para o caso analisado, dois postos seria o ideal, pois assim é obtida uma grande redução do dano, superior a 95% em ambos os modelos de otimização. Alocando-se uma quantidade superior, o benefício em termos de redução de custo do sobre peso é menor, não compensando os custos de implantação de equipamentos. Cabe ressaltar que a malha rodoviária do estado do Pará é pouco complexa, necessitando de uma quantia pequena de postos de pesagem para obter uma boa cobertura.

Com base nessas considerações, optou-se pela alocação de dois postos de fiscalização de peso no local de estudo, evidenciados na **figura 4**.

Fig. 4 - Mapa do estado do Pará, com destaque nos trechos de maior IVFP e nos locais indicados para receber postos de pesagem.

Fonte: Os autores.



Destaca-se que os trechos com maior valor de

IVFP [40] possuem maior relevância para a fiscalização de peso. Mesmo o IVFP não considerando as possíveis rotas de evasão, percebe-se na **figura 4** que os locais indicados através da aplicação dos modelos de otimização encontram-se em locais com elevado IVFP, o que sugere que essa metodologia, aliada com modelos de otimização que considerem a evasão, são ferramentas consistentes para o planejamento de infraestrutura de inspeção de peso.

Observando a caracterização do tráfego do estado - localização dos volumes de veículos pesados **figura 1** e localização dos fluxos de carga **figura 2** – percebe-se que os postos sugeridos encontram-se nos locais de maior densidade de veículos pesados do estado, o que indica a coerência dos modelos de otimização em localizar os principais pontos para instalação dos equipamentos de fiscalização.

4. Conclusão

O objetivo geral deste trabalho foi a aplicação de modelos de otimização da localização de equipamentos de fiscalização de peso. Para isso, foi realizado um estudo de caso na malha rodoviária do estado do Pará, a partir do qual concluiu-se que com poucos sensores, colocados em locais estratégicos e otimizados, pode-se obter uma redução satisfatória do dano causado por veículos com sobre peso na infraestrutura.

Além disso, salienta-se que a revisão sistemática realizada cumpriu o objetivo proposto, que era destacar os principais modelos de localização de equipamentos de fiscalização utilizados nacional e internacionalmente. Nessa revisão, localizou-se estudos sobre instalação de sensores de contagem de fluxo, controle de peso, de velocidade e de emissões veiculares, dentre

Referências

- [1] V. Ghisolfi, G. M. Ribeiro, G. L. D. Chaves, R. F. Orrico Filho, I. C. S. Hoffmann e L. R. Perim (2019). “Evaluating Impacts of Overweight in Road Freight Transportation: A Case Study in Brazil with System Dynamics.” *Sustainability*, v. 11, p. 3128. DOI: 10.3390/su11113128.
- [2] B. Jacob e V. F. L. Beaumelle (2010). “Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology.” *IATSS Research*, v. 34, n. 1, p. 9–15. DOI: 10.1016/j.iatssr.2010.06.003.
- [3] G. G. Otto, L. Franceschi, L. F. G. Dellaroza, V. Z. Tani e A. M. Valente. (2019) Impacts of the Lack of Weight Enforcement on Maintenance Costs of the Brazilian Roadway Network. *Proceedings of the 8th International Conference on Weight-In-Motion*.

outros, com diferentes metodologias de resolução para os problemas propostos.

Além disso, observa-se que a metodologia do IVFP aliada a modelos de otimização que considerem a tendência evasiva dos transportadores, pode representar uma alternativa interessante para o auxílio na tomada de decisão em relação a alocação de postos de fiscalização do tráfego.

Considerando que a prática evasiva dos motoristas é uma realidade pertinente, nota-se que é necessário levar esse fato em consideração quando o equipamento alocado tiver como objetivo a fiscalização. Essa consideração, ainda na fase de planejamento, não irá aumentar os custos de instalação, mas sim otimizar os locais escolhidos para a instalação dos dispositivos, o que minimizará a ocorrência de desvios curtos, que facilitam a fuga dos infratores.

Por fim, considerando o impacto negativo causado pela tendência evasiva dos condutores em situação ilegal em diversos aspectos, acredita-se que é pertinente a criação de redes de pontos de monitoramento que levem em consideração a realidade das rodovias brasileiras e a tendência evasiva, a fim de auxiliar os gestores da infraestrutura de transportes na tomada de decisão e aumentar a eficácia da fiscalização de tráfego.

Agradecimentos

Os autores são gratos pelo apoio do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), cujo interesse no assunto motivou a realização deste estudo. Os autores também agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por viabilizar essa pesquisa.

- [4] Brasil, “Boletim Estatístico”, Confederação Nacional dos Transportes, Brasília, DF, 2019. [Online]. Disponível em: [https://www\[cnt.org.br/boletins](https://www[cnt.org.br/boletins)
- [5] I. C. M. Pacheco. “Sistema Especialista Para Monitoramento Da Operação Dos Equipamentos De Fiscalização Eletrônica De Velocidade” (2011). Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [6] E. Bernardi. “Os sistemas de identificação veicular, em especial o reconhecimento automático de placas” (2015). Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/D.3.2016.tde-11052016-162646. Acesso em: 2021-09-28.
- [7] B. H. Cottrell Jr. (1992). “The Avoidance of Weigh Stations in Virginia by Overweight Trucks”. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville.
- [8] W. Cunagin, W. A. Mickler e C. Wright (1997). “Evasion of Weight-Enforcement Stations by Trucks.” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1570, n.1, p. 181–190. DOI: 10.3141/1570-21.
- [9] J. G. Strathman, e G. Theisen (2002). “Weight enforcement and evasion: Oregon case study”.
- [10] N. Marković, I. O. Ryzhov, e P. Schonfeld, “Evasive flow capture: Optimal location of weigh-in-motion systems, tollbooths, and security checkpoints”, Networks, vol. 65, no 1, p. 22–42, jan. 2015, doi: 10.1002/net.21581.
- [11] A. Bogyrbayeva e C. Kwon. Pessimistic evasive flow capturing problems. European Journal of Operational Research, v. 293, n. 1, p. 133–148, ago. 2021.
- [12] F. Hooshmand e S.A. Mirhassani. An Effective Bilevel Programming Approach for the Evasive Flow Capturing Location Problem. Networks and Spatial Economics, v. 18, n. 4, p. 909–935, 1 dez. 2018.
- [13] L. Franceschi, G. G. Otto, L. Kaesemeyer, e A. M. Valente, “Effects of drivers’ evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems”, TRANSPORTES, vol. 28, no 5, p. 235–251, dez. 2020, doi: 10.14295/transportes.v28i5.2233.
- [14] O. Arslan, O. Jabali e G. Laporte. Exact Solution of the Evasive Flow Capturing Problem. Operations Research, v. 66, n. 6, p. 1625–1640, nov. 2018.
- [15] S. Mitchell, M. O’Sullivan e I. Dunning. “PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python”, Department of Engineering Science, The University of Auckland, 2011, [Online]. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.416.4985>.
- [16] H. G. Santos, T. A. M. Toffolo. “Tutorial de desenvolvimento de métodos de programação linear inteira mista em python usando o pacote Python-MIP”, Department of Computing, Federal University of Ouro Preto (UFOP), 2019, [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338418061_Tutorial_de_desenvolvimento_de_metodos_de_programacao_linear_inteira_mista_em_python_usando_o_pacote_Python-MIP
- [17] M. C. De-La-Torre-Ugarte-Guanilo, R. F. Takahashi e M. R. Bertolozzi. “Revisão sistemática: noções gerais”. Revista da Escola de Enfermagem da USP, v. 45, n. 5, p. 1260-1266, 2011.
- [18] A. Rygula, K. Brzozowski e A. Maczyński. Limitations of the effectiveness of Weigh in Motion systems. Open Engineering, v. 10, n. 1, p. 183-196, 17 mar. 2020.
- [19] V. Ammarapala, T. Chinda, P. Udomworarat, T. Rongwiriyapanich, A. Khampanit, S. Suanmali e B. Samphanwattanachai. Selection of weigh station locations in Thailand using the analytic hierarchy process. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2013.
- [20] G. Climaco, P.H. González, G.M. Ribeiro, G.R. Mauri e L. Simonetti. A Biased Random-Key Genetic Algorithm for the Traffic Counting Location Problem. 2019 8th Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS). Anais...IEEE, out. 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8923993/>
- [21] P.H. González, G. Climaco, G.R. Mauri, B.S. Vieira, G.M. Ribeiro, R.D. Orrico Filho, L. Simonetti, L.R. Perim e I.C.S. Hoffmann. New approaches for the traffic counting location problem. Expert Systems with Applications, v. 132, p. 189–198, out. 2019.
- [22] K. Hyun, A. Tok e S.G. Ritchie. Long distance truck tracking from advanced point detectors using a selective weighted Bayesian model. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 82, p. 24–42, set. 2017.
- [23] J. Jinyu, Z. Xu, Y. Zhongzhen. Locating Control Stations for Mobile Monitoring of Overloaded Trucks on Rural Highways. IEEE Access, v. 8, p. 65821–65829, 2020.
- [24] I. Jovanović, M. Šelmić e M. Nikolić. “Metaheuristic approach to optimize placement of detectors in transport networks — case study of Serbia”. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 46, n. 3, p. 176-187, mar.

2019.

- [25] T. Konstantinou, K. Kepartsoglou, P. Kopelias. "Mobile vehicle emission inspection service optimization: a flow intercepting location model and application". *Transportation Planning and Technology*, v. 43, n. 2, p. 174–187, 17 fev. 2020.
- [26] M. Kulović, Z. Injac, S. Davidović e I. Posavac. "Modelling Truck Weigh Stations' Locations based on Truck Traffic Flow and Overweight Violation: A Case Study in Bosnia and Herzegovina". *PROMET - Traffic&Transportation*, v. 30, n. 2, p. 163–171, 20 abr. 2018.
- [27] P. Kuusela, I. Norros, J. Kilpi e T. Raty. "Origin-destination matrix estimation with a conditionally binomial model". *European Transport Research Review*, v. 12, n. 1, p. 43, 17 dez. 2020.
- [28] S. Li, B. B. Keskin, Bi-criteria dynamic location-routing problem for patrol coverage. *Journal of the Operational Research Society*, v. 65, n. 11, p. 1711–1725, 21 nov. 2014.
- [29] C-C. Lu, S. Yan, H-C. Ko e H-J. Chen. "A Bilevel Model with a Solution Algorithm for Locating Weigh-In-Motion Stations". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 19, n. 2, p. 380-389, fev. 2018.
- [30] X. Luo, L. Niu e S. Zhang. "An Algorithm for Traffic Flow Prediction Based on Improved SARIMA and GA". *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 22, n. 10, p. 4107-4115, 31 out. 2018.
- [31] A. Mahmoudabadi e S. M. Seyedhosseini. "Improving the efficiency of weigh in motion systems through optimized allocating truck checking oriented procedure". *IATSS Research*, v. 36, n. 2, p. 123-128, mar. 2013.
- [32] N. Marković, I. O. Ryzhov, e P. Schonfeld. "Evasive flow capture: A multi-period stochastic facility location problem with independent demand". *European Journal of Operational Research*, v. 257, n. 2, p. 687-703, mar. 2017.
- [33] M. Owais, M. El Deeb, e Y. A. Abbas. "Distributing Portable Excess Speed Detectors in AL Riyadh City". *International Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 11, p. 1301-1314, 2020.
- [34] S. Pal. "Application of GIS in Road Information System—An Experience with State Highways of West Bengal". In: J. K. Ghosh; I. da Silva (Orgs.); *Applications of Geomatics in Civil Engineering*. v. 33. Singapore: Springer Singapore, 2020. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-7067-0_32. Acesso em: 13 set. 2021.
- [35] F. Sayyady, Y. Fathi, G. F. List e J. R. Stone. "Locating Traffic Sensors on a Highway Network". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2339, n. 1, p. 30–38, 1 jan. 2013.
- [36] D. Sun, Y. Chang e L. Zhang. "An ant colony optimization model for traffic counting location problem". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, v. 165, n. 3, p. 175-185, ago. 2012.
- [37] B. S. Vieira, T. Ferrari, G. M. Ribeiro, L. Bahiense, R. D. Orrico Filho, C. A. Abramides e N. F. R. Campos Júnior. "A progressive hybrid set covering based algorithm for the traffic counting location problem". *Expert Systems with Applications*, v. 160, p. 113641, dez. 2020.
- [38] C-J. Wu, T. Schreiter e R. Horowitz. "Multiple-clustering ARMAX-based predictor and its application to freeway traffic flow prediction". (2014) American Control Conference. Anais... IEEE, jun. 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6859388/>.
- [39] H. V. Stackelberg (1952). "The Theory of the Market Economy. Oxford University Press".
- [40] L. Franceschi, G. G. Otto, L. Kaesemodel, e A. M. Valente, "Elaboração de um processo multicritérios para apoio à localização de postos de pesagem em malhas rodoviárias". Anais 33 Congresso Da ANPET-Balneário Camboriú-SC. 2019.
- [41] BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Estimativa do Volume Médio Diário Anual - VMDA. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnc/Modelagem>. Acesso em: 18 abr. de 2022. 2019.
- [42] Empresa de Planejamento e Logística - EPL. Matrizes do transporte inter-regional de carga do Brasil, 2016. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/matrizes-do-transporte-inter-regional-de-carga-no-brasil>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

Proposta de modelos de otimização para movimentações do pessoal militar do Exército Brasileiro

Dayanna Rodrigues da Cunha Nunes^a, Orivalde Soares da Silva Júnior^b, Renata Albergaria de Mello Bandeira^c, Paulo Afonso Lopes da Silva^d, Jeronymo Mota Alves de Carvalho^e, Yuri Façanha Bezerra^f

Pesquisa Operacional e Logística em Engenharia de Transporte - IME

^adayanna_nunes@ime.eb.br

^borivalde@ime.eb.br

^crenatabandeira@ime.eb.br

^dpauloafonsolopes@ime.eb.br

^ejeronymo.carvalho@eb.mil.br

^ffacanha@ime.eb.br

RESUMO: A movimentação dos militares do Exército Brasileiro (EB) entre as diversas Organizações Militares (OM), essas agrupadas nas chamadas guarnições em diversas cidades, é uma atividade realizada anualmente pela Diretoria de Controle de Efetivos e Movimentações (DCEM), que tem como objetivo atender, da melhor maneira possível, às necessidades da Força e aos interesses dos militares. Para otimizar as movimentações dos militares, este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático baseado em um problema de alocação de recursos e compara os resultados obtidos com aqueles apresentados pelo Sistema de Apoio às Decisões para Movimentações (SADMov), atualmente em uso, que se baseia em um algoritmo construtivo. Realizaram-se experimentos computacionais para uma amostra de 277 tenentes da arma de Infantaria, 374 guarnições e 912 organizações militares. Os resultados das otimizações indicaram um atendimento positivo de 121% para os militares e de 34% para as OM.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentação de pessoal. Problema de alocação. Otimização. Exército Brasileiro. Programação não linear inteira.

ABSTRACT: The permanent change of station (PCS) of the Brazilian Army military among the various Military Organizations (OM), these grouped in the so-called garrisons in several cities, is an activity carried out annually by the Directorate of Personnel and Movement Control (DCEM), which aims to meet, in the best possible way, the needs of the Force and the interests of the military. To optimize the relocations of the military, this article presents the development of a mathematical model, based on a problem of resource allocation, and compares his results with those presented by the Decision Support System for Movements (SADMov), currently in use, which is based on a constructive algorithm. Computer experiments were carried out for a sample of 277 lieutenants of the Infantry, 374 garrisons and 912 military organizations. The results of optimizations indicate a positive attendance of 121% for the military and 34% for the OM.

KEYWORDS: Personnel relocation. Allocation Problem. Optimization. Brazilian Army. Integer nonlinear programming.

1. Introdução

De acordo com o Art. 2º do Decreto nº 2.040, de 21 de outubro de 1996, “O militar está sujeito, em decorrência dos deveres e das obrigações da atividade militar, a servir em qualquer parte do País ou no exterior”, o que faz necessária a existência de um órgão no âmbito das Forças Armadas que gerencie essas movimentações.

A Diretoria de Controle de Efetivos e Movimentações (DCEM), subordinada ao Departamento-

Geral do Pessoal (DGP), é o órgão responsável pela movimentação dos militares de carreira do Exército Brasileiro. São aproximadamente 60 mil militares, a serem distribuídos em quase 1.000 organizações militares (OM), em todo o território nacional, além das missões no exterior. Para cumprir essa finalidade, a DCEM desenvolveu dois produtos: o Cadastro de Movimentações do Exército (CAMEX) e o Algoritmo de Movimentações do Exército, segundo AGITEC [1].

O CAMEX consiste em um sistema de inscrição para movimentação, obrigatório para os militares que com-

pletaram o tempo mínimo para movimentação. Nele, as opções de guarnições são alocadas inicialmente pela DCEM, podendo o militar reordená-las segundo suas prioridades. Essa ferramenta de gestão compartilhada permite à DCEM ter uma visão dos interesses de cada militar no que tange à sua movimentação [1].

O Algoritmo de Movimentações do Exército, empregado para auxiliar na tomada de decisões da DCEM, busca otimizar as movimentações, considerando três fatores principais: a necessidade da Força, o interesse do militar (conforme o CAMEX) e a meritocracia [1].

O CAMEX e o Algoritmo automatizaram o que era realizado manualmente. As maiores vantagens desse processo são a celeridade, a redução da interferência humana nas decisões, o aumento da produtividade do pessoal e a facilitação das auditorias em todas as etapas.

Nesse cenário, o objetivo deste artigo é apresentar três modelos matemáticos, dois mono-objetivos e um multiobjetivo, para otimizar as movimentações dos militares do Exército Brasileiro. O problema é de alocação e visa atender às necessidades de recursos humanos das OM e aos interesses dos militares, relativamente às suas opções de movimentação.

Este artigo encontra-se estruturado em seis seções: esta introdução, revisão bibliográfica, metodologia, estudo de caso, análise e discussão dos resultados e conclusões.

2. Revisão Bibliográfica

Pentico [11] faz uma revisão sistemática da literatura a respeito das variações do problema clássico de alocação que surgiram desde a publicação do artigo de Kuhn [9], sobre a utilização do método húngaro para a sua resolução, reconhecido como o estudo que destacou esse tipo de problema, dando início a mais pesquisas nesse assunto.

O problema original de alocação (Allocation Problem – AP) consiste em encontrar uma correspondência um-para-um entre tarefas e agentes com o objetivo de minimizar o custo total das alocações, segundo Pentico [11].

A variação mais comum desse problema é o da alocação generalizada (Generalized Assignment Problem – GAP), um problema de otimização combinatória NP-difícil que consiste em encontrar o custo mínimo

de alocação de n tarefas para m agentes, em que cada tarefa é alocada a exatamente um agente, considerando as capacidades de cada agente, segundo Chu [5]. Para resolver esse problema, algoritmos exatos e heurísticos foram propostos. Entre os métodos exatos, pode-se citar os trabalhos de Savelsbergh [12], que utiliza um algoritmo branch-and-price, e o de Nauss [10], que prevê o uso de um algoritmo branch-and-cut. Ceselli e Righini [4] e Avella et al. [2] também os utilizaram em seus trabalhos, porém, aplicados a uma variação do GAP, o *Multilevel Generalized Assignment Problem (MGAP)*, em que os agentes podem realizar tarefas segundo diferentes níveis de eficiência, os quais têm custos diferenciados.

Todavia, a maioria dos trabalhos na literatura para esse tipo de problema utiliza heurísticas e meta-heurísticas como método de solução. Tal fato se deve principalmente à complexidade do problema e à disponibilidade existente de recursos computacionais.

Díaz e Fernández [6] propõem a meta-heurística Busca Tabu para a resolução de problemas do tipo GAP. O algoritmo utiliza a memória para ajustar dinamicamente o peso da penalidade incorrida por violar a viabilidade. Os principais diferenciais desse algoritmo são a simplicidade e a flexibilidade, que fazem com que ele, quando comparado a outras heurísticas, obtenha soluções de qualidade em tempo computacional competitivo.

Yagiura et al. [18] também usam a Busca Tabu, com uma abordagem de cadeia de ejeção, que produz um conjunto restrito de movimentos, relacionados à construção da vizinhança a partir de uma solução inicial. O algoritmo usa um mecanismo para ajustar os parâmetros de pesquisa e manter um equilíbrio entre as visitas nas regiões viáveis e não-viáveis.

Tkatek et al. [14] estudaram um modo de otimizar a realocação de recursos humanos em uma organização com várias unidades de produção, geograficamente distribuídas considerando as características individuais delas. O estudo tem duas etapas: primeira, formular o problema, partindo do básico do GAP e adicionando outras restrições para caracterizá-lo; e segunda, resolvê-lo usando algoritmos genéticos.

Dörterler [7] propõe um Algoritmo Genético desenvolvendo crossover aplicado aos agentes, métodos de busca local e substituições baseadas na maturidade das

soluções. Esses métodos produzem uma diversidade de soluções, fazendo com que uma solução mais próxima da ótima seja obtida em um menor tempo de execução.

Wan et al. [16] desenvolveram um algoritmo híbrido a partir da combinação do Algoritmo do Morcego com a Relaxação Lagrangiana para resolver problemas do tipo GAP. Para isso, utilizaram a estrutura básica do Algoritmo do Morcego, redefinindo as fórmulas de velocidade, posição e atuação local e, então, combinaram com a Relaxação Lagrangiana.

Tkatek et al. [15] combinaram o Algoritmo Genético com o Simulated Annealing para otimizar a alocação de pessoal qualificado em postos de trabalho, segundo prioridades. A hibridização teve por objetivo reduzir o consumo de tempo computacional e, ao mesmo tempo, melhorar a taxa de convergência da solução.

Além disso, alguns trabalhos adotam uma abordagem multiobjetivo para o problema de alocação, considerando um balanceamento entre os objetivos, que muitas das vezes são conflitantes.

Tapkan et al. [13] utilizam os métodos de ordenação fuzzy dos valores da função objetivo com o algoritmo de Enxame de Abelhas para resolver um problema multiobjetivo para minimizar o custo total e o desequilíbrio entre as cargas de trabalho dos agentes.

Kaur et al. [8] analisaram o trade-off entre custo e tempo de execução para um projeto industrial e, para isso, propuseram um algoritmo iterativo que considera todas as combinações dos parâmetros a fim de determinar o conjunto de soluções eficientes de Pareto.

Wang et al. [17] exploraram a otimização multiobjetivo no contexto da arquitetura de redes, considerando a alocação de múltiplos usuários, tarefas e servidores, a fim de minimizar o tempo de resposta, o consumo de energia e o custo.

Zhang et al. [19] apresentam um modelo de otimização multiobjetivo aplicado a alocação de portões em aeroportos com os objetivos de minimizar conflitos de voos em tempo real, maximizar a taxa de utilização da ponte de embarque e minimizar o consumo de combustível pelo taxiamento de aeronaves.

Há inúmeras variações do problema original e dos métodos de solução. Apesar de nenhum deles tratar es-

pecificamente da questão da movimentação de militares, existem similaridades e lógicas de resolução que serviram de ponto de partida para o desenvolvimento dos modelos deste artigo.

3. Metodologia

Partiu-se da formulação básica do problema GAP e foram adicionadas restrições específicas do problema estudado, tal como fizeram Tkatek et al. [14]. O GAP, bastante abordado na literatura, trabalha apenas com duas restrições: uma que estipula que cada trabalhador só pode ser alocado em uma única tarefa e outra que limita que cada tarefa seja atribuída a um único trabalhador. Neste artigo, apenas a primeira restrição é mantida, ou seja, cada militar só pode ser alocado em uma única OM, porém não há impedimentos para que mais de um militar seja designado para uma mesma OM. Entretanto, apesar de ser omitida uma das restrições do problema padrão, foram inseridas restrições particulares do problema da movimentação dos militares, o que aumenta a sua complexidade. Com relação aos objetivos deste artigo, primeiramente deve ser priorizado o atendimento dos interesses das OM e, na sequência, o atendimento dos interesses dos militares.

Os militares, por meio do CAMEx, colocam em ordem de prioridade as guarnições nas quais desejam servir e a DCEM os aloca não nas guarnições, porém nas OM. As OM são os elementos dos conjuntos referentes às guarnições, conjuntos que geralmente são disjuntos, ou seja, não existe uma OM que pertença ao mesmo tempo a duas guarnições militares. As exceções, caso existam, são tratadas individualmente.

Tendo em vista essa diferença entre as opções de escolha dos militares (conjunto das guarnições militares) e as alocações a serem realizadas pela DCEM (conjunto das organizações militares), assumiram-se os seguintes pressupostos:

a) Se um militar é voluntário para uma determinada guarnição militar, então ele é voluntário para todas as OM da guarnição;

b) Se um militar tem determinada ordem de prioridade para uma guarnição militar, então essa ordem de prioridade será transferida para

todas as OM da guarnição.

Para analisar esses objetivos separadamente e em conjunto, foram propostos três modelos matemáticos: dois mono-objetivos e um multiobjetivo. O primeiro é um modelo de programação não-linear inteira que busca atender os interesses das organizações militares e é representado pelas **equações 1 a 3 a 9** (Min Placar). O segundo modelo, de programação linear inteira, busca atender os interesses dos militares e é representado pelas **equações 2 a 9** (Max Pontos). O terceiro modelo busca atender simultaneamente ambos os objetivos 1 e 2, porém o objetivo 1 foi substituído por uma linearização exata, sendo representado pelas **equações 3 a 12** (Multi). Todos os modelos foram resolvidos de forma exata.

Nesses modelos propostos, M representa o conjunto de i militares, G representa o conjunto das j guarnições e O representa o conjunto das k organizações militares. Os parâmetros utilizados são: \square_i recebe o valor 1 para indicar se o militar i está ativo para movimentação e 0, caso contrário, quando estiver bloqueado; g_i é a pontuação do militar i, calculada pela DCEM, considerando o histórico do militar, incluindo avaliações e condecorações; c_{ij} é a classificação em ordem de prioridade da guarnição j para o militar i; v_{ij} recebe o valor 1 para indicar que o militar i é voluntário para a guarnição j e 0, caso contrário; P_{\max} é a cardinalidade do conjunto G, das guarnições militares; P_k é o placar inicial da OM k, que indica quantos militares uma OM precisa ganhar ou perder a fim de cumprir o previsto para cada cargo ou função: por exemplo, uma OM com placar -2 precisa perder 2 militares, uma OM com placar 1 precisa ganhar 1 militar e uma OM com placar 0 não precisa perder nem ganhar militares, estando seu efetivo de acordo com o previsto; O_{ik} recebe o valor 1 se a OM k é de origem (atual) do militar i e 0, caso contrário; s_{jk} recebe o valor 1 se a OM k é subordinada à guarnição j e 0, caso contrário x_{ik} ; as variáveis de decisão recebem o valor 1 quando o militar i é movimentado para a OM k e 0, caso contrário; as variáveis de decisão m_i recebem o valor 1 se o militar i é movimentado e 0, caso contrário; as variáveis de decisão q_k representam o placar final da OM k.

$$\text{Minimizar } z = \sum_{k \in O} q_k^2 \quad (1)$$

$$\text{Maximizar } z = \sum_{i \in M} \sum_{k \in O} x_{ik} \times g_i \times \left(\text{sujeito a} \right) \quad (2)$$

$$m_i = \sum_{k \in O} x_{ik} \quad \forall i \in M \quad (3)$$

$$q_k = p_k - \sum_{i \in M} x_{ik} + \sum_{i \in M} O_{ik} \times m_i \quad \forall k \in O \quad (4)$$

$$\sum_{k \in O} x_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in M \quad (5)$$

$$x_{ik} \leq \sum_{j \in G} v_{ij} \times s_{jk} \quad \forall i \in M, k \in O \quad (6)$$

$$x_{ik} \leq a_i \quad \forall i \in M, k \in O \quad (7)$$

$$x_{ik}, m_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in M, k \in O \quad (8)$$

$$q_k \in Z \quad \forall k \in O \quad (9)$$

$$\text{lexmin} \left(q_k^+ + q_k^-, - \sum_{i \in M} \sum_{k \in O} x_{ik} \times \right. \quad (10)$$

$$q_k = q_k^+ - q_k^- \quad (11)$$

$$q_k^+, q_k^- \in Z \quad \forall k \in O \quad (12)$$

A função objetivo 1, voltada aos interesses das organizações militares, busca minimizar o quadrado dos placares das OM após as movimentações.

A função objetivo 2 busca maximizar o atendimento aos militares, ou seja, movimentar os militares com maior pontuação, alocando-os em organizações militares que estejam nas primeiras posições segundo as prioridades de cada militar.

Esse problema está sujeito às seguintes restrições: (3) definem se o militar i é movimentado ou não; (4) definem o valor do placar para cada OM; (5)

garantem que nenhum militar seja designado para mais de uma OM; (6) garantem que um militar apenas seja designado para uma OM para a qual seja voluntário; (7) garantem que nenhum militar bloqueado para movimentação seja movimentado; e (8) e (9) definem o domínio das variáveis de decisão.

Com relação ao modelo multiobjetivo, foram realizadas as seguintes adaptações. A função objetivo (1) foi substituída pela **equação 10**, buscando transformar o modelo em linear. A função quadrática foi substituída pela função módulo, a qual foi linearizada utilizando uma aproximação exata. Para isso, foram definidas as variáveis de decisão q_k^+ e q_k^- para representar as parcelas positiva e negativa das variáveis de decisão q_k , conforme apresenta-se nas **equações 10 à 12**.

Na função multiobjetivo (10), utilizou-se a ordem lexicográfica, a qual consiste em priorizar os objetivos segundo a ordem na qual estão dispostos, neste caso: primeiro, o atendimento às organizações militares; e, segundo, os interesses dos militares.

4. Estudo de caso

O Exército Brasileiro tem um efetivo aproximado de 60 mil militares de carreira, agrupados em cerca de 900 universos, concorrendo a vagas em quase 1.000 organizações militares, distribuídas pelo Brasil e pelo exterior. Para fins administrativos, os militares são divididos em universos segundo o posto ou a graduação e mais a tabela, a arma ou o serviço; por exemplo, o universo de capitães do serviço de saúde.

Os modelos matemáticos descritos na seção 3 foram aplicados ao universo dos tenentes da arma de Infantaria para o ano de planejamento de 2021, composto por 277 oficiais, 374 guarnições e 912 OM. Com relação ao universo de militares, objeto deste estudo, foram fornecidos os seguintes dados: número identificador do militar; código da OM de origem do militar; código da guarnição de origem do militar; tipo da guarnição de origem do militar (especial:1, comum:0); código da guarnição de opção do militar; tipo da guarnição de opção do militar (especial:1, comum:0); ordem da guarnição de opção do militar (CAMEX); se o militar é voluntário para a guarnição de opção (voluntário:1, não-voluntário:0); pon-

tuação do militar; e estado do militar para movimentação (bloqueado ou ativo).

Complementando essas informações, foram fornecidos também dados referentes às OM e às guarnições envolvidas. São eles: estado da OM; tipo de localidade da OM (A, B, COMUM); código da OM; código da guarnição da OM; nome da OM; e saldo da OM (ação sugerida).

O presente estudo, utilizou um banco de dados caracterizado, previamente tratado de forma a preservar a confidencialidade das informações dos militares.

Foi utilizado o software de AIMMS em um sistema operacional Windows 64-bits, com processador Core i7 e processador de 8GB de memória RAM. Os resultados obtidos para cada função objetivo serão apresentados a seguir.

Primeiramente, processou-se o mesmo modelo, aplicando a função objetivo de atendimento às OM, **equação 1**. Foram criadas 253.815 variáveis, sendo 252.901 inteiras, para a resolução do problema. A solução ótima foi obtida em 195,61 segundos, utilizando 688,5 Mb de memória.

De um total de 912 OM, 798 estavam com placar igual a zero e o valor da função objetivo era 343. Após realizar a otimização, 808 OM ficaram com placar igual a zero, apresentando um acréscimo de 10 OM. O valor da função objetivo foi 205, apresentando um decréscimo de 40,23%.

Em seguida, o modelo mono-objetivo foi processado para a função objetivo de atendimento aos militares, **equação 2**. Foram criadas 253.815 variáveis, sendo 252.901 inteiras, e a solução ótima foi obtida em 13,47 segundos, utilizando 706,3 Mb de memória.

Dos 277 militares do universo, com 7 bloqueados para movimentação, aproximadamente 45% dos militares foram movimentados. Desses 125 militares movimentados, todos foram atendidos em suas primeiras opções. Com relação à situação dos militares após as movimentações, obteve-se que todos os militares (movimentados ou não) foram classificados nas guarnições militares que correspondiam à primeira opção, com exceção de quatro deles, não movimentados porque estavam bloqueados.

Posteriormente, aplicou-se o modelo multiobjetivo, **equação 10**. Foram criadas 255.639 variáveis, sendo 252.901 inteiras, e a solução ótima foi obtida em 4,31 segundos, utilizando 510,6 Mb de memória.

5. Análise e Discussão dos Resultados

Para a otimização segundo a função objetivo (1), os critérios utilizados, para comparação da solução obtida com a fornecida do SADMov, foram o número de militares movimentados, a quantidade de OM com placar final igual a zero e o valor da função objetivo. Os valores encontram-se apresentados na **tabela 1**.

Tab. 1 - Comparaçao dos resultados visando o atendimento às OM

Resultado	Min Placar	SADMov
Número de militares movimentados	49	46
Número de OM com placar zero	808	776
Valor da função objetivo	205	269

Verificou-se o ganho do modelo proposto tanto em termos de quantidade de militares movimentados, bem como de OM com placar zero. Além disso, o valor da função objetivo (de minimização) diminuiu, aproximadamente, 24%.

Considerando, por sua vez, a otimização segundo a função objetivo (2), os critérios utilizados, para comparação da solução obtida com a fornecida do SADMov, foram o número de militares movimentados, o número de militares movimentados na primeira opção e o valor da função objetivo, tanto do modelo proposto quanto do SADMov, conforme **tabela 2**.

Tab. 2 - Comparaçao dos resultados visando o atendimento aos militares

Resultado	Max Pontos	SADMov
Número de militares movimentados	125	46

Número de militares movimentados na primeira opção	125	22
Valor da função objetivo	576.418	235.639

Verificou-se o ganho do modelo proposto tanto em termos de quantidade de militares movimentados, bem como da parcela atendida na primeira opção. Além disso, o valor da função objetivo (de maximização) aumentou, aproximadamente, 145%.

A otimização multiobjetivo apresentou resultados mais equilibrados em relação aos dois objetivos do que os valores de cada otimização separadamente. Além disso, quando comparada à solução fornecida do SADMov, é possível perceber que a otimização multiobjetivo proposta neste artigo superou-a em todos os critérios adotados para comparação, conforme **tabela 3**.

Tab. 3 - Comparaçao dos resultados otimização multiobjetivo com SADMov

Resultado	Multi	SADMov
Número OM com placar zero	845	776
Valor da Função Objetivo Eq. (10) - Atendimento às OM	115	173
Número de Militares Movimentados	115	46
Número de Militares Movimentados na 1 ^a opção	37	22
Valor da Função Objetivo FO Eq. (2) - Atendimento aos militares	-520.473	-235.639

Verificou-se o ganho do modelo proposto tanto no atendimento às OM quanto no atendimento aos militares. Houve um aumento considerável na quantidade de OM com placar zero, na quantidade de militares movimentados, bem como da parcela atendida na primeira opção. Além disso, houve uma melhoria nas funções objetivo. O

valor da função objetivo de atendimento às OM diminuiu, aproximadamente, 34%; e a de atendimento aos militares diminuiu cerca de 121%.

Finalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade considerando o modelo multiobjetivo. A análise foi voltada para a questão do bloqueio de alguns militares para a movimentação. Sendo assim, considerou-se três cenários, além do considerado anteriormente. No primeiro cenário, nenhum militar está bloqueado para movimentação, todos estão ativos; no segundo cenário, os militares cuja OM atual é do tipo A ou B estão ativos (70 militares) e os militares de OM do tipo comum (270 militares) estão bloqueados; e no terceiro, apenas os militares de OM do tipo comum estão ativos para movimentação. A **tabela 4** apresenta os resultados obtidos na otimização para cada cenário.

Tab. 4 - Comparação dos resultados otimização multiobjetivo para os cenários

Resultado	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Número OM com placar zero	845	810	829
Valor da Função Objetivo Eq. (10) - Atendimento às OM	123	151	163
Número de Militares Movimentados	129	36	93
Número de Militares Movimentados na 1 ^a opção	63	23	55
Valor da Função Objetivo FO Eq. (2) - Atendimento aos militares	-598.664	-151.781	-449.224

A partir da **tabela 4**, percebe-se que o Cenário 1 apresenta os melhores valores para ambas as funções objetivo. Isso pode ser explicado pelo maior número de militares

passíveis de serem movimentados nesse cenário, o que confere uma maior flexibilidade ao modelo. Observa-se, ainda, que o cenário 2, mais restritivo com relação às movimentações, com cerca de 97% dos militares bloqueados, é o que apresenta o pior valor para a função objetivo de atendimento aos militares. Fica evidente, por meio das **tabelas 3 e 4**, que essa função objetiva é beneficiada pelo aumento do número de militares ativos para movimentação. O mesmo, todavia, não pode ser afirmado com relação ao atendimento às OM. Apesar da otimização multiobjetivo ter retornado uma solução melhor para o cenário 1 (**tabela 4**), em comparação com o apresentado na **tabela 3**, em termos de atendimento aos militares, a função objetivo de atendimento às OM sofreu uma ligeira piora no cenário 1.

6. Conclusões

A movimentação anual dos militares do Exército Brasileiro é uma atividade voltada para atender, da melhor maneira possível, às necessidades da Força e aos interesses dos militares, realizada com o apoio do sistema SADMov, baseado em um algoritmo heurístico construtivo.

Este artigo apresentou três novos modelos matemáticos com os objetivos de atender aos militares e à Força, utilizado para um universo reduzido de 277 tenentes de Infantaria, os quais retornaram resultados que evidenciaram a adequação deles ao proposto. Embora processado com uma amostra reduzida de oficiais, essa é representativa do efetivo de carreira do Exército, porque todos os postos e graduações podem ser movimentados de acordo com os pressupostos assumidos pelos modelos deste artigo.

Tanto no que se refere ao atendimento aos militares quanto às OM, todos os modelos apresentaram ganhos com relação à quantidade de militares movimentados, número de militares atendidos na primeira opção, número de OM com placares zerados e redução nos valores absolutos dos placares. Cabe ao decisor, então, selecionar o modelo que mais se adequa, considerando sua preferência, seja de otimização multiobjetivo ou mono-objetivo. Além disso, a análise de sensibilidade realizada neste estudo permite auxiliar nas decisões referentes ao bloqueio de militares para movimentação, indicando os efeitos destas nas soluções.

Apesar da aplicação ser voltada para a área militar, esses modelos podem, feitas algumas modificações com o intuito de adequá-los ao novo universo de estudo, ser aplicado, inclusive, em instituições civis, como, por exemplo, bancos, multinacionais etc., uma vez que ferramentas que auxiliem na gestão de recursos humanos, propiciando uma melhor utilização da força de trabalho alinhada com os objetivos organizacionais são de interesse de qualquer organização.

Para estudos futuros, sugere-se abordar a questão

da preterição, evitada ao máximo pela DCEM nas movimentações. Preterição ocorre quando um militar pior classificado é designado para uma guarnição que era uma opção prioritária para um militar mais bem classificado. Também sugere-se definir pesos para o atendimento aos militares e às OM, unificando as funções objetivos pelo método das somas ponderadas, de forma a comparar com os resultados da otimização multiobjetivo realizada neste artigo e com o que a DCEM acredita ser o mais vantajoso para o Exército.

Referências

- [1] AGITEC. Informativo da Propriedade Intelectual 01-2021. 2021. Disponível em: <<http://www.agitec.eb.mil.br/publicacoes/212-informativo-da-agitec-n-01-2021>>. Acessado em 30 ago. 2021.
- [2] Avella, Pasquale; Boccia, Maurizio; Vasilyev, Igor. A branch-and-cut algorithm for the multilevel generalized assignment problem. *IEEE Access*, v. 1, p. 475-479, 2013.
- [3] BRASIL. Decreto nº 2.040, de 21 de outubro de 1996. Aprova o Regulamento de Movimentação para Oficiais e Praças do Exército (R-50). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1996/d2040.htm>. Acessado em 30 ago. 2021.
- [4] Ceselli, Alberto; Righini, Giovanni. A branch-and-price algorithm for the multilevel generalized assignment problem. *Operations research*, v. 54, n. 6, p. 1172-1184, 2006.
- [5] Chu, Paul C.; Beasley, John E. A genetic algorithm for the generalized assignment problem. *Computers & Operations Research*, v. 24, n. 1, p. 17-23, 1997.
- [6] Diaz, Juan A.; Fernández, Elena. A tabu search heuristic for the generalized assignment problem. *European Journal of Operational Research*, v. 132, n. 1, p. 22-38, 2001.
- [7] Dörterler, Murat. A new genetic algorithm with agent-based crossover for the generalized assignment problem. *Information Technology and Control*, v. 48, n. 3, 2019.
- [8] Kaur, Prabhjot; Dahiya, Kalpana; Verma, Vanita. Time-cost trade-off analysis of a priority based assignment problem. *OPSEARCH*, v. 58, n. 2, p. 448-482, 2021.
- [9] Kuhn, Harold W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval research logistics quarterly*, v. 2, n. 1-2, p. 83-97, 1955.
- [10] Nauss, Robert M. Solving the generalized assignment problem: An optimizing and heuristic approach. *INFORMS Journal on Computing*, v. 15, n. 3, p. 249-266, 2003.
- [11] Pentico, David W. Assignment problems: A golden anniversary survey. *European Journal of Operational Research*, v. 176, n. 2, p. 774-793, 2007.
- [12] Savelsbergh, Martin. A branch-and-price algorithm for the generalized assignment problem. *Operations research*, v. 45, n. 6, p. 831-841, 1997.
- [13] Tapkan, Pinar; Özbakir, Lale; Baykasoglu, Adil. Solving fuzzy multiple objective generalized assignment problems directly via bees algorithm and fuzzy ranking. *Expert systems with applications*, v. 40, n. 3, p. 892-898, 2013.
- [14] Tkatek, Said; Abdoun, Otman; Abouchabaka, Jaafar; Rafalia, Najat. An optimizing approach for multi constraints reassignment problem of human resources. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 6, n. 4, p. 1907-1919, 2016.
- [15] Tkatek, Said; Abdoun, Otman; Abouchabaka, Jaafar; Rafalia, Najat. A hybrid genetic algorithms and sequential simulated annealing for a constrained personal reassignment problem to preferred posts. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, v. 9, n. 1, p. 454-464, 2020.
- [16] Wan, Xiaoqiong; Zhang, Huizhen; Zhao, Yuping. Lagrangian bat algorithm for solving generalized assignment problems. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, v. 41, p. 167-173, 2019.
- [17] Wang, Peng; Li, Kenli; Xiao, Bin; Li, Keqin. Multi-objective optimization for joint task offloading, power assignment, and resource allocation in mobile edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021.
- [18] Yagiura, Mutsunori; Ibaraki, Toshihide; Glover, Fred. An ejection chain approach for the generalized assignment problem. *Journal on computing*, v. 16, n. 2, p. 133-151, 2004.
- [19] Zhang, Yu; He, Qing; Yang, Liu; Liu, Chenghan; An Improved Tunicate Swarm Algorithm for Solving the MultiObjective Optimisation Problem of Airport Gate Assignments. *Applied Sciences*, v. 12, n. 16, p. 8203, 2022.

A influência do estado de maturação de componentes na sua aprovação em projetos de novos produtos na indústria de automóveis

João Paulo Dourado^a Rui Silva^b

^ajoaopaulo.santosdourado1968@gmail.com

^brgasilva@gmail.com

RESUMO: O foco do trabalho é na fase industrialização das peças de compra externa – elaboração das ferramentas, desenvolvimento e construção dos métodos de fabrico e controlos associados. O desenvolvimento da componente / peça é feito pela engenharia da organização: desenhos / ficheiros 3D CAD / normas. O setor de compras da organização seleciona fornecedores para o projeto – através do RFQ / Pedido de Orçamentação. Atraso na maturação do componente (desvios a especificação) e / ou atraso no fornecimento pode resultar em atrasos a jusante, afetando organização e cliente. Também há problemas na performance do componente / produto. A literatura que trata da fase de industrialização é muito escassa não existindo registros de uma fase de industrialização sem sucesso, ou de casos de sucesso, para possível benchmarking entre organizações.

PALAVRAS-CHAVE: APQP. FMEA. DFMA. NPD. Engenharia Simultânea. Benchmark. Factibilidade. Quality Gates. Simulação. Rede de Petri.

1. Introdução

A crescente pressão de inovação especialmente sobre os fabricantes de automóveis leva a uma diversidade de modelos e variantes de componentes significativamente maior, enquanto que os ciclos de desenvolvimento diminuem. Consequentemente, o número de ramp-ups de séries sucessivas também aumenta, o que acarreta desafios técnicos e econômicos para os fabricantes de automóveis. Estes enfrentam modificações tardias ou frequentes de produtos e processos de produção durante o ramp-up da produção em série, o que prejudica o lançamento no mercado em tempo útil e causa perdas financeiras. Para minimizar isso é necessário antecipar as modificações de engenharia com base no conhe-

ABSTRACT: The focus of the work is on the industrialization phase of externally purchased parts – tooling, development and construction of manufacturing methods and associated controls. The component/part development is done by the engineering of the organization: drawings / 3D CAD files / standards. The organization's purchasing department selects suppliers for the project – through the RFQ / Request for Quotation. Delay in component maturation (deviations from specification) and / or delay in supply can result in downstream delays, affecting both organization and customer. Also, performance issues in components / products. The literature that deals with the industrialization phase is very scarce and there are no records of an unsuccessful industrialization phase, or cases of success, for possible benchmarking between organizations.

KEYWORDS: APQP. FMEA. DFMA. NPD. Concurrent Engineering. Benchmark. Feasibility. Quality Gates. Simulation. Petri net.

cimento da elaboração do produto e por meio de um monitoramento mais focado. Com isso, o risco de projeto chegar a fase de SOP sem ter o nível de maturidade necessário será reduzido. Este conhecimento adquirido será usado para garantir um nível de maturidade adequado nas gerações seguintes de produtos [1].

A qualidade do produto final não depende mais apenas do seu fabricante, mas também do resultado da qualidade de seus componentes fornecidos por inúmeros subcontratados. Na indústria automotiva, uma considerável complexidade na estrutura do produto combinada com um alto ritmo de implementação dos processos de fabricação criaram uma estreita especialização dos fornecedores [2].

É importante entender o papel dos fornecedores /

subcontratados no contexto. No processo NPD, toda a pesquisa e desenvolvimento é feito na organização, tendo como saída desenhos, normas e especificações de produtos finais e peças individuais. Para os componentes individuais que é decidido ter terceirização. Todos os fornecedores liberados adequados para o tipo de peças consideradas são contatados para fornecê-las. Durante a fase de nomeação (sourcing), todos os fornecedores envolvidos verificam a documentação disponível para confirmar a viabilidade de fabricação dos respectivos componentes.

Uma vez que os fornecedores dos componentes individuais são escolhidos para o projeto, é iniciado o processo de desenvolvimento do processo de fabricação em cada um deles. A organização recebe amostras das partes individuais enquanto a fase de maturação do projeto ocorre dentro da cadeia de suprimentos de acordo com os marcos acordados entre as partes no início do projeto. Cada nova amostragem representa um estado de maturação diferente de cada parte envolvida. A organização usa essas peças para construir produtos e realizar os testes necessários para a aceitação do produto no mercado. Quando suficientemente amadurecidos e todos os testes de validação apresentarem resultados positivos, é hora da aprovação final do status das peças e dos processos de fabricação envolvidos. Em seguida, acontece o início da produção em série (Start of Production / SOP) em todos os fornecedores envolvidos. O SOP na organização ocorre posteriormente e, consequentemente, a introdução do produto no mercado.

2. Revisão De Literatura

A literatura que trata da fase de industrialização dos componentes num novo desenvolvimento é muito escassa, não existindo registo de como estes correm, para benchmarking entre organizações. Muitas são as sistemáticas usadas no processo de desenvolvimento de novos produtos (NPD) como a engenharia simultânea (CE), com várias metodologias associadas (QFD; DFM; DFA; outros) a fim de se ter maior conhecimento tanto a nível das expec-

tativas do mercado, como do processo manufatura. A nível de planeamento, gestão e monitorização tem-se o Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP) juntamente com os Quality Gates. Além disso, é importante saber avaliar se as ferramentas são bem aplicadas / utilizadas. Por exemplo, existem projetos que acabaram com atrasos e estouros de custos, onde as quality gates do projeto não foram conduzidas adequadamente no momento certo do projeto. Portanto, o resultado do projeto não pode ser previsto com clareza a fim de implementar ações corretivas [3].

A fase de desenvolvimento de novo produto (New Product Development / NPD) demanda novas soluções para apresentar produtos mais elaborados e, objetivamente, mais baratos. Para isso, os produtos devem ser lançados cada vez mais rápido e com qualidade adequada à estrutura da área de manufatura enxuta (lean). Como resultado, as empresas estão utilizando uma nova estrutura organizacional para seus processos de desenvolvimento de novos produtos que, diferentemente da forma tradicional, é baseada em uma abordagem integrada relacionada à engenharia simultânea (Concurrent Engineering / CE) onde todas as atividades de trabalho envolvidas possíveis são executadas em paralelo e com todas as conexões necessárias entre as atividades dos diferentes departamentos estabelecidas. O objetivo é evitar contratempos contínuos e outros problemas que surgem com a abordagem tradicional de “etapas sequenciais” e, com isso, melhorando o desempenho do NPD – por engenharia simultânea. Com o CE, a organização tenta acelerar o processo, aumentando a sua flexibilidade, adotando uma abordagem mais estratégica na resolução de problemas através do trabalho em equipe, desenvolvendo diferentes habilidades e melhorando a comunicação interna. CE refere-se a trazer engenheiros de projeto e produção no início da fase de projeto e simultaneamente desenvolver o produto e o processo de fabricação do produto, isto é, o conceito básico de CE refere-se a tirar o processo de projeto de produto do mundo isolado dos engenheiros de projeto e incorporar outros requisitos

funcionais que tenham, ou deveriam ter, influência no projeto. Com isso, é esperado que a aplicação da CE no processo NPD levará ao desenvolvimento de um produto melhor, mais fácil, mais barato e concluído em menos tempo [4].

A análise Design for Manufacture and Assembly (DFMA) considera a análise do produto quando este é desmontado e montado novamente, avaliando o tempo e os custos de movimentação e junção de componentes. A metodologia DFM refere-se à simplificação da fabricação do produto, enquanto a metodologia DFA tem o seu foco na simplificação do produto, bem como, redução de custos. O DFM é usado para avaliar a viabilidade da industrialização do produto ao tratar de todas as questões relacionadas (por exemplo, seleção de materiais e máquinas / ferramentas, métodos de fabrico, planeamento de processos, montagem, testes de controle de qualidade, e outros) para o desenvolvimento do produto a fim de garantir que as características do projeto possam ser fabricadas o mais facilmente possível. O DFA endereça a qualidade de montagem em grande parte através da simplificação da estrutura do produto e na redução do número total de peças em um produto [5] [6] [7].

Observa-se que a maioria dos procedimentos e das metodologias apresentadas na revisão bibliográfica estão focados a montante do processo de industrialização, embora a análise de factibilidade ainda na fase de cotação; o APQP como os *Quality Gates (QG)* e o envolvimento antecipado dos fornecedores sejam relevantes.

O Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (*Advanced Product Quality Planning / APQP*) é uma das ferramentas sistema de gestão da qualidade exigido pela norma ISO/TS 16949 utilizada nas indústrias automotivas. A metodologia considera cinco etapas: planejamento, concepção do sistema de gestão, definição dos métodos de controle e aprovação do sistema de gestão, análise crítica e melhorias. A aplicação desta metodologia permite a identificação, a análise e o controle de riscos. Atualmente o APQP é um requisito obrigatório para a entrega de produtos às empresas da cadeia auto-

motiva, pois funciona como um guia no processo de desenvolvimento e, também, um padrão para análise de resultados entre fornecedores e organização [8]. O processo APQP está definido no manual APQP da AIAG (*Automotive Industry Action Group*), uma associação sem fins lucrativos da indústria automotiva fundada em 1982.

Algumas vantagens podem ser obtidas com a utilização do APQP, dentre as quais se destacam a identificação precoce das mudanças necessárias no produto e processo e o desenvolvimento do produto dentro do prazo, com menor custo e com atenção aos requisitos do cliente. O primeiro passo no planejamento da qualidade do produto para a indústria de automóveis é a escolha de um responsável pelo projeto APQP seguido de uma equipe multifuncional composta por representantes da produção, engenharia, qualidade, logística, recursos humanos, saúde e segurança, segurança de ativos, vendas, compras, assistência pós-venda, também fornecedores e clientes, se for o caso. Uma equipe multifuncional do APQP, na fase inicial do programa, deve se reunir para definir: (a) os papéis e responsabilidades de cada processo representado; (b) um cronograma para as cinco etapas do processo de APQP; (c) os custos que devem ser considerados. Recomenda-se que a equipe do APQP considere a aplicação da “engenharia concorrente” para acelerar o projeto, as atividades devem ser realizadas simultaneamente, para evitar atrasos desnecessários. Durante a implementação do projeto, a equipe enfrentará problemas. É responsabilidade da equipe do APQP estabelecer uma abordagem disciplinada para a resolução de problemas – por exemplo: benchmarks, PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), diagrama de causa e efeito, fluxograma de processos, FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e registro os problemas [4].

Benchmarking [9] é a busca por melhores práticas que conduzam uma empresa para maximizar o desempenho do negócio. É também o processo contínuo de medição de produtos, serviços e práticas em relação aos mais fortes concorrentes ou empresas reconhecidas como líderes em suas indústrias. A aferição leva à compreensão da posição de um concor-

rente, mas não para a criação de práticas para além das da concorrência, estas somente serão alcançadas.

A Análise de modo e efeitos de falha (*Failure Mode and Effects Analysis / FMEA*) é um método para detectar possíveis falhas do produto tão cedo quanto possível no processo de desenvolvimento. Isso possibilita melhoria na qualidade dos produtos com consequente diminuição de reclamações dos clientes e minimização de custos relacionados a essas reclamações [10]. Foi iniciado na década de 1940 pelos militares dos Estados Unidos da América e é uma abordagem passo a passo para identificar todas as possíveis falhas em um projeto, um processo de fabricação ou montagem, ou um produto ou serviço. “Modos de falha” significa as formas, ou modos, em que algo pode falhar. Falhas são quaisquer erros ou defeitos, especialmente aqueles que afetam o cliente, e podem ser potenciais ou reais. “Análise de efeitos” refere-se ao estudo das consequências dessas falhas. As falhas são priorizadas de acordo com a gravidade de suas consequências, a frequência com que ocorrem e a facilidade com que podem ser detectadas. O objetivo do FMEA é tomar ações para eliminar ou reduzir falhas, começando pelas de maior prioridade. Os modos de falha e a análise de efeitos também documentam o conhecimento e as ações atuais sobre os riscos de falhas, para uso na melhoria contínua. O FMEA é usado durante o projeto para evitar falhas. Mais tarde, é usado para controle, antes e durante a operação contínua do processo. Idealmente, o FMEA começa durante os primeiros estágios conceituais do projeto e continua ao longo da vida útil do produto ou serviço.

Os Quality Gates foram inicialmente aplicados aos processos de desenvolvimento de produtos, especialmente ao controle de qualidade na indústria automotiva. Desde então, o Quality Gates tem sido aplicado de forma mais ampla à garantia de qualidade e gerenciamento de projetos e tem sido aplicado com sucesso como um mecanismo de garantia de qualidade em vários setores [11]. O procedimento Quality Gate resulta em uma decisão de aprovação / reprovação para avançar, com base em um conjunto de critérios de saída pré-determinados para cada

fase ou marco que está sendo verificado. No entanto, os critérios de Quality Gates também podem incluir o sucesso de outros Quality Gates de forma que os Quality Gates possam ser interconectados entre si [4]. Os Quality Gates também podem servir como um ponto de sincronização dos resultados do processo e os critérios de entrada e saída devem ser atendidos antes que o produto possa continuar ao longo do processo. Os Quality Gates ajudam a dividir os requisitos gerais do resultado final do processo em submetas para as etapas do processo único e a esclarecer as dependências internas da cadeia do processo. Além disso, o Quality Gates não precisa ser executado apenas em série, podendo ser executado em paralelo também. Ou seja, diferentes subprocessos são executados independentemente, mas em algum ponto são filtrados juntos, pois os produtos de uma fase são usados como entradas para a próxima fase [4].

Quando incorporado ao APQP, os quality gates são realizados ao fim de cada fase do APQP, formalizando a passagem de uma fase do APQP para outra. Essa sistemática combinada pode atuar tanto a nível da organização como a nível dos fornecedores,

Sobre o envolvimento antecipado dos fornecedores (*Early Supplier Involvement / ESI*) temos o contributo de Eisto e seus colegas [12] que apresentam seu ponto de vista sobre os níveis de colaboração entre organização / fornecedor. Começando com o “Nível de Entrega do Pedido” (Nível I) no qual uma organização contrata um fornecedor quando o projeto está pronto. O primeiro contato geralmente é um pedido de cotação com o projeto da peça e os componentes relacionados normalmente são congelados. Apenas pequenas alterações são possíveis, por exemplo: ajustar a espessura da parede ou adicionar alguns detalhes para facilitar a manufatura de peças – em caso de peças fundidas. A organização envia solicitação de cotação para vários fornecedores e compara as cotações para decisão final do fornecedor escolhido. O cliente fornece apenas um desenho e uma data de entrega da peça aos fornecedores. O ESI realmente não é utilizado neste nível de colaboração [12].

Agora, o “Nível Cooperativo” (Nível II) refere-se que os processos da organização e dos fornecedores estão parcialmente sobrepostos onde todos os participantes cooperam no design. Os fornecedores têm a chance de comentar e avaliar o design da peça antes que ela seja congelada. Isso permite alterações no design das peças que facilitam o processo de fabricação. Os contratos tornam-se mais importantes a este nível uma vez que os fornecedores estão agora a melhorar o desenho dos componentes da organização e a utilizar recursos próprios para esta melhoria [12].

Considerando o “Nível de Parceria” (Nível III), os fornecedores são escolhidos no início de um projeto e os processos são totalmente sobrepostos. Isso permite focar a expertise de cada fornecedor no projeto da organização no momento adequado [12].

Este nível é adequado para peças complexas e/ou que tenham um papel importante no produto final. Em vez de escolher a cotação mais baixa, os parceiros desenvolvem novas soluções de valor agregado em colaboração. Ao inventar novas soluções, as oportunidades de redução de custos e tempo são muito maiores no longo prazo de fabricação do que

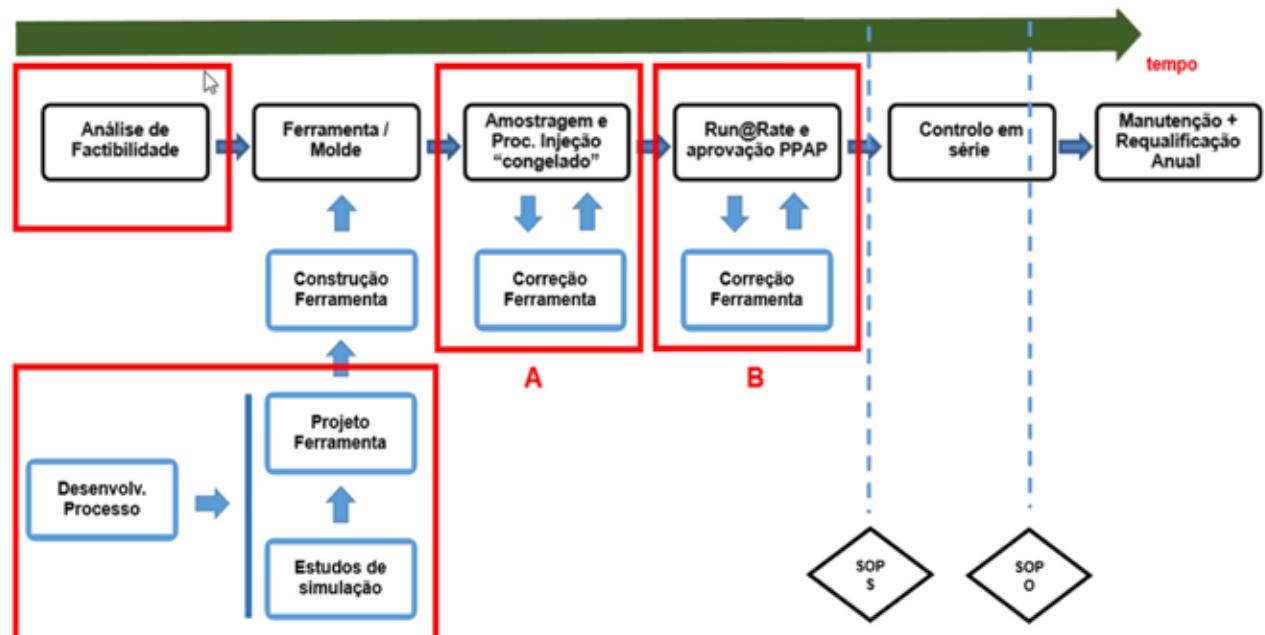
pela concorrência de preços, considerando também a otimização do produto e da cadeia produtiva [12].

Existem outros desafios para um “envolvimento antecipado dos fornecedores” bem-sucedido. O princípio principal de um ESI eficaz refere-se a ter uma especificação detalhada e abrangente disponível nas fases iniciais do projeto [13], porque ajuda (1) conhecer os meios exatos necessários (equipamentos e recursos humanos) que serão necessários e (2) permitir um estudo de factibilidade.

Outro ponto está relacionado à validação do projeto da ferramenta. Deixar o projeto da ferramenta nas mãos do fornecedor sem nenhuma verificação por parte da organização, é arriscado, principalmente quando todo o processo se baseia no conhecimento do fornecedor escolhido para a peça – pela tipologia da peça / tipo de material – sem qualquer análise de factibilidade mais robusta, aplicando softwares de simulação mais adequados [13].

A vantagem das simulações – que é um exemplo de abordagem colaborativa entre organização e fornecedores – é tentar obter um melhor entendimento dos possíveis resultados do enchimento de peças (defeitos e localizações) através da interpretação dos

Fig. 1 – Modelação: Processo de injeção plástica – Framework de Simulação



resultados da simulação. Casos de turbulência excessiva, aprisionamento de ar/gás e/ou solidificação precoce (não planejada) durante o enchimento podem comprometer a qualidade do componente como a performance do produto final. Com isso pode-se sugerir modificações no projeto da peça ou no conceito do processo de manufatura / ferramenta. Isso será eficaz quando ocorrer numa fase inicial do projeto e as modificações forem permitidas antes do congelamento do status. Quando acontece após o congelamento do projeto, especialmente quando a peça é formalmente fornecida, as possibilidades de ajuste dos parâmetros do processo são limitadas e a oportunidade de melhorar a capacidade de fabricação é perdida. A estrutura de custos do produto pode ser facilmente definida quando ocorre no início do processo de desenvolvimento A outra situação refere-se a possíveis / futuras alterações de projeto, por exemplo: adicionar / remover geometrias ao design da peça existente. Isto altera os padrões de fluxo que podem originar outra panóplia de defeitos - defeitos de superfície / defeitos internos - que podem causar também uma redução das propriedades mecânicas, algumas vezes localizadas. Isso exige um redesenho do sistema de fabricação, com estudos prévios por simulações [12].

Em caso de alguma falha nas fases avançadas do projeto do produto pode representar atrasos e até mesmo falha do projeto. Não há tempo disponível para corrigir, modificar ou mesmo construir uma nova ferramenta [13].

Tomando como exemplo um componente mecânico feito de material plástico manufaturado através do processo de injeção adquirido a um fornecedor externo, é possível apresentar todo o processo de maturação do design do componente ainda na fase de simulação com o suporte do fornecedor. Isso demonstra a necessidade de alinhamento e sincronização entre organização e fornecedores [14].

Neste trabalho é apresentado um framework é um modelo de simulação ao estudo da maturação dos componentes e de resultados que demonstram a utilidade deste processo.

3. Framework Para Simulação

Para esse projeto de peça plástica por processo de injeção foi realizada uma simulação do processo de manufatura. Na **figura 1** é apresentado o fluxo de desenvolvimento do processo de manufatura no fornecedor. As etapas nas caixas “em vermelho” são as mais críticas. A análise de factibilidade e o desenvolvimento de processo de manufatura influenciam o conceito da ferramenta e, consequentemente, no número de intervenções de ferramenta para correção dimensional. As etapas relativas a intervenção de ferramenta para correção dimensional foram divididas em duas fases – fase A e fase B. Na fase A estão os loops de intervenção requeridos até termos uma peça dimensional aceitável para a produção em série e assim avançar para a fase de submissão de PPAP. Já na fase B, estão os loops de intervenção da ferramenta “extraordinários”, não expectáveis para a fase do projeto decorrentes de ensaios de confiabilidade realizados no produto final.

4. Modelo De Simulação e Resultados

Para fins de simulação, um modelo de sistema dinâmico de eventos discretos pode ser definido para esta análise, sendo composto de entidades, atividades e processos. Cada componente do sistema que requer uma representação explícita é uma entidade [15] [16]. O objetivo da simulação é reproduzir as atividades das entidades no modelo e tirar conclusões sobre o comportamento e desempenho do sistema [17] [16].

Esta classe inclui todas as ferramentas de simulação baseadas em formalismos matemáticos que modelam sistemas dinâmicos de eventos discretos como autômatos, redes de Petri, cadeias de Markov, e outros [18] [16].

O aspecto teórico das redes de Petri permite a modelagem e análise precisa do comportamento do sistema, enquanto a representação gráfica das redes de Petri permite a visualização de mudanças no estado do sistema modelado [19].

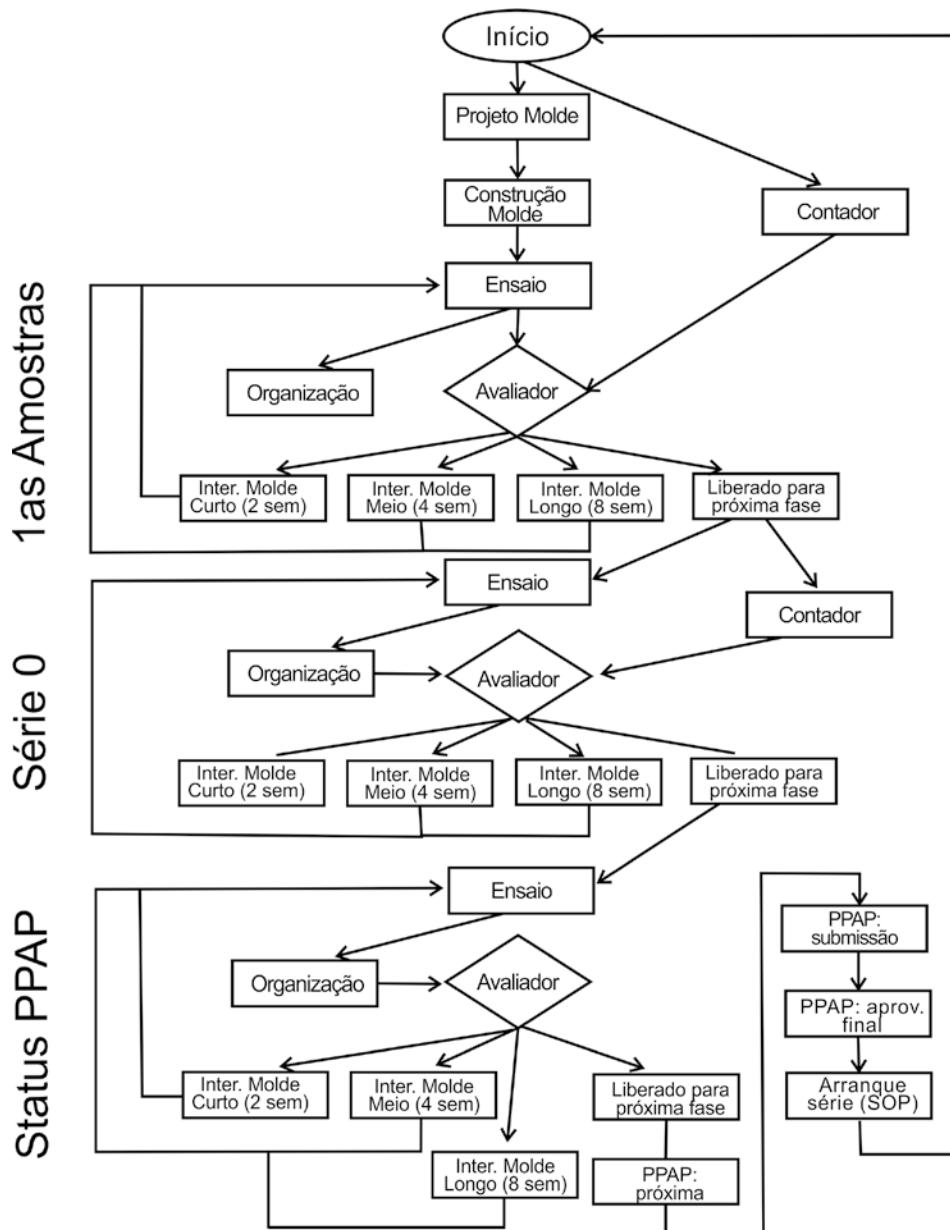
O modelo de simulação para construção da rede de Petri é apresentado na **figura 2**. A modelação

apresentada na **figura 1** está adequada para os processos existentes na maioria das organizações – considerando as fases de 1as amostras, série 0 (ou série piloto) e finalização do processo de fabrico no fornecedor, chamado de status PPAP. As fases de 1as amostras e série 0 correspondem a fase A da **figura 1**, enquanto que o status PPAP corresponde a fase B. No modelo da **figura 2**, tem-se considerado o ciclo de intervenções de ferramenta para cada fase, com opções de duração do mesmo dependendo da

complexidade da intervenção.

Voltando ao nosso projeto de uma peça plástica por injeção: um projeto de uma peça plástica por injeção de termoplásticos, com dimensões de 160 X 298 X 25mm e com furos. A ferramenta será de uma cavidade; tamanho de 1100 X 1200 X 850 mm, considerando elementos móveis. Além disso, a ferramenta terá 3 placas, canal quente e injeção submarina. O projeto da ferramenta a ser desenvolvido considerará a utilização de uma injetora

Fig. 2 – Modelo para simulação



com 400 toneladas (força de fechamento) e levará até 4 semanas, contando com a aprovação do cliente. O tempo necessário para a construção seria de 16 semanas para o primeiro ensaio. As intervenções para correção dimensional estão classificados em: (a) Intervenções simples – até 2 semanas, consistindo na eliminação de rebarbas, ajuste de folgas (visuais / funcionais) e correção de desvios dimensionais até 0,2mm; (b) Intervenções de média complexidade – até 4 semanas, consistindo em mudanças de design com soldagem na bucha ou cavidade (com fabricação de novos eletrodos) e troca de insertos, corrediças, balancins e (c) Intervenções complexas – entre 8 e 10 semanas, consistindo na construção de nova cavidade e / ou bucha.

As condições ideais consideradas pela maioria dos fornecedores deste tipo de tecnologia na sua orçamentação são as seguintes: 2 a 3 intervenções simples “2 semanas”, com, no máximo 1 intervenção de média complexidade “4 semanas”. Nas 121 simulações realizadas na Rede de Petri obteve-se os seguintes resultados em termos de quantidade de intervenções: (a) 1as amostras: Foram precisas de 8 a 9 intervenções, simples / médias / complexas; (b) Série 0: Foram precisas de 8 a 9 intervenções, simples / médias / complexas; (c) Fase PPAP: Foram precisas 4 intervenções – no máximo, 1 intervenção média / 4 semanas.

Em termos de duração de cada fase do projeto temos as seguintes figuras: (d) as amostras: 28 a 36 semanas; (e) Série 0: 28 a 36 semanas; (f) Status PPAP: 1 a 15 semanas e (g) Simulação completa: 77 a 107 semanas. Tendo como base de comparação que nas condições ideais a duração total do projeto seria de 30 semanas, este acréscimo entre 47 e 77 semanas é muito gravoso para os prazos acordados com os clientes culminando em atrasos no arranque da produção em série a jusante do fornecedor – aferindo organização e cliente final.

5. Conclusões

Observa-se que a maioria das metodologias avaliadas na revisão bibliográfica não focam na análise de factibili-

dade e nos estudos de simulação.

Um ponto importante: se uma peça não estiver OK na análise de factibilidade e nos estudos de simulação, com certeza não ficará OK perto do SOP. Uma análise de factibilidade deficiente resulta em peças “reais” fora de especificação”. O mesmo se verifica com os pontos NOK não tratados dos estudos de simulação. A correção dimensional em peças “reais” resulta num enorme esforço, resultando em inúmeras intervenções “longas” e “complexas”, cujo resultados obtidos não são “tão eficientes” caso fosse ainda tratados no projeto da ferramenta já preparado para intervenções “complexas” (como o “safety steel”).

Adicionalmente, devido à duração total do projeto observada em cada uma das simulações realizadas, é importante ter em mente que o projeto provavelmente terá o início da produção em série com as peças ainda não atingindo a maturidade máxima da peça / componente e do processo de fabricação. Com isso, a organização estará utilizando peças com diferentes status de projeto – com seus fornecedores ainda a trabalhar na fase de série piloto ou pré-PPAP.

Isso pode causar problemas tanto para o fornecedor quanto para a organização. O fornecedor ainda tem sua equipe de engenharia para tratar da peça até que tenha o PPAP final aprovado, gerenciar os níveis de engenharia/projeto da peça a ser enviada para a organização a fim de evitar qualquer mistura de status diferentes de peças diferentes. Isto poderá acarretar risco e por isso deverá ser acautelado pela organização para não afetar a performance do produto a ser entregue.

Por isso é importante definir a estratégia de como os pontos NOK serão tratados no decorrer do projeto.

A maior participação dos fornecedores no desenvolvimento do design (por exemplo: DFMA) utilizando as ferramentas de simulação apropriadas, ajuda aumentar a sua factibilidade e a robustez do processo de fabrico.

Por último, o APQP e Quality Gates deverão focar-se mais nos fornecedores, assim como os Quality Gates na organização que deverão questionar a maturação, monitorando a evolução da maturação do componente nos fornecedores.

Referências

- [1] Rapp, S., Heinicke, J., Weber, J., & Albers, A. (2020) Development of strategic guidelines for agile Parts Maturity Management of engine subsystems in the automotive industry during series ramp-up. DS 101: Proceedings of NordDesign 2020, Lyngby, Denmark, 12th-14th August 2020, 1-12
- [2] Rewilak, J. And Tokaj, T. (2012) Measurement of effectiveness of new products implementation process according to APQP/PPAP requirements – Proposition of indices, Management and Production Engineering Review, Vol. 3, Issue 4, pp. 69-79, Dec. 2012, doi: 10.2478/v10270-012-0035-8
- [3] Taniguchi, A., & Onosato M. (2017). Use of Project Management Information System to Initiate the Quality Gate Process for ERP Implementation. International Journal of Information Technology and Computer Science, 9 (12), 1-10, DOI: 10.5815/ijitcs.2017.12.01
- [4] Dourado, J., Silva, R. And Silva, A. (2013) Development of new products using APQP and quality gate. International Journal of Engineering and Industrial Management Vol.5 2013 – pp. 79-91. Universidade Lusíada
- [5] Kwon, Y., Rauniar, S., Chiou, R., & Sosa, H. (2006). Remote Control of Quality Using Ethernet Vision and Web-enabled Robotic System. Concurrent Engineering: Research and Applications, 14 (1), 35-42, DOI: 10.1177/1063293X06063840.
- [6] Raheja, S., Verma, S., & Parvez, M. (2011). Concurrent Engineering for Process Improvement of Product. International Journal of Computer Science & Management Studies, 11 (02), 110-113.
- [7] Estorilho, C., Simião, M., Schonoski, C., & de Lara, M. (2008). Estudo de redução de custo de fabricação e montagem em um motor a diesel com o auxílio do DFMA. Produto & Produção, 9 (3), 05-14, DOI: 10.22456/1983-8026.3260.
- [8] Benincá, Sellitto, M. A. (2010). Uso do APQP na implantação de um sistema de gestão de saúde e segurança ocupacional – SGSSO. Revista Liberato, 11 (16), 89-188, Novo Hamburgo.
- [9] Abdalla, H. (1999). Concurrent engineering for global manufacturing. International Journal of Production Economics, 60-61, 251-260, DOI: 10.1016/S0925-5273(98)00152-2.
- [10] Posso, R., & Estorilho, C. (2009). Identificação dos Fatores de Influência na Aplicação do Método Failure Mode and Effect Analysis - FMEA de Processo: um estudo em produtos estampados. Produto & Produção, 10 (2), 87 - 107.
- [11] Ambartsoumian, V., Dhaliwal, J., Lee, E., Meservy, T., & Zhang, C. (2011). Implementing quality gates throughout the enterprise IT production process. Journal of Information Technology Management, 22 (1), 28-38.
- [12] Eisto, T., Hölttä, V., Mahlamäki, K., Kollanu, J., & Nieminen, M. (2010). Early Supplier Involvement in New Product Development: A Casting-Network Collaboration Model. World Academy of Science, Engineering and Technology 38, 856-866.
- [13] Dourado, J., Silva, R. And Silva, A. (2011) Concurrent Engineering: An Overview Regarding Major Features and Tools. Business Excellence, Vol.5 No.2 December 2011 – pp. 67-82. Poslovna Izvrsnost Zagreb, God. V (2011) BR. 1
- [14] Kranabitl, P., Bajzek, M., Atzwanger, M., Schenk, D., & Hick, H. (2020). Automotive Powertrain Development Process. Systems Engineering for Automotive Powertrain Development, 1-20.
- [15] Pidd, M. (1994). An introduction to computer simulation. Proceedings of Winter Simulation Conference Florida USA, 7-14, DOI: 10.1109/WSC.1994.717064
- [16] Prado, R. P., & Villani, E. (2010). Discrete Event Simulation Applied to Aircraft Development Cycle. Brazilian Journal of Operations & Production Management, (2), 131-152.
- [17] Lima, J. C. C. O. Pinto, M. A. C., Migon, M. N, Montoro, G. C. F. Alves, M. F. (2005). A Cadeia Aeronáutica Brasileira e o Desafio da Inovação. Revista BNDES Setorial, 21, 31-55.
- [18] Ho, Y. C. (1987). Basic research, manufacturing automation, and putting the cart before the horse. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-32 (12), 1042-1043, DOI: 10.1109/TAC.1987.1104502
- [19] Wang, J. (2007b). Petri nets for Dynamic Event-Driven System Modeling. In: Handbook of Dynamic System Modeling, Chapter 24, 24.1-24.17, Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, Boca Raton, DOI: 10.1201/9781420010855.ch24

Avaliação de variáveis agronômicas e imagens do satélite Sentinel-2 para estimativa de produtividade da cana-de-açúcar a partir do algoritmo Random Forest

Rafaella Pironato Amaro^a, Ana Cláudia dos Santos Luciano^b

Departamento de Engenharia de Biossistemas - USP

^arafaella.amaro@usp.br

^banaluciano@usp.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho, foi avaliar a importância de variáveis agronômicas e de imagens do satélite Sentinel-2 para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar, utilizando o algoritmo Random Forest. Foram obtidos dados agronômicos referentes à variedade, estágio de corte, tipo de solo e relevo, além de dados provenientes das imagens de satélite referentes ao NDVI médio, máximo e o desvio padrão do NDVI de cada talhão. Foram criados dois modelos empíricos considerando: i) Variáveis agronômicas, ii) Variáveis agronômicas e imagens Sentinel-2. O modelo estimativo de produtividade apresentou R^2 igual a 0,64 e 0,83, RMSE de 10,17 e 7,0 ton/ha, para os modelos i e ii, respectivamente. A avaliação da importância das variáveis indicou que a variável estágio de corte foi a mais importante, seguida das variáveis variedade e NDVI médio do talhão. A combinação de variáveis agronômicas e de imagens de satélite trouxe melhorias na estimativa da produtividade de cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: Índice de vegetação, Modelo empírico, NDVI, Aprendizado de máquinas

ABSTRACT: The objective of this project was to evaluate the importance of agronomic variables and Sentinel-2 satellite images to estimate sugarcane yield using the Random Forest algorithm. We used agronomic data referring to the variety, cutting stage, soil type and relief, in addition to data from satellite images referring to the average, maximum NDVI and the standard deviation of the NDVI of each field. Two empirical models were created considering: i) Agronomic variables, ii) Agronomic variables and Sentinel-2 images. The model to estimate sugarcane yield showed R^2 equal to 0.64 and 0.83, RMSE of 10.17 and 7.0 ton/ha for models i and ii, respectively. The evaluation of the importance of the variables indicated that the variable cutting stage was the most important, followed by the variable variety and average NDVI of the field. The combination of agronomic variables and satellite images brought improvements to estimate sugarcane productivity.

KEYWORDS: Vegetation index, Empirical model, NDVI, Machine learning

1. Introdução

Acana-de-açúcar, que ocupa aproximadamente 8,7 milhões de hectares no Brasil [1], é uma cultura global com importância não apenas para a produção de açúcar, mas também é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos [1, 2]. No Brasil, a cultura tem grande importância social e econômica para o país, pois gera empregos e exportação para o exterior. Nos últimos 20 anos, a produção e área plantada de cana-de-açúcar no Brasil duplicaram, apresentando um

aumento de 1,8% em relação a 2019/2020 [1]. Apesar das oscilações climáticas, a produção de cana-de-açúcar atingiu cerca de 753 milhões de toneladas em 10,1 milhões de hectares na safra 2021 [3]. A região Centro-Sul representou o maior eixo produtivo do país, sendo responsável por 92% do total da cana-de-açúcar produzida [1]. No entanto, a cana-de-açúcar, por ser uma planta semi-perene, sofre com as influências do clima, que são oscilantes durante o ciclo de crescimento da cultura. Tais oscilações, ocorrem especialmente no aspecto das precipitações e na sua regularidade de distribuição, ao contrário do que acontece com as culturas anuais que são influenciadas pelo clima em períodos limitados [1]. Portanto,

a cana-de-açúcar pode sofrer com eventuais déficits hídricos em algumas localidades, impactando nos potenciais produtivos que podem variar em função da interação entre a época do ano em que ocorrem e, a fase do ciclo fenológico da cultura [3,4]. Neste sentido, o clima é um fator fundamental para o planejamento agrícola da produção de cana-de-açúcar. Os efeitos combinados da variabilidade natural do clima, as condições de população crescente, a perda de solo e as mudanças climáticas, exigem métodos que fornecem uma avaliação oportuna e precisa do crescimento e da produção das culturas e que contribuam para o aumento da sustentabilidade da produção de alimentos agrícolas [5, 6]. Neste contexto, a necessidade de um planejamento estratégico adequado, a previsão de safras de determinada cultura e o conhecimento de sua distribuição no espaço geográfico é de extrema importância para o planejamento do setor sucroenergético brasileiro. Além disso, o monitoramento da produção de cana-de-açúcar auxilia na criação de políticas públicas e segurança alimentar, o que impacta diretamente na melhoria da precisão e robustez dos sistemas de monitoramento de culturas [8].

Dentre os meios de monitoramento agrícola, encontra-se a estimativa de área e produtividade. A previsão de produtividade agrícola de acordo com os métodos tradicionais é conduzida por meio de pesquisas agrícolas ou por especialistas, com base em avaliações das condições das culturas, produção histórica da área e condições ambientais [9],[10]. Tais métodos são subjetivos, demorados e muitas vezes pouco representativos, devido ao pequeno tamanho das amostras, que não levam em consideração toda a variabilidade espacial dos talhões de produção [11]. Outra desvantagem desses métodos tradicionais é que demandam muito tempo e são onerosos, dado o grande número de pessoas envolvidas [12].

Para combater a subjetividade dos métodos tradicionais de predição da produtividade agrícola, e possibilitar a análise da variabilidade espacial e temporal, a estimativa baseada em modelos preditivos empíricos com imagens de satélite é uma alternativa promissora, que assiste os produtores

de cana-de-açúcar na tomada de decisão assertiva, auxiliando no manejo das áreas. As imagens de satélite têm sido amplamente utilizadas no monitoramento de culturas agrícolas para avaliação geral do estado da cultura da cana-de-açúcar [13], como por exemplo na estimativa da sua produtividade [14]. A estimativa de produtividade pode ser feita com base em dados agronômicos, climáticos e a combinação com as imagens de satélite, utilizando técnicas estatísticas convencionais ou de aprendizado de máquina [15-17].

Algumas vantagens do uso de algoritmos de aprendizado de máquina, como floresta aleatória (RF - Random Forest), estão relacionadas à capacidade de usar uma grande quantidade e variedade de informações, como dados numéricos e categóricos, advindos da combinação de dados de sensoriamento remoto e dados agronômicos [18]. O uso integrado de imagens de satélite com algoritmos de aprendizado de máquina, como o Random Forest, tem mostrado resultados promissores para prever a produção de culturas como trigo [19], soja [20] e da cana-de-açúcar [21] auxiliando na estimativa da produtividade de forma precisa, ao longo dos anos e, em diferentes condições ambientais.

Considerando a variabilidade das condições ambientais, a previsão do rendimento da cultura não é trivial, assim os modelos preditivos utilizando técnicas de mineração de dados e imagens de satélite podem acelerar o desenvolvimento e, melhoria da precisão e robustez desses sistemas de previsão de produtividade de forma regional e temporal. Ainda, o uso de modelos estimativos de produtividade com imagens de satélite assiste os produtores de cana-de-açúcar de forma espacial e temporal na tomada de decisão, auxiliando no manejo das áreas, reduzindo custos e melhorando a produtividade da lavoura.

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de variáveis agronômicas e de imagens do satélite Sentinel-2 para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, utilizando o algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forest*.

2. Material e Métodos

2.1 Dados

A área de estudo está localizada na região de Catanduva, no centro do estado de São Paulo, no Brasil **figura 1**. O tipo de solo predominante é o argiloso, sendo as classes de solos com maior predominância os Latossolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho. Na área de estudo os ambientes de produção C e D são predominantes e, a produtividade média das últimas três safras foi de 72 ton/ha. Ao total há 3447 talhões com área média de 9,15 hectares. A classificação do clima da região é do tipo AW, caracterizado por ser tropical, com muito mais pluviosidade no verão que no inverno. Sendo a temperatura média de 23,3 °C e a média anual de pluviosidade de 1444 mm [22].

Foram obtidos dados agronômicos de uma empresa parceira para os talhões da área de estudo. Para cada talhão foram obtidos os dados referentes à variedade de cana-de-açúcar, estágio de corte, TCH (tonelada de cana-de-açúcar por hectare), tipos de solo e relevo. No total há 53 variedades de cana-de-açúcar na área de estudo, o estágio de corte no local está entre o 1º até o 8º corte. O relevo varia entre suave ondulado a ondulado. Os dados são referentes à safra de cana-de-açúcar de 2018-2019, que compreende 01 de abril de 2018 até 31 de março de 2019.

Todos os dados foram organizados para retirada de inconsistência e falhas (*outliers*) e, portanto, foi feita uma padronização das informações. Essa análise de consistência foi realizada no software estatístico R [23]. Após o tratamento dos dados, foram obtidos um total de 2691 talhões.

As imagens de satélite foram obtidas por meio do sensor orbital multiespectral MSI (*Multispectral Imager*) a bordo do satélite Sentinel-2A. Essas imagens possuem resolução temporal de 5 dias e 13 bandas espectrais variando de 443 a 2190 nm, com resolução espacial de 10 m para as bandas do vermelho (B4) e infravermelho próximo (B8). Além disso, as imagens possuem correção atmosférica. Foram selecionadas as imagens de refletância de superfície das bandas 4 e 8, as quais foram processadas para o dia 09/07/2018. Em seguida, foi calculado o índice espectral Normalized Difference Vegetation Index - NDVI [24] em cada talhão. Por fim, para cada talhão foi calculado os valores de NDVI médio, NDVI

máximo e desvio padrão do NDVI.

Fig. 1 – Localização da área de estudo.



2.2 Modelagem da produtividade da cana-de-açúcar

Os dados agronômicos e os dados das imagens de satélite foram integrados por meio da criação de modelos empíricos, utilizando o algoritmo de regressão *Random Forest* (RF), implementado no software estatístico R [23]. A técnica RF se baseia na aplicação de bagging em árvores de decisão, com uma importante extensão - além de mostrar os registros, o algoritmo também mostra as árvores. Nas árvores de decisão tradicionais, para determinar como criar uma sub-repartição de uma repartição, o algoritmo escolhe uma variável e um ponto de divisão por meio da minimização de um critério a ser escolhido. Entretanto, no caso do RF, em cada estágio do algoritmo, a escolha de uma variável é limitada a um subconjunto aleatório de variáveis. Dessa forma, quando comparado com o algoritmo de árvore básico, o algoritmo de RF adiciona mais dois passos: o *bagging* e a amostragem bootstrap das variáveis em cada divisão [25]. O RF tem sido usado para previsão de produtividade, devido à sua capacidade de lidar com alta dimensionalidade de dados, detecção de outliers, robustez contra overfitting e a possibilidade de estudar a importância da variável de entrada em um modelo calibrado [26]. Para a construção dos modelos foram utilizados 80% dos dados para calibração e 20% para validação. Foram criados

dois modelos empíricos: i) O Modelo 1 utilizou apenas os dados agronômicos, como o estágio de corte, variedade de cana-de-açúcar, tipo de solo e relevo; ii) o Modelo 2 considerou os dados agronômicos do Modelo 1 (estágio de corte, variedade de cana-de-açúcar, tipo de solo e relevo) e, foi adicionado dados de imagem de satélite, como os valores médios do índice de vegetação NDVI, desvio padrão do NDVI e valores máximos do índice de vegetação NDVI. As métricas de avaliação utilizadas foram o coeficiente de determinação (R^2) e Raiz quadrada média dos erros (RMSE - *Root Mean Square Error*). Para a determinação das métricas de avaliação o TCH estimado pelo modelo, utilizando os 20% dos dados do conjunto de validação, foi comparado ao TCH medido pela usina. Por fim, foi avaliada a importância das variáveis utilizando o algoritmo *Random Forest* [27].

4. Resultados e Discussão

O Modelo 1, com variáveis agronômicas, apresentou R^2 igual a 0,64 e RMSE igual a 10,2 ton/ha. A dispersão dos dados pode ser vista na **figura 2a**. Resultados similares, R^2 de 0,73, foram encontrados para estudo utilizando variáveis agronômicas como o tipo de solo, largura do sulco, rendimento da parcela em relação ao último ano, variedade de cana-de-açúcar, irrigação, controle epidêmico, fertilização, e volume de chuva [28]. Outros estudos de produtividade da cana-de-açúcar, obtiveram variação do erro médio absoluto obtido (MAE) entre 4,6 e 7,5 ton/ha, ou seja, valores de RMSE entre 2,1 e 2,7 ton/ha, próximos ao do presente estudo. Os autores consideraram variáveis de produção e manejo, além do clima ocorrido no período de análise a fim de avaliar modelos como Redes Neurais Artificiais, Máquinas de Vetor de Suporte, Árvores de Regressão Impulsionada e Random Forest [29]. Ambos os autores, associaram a produtividade com variáveis climatológicas e atingiram melhores resultados demonstrados pelas métricas de avaliação.

Dentre as variáveis avaliadas, pelo modelo 1, o estágio de corte foi a variável mais importante, seguido pela variedade de cana-de-açúcar, tipo de solo e, por fim relevo (**tabela 1**). Resultado similar foi encontrado por outros autores, que realizando um estudo com árvore de decisão para uma única unidade de usina de açúcar no

oeste do estado de São Paulo, constatou que o número de cortes e teor de argila na camada superior do solo (até 25 cm) são os principais fatores que afetam a produtividade da cana-de-açúcar [30]. Ainda, a avaliação de mais de uma técnica de mineração de dados, utilizando variáveis agronômicas e clima, para identificar e ordenar as principais variáveis que condicionam a produtividade da cana-de-açúcar, mostrou que o número de cortes foi o fator mais importante por todas as técnicas de mineração de dados [16].

Quanto à variedade de cana-de-açúcar sabe-se que a mesma é um indicador direto da produtividade, uma vez que as diferenças entre as variedades contribuem de forma significativa na variabilidade da produtividade [31]. Isto porque cada variedade de cana-de-açúcar tem uma característica específica. Além disso, ressalta-se que há uma interação significativa entre variedades e cortes sucessivos na produtividade da cana-de-açúcar [32], o que reflete diretamente na produtividade.

O relevo foi a variável com menor relevância em relação às outras variáveis. Tal fato pode ser explicado devido à baixa variabilidade das feições do terreno, que permaneceram entre suave onulado e onulado e acabam não influenciando, nesse estudo, de forma significativa na variabilidade da produtividade.

Ao adicionarmos outras variáveis ao modelo empírico de produtividade, como os valores médios, desvio padrão e valores máximos do índice de vegetação NDVI, o modelo apresentou melhores ajustes (R^2 igual a 0,83), ver **figura 2b**. O R^2 obtido aumentou para 0,83 e o RMSE diminuiu para 7,0 ton/ha em comparação ao modelo 1. Tal fato, demonstra que as variáveis provenientes de imagens de satélite trouxeram um ganho de informação na criação de um modelo empírico de estimativa da produtividade de cana-de-açúcar. Estudos similares, encontraram valores de R^2 igual a 0,94 para cana-de-açúcar utilizando imagens do satélite Landsat-8, e os índices de vegetação que combinam a banda do vermelho e infravermelho como o NDVI, Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) e Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), além do Índice de Vegetação Normalizada do Verde (GNDVI) [13]. Apesar das diferenças dos resultados dos modelos, vale ressaltar que estes estudos consideraram mais de um índice de vegetação ao longo de séries temporais, ao in-

vés de uma única data, que foi constatado pelos autores estimar de forma mais precisa em comparação a um único índice de vegetação e uma data específica de coleta da imagem de satélite.

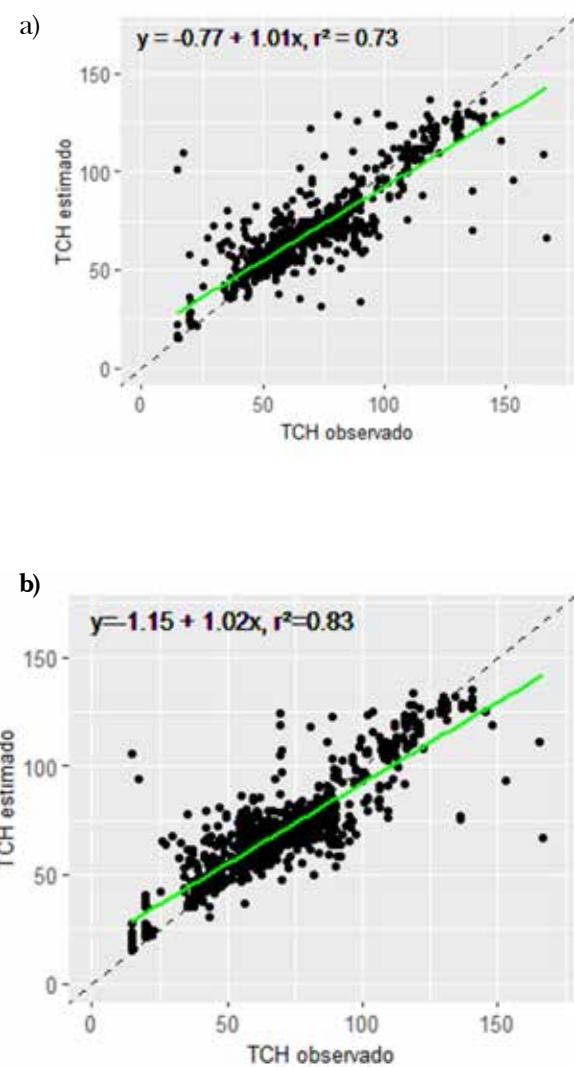
Quanto às importâncias de variáveis, para o Modelo 2, as variáveis que tiveram maior importância na estimativa de produtividade foram similares ao Modelo 1, ou seja, o estágio de corte e a variedade de cana-de-açúcar. No entanto, as variáveis relacionadas ao NDVI tiveram maior importância que o tipo de solo e relevo **tabela 1**. Os índices de vegetação, como o NDVI, estão relacionados principalmente à abundância de cobertura vegetal verde e biomassa e são sensíveis a variações nas respostas de estresse do dossel da planta, cultivares e práticas de gestão [33, 34]. Além disso, os dados de índices de vegetação obtidos no período do seu máximo crescimento, têm relação direta com a produtividade da cultura da cana-de-açúcar [35]. Outros estudos mostraram a importância de índices como o NDVI para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar. Mulianga et all. [36] obtiveram RMSE inferior a 5 ton/ha para estimativa da produtividade utilizando o NDVI do satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e dados agronômicos, por meio de um modelo de regressão linear. Já Fernandes et all. [37] também mostraram a importância do NDVI ao utilizá-lo para prever a produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, para isso foram utilizadas imagens do sensor MODIS e um modelo de conjunto de redes neurais artificiais. O R^2 obtido nesse estudo foi de 0,61.

Tab. 1: Importância das variáveis.

Ordem de importância	Modelo 1	Modelo 2
1	Estágio de corte	Estágio de corte
2	Variedade de cana-de-açúcar	Variedade de cana-de-açúcar
3	Tipo de solo	NDVI médio
4	Relevo	Desvio padrão NDVI
5	-	NDVI máximo
6	-	Tipo de solo
7	-	Relevo

Fonte: Autor.

Fig. 2 – Gráfico de dispersão para o modelo 1 considerando apenas variáveis agronômicas (a) e considerando variáveis agronômicas e de satélite -modelo 2 (b).



5. Conclusões

Foram criados modelos empíricos de produtividade utilizando informações agronômicas e imagens do satélite Sentinel-2, a partir do algoritmo *Random Forest*. Os resultados demonstraram que a combinação de variáveis agronômicas e de imagens de satélite trouxe melhorias na estimativa da produtividade de cana-de-açúcar. As variáveis de maior importância para os modelos empíricos foram as variáveis estágio de corte, variedade de ca-

na-de-açúcar e NDVI médio do talhão. Estudos futuros devem ser realizados para a integração de informações climáticas e outros índices de vegetação. Por fim, a utili-

zação de séries temporais de imagens para estimativa e acompanhamento da produtividade pode trazer ganhos ao monitoramento da cana-de-açúcar.

Referências

- [1] CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Quarto Levantamento da safra 2020/21. Companhia Nacional de Abastecimento, v.7, 2021, p. 57
- [2] Surendran, U.; Ramesh, V.; Jayakumar, M.; Marimuthu, S.; Sridevi, G. Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semi-arid tropical agro ecosystem in India Soil Tillage Res., 158, 2016.pg 10-21.
- [3] INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. Australian Journal of Agricultural Research, v.59, p.13-26, 2008.
- [4] MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. Pesquisa Agropecuária Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.1582, 2009.
- [5] IBGE. Produção Agrícola Municipal – PAM. 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- [6] FAO. The Future of Food and Agriculture-Trends and Challenges, 2017.
- [7] IPCC Summary for policymakers. Masson-Delmotte, V. Zhai, P.; Pörtner, H.O. Roberts, D. Skea, J. Shukla, P.; Pirani, A.; Moufouma-Okia, W. Péan, C.; Pidcock, R. Connors, S.; Matthews, J. Chen, Y. Zhou, X.; Gomis, M.; Lonnoy, E.; Maycock, T.; Tignor, M.; T. Waterfield, T. (Eds.), Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018, 32pg.
- [8] Holzman, M.E.; Rivas, R.; Piccolo, M.C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 28, 2014, pg. 181-192. 10.1016/j.jag.2013.12.006
- [9] Bocca, F.F.; Rodrigues, L.H.A. Arraes, N.A.M. When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. Agric. Syst., 135, 2015, pg. 48-56.
- [10] Everingham, Y.L.; Muchow, R.C.; Stone, N.G.; Inman-Bamber, A. Singels, C.N. Bezuindenhou Enhanced risk management and decision-making capability across the sugarcane industry value chain based on seasonal climate forecasts Agric. Syst., 74, 2002, pg. 459-477. 10.1016/S0308-521X (02)00050-1
- [11] Basso, B., Cammarano, D., Carfagna, E. Review of Crop Yield Forecasting Methods and Early Warning Systems, in: Report Presented to First Meeting of the Scientific Advisory Committee of the Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics FAO Headquarters, Rome, Italy, 2, 2013, pg. 1-56. 10.1017/CBO9781107415324.004
- [12] Picoli, M.C. A Estimativa da produtividade da cana-de-aúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva. 2007. 90p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- [13] Singla, S.K., Garg, R.D., Dubey, O.P. Ensemble machine learning methods to estimate the sugarcane yield based on remote sensing information. Revue d'Intelligence Artificielle, v. 34, n.6, 2020, pg. 731-743. <https://doi.org/10.18280/ria.340607>
- [14] Cechin-Júnior, C. Johann, J. A. Antunes, J. F. G.; Deppe, F. Sugarcane mapping in Paraná State Brazil using MODIS EVI images. International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, v.9, n.1, pg. 3205-3221, 2020.
- [15] Verma, A.M.; GaRG, P. K.; Prasad, K. S. H.; Dadhwal, V. K.; Dubey, S. K.; Kumar, A. Sugarcane Yield Forecasting Model Based on Weather Parameters. Sugar Tech. v.23, n.1, 2021, pg.158–166.
- [16] Hammer, R. G.; Sentelhas, P. C.; Mariano, J. C. Q. Sugarcane yield prediction through data mining and crop simulation models. Sugar Tech., 22, 2020, pg. 216-225. 10.1007/s12355-019-00776-z.
- [17] Luciano, A. C. S.; Picoli, M. C. A.; Duft, D. G.; Rocha, J. V.; Leal, M. R. L. V.; Maire, G. Empirical model for forecasting sugarcane yield on a local scale in Brazil using Landsat imagery and random forest algorithm. Computers and

- Electronics in Agriculture. 184, 2021, 106063. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106063>.
- [18] Everingham, Y., Sexton, J., Skocaj, D., Inman-Bamber, G. Accurate prediction of sugarcane yield using a random forest algorithm. *Agron. Sustentar. Dev.*, 36, 2016, 10.1007 / s13593-016-0364-z.
- [19] Kamir, E.; Waldner, F.; Hochman, Z. Estimating wheat yields in Australia using climate records, satellite image time series and machine learning methods. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.160, 2020, pg. 124-135.
- [20] Schwalbert, R.A.; Amado, T.; Corassa, G.; Pott, L.P.; Prasad, P.V.V.; Ciampittia, I.A. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.284, 2020, p. 07886.
- [21] Shendryk, Y.; Davy, R.; Thorburn, P. Integrating satellite imagery and environmental data to predict field-level cane and sugar yields in Australia using machine learning. *Field Crops Research*. v.260, 2021, p.107984. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107984>
- [22] Köppen W, Geiger R (1928) *Klimate der Erde*. Justus Perthes, Gotha. 1928. Wall-Map 150 cm x 200 cm.
- [23] RSTUDIO. Studio Team. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. 2020. URL <http://www.rstudio.com/rstudio>
- [24] Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 2. Washington, D.C., Proceeding,1, NASA. Goddard Space Flight Center, Washington, D.C., 1973, pg.309-317.
- [25] BRUCE, P; BRUCE, A. *Estatística Prática para Cientistas de Dados: 50 conceitos essenciais*. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019.
- [26] Gislason, P.O.; Benediktsson, J.A.; Sveinsson, J.R. Random forests for land cover classification *Pattern Recognit. Lett.*, 27, 2006, pg. 294-300. [10.1016/j.patrec.2005.08.011](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.08.011).
- [27] Breiman, L. Random forests. *Mach. Learn.*, 45, 2001, pg. 5-32. [10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324).
- [28] Charoen-Ung, P. Sugarcane Yield Grade Prediction using Random Forest and Gradient Boosting Tree Techniques. *15th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, 2018, pg.1-6.
- [29] Bocca, F. F.; Rodrigues, L. H. A. The effect of tuning, feature engineering, and feature selection in data mining applied to rainfed sugarcane yield modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 128, 2016, p. 67-76.
- [30] Peloia, P.R., F.F. Bocca, and L.H.A. Rodrigues. 2019. Identification of patterns for increasing production with decision trees in sugarcane mill data. *Scientia Agricola* 76. 2019, pg.281-289.
- [31] Ramburan, S.; Wettergreen, T.; Berro, S.D.; Shongwe, B. Genetic, environmental and management contributions to ratoon decline in sugarcane. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 146, 2013, pg.105-112.
- [32] Arnt, W. R. Desempenho de variedades de cana-de-açúcar em duas épocas de colheita no pontal do Paranapanema. Orientador: 2016. 55p. Dissertação (Mestrado) – Agronomia. Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados-MT.
- [33] Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological spectral models. *Remote Sens. Environ.*, 33, 1990, pg. 183-192, [10.1016/0034-4257\(90\)90029-L](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90029-L)
- [34] Silleos, N.G.; Alexandridis, T.K.; Gitas, I.Z.; Perakis, K. Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto Int.*, 21, 2006, pg. 21-28. [10.1080/10106040608542399](https://doi.org/10.1080/10106040608542399)
- [35] Pinheiro Lisboa, I.; Melo Damian, J. Roberto Cherubin, M. Silva Barros, P.P. Ricardo Fiorio, P. Cerri, C.C. Eduardo Pellegrino Cerri, C. Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal. *Agronomy* 8, 2018, pg.196. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090196>
- [36] Mulianga, B.; Begue, A.; Simoes, M. Todoroff, P. Forecasting regional sugarcane yield based on time integral and spatial aggregation of MODIS NDVI. *Remote Sens.*, v.5, n.5, 2013, pg. 2184-2199. [10.3390/rs5052184](https://doi.org/10.3390/rs5052184).
- [37] Fernandes, J.L.; Esquerdo, J.C.D.; Favilla, N.F. Sugarcane yield prediction in Brazil using NDVI time series and neural networks ensemble. *Taylor & Francis*, v.38, n.16, 2017, pg. 4631-4644.

Caracterização microestrutural de niobatos de sódio pelo processo sol-gel para uso na engenharia tecidual

Suzana Noronha Ferreira Ribeiro^a Amal Elzubair Eltom, Marcelo Henrique Prado da Silva

Instituto Militar de Engenharia – IME
Sessão de Engenharia de Materiais

^asuzananoronha13@ime.eb.br

RESUMO: Niobato de sódio é um material dielétrico potencialmente importante por suas propriedades piezoelectricas. Possui estrutura do tipo perovskita, na sua forma mais estável. Os recentes avanços na engenharia de tecidos têm se concentrado no uso de sinais bioquímicos e físico-químicos para desencadear respostas celulares específicas e incentivar uma melhor interação biológica entre o biomaterial e o tecido vivo. A cerâmica piezoeletrica pode ser a chave para a funcionalização dos enxertos atuais, pois exibem comportamento elétricos gerados mecanicamente. Neste trabalho, foi adotada a produção do niobato de sódio (NaNbO_3), um biomaterial piezoeletrico, em composições molares diferentes, pelo método sol-gel com o objetivo de observar as alterações na microestrutura utilizando técnicas microscopia eletrônica de varredura (MEV). A síntese foi eficiente e a microestrutura está de acordo com o que foi encontrado na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Niobatos de sódio. Sol-gel. Piezoeletricos.

ABSTRACT: Sodium niobate is a potentially important dielectric material for its piezoelectric properties. It has a perovskite-like structure, in its most stable form. Recent advances in tissue engineering have focused on the use of biochemical and physicochemical signals to trigger specific cellular responses and encourage better biological interaction between the biomaterial and living tissue. Piezoelectric ceramics may be the key to the functionalization of current grafts, as they exhibit mechanically generated electrical behavior. In this work, the production of sodium niobate (NaNbO_3), a piezoelectric biomaterial, in different molar compositions, by the sol-gel method was adopted in order to observe the changes in the microstructure using scanning electron microscopy (SEM) techniques. The synthesis was efficient and the microstructure is in agreement with what was found in the literature.

KEYWORDS: Sodium niobates. Sol-gel. Piezoelectric

1. Introdução

A engenharia tecidual tem se concentrando no estudo de sinais bioquímicos e físico-químicos, com o objetivo de obter respostas celulares específicas e incentivar uma melhor interação entre o tecido vivo e os materiais implantados. Estudos nessa área indicam que a utilização de estímulos elétricos pode promover um aumento da velocidade de cicatrização e regeneração dos tecidos [1, 2].

Estudos levaram ao desenvolvimento e uso de estímulos elétricos exógenos no tratamento de fratura óssea em diferentes partes do sistema esquelético humano. No entanto, a utilização de estímulos elétricos pontuais e não constantes não levam a re-

spostas tão eficientes como deportadas pela literatura. Devido a isso, a eficácia clínica e a segurança desses métodos de estimulação elétrica exógena estão sendo consideradas inconsistentes e inconclusivas. Pois há falta de número suficiente de estudos clínicos randomizados e bem controlados para comprovar sua utilização [1,2,3].

A alta demanda de novos materiais inteligentes que possam favorecer o processo de regeneração tecidual levam ao estudo de novos materiais contendo componentes eletricamente ativos ou materiais que possam ser polarizados. As cerâmicas piezoelectricas que apresentam estrutura perovskita são as mais indicadas para esse tipo de atuação [2, 3, 4, 5].

As cerâmicas piezoelectricas podem ser a chave para a funcionalização dos projetos de implantes atuais. Elas ex-

ibem comportamento elétricos gerados mecanicamente. A cerâmica piezoeletrica mais utilizada até o momento é titanato de zirconato de chumbo $Pb[Zr_{(x)}Ti_{(1-x)}]O_3$ (PZT), onde a composição x é usada para ajustar propriedades específicas para memória ou dispositivos piezoeletricos. No entanto, devido à toxicidade desses dispositivos contendo chumbo, muito esforço tem sido dedicado nos últimos anos para encontrar alternativas sem chumbo adequadas ao PZT. Um sistema de materiais alternativos promissores é a síntese por sol-gel de niobato de sódio e potássio ($Na,KNbO_3$). Enquanto as propriedades estruturais e eletrônicas do niobato de potássio de um membro final ($KNbO_3$) são relativamente bem conhecidas, este é muito menos o caso do niobato de sódio perovskita ($NaNbO_3$) [5, 6, 7].

O Niobato de sódio é uma cerâmica que a temperatura ambiente tem uma estrutura ortorrômbica, grupo espacial Pbma. O interesse por esse material baseia-se na sua fase perovskita que exibe propriedades piezoeletricas. Existe uma variedade de rotas de preparação do $NaNbO_3$ que utilizam, em sua maioria, o pentóxido de nióbio. A síntese utilizando solução sólida é bastante conhecida, entretanto, a síntese por sol-gel leva a obtenção de materiais com melhor homogeneidade e com um tempo de obtenção menor [8].

Neste trabalho, foi adotada a produção do niobato de sódio ($NaNbO_3$) pelo método sol-gel em composições molares diferentes, o tratamento térmico foi realizado na temperatura de calcinação de 650°C e sinterização 1130°C com o objetivo de observar as alterações na microestrutura. Com o controle desses parâmetros, será possível obter uma previsão de síntese ideal para orientar estudos posteriores de aplicação dessa cerâmica para a regeneração óssea.

2. Materiais e Métodos

O trabalho consiste na síntese de niobato de sódio ($NaNbO_3$) pelo método sol-gel seguindo as etapas utilizadas por Jigong (2010) [9]. O autor levou em consideração o diagrama de fases do niobato de sódio e potássio **figura 2**, onde, em uma das extremidades tem-se a presença do

niobato de sódio e na outra, niobato de potássio [10]. Os reagentes utilizados estão dispostos na **tabela 1** a seguir.

Tab.1 - Reagentes utilizados na síntese do $NaNbO_3$ pelo método sol-gel.

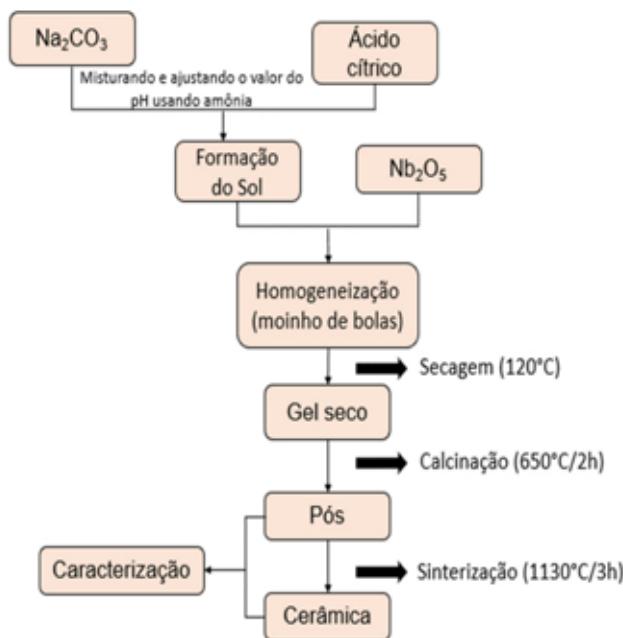
REAGENTES	PUREZA (%)	FABRICANTE
Na_2CO_3	99,8	Vetec
Nb_2O_5	99,96	--
Ácido cítrico $C_6H_8O_7H_2O$	99,5	Baker
Amônia	--	Merck
Álcool polivinílico (PVA)	--	Merck

Fonte: Autoria própria.

Os precursores utilizados como matéria prima foram Na_2CO_3 (99,8%), Nb_2O_5 (99,96%) e ácido cítrico ($C_6H_8O_7H_2O$, 99,5%). O esquema detalhado do processo é apresentado no fluxograma a seguir **figura 1**. O carbonato pesado foi dissolvido em água deionizada e agitado por 20 min. O ácido cítrico (a proporção molar de ácido cítrico para o conteúdo total de cátion foi 2 para 1) foi dissolvido em água deionizada em um bêquer e agitado por 20 min, posteriormente, foi adicionado à solução de carbonatos. Então, pequenas quantidades de solução de amônia foram adicionadas para ajustar o valor do pH e formar o sol. O Nb_2O_5 foi adicionado ao sol e a solução foi agitada por 1h, após isso, passou pelo processo de homogeneização no moinho de bolas, contendo bolas de alumina, durante 8h. Após a moagem, a pasta foi seca a 120°C para formar xerogel. O xerogel resultante foi calcinado a 650°C por 2h para obter após o niobato de sódio. Os pós calcinados foram prensados em pastilhas de aproximadamente 3g e 12mm de diâmetro, utilizando álcool polivinílico (PVA) como ligante. Após a

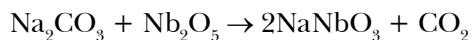
queima do PVA, as pastilhas foram finalmente sinterizadas à 1130°C durante 3h.

Fig. 1 - Fluxograma da síntese do NaNbO_3 pelo método sol-gel.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados estão dispostos a seguir através da caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A fim de comparação, foi produzido niobato de sódio por duas composições diferentes. A primeira composição apresenta proporção estequiométrica (A) um para um (1:1) de carbonato de sódio e óxido de nióbio e a segunda, na proporção não estequiométrica (B) um para três quartos (1:3/4) de carbonato de sódio e óxido de nióbio, respectivamente. A fórmula utilizada para o cálculo dos reagentes foi a seguinte:



A **tabela 2** apresenta a proporção molar utilizada para comparação:

Tab. 2 - Proporção molar dos compostos.

Nomenclatura das Amostras	PROPORÇÃO	
	Na ₂ CO ₃	Nb ₂ O ₅
NaNbO ₃ - A	1	1
NaNbO ₃ - B	1	3/4

Fonte: Autoria própria.

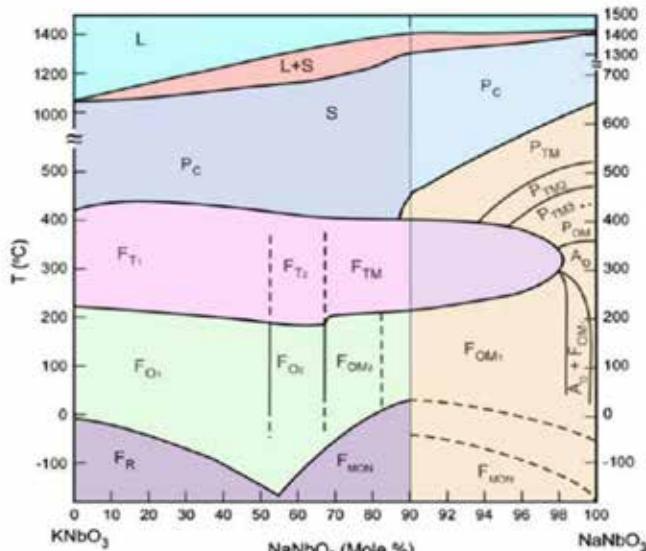
As amostras foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A morfologia dos pós calcinados e sinterizados foram investigadas pelo microscópio eletrônico de varredura modelo QUANTA 250 FEG da fabricante FEI, instalado no laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto Militar de Engenharia (IME) para análise das microestruturas via SE e BSE. Nestas análises foram utilizados detectores de elétrons secundários – SE (marca SE Detector R580 do fabricante FEI) e retroespalhados – BSE (modelo 6 Channel BSD Amplifier MK 3.1 do fabricante FEI) associados ao software de controle Spirit 1.9. As amostras foram recobertas com ouro, depositado por um metalizador LEICA modelo EM ACE600 sob corrente de 50mA durante 2 minutos.

3. Resultados e Discussão

A **figura 2** apresenta o diagrama de fases do sistema $\text{KNbO}_3 - \text{NaNbO}_3$, onde C, T, O e M indicam simetria cúbica, tetragonal, ortorrômbica e monoclinica, respectivamente; F, A, P são as letras indicadas para representar os comportamentos ferroelétrico, anti ferroelétrico e para elétrico; S e L correspondem aos estados sólido e líquido. É possível observar ao longo da faixa ao lado direito onde tem-se inteiramente a composição do niobato de sódio. Esse material é totalmente dependente da sua composição e da temperatura de obtenção. Devido a isso, é de extrema importância o processo de obtenção do niobato de sódio, pois qualquer diferença de composição produz uma estrutura diferente e, por

consequência, propriedades diferentes.

Fig. 2 - Diagrama de fases do sistema KNbO_3 – NaNbO_3 . C, T, O e M indicam simetria cúbica, tetragonal, ortorrômbica e monoclinica, respectivamente; F, A, P para comportamento ferroelétrico, anti ferroelétrico e para elétrico; S e L correspondem aos estados sólido e líquido.

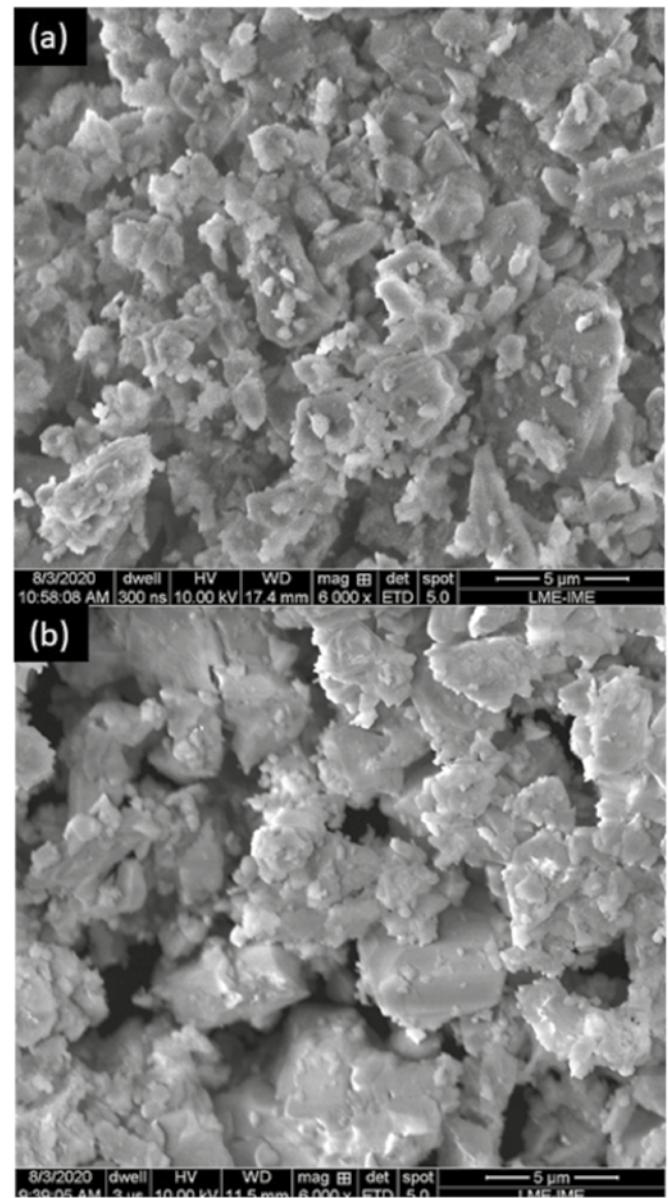


Fonte: LI (2013) [10].

3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

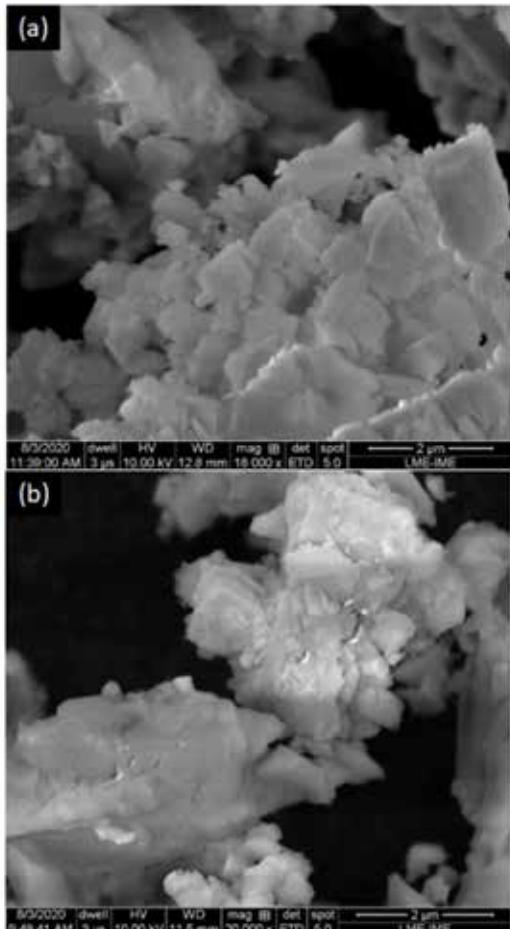
As **figuras 3 e 4** apresentam as micrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) das amostras de NaNbO_3 - A e NaNbO_3 - B, ambas calcinadas a 650°C por 2h. Elas denotam como ocorre a variação na microestrutura equivalente a variação composicional incitada nesse trabalho. As imagens em MEV mostram formação de precipitados com formatos irregulares. As amostras calcinadas não apresentam grande variação de tamanho como pode-se notar facilmente nas micrografias observadas nas **figuras 3 e 4**. Entretanto, é notável uma maior compactação das partículas nas amostras de NaNbO_3 - B em comparação com NaNbO_3 - A.

Fig. 3 - Micrografia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de (a) NaNbO_3 - A e (b) NaNbO_3 - B ambas calcinadas. Aumentos de (a e b) 6.000X.



Fonte: Autoria própria.

Fig. 4 - Micrografia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de (a) NaNbO_3 - A e (b) NaNbO_3 - B ambas calcinadas. Aumentos de (a) 18.000X e (b) 20.000X.

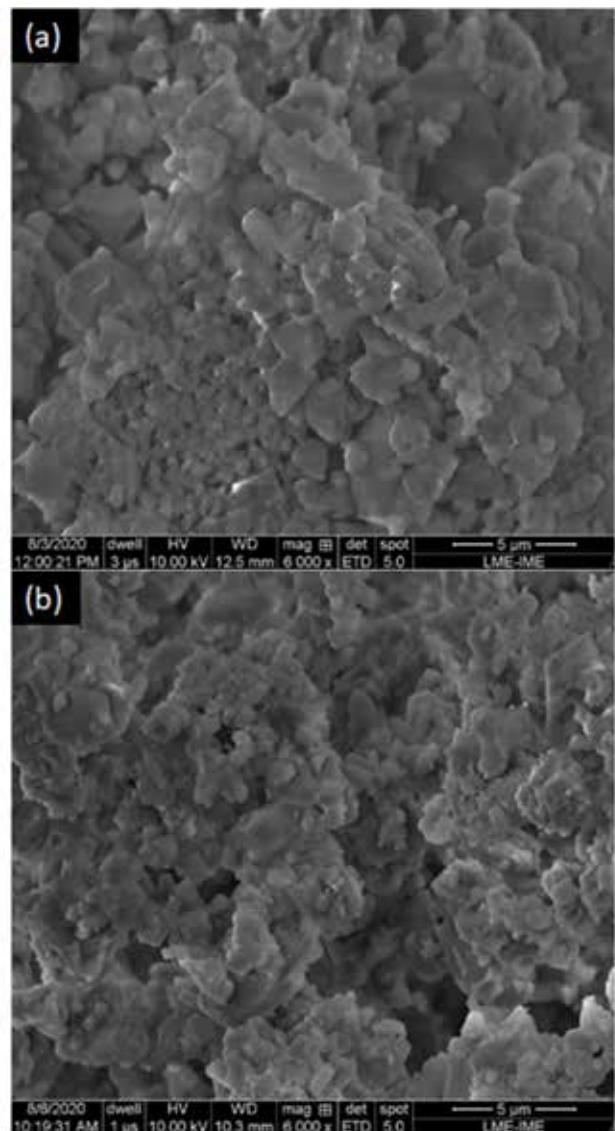


Fonte: Autoria própria.

As **figuras 5 e 6** apresentam as micrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) das amostras de NaNbO_3 - A e NaNbO_3 - B ambas calcinadas a 650°C por 2h e sinterizadas a 1130 por 3h. Elas denotam como ocorre a variação na microestrutura equivalente a variação composicional incitada nesse trabalho. As imagens em MEV mostram formação de precipitados com formatos irregulares. A **figura 5(b)** apresenta uma melhor homogeneidade dos aglomerados em comparação com a **figura 5(a)**. A **figura 6(b)** é possível observar que algumas partículas apresentaram tamanho de grão com crescimento maior que as demais observadas na **figura 6(a)**, as quais apresentaram grãos com tamanhos homogêneos. Pode ser possível observar a presença de agulhas,

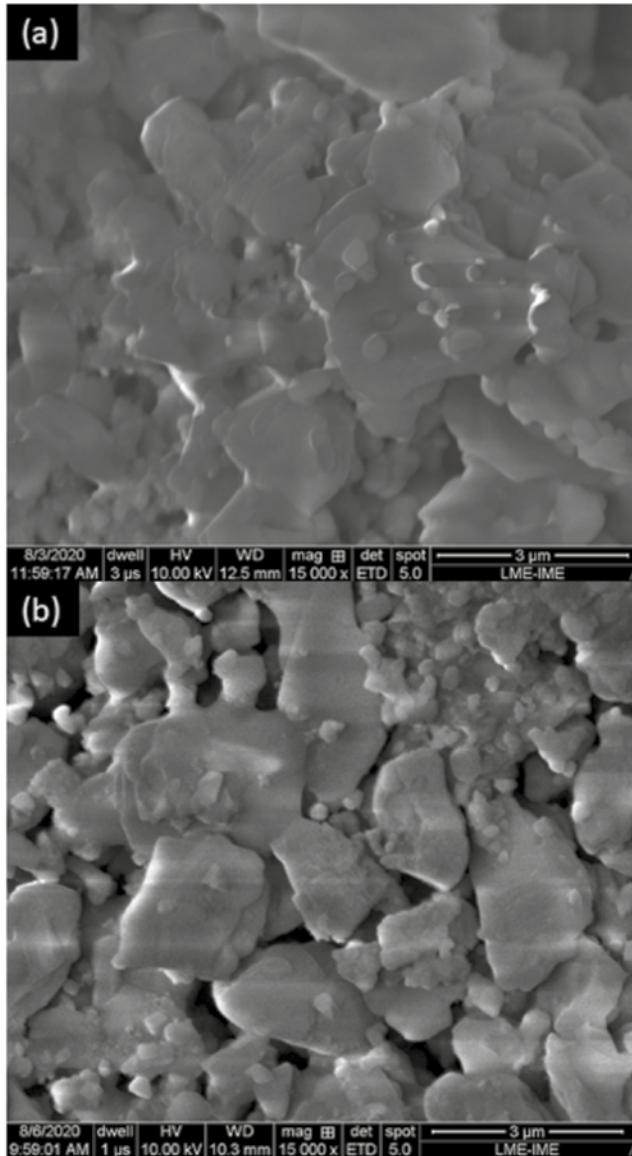
elas tendem a aparecer quando são sintetizadas em concentrações molares baixas, logo, compreende-se os formatos aciculares e irregulares observados nessas amostras. As duas composições podem ser comparadas observando variação no tamanho de grão para a amostra de NaNbO_3 - B levemente maiores em relação a amostra NaNbO_3 - A. Além disso, apresentam uma maior compactação observadas na **figura 5(b)** e **6(b)**.

Fig. 5 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de (a) NaNbO_3 - A e (b) NaNbO_3 - B ambas sinterizadas. Aumentos de (a e b) 6.000X.



Fonte: Autoria própria.

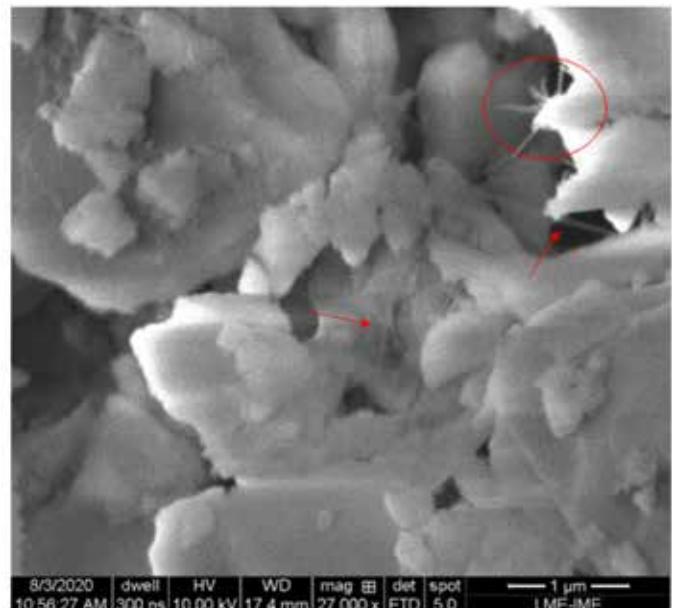
Fig. 6 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de (a) NaNbO_3 - A e (b) NaNbO_3 - B ambas sinterizadas. Aumentos de (a e b) 15.000X.



Fonte: Autoria própria.

A figura 7 apresenta a amostra NaNbO_3 - A calcinada a 650°C por 2h. Nessas amostras é possível observar a presença de precipitados em forma de fios sub micro-métricos. Este resultado é interessante visto que segundo a literatura, agulhas ou nanoagulhas só são obtidas em concentrações molares menores, como mostra a formação de pequenas agulhas notadas apenas nessa composição e no tratamento térmico de calcinação [11].

Fig. 7 - Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da amostra de NaNbO_3 - A calcinada. Aumentos de 27.000X.



Fonte: Autoria própria.

4. Conclusão

A síntese de niobato de sódio por sol-gel foi efetiva em produzir a fase de niobato de sódio (NaNbO_3) com a presença de pequena porcentagem de óxido de nióbio. A microestrutura apresentou tamanho de grão irregular e poros nas amostras calcinadas e boa densificação das amostras sinterizadas. Dessa forma, é válido o estudo do niobato de sódio para sua utilização nas aplicações em biomateriais como cerâmicas que apresentam o fenômeno da piezoelectricidade, onde os testes serão realizados em trabalhos posteriores.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao IME pelos recursos utilizados para a realização deste trabalho, bem como pelo financiamento do CNPq, CAPES e FAPERJ.

Referências

- [1] BAHAREH A.; MILAZZO M.; LAZZERI A.; BERRETTINI S. UDDIN M. J.; QIN Z. BUEHLER M. J.; DANTI S. Electrospinning piezoelectric fibers for biocompatible devices. *Advanced healthcare materials*. P. 1901287- 1901287, 2019.
- [2] POON, K. K.; MATTHIAS, C.; WURM, EVANS, D. M.; EINARSrud, M. A.; LUTZ, R.; GLAUM, J. Biocompatibility of (Ba,Ca)(Zr,Ti)O₃ piezoelectric ceramics for bone replacement materials. *J Biomed Mater Res*. v.108, p.1295–1303, 2020. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34477>
- [3] TOFAIL, A. M. S.; BAUER J. Electrically polarized biomaterials. *Advanced materials*. V.28, n.27, p.5470-5484, 2016.
- [4] BODHAK, S.; BOSE, S.; BANDYOPADHYAY, A. Role of surface charge and wettability on early stage mineralization and bone cell–materials interactions of polarized hydroxyapatite. *Acta Biomaterialia*. v.5, p.2178–2188, 2009.
- [5] SHROUT, T. R.; ZHANG, S. J. Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT? *J. Electr.* v.19, p.113–126, 2007.
- [6] Y. Saito, H. Takao, T. Tani et al., “Lead-free piezoceramics,” *Nature*, vol. 432, no. 7013, p. 84, 2004.
- [7] X. Tan, C. Ma, J. Frederick, S. Beckman, and K. G. Webber, “The antiferroelectric ↔ ferroelectric phase transition in lead-containing and lead-free perovskite ceramics,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 94, no. 12, pp. 4091–4107, 2011.
- [8] C. I. Cheon, H. W. Joo, K.-W. Chae et al., “Monoclinic ferroelectric NaNbO₃ at room temperature: crystal structure solved by using super high resolution neutron powder diffraction,” *Materials Letters*, vol. 156, pp. 214–219, 2015.
- [9] JIGONG HAO; ZHIJUN XU; RUIQING CHU; YANJIE ZHANG; QIAN CHEN; PENG FU; WEI, LI.; GUORONG, LI.; QINGRUI, YIN. Characterization of (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃ powders and ceramics prepared by a novel hybrid method of sol–gel and ultrasonic atomization. *Materials and Design* v.31, p.3146–3150, 2010.
- [10] Li, J.-F., Wang, K., Zhu, F.-Y., Cheng, L.-Q., & Yao, F.-Z. (2013). (K_xNa_{1-x})NbO₃-Based Lead-Free Piezoceramics: Fundamental Aspects, Processing Technologies, and Remaining Challenges. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(12), 3677–3696. doi:10.1111/jace.12715
- [11] TSUNG-YING, KE; HSIANG-AN CHEN, HWO-SHUENN SHEU, JIEN-WEI YEH, HEH-NAN LIN, CHI-YOUNG LEE, HSIN-TIEN CHIU. Sodium Niobate Nanowire and Its Piezoelectricity. *The Journal of Physical Chemistry*. 2008 112 (24), 8827-8831

Escória de aciaria como material precursor na geopolimerização

Eliziane Medeiros Santos^a, Flávio J. H. T. v. Ramos^b, Maria de Fátima V. Marques^b, Ricardo P. Weber^a

^aInstituto Militar de Engenharia (IME), ^bUniversidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

^aelizianemsantos@gmail.com

RESUMO: Materiais geopoliméricos são cada vez mais estudados devido às suas boas propriedades, que podem até ser comparadas às do concreto de cimento Portland. Para a geopolimerização, é necessário um material precursor que seja rico em alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). A escória de forno panela é um rejeito industrial que se adequa às necessidades da síntese de geopolímeros. Este estudo avalia a geopolimerização empregando a escória de forno panela através das análises de difração de raios X (XRD), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (SEM). Com a análise de XRD foi possível identificar fases cristalinas e alguns picos característicos da geopolimerização; na espectroscopia de FTIR, o deslocamento de algumas bandas pela incorporação de Al; nas imagens de SEM a diferença de morfologia entre a escória pura e o geopolímero, confirmando a ocorrência da geopolimerização.

PALAVRAS-CHAVE: Geopolímero. Geopolimerização. Escória de forno panela.

ABSTRACT: Geopolymer materials are progressively studied due to their good properties that can even be compared to Portland cement concrete. For geopolimerization, a precursor material is required, which is rich in alumina (Al_2O_3) and silica (SiO_2). Ladle furnace slag is an industrial waste that suits the needs of geopolymer synthesis. This study analyzes the geopolimerization performed with ladle furnace slag through X-ray diffraction (XRD); Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy (SEM) analyses. With the XRD analysis, it was possible to identify crystalline phases and some peaks characteristic of geopolimerization; in the FTIR spectroscopy, the displacement of some bands by the incorporation of aluminum and in SEM images, the difference in morphology between pure slag and geopolymer, confirming the occurrence of geopolimerization

KEYWORDS: Geopolymer. Geopolymerization. Ladle furnace slag.

1. Introdução

A poluição do ecossistema é um problema global e os efluentes industriais contribuem consideravelmente com esse problema devido ao seu inegável efeito na saúde pública e ao meio ambiente [1]. A redução de resíduos na mineração e nas atividades industriais se tornou uma das principais questões ambientais visando a busca de melhorias e soluções. Converter resíduos em produtos de valor agregado é uma questão fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias [2].

Durante a fabricação do aço, existem subprodutos que são descartados, como as escórias, por possuírem alto conteúdo metálico e por terem comportamento de expansão [3]. Com isso, começaram a surgir estudos com

utilizações para as escórias de aciaria que foram incorporadas em pavimentação, aterros, alvenaria de edifícios, produção de cimento, construção de estradas e produção de fertilizantes [4]. A escória de aciaria se qualifica para a síntese de geopolímero por ser um material rico em minerais de sílica e alumina [5].

Geopolímeros são materiais inorgânicos semicristalinos formados pela ativação alcalina de aluminossilicato. Suas propriedades podem ser comparadas ao concreto de cimento Portland comum, tendo resistência mecânica comparável ou ainda superior e boas propriedades físicas como menor retração, baixa relação densidade-resistência e características de durabilidade. Assim, existem diversas aplicações como ligante para concretos e tijolos, aterros, estradas e telhas [6]. Os geopolímeros também podem ser usados em compósitos possuindo uma ampla gama

de aplicações, como adequação para infraestrutura de transporte, pavimentos, aplicações subaquáticas, reparo e reabilitação de estruturas, bem como os recentes desenvolvimentos em impressão 3D [7]. Nos últimos anos, houve um intenso desenvolvimento de estudos voltados para a utilização de precursores tradicionais, como precursores derivados de resíduos como as escórias [8]. Entre as escórias geradas na produção do aço existe a escória de forno panela e alguns estudos mostraram que ela possui propriedades cimentícias com potencial de aumentar as propriedades de resistência dos geopolímeros [9].

A geopolimerização é um processo com os seguintes estágios: dissolução, difusão, oligomerização, polimerização adicional e endurecimento por desidratação das fontes de alumínio-silício em uma solução alcalina [10]. Para que ocorra a geopolimerização deve existir um material precursor que pode estar na forma natural ou como subproduto. Ele precisa ser rico em alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). Esse material precursor de alumino-silicato requer uma solução de ativação alcalina como hidróxido de sódio ou potássio (NaOH, KOH), silicato de potássio ou sódio (K_2SiO_3 , Na_2SiO_3), entre outros. A síntese de geopolímero se inicia pela dissolução das espécies de Al e Si dos materiais precursores sob a ação da solução ativadora alcalina. Ocorre então interação iônica entre as espécies em meio alcalino, seguida pela quebra da ligação covalente entre os átomos de silício, alumínio e oxigênio. Íons carregados negativamente associados ao Al tetraédrico são balanceados por cátions alcalinos e alcalino-terrosos (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Li^+). Após esse processo, ocorre o transporte, a orientação e a condensação dos íons precursores em monômeros, seguido dos processos de coagulação e gelificação. Assim, as redes 3D rígidas de aluminatos de sílica são formadas por policondensação de monômeros [11].

Este estudo é referente a produção de geopolímero utilizando a escória de forno panela como material precursor. No processo de geopolimerização são testadas duas proporções massa/volume diferentes de sólido/líquido, sendo utilizada a solução alcalina de metassilicato de sódio. Foram feitas análises dos materiais através de espectroscopia no infravermelho com transformada

de Fourier (FTIR), difratometria de raios X (XRD) e microscopia eletrônica de varredura (SEM).

2. Materiais e Métodos

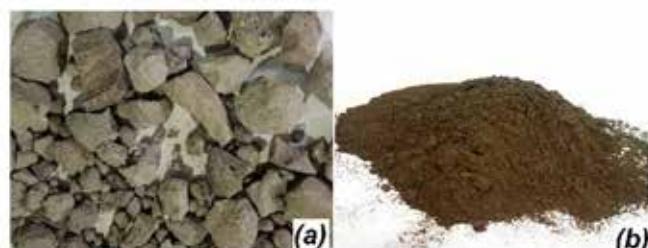
No presente trabalho foi estudada a geopolimerização com material precursor sendo a escória de forno panela. A escória de aciaria de panela foi fornecida pela USIMINAS e possui composição química de acordo com a **figura 1**.

Fig. 1 – Composição (%) da escória de aciaria de panela.

FeT	Fe ⁰	FeO	CaO	SiO ₂	MgO
53,58	32,03	26,42	17,30	7,11	5,35
MnO	Al ₂ O ₃	S	ZnO	K ₂ O	Na ₂ O
2,09	3,97	0,68	<0,005	0,26	0,08

Na busca da diminuição da granulometria, a escória de panela foi colocada em um moinho planetário durante o período de uma hora e trinta minutos, sob a velocidade de 300 rpm. A **figura 2** apresenta o estado da escória de aciaria de panela antes e depois da moagem.

Fig. 2 – Escória antes (a) e depois da moagem (b).



Na geopolimerização foi utilizado o metassilicato de sódio para produzir a solução alcalina. Foram testadas duas diferentes proporções sólido/líquido, pela razão entre a massa de escória particulada e o volume de solução: 1,4 e 1,6 g/ml. Na concentração de 1,4 g/ml, foram adicionadas 27,90 g de metasilicato de sódio em 60 ml de água deionizada. Essa mistura ficou em agitação por 2 h inicialmente para que ocorresse a dissolução completa. Em seguida a escória de aciaria foi adicionada aos poucos totalizando 56,10 g e a mistura continuou no agitador mecânico por mais 20 h. Já para a concentração de 1,6 g/ml foram executados os mesmos procedimentos, porém com 31,80 g de metasilicato de sódio e 63,99 g de escória.

Após o tempo de agitação, a mistura ganhou viscosidade e foi colocada na estufa a 70 °C para solidificação. Com o material solidificado foram retiradas algumas amostras para caracterização. Os geopolímeros foram nomeados de geopolímero 1.4 e 1.6. O restante do material foi macerado para pulverização. A **figura 3** apresenta as etapas realizadas no processo de geopolimerização iniciando com a mistura dos materiais pelo agitador mecânico (a), seguido do geopolímero após as 20 h de agitação (b), do geopolímero solidificado (c) e por fim do geopolímero macerado (d).

Fig. 3 – Mistura dos materiais pelo agitador mecânico (a), geopolímero após as 20 h de agitação (b), geopolímero solidificado (c) e geopolímero macerado (d).



2.1 Difração de raios X (XRD)

Com o intuito de investigar as fases presentes, foi realizada a análise de XRD no Laboratório de Difração de raios X do IME. A análise foi feita em um difratômetro da marca PANalytical, modelo X'Pert MRD, operado com radiação de cobre $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54060\text{\AA}$), corrente de 40mA, tensão de 45 kV, intervalo de 2θ de 10° a 90°, varredura com passo de 0,050° e tempo de coleta de 180 segundos.

2.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

As amostras em forma de pó foram submetidas a análise de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) com o objetivo de identificar os grupos funcionais e deslocamento de bandas. A realização do ensaio foi feita no Centro Brasileiro de Pesquisas

Físicas (CBPF), com um equipamento da marca IR Prestige-21, sendo utilizado na faixa de IR média de 4000 a 400 cm^{-1} com 128 varreduras e uma resolução de 4 cm^{-1} .

2.3 Microscopia eletrônica de varredura (SEM)

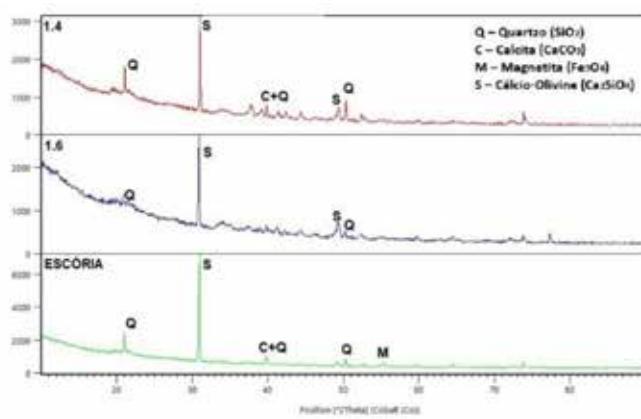
A fim de analisar a microestrutura e as dimensões de partículas, amostras da escória de aciaria e de todas as etapas da geopolimerização foram analisadas por um microscópio eletrônico de varredura (SEM). O equipamento da marca FEG-SEM, fabricado pela FEI, modelo Quanta 250, pertence ao IME e foi utilizada uma tensão de 15 kV. As superfícies das amostras foram recobertas com ouro, o qual foi depositado no aparelho de recobrimento, fabricado pela Leica, modelo Ace 600, durante 180 segundos, com uma camada estimada de 16 nm.

3. Resultados e Discussões

3.1 Difração de raios X (XRD)

Através da análise de difração de raios X (XRD) foi possível obter os difratogramas das amostras dos geopolímeros 1.4 e 1.6 e da escória de panela, que foram indexados pelo software HighScore, apresentado na **figura 4**.

Fig. 4 – Difratogramas dos geopolímeros 1.4 e 1.6 e da escória de panela.



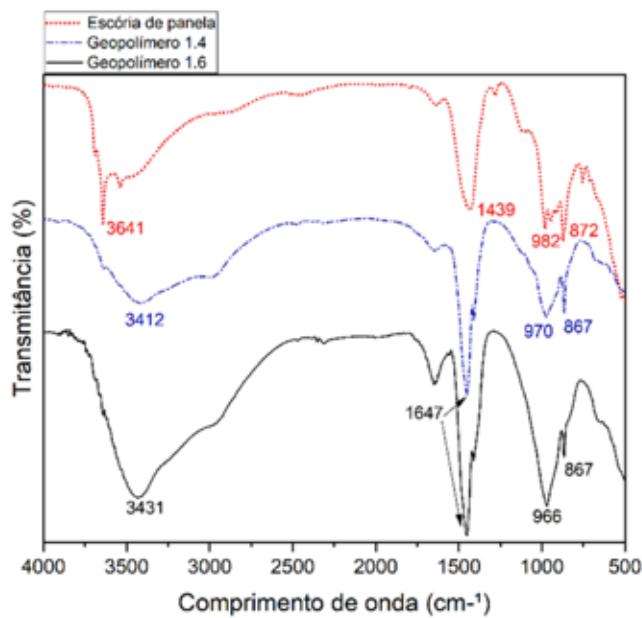
Os difratogramas apresentam fases cristalinas que incluem quartzo (Q), calcita (C), magnetita (M) e cálcio-olivina (S), identificando a composição da escória de panela [10]. Através da comparação entre os difratogramas apresentados na **figura 4**, é possível observar os difratogramas

dos geopolímeros 1.4 e 1.6, onde ocorreu o surgimento de novos picos de difração da fase S próximo a 49° (2 $\overline{0}$), além de novos picos de fases ainda não indexadas, o que sugere a confirmação da geopolimerização. Além disso, o pico próximo a 50° que contém a fase Q no geopolímero 1.4 se tornou mais intenso relacionado ao alto teor de sílica cristalina. Já para o do geopolímero 1.6 ocorreu redução e alargamento do pico, o que pode estar associado ao tamanho do cristalito ou a uma reorganização diferente [13, 14].

3.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros para a escória de panela e para os geopolímeros 1.4 e 1.6 estão apresentados na **figura 5**.

Fig. 5 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) da escória de panela e dos geopolímeros 1.4 e 1.6.



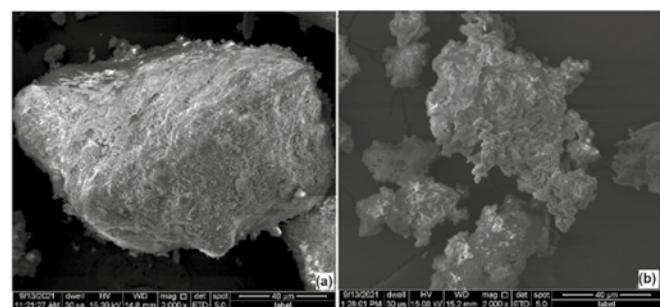
As bandas estão presentes nas regiões de 3641, 1439, 982 e 872 cm^{-1} na escória de panela; 3412, 1647, 970 e 867 cm^{-1} no geopolímero 1.4 e em 3431, 1647, 966 e 867 cm^{-1} no geopolímero 1.6. No espectro da escória de panela, a banda 3641 cm^{-1} reflete grupos H-O-H da água cristalina, o que indica que carbonatos foram formados com água de cristalização. Nas bandas 1439 e 872 cm^{-1} ocorre um alongamento assimétrico de CO_3^{2-} que pode

ser atribuído à presença de CaCO_3 . Já a banda 982 cm^{-1} se relaciona ao alongamento das bandas de vibração de Si-O [15, 16]. As bandas em 3412 e 3431 cm^{-1} presentes nos geopolímeros 1.4 e 1.6, respectivamente, se referem à vibração de alongamento de OH, correspondendo à água estrutural e à água livre. A banda 1647 cm^{-1} encontrada em ambos os geopolímeros se refere à absorção de vibração de flexão das ligações H-O-H indicando água livre [17]. As bandas de 970 e 966 cm^{-1} dos geopolímeros foram deslocadas se comparadas à escória de panela, além de uma pequena banda próxima de 1100 cm^{-1} existente na escória ter desaparecido nos geopolímeros. Isso se deve a formação da matriz geopolimérica indicando a incorporação dos átomos de Al na estrutura tetraédrica. Quanto maior for o deslocamento, maior o grau de penetração de Al das partes vítreas na rede $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e, portanto, a formação do gel geopolimérico. A formação desta fase de gel sugeriu a despolimerização e reorganização estrutural de fases amorfas no geopolímero. A banda em 867 cm^{-1} presente em ambos os geopolímeros indicam vibrações de flexão de Ca-O e Si-O [6, 9].

3.3 Microscopia eletrônica de varredura (SEM)

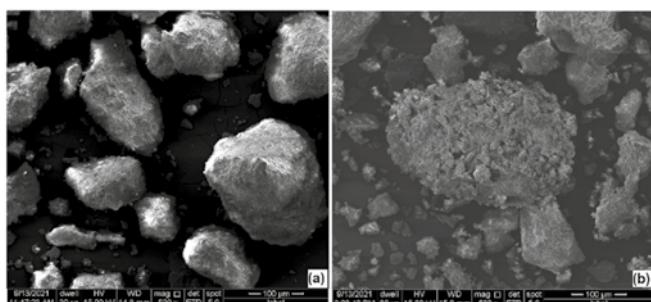
A morfologia, microestrutura, dimensões das partículas e a dispersão dos particulados da escória de panela e dos geopolímeros 1.4 e 1.6 foram analisadas em SEM. É possível verificar a ocorrência da geopolimerização devido à alteração morfológica apresentada nas imagens de SEM com aumento de 2.000x contida na **figura 6**, que contém as imagens da escória de panela (a) e do geopolímero 1.4 (b).

Fig. 6 – Diferença morfológica entre a escória de panela (a) e o geopolímero 1.4 (b).



Também é possível observar a alteração morfológica nas micrografias com aumento de 1000x na **figura 7**, possibilitando a diferenciação da escória de panela (a) com o geopolímero 1.6 (b), o que também confirma a ocorrência da geopolimerização.

Fig. 7 – Diferença morfológica entre a escória de panela (a) e o geopolímero 1.6 (b).



A **fig. 8** apresenta a micrografia do geopolímero 1.4 com aumento de 5000x onde é possível observar uma estrutura composta por grânulos compactados em uma estrutura homogênea. Essa estrutura cúbica do cristal apresenta morfologia similar às zeólitas [18, 19].

4. Conclusões

Através da difração de raios X realizada na escória de forno panela, foi possível identificar fases cristalinas

Referências

- [1] ALOUANI, M. E.; SAUFI, H.; MOUTAOUKIL, G.; ALEHYEN, S.; NEMATOLLAHI, B.; BELMAGHRAOUI, W.; TAIBI, M. h. Application of geopolymers for treatment of water contaminated with organic and inorganic pollutants: State-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier, p. 105095, 2021.
- [2] MURALEEDHARAN, M.; NADIR, Y. Factors affecting the mechanical properties and microstructure of geopolymers from red mud and granite waste powder: A review. *Ceramics International*, 2021. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221003382>>.
- [3] SATISH KUMAR, D.; SAH, R.; SANYAL, S.; PRASAD, G. Measurement of metallic iron in steel making slags. *Measurement*, v. 131, p. 156–161, 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118308054>>.
- [4] PAUL, D.; SURESH, M.; PAL, M. Utilization of fly ash and glass powder as fillers in steel slag asphalt mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, p. e00672, 2021. ISSN 2214-5095. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952100187X>>.
- [5] LIN, W. Y.; PRABHAKAR, A. K.; MOHAN, B. C.; WANG, C.-H. A factorial experimental analysis of using wood fly ash as an alkaline activator along with coal fly ash for production of geopolymer-cementitious hybrids. *Science of The Total Environment*, v. 718, p. 135289, 2020. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719352817>>.

- [6] HUI-TENG, N.; CHENG-YONG, H.; YUN-MING, L.; ABDULLAH, M. M. A. B.; ErnHun, K.; RAZI, H. M.; YONG-SING, N. Formulation, mechanical properties and phase analysis of fly ash geopolymer with ladle furnace slag replacement. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 12, p. 1212-1226, 2021. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421002921>>.
- [7] ALBIDAH, A. S. Effect of partial replacement of geopolymer binder materials on the fresh and mechanical properties: A review. *Ceramics International*, 2021. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221004892>>.
- [8] PAYÁ, J.; AGRELA, F.; ROSALES, J.; MORALES, M. M.; BORRACHERO, M. V.13 - application of alkali-activated industrial waste. In: de Brito, J.; AGRELA, F.(Ed.). *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Woodhead Publishing, 2019, (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering). p. 357-424. ISBN978-0-08-102480-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081024805000130>>.
- [9] YONG-SING, N.; YUN-MING, L.; CHENG-YONG, H.; ABDULLAH, M. M. A. B.; CHAN, L. W. L.; HUI-TENG, N.; SHEE-WEEN, O.; WAN-EN, O.; YONG-JIE, H. Evaluation of flexural properties and characterisation of 10-mm thin geopolymer based on fly ash and ladle furnace slag. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, p. 163-176, 2021. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421008413>>.
- [10] ZHU, X.; YAN, D.; FANG, H.; CHEN, S.; YE, H. Early-stage geopolymerization revealed by 27al and 29si nuclear magnetic resonance spectroscopy based on vacuum dehydration. *Construction and Building Materials*, v. 266, p. 121114, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820331184>>.
- [11] FARHAN, K. Z.; JOHARI, M. A. M.; DEMIRBOĞA, R. Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: A review. *Construction and Building Materials*, v. 264, p. 120276, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820322819>>.
- [12] ZHU, X.; LI, W.; DU, Z.; ZHOU, S.; ZHANG, Y.; LI, F. Recycling and utilization assessment of steel slag in metakaolin based geopolymer from steel slag by-product to green geopolymer. *Construction and Building Materials*, v. 305, p. 124654, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821024090>>.
- [13] SHAHIN, A.; BARSOUM, I.; KORKEES, F. Analysis of an HDPE flanged connection with a time and temperature dependent constitutive behavior. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 191, p. 104375, 2021. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016121000739>>.
- [14] MOREIRA, D. C. F.; SIGOLI, F. A.; MAZALI, I. Avaliação da influência da cristalinidadesobre a determinação do tamanho do cristalito do óxido semicondutor zno. UNICAMP, Campinas, Brasil, 2011.
- [15] XU, B.; YI, Y. Use of ladle furnace slag containing heavy metals as a binding material in civil engineering. *Science of The Total Environment*, v. 705, p. 135854, 2020. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719358498>>.
- [16] CÁRDENAS BALAGUERA, C. A.; GOMÉZ BOTERO, M. A. Characterization of steel slag for the production of chemically bonded phosphate ceramics (CBPC). *Construction and Building Materials*, v. 241, p. 118138, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820301434>>.
- [17] BAI, T.; SONG, Z.-G.; WU, Y.-G.; HU, X.-D.; BAI, H. Influence of steel slag on the mechanical properties and curing time of metakaolin geopolymer. *Ceramics International*, v. 44, n. 13, p. 15706-15713, 2018. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218313890>>.
- [18] ABDEL-GHANI, N. T.; ELSAYED, H. A.; ABDELMOIED, S. Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blast furnace steel slag and its fire-resistance. *HBRC Journal*, v. 14, n. 2, p. 159-164, 2018. ISSN 1687-4048. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404816300219>>.
- [19] SIMANJUNTAK, W.; PANDIANGAN, K. D.; SEMBIRING, Z.; SIMANJUNTAK, A.; HADI, S. The effect of crystallization time on structure, microstructure, and catalytic activity of zeolite-a synthesized from rice husk silica and food-grade aluminum foil. *Biomass and Bioenergy*, v. 148, p. 106050, 2021. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953421000878>>.

Influência da adição de carbeto de titânio na densificação e microestrutura de cerâmicas de alumina dopadas com nióbia e fluoreto de lítio

Pedro Henrique Poubel Mendonça da Silveira^{a,b}, Matheus Pereira Ribeiro^a, Thuane Teixeira da Silva^a, Pedro Craveiro Rodrigues dos Santos Credmann^a, Paulo Roberto Rodrigues de Jesus^a, Alaelson Vieira Gomes^a

^aSeção de Engenharia de Materiais SE/8, Instituto Militar de Engenharia.

^bpedroo.poubel@gmail.com

RESUMO: Compósitos de matriz cerâmica são objetos de estudo no setor balístico por conta da alta dureza associada a tenacidade à fratura e melhoria na performance balística em sistemas de blindagem multicamadas. As cerâmicas sem a presença de dopantes dificultam o processamento e podem comprometer as propriedades finais do material sinterizado. Este trabalho visou o processamento cerâmico de compósitos de matriz cerâmica à base de Al_2O_3 , com adições de 4 %p de Nb_2O_5 , 0,5 %p de LiF e 38,5 %p de TiC, processados por sinterização convencional a 1400 °C/Ih. As cerâmicas sem a presença de TiC apresentaram altos valores de densificação, já as amostras com adições de TiC tiveram reduções severas em sua densificação, tornando- se tornando um material extremamente frágil e quebradiço.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos de Matriz Cerâmica; Microestrutura; Sinterização; Alumina; Carbeto de Titânio.

ABSTRACT: Ceramic matrix composites are objects of study in the ballistic sector due to the high hardness associated with fracture toughness and improved ballistic performance in multilayer shielding systems. Ceramics without the presence of dopants make processing difficult and may compromise the final properties of the sintered material. This work aimed at the ceramic processing of ceramic matrix composites based on Al_2O_3 , with additions of 4 w% of Nb_2O_5 , 0.5 wt% of LiF and 38.5 wt% of TiC, processed by conventional sintering at 1400 °C/Ih. Ceramics without the presence of TiC showed high densification values, whereas samples with TiC additions had severe reductions in their densification, becoming an extremely fragile and brittle material.

KEYWORDS: Ceramic Matrix Composites; Microstructure; Sintering; Alumina; Titanium Carbide.

1. Introdução

Anecessidade da utilização de materiais compósitos vem crescendo devido à sua alta estabilidade ao peso, alta resistência e densidade relativamente baixa, quando comparados às outras classes de materiais. Portanto, os compósitos têm sido utilizados em indústrias como aeroespacial, automotiva, militar e muitos outros campos nas últimas décadas. Uma das principais aplicações dos compósitos é a proteção balística, que utiliza esta classe de materiais no campo militar. Graças ao seu baixo peso, os compósitos são preferidos para a construção de aeronaves, tanques e coletes à prova de balas [1].

Os materiais cerâmicos utilizados em blindagem balística devem ter um grau suficiente de fragmento

da bala, além de reduzir sua velocidade, transformando-a em pequenos fragmentos que devem ser cobertos pela camada posterior da blindagem, constituída de material flexível que suporta a cerâmica. Sendo assim, é necessário que o material cerâmico apresenta alto módulo de elasticidade, somado a alta dureza e boa tenacidade à fratura [2-4].

Os principais materiais cerâmicos usados comercialmente no desenvolvimento de blindagens balísticas são Al_2O_3 , B_4C , SiC e compósitos de matriz cerâmica (CMCs), como por exemplo o sistema Al_2O_3/ZrO_2 ou $Al_2O_3/Nb_2O_5/LiF$. O alto custo aliado às restrições de processamento e dificuldades para prever o desempenho balístico das propriedades destes materiais são retrocessos dos mecanismos cerâmicos, sendo necessária a inclusão de outros elementos para a melhoria de propriedades e redução de custos [5-8].

Dessa forma, a Al_2O_3 fornece a melhor relação custo-benefício entre as cerâmicas avançadas, apresentando alto módulo de elasticidade, alto desempenho como refratário, alta dureza e custo relativamente mais baixo. No entanto, devido à sua baixa tenacidade à fratura e baixa resistência à flexão, o desempenho balístico da alumina é menor quando comparado ao SiC e ao B4C [1,3,9].

Um fator a ser levado em consideração no processamento de cerâmicas para blindagem balística é a formação de fase líquida. Esta fase propicia ao material uma maior densificação, acompanhado de redução das temperaturas de sinterização dos materiais, sem a perda de propriedades. Um exemplo é o uso da nióbia (Nb_2O_5), onde sua adição na alumina em quantidades de 1 a 8% em peso propiciam na alumina uma redução considerável na temperatura de sinterização [10,11].

Outro fator importante é a adição de carbonetos na matriz cerâmica. Adições deste grupo de cerâmicos na matriz de Al_2O_3 (tais como NbC, SiC, B_4C), permite um aumento na dureza e na tenacidade à fratura [12]. No desenvolvimento de CMCs para blindagem, um material com boas propriedades utilizado como adição intersticial para conferir maior dureza e tenacidade à fratura, é o carbeto de titânio (TiC) [12-16].

O TiC é uma cerâmica extremamente dura (dureza Mohs 9 - 9,5) e tem um ponto de fusão extremamente alto (3260 °C) [12-16]. No entanto, o processamento de CMCs constituídos de Al_2O_3 -TiC é difícil, pois uma vez que técnicas como a sinterização por plasma (SPS) ou prensagem a quente (HP) são necessárias. A partir dessas técnicas, é possível obter uma sinterização mais rápida, e com densidades em torno de 95% do TD, porém são técnicas de difícil disponibilidade [16].

Visando um processamento mais simples e barato, o objetivo deste trabalho se dá em processar por meio de sinterização convencional e prensagem isostática a frio, CMCs de matriz Al_2O_3 , com adições de TiC e o uso de Nb_2O_5 e LiF como aditivos de sinterização.

2. Metodologia

2.1 Materiais de Partida

Os pós utilizados para a confecção dos corpos cerâmicos são: $\square\text{-Al}_2\text{O}_3$ adquirida na Treibacher Schleifmittel (Brasil), com tamanho de grão médio de 3 μm , a Nb_2O_5 foi adquirida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (Brasil), o fluoreto de lítio (LiF) usado foi obtido pela Vetec (Brasil), o TiC usado na adição foi adquirido com a empresa Sigma Aldrich (EUA), e o ligante orgânico utilizado para conferir resistência ao corpo à verde é o Polietilenoglicol (PEG 300) da empresa Isofar (Brasil). A seguir na **tabela 1** estão descritos os materiais usados na confecção dos compostos cerâmicos e as densidades de cada componente utilizado.

Tab. 1 - Densidade dos elementos constituintes das cerâmicas produzidas.

Material	Densidade (g/cm ³)
Al_2O_3	3,98
Nb_2O_5	4,60
LiF	2,60
TiC	4,93
PEG 300	--

A densidade das misturas foi determinada a partir da Regra das Misturas, dada a seguir na **equação 1**, onde foram utilizadas as densidades de cada elemento da mistura e sua fração em peso, excluindo o PEG que é eliminado durante a sinterização.

$$\rho = (\rho_A \times m_A) + (\rho_B \times m_B) \quad (1)$$

As porcentagens de adição de cada elemento foram 0,5% em peso de LiF, 4% em peso de Nb_2O_5 e 38,5% em peso de TiC. Na **tabela 2**, estão descritas as densidades de cada composição da mistura.

Tab. 2 - Densidade teórica das amostras obtida por meio da regra das misturas.

Material	Densidade (g/cm ³)
Al ₂ O ₃ -Nb ₂ O ₅	4,00
Al ₂ O ₃ -Nb ₂ O ₅ -LiF	3,99
Al ₂ O ₃ -TiC-Nb ₂ O ₅	4,37
Al ₂ O ₃ -TiC-Nb ₂ O ₅ -LiF	4,36

2.2 Processamento das Amostras

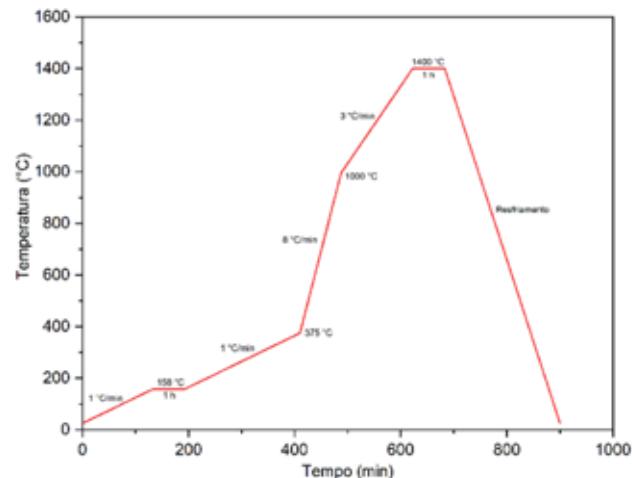
Os materiais de partida foram inseridos em um jarro revestido de alumina. Foi inserido junto destes elementos, água deionizada na proporção de 1:1 para facilitar a homogeneização, e bolas de alumina para uma melhor cominuição dos pós. A moagem e mistura foi feita em moinho de bolas por um período de 8h, seguido de secagem em estufa, em temperatura de 80°C por um período de 48 h.

Após a secagem, a mistura resultante da moagem foi desaglomerada com o auxílio de pistilo e almofariz, seguido de peneiração para obter granulometria desejada. Foi utilizado um agitador de peneiras por um período de 3 min utilizando uma peneira DIN 4188 com abertura de 0,255 mm.

A preparação dos corpos cerâmicos à verde foi feita através de prensagem uniaxial a frio, por meio de uma prensa SKAY, com capacidade de 30 t. Os discos cerâmicos foram preparados com matrizes de 20mm de diâmetro para os ensaios de Arquimedes e prensadas em duas etapas: a primeira etapa consistiu de uma pré-carga de 15 MPa para o assentamento dos pós na matriz por um período de 30 s, já a segunda etapa consistiu de prensagem com carga de 50 MPa para dar o formato de pastilha aos pós.

A sinterização das amostras foi feita de forma convencional, sem a presença de atmosfera controlada. A sinterização foi realizada em um forno JUNG com o processo alcançando patamar máximo de temperatura de 1400 °C. A rota de sinterização é mostrada a seguir na **figura 1**.

Fig. 1 – Rota de sinterização utilizada neste estudo.



2.3 Caracterização

2.3.1 Cálculo de Densificação à Verde

A partir do valor de densidade teórica encontrada através da Regra das Misturas, foi possível calcular a densidade e densificação dos corpos cerâmicos à verde.

Foi utilizada a **equação 2** para determinar a densidade dos corpos a verde através da diferença da massa pelo volume da amostra.

Já a densificação à verde, mostrada a seguir na **equação 3**, foi calculada em cima da percentagem da diferença do valor de densidade obtido pela densidade teórica encontrada na regra das misturas da **equação 1**.

$$\rho_{verde} = \frac{massa_{amostra}}{volume_{amostra}} \quad (2)$$

$$Densificação_{verde} = \left(\frac{\rho_{verde}}{\rho_{teórica}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

2.3.2 Densificação das Amostras Sinterizadas

O cálculo de densidade e densificação dos corpos cerâmicos sinterizados foi realizado com base na NBR 16667:2017 [15]. O cálculo é realizado com princípio na

técnica de Arquimedes, onde é utilizado os dados obtidos da massa imersa (m_i), massa úmida (m_u) e massa seca (m_s) para determinar a densidade aparente através da **equação 4**, e com esse resultado determinar a densificação do corpo cerâmico através da diferença entre a densidade aparente e a densidade teórica do corpo (**equação 5**).

$$\rho_{aparente} = \left(\frac{m_s}{m_u - m_i} \right) \times \rho_{líq} \quad (4)$$

$$Densificação = \left(\frac{\rho_{aparente}}{\rho_{teórica}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

2.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise da superfície de fratura das amostras sinterizadas foi feita em um microscópio eletrônico de varredura QUANTA FEG 250. Foi utilizado potência do feixe de 5kV, 20kV e 25kV, diâmetro do feixe 5,5 μm e magnificação de 500x e 2000x para observar as microestruturas. As amostras foram recobertas com ouro para possibilitar a visualização no MEV.

3. Resultados e Discussão

3.1 Densificação à Verde

A seguir na **tabela 3**, são apresentados os valores de densidade e densificação à verde dos quatro grupos de amostras antes da sinterização.

Tab. 3 - Densidade e densificação à verde dos corpos à verde.

Amostras	Densidade (g/cm^3)	Densificação (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$	$2,02 \pm 0,01$	$50,64 \pm 0,44$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-LiF}$	$2,12 \pm 0,10$	$53,37 \pm 2,57$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-Nb}_2\text{O}_5$	$1,48 \pm 0,05$	$33,86 \pm 1,21$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-Nb}_2\text{O}_5\text{-LiF}$	$1,44 \pm 0,10$	$33,11 \pm 2,31$

A partir dos valores exibidos na **tabela 3**, observa-se que as amostras sem adição de TiC apresentaram valores satisfatórios de densificação à verde. Para as cerâmicas alcançarem uma boa densificação após a sinterização, é necessário que haja uma densificação dos corpos verdes de aproximadamente 55% da densidade teórica ou superior. As amostras com adições de TiC apresentaram valores de densificação muito baixos, o que resulta em baixas densificação dos corpos após a sinterização. Outro fator a ser levado em consideração foi a dificuldade em conseguir prender os corpos com adição de TiC, já que estes apresentaram defeitos de laminação e *endcapping*.

3.2 Densificação das Amostras Sinterizadas

A seguir na **tabela 4** são mostrados os valores de densidade e densificação das amostras sinterizadas.

Tab. 4 - Densidade e densificação à verde das amostras sinterizadas.

Amostras	Densidade (g/cm^3)	Densificação (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$	$3,39 \pm 0,07$	$84,88 \pm 1,77$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-LiF}$	$3,69 \pm 0,02$	$92,71 \pm 0,50$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-Nb}_2\text{O}_5$	$1,06 \pm 0,01$	$24,22 \pm 0,26$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-Nb}_2\text{O}_5\text{-LiF}$	$9,99 \pm 0,01$	$29,19 \pm 0,58$

Os valores de densificação média dos grupos foram muito discrepantes uns dos outros. As amostras do grupo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{/Nb}_2\text{O}_5\text{/LiF}$ apresentaram a maior densificação de todos os grupos, com valores próximos aos obtidos na literatura, acima de 91% [5,6,11]. Já as amostras do grupo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{/Nb}_2\text{O}_5$, apresentaram um valor mais baixo, com densificação próxima a 85%, isto ocorre pelo fato de somente ter se formado a fase $\text{AlN}\text{-bO}_4$ durante a homogeneização [18]. Já o grupo com LiF apresenta interação deste elemento com Nb_2O_5 , fazendo a ocorrência das fases LiNbO_3 e $\text{Nb}_3\text{O}_7\text{F}$ durante a sinterização [19].

Já os dois grupos com presença de TiC na composição apresentaram reduções severas na densificação das amostras (valores menores que 30%). Essa baixa

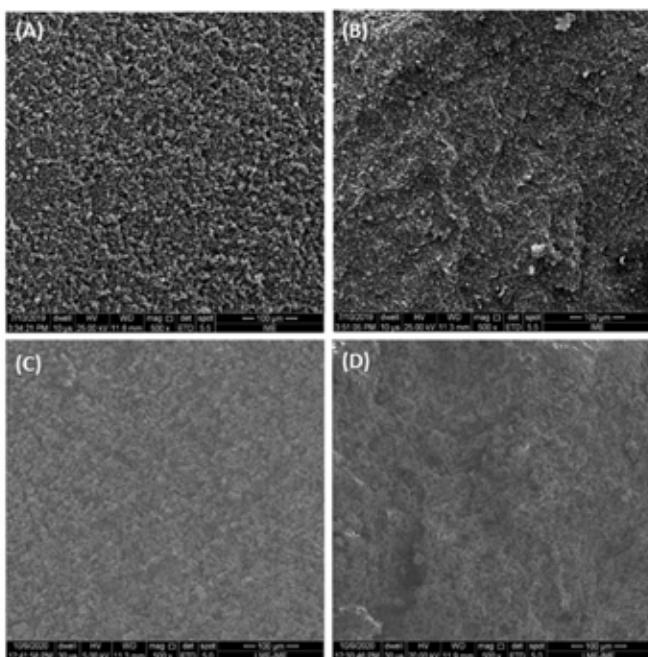
densificação pode ser resultado do alto teor de TiC usado na composição (38,5 % em peso), impedindo que o material se aloje como elemento intersticial na alumina.

É possível supor a partir de dados da literatura, que sem a presença de atmosfera inerte, o TiC reage com o oxigênio, formando a fase titânio (TiO_2), o que até poderia favorecer na sinterização em presença de fase líquida [15,16]. Entretanto sua concentração excessivamente alta, aliado à baixa densificação dos discos cerâmicos durante a prensagem pode ter prejudicado a interação das amostras, fazendo com que o resultado fosse discos porosos e quebradiços.

3.3 Microestrutura das Amostras Sinterizadas

A seguir, nas **figuras 2 e 3**, estão contidas as imagens obtidas com auxílio do MEV da superfície de fratura das amostras sinterizadas.

Fig. 2 – Micrografias das regiões de fratura das amostras sinterizadas com magnificação de 500x: (a) Al_2O_3/Nb_2O_5 ; (b) $Al_2O_3/Nb_2O_5/LiF$; (c) $Al_2O_3/TiC/Nb_2O_5$; (d) $Al_2O_3/TiC/Nb_2O_5/LiF$.



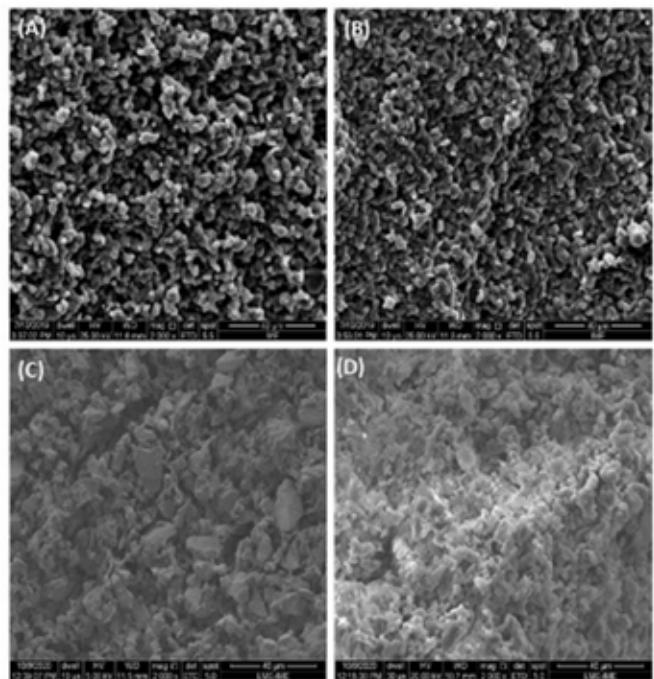
As micrografias da **figura 2** apresentam de forma geral a região de fratura das amostras sinterizadas. Como é possível observar, as amostras dos grupos Al_2O_3/Nb_2O_5 e $Al_2O_3/Nb_2O_5/LiF$ apresentam menor po-

rosidade em sua superfície, resultado da alta densificação obtida na sinterização destes dois grupos.

As amostras com adição de TiC na composição, apresentaram elevada porosidade em sua superfície, resultante da baixa interação dos grãos durante a sinterização. Durante o recobrimento das amostras para a análise no MEV, houve dificuldade na deposição do ouro nas amostras com TiC, pois parte deste material se deposita nos poros, escapando da superfície. Dessa forma, durante a análise, não foi possível gerar as imagens destes dois grupos com a mesma potência do feixe de elétrons (25kV), tornando-se necessário reduzir a potência do feixe para 5kV para a análise da amostra do grupo $Al_2O_3/TiC/Nb_2O_5$ por conta do excesso de carregamento de luz na imagem, e potência de 20kV para a amostra do grupo contendo $Al_2O_3/TiC/Nb_2O_5/LiF$.

A seguir na **figura 3**, estão presentes as micrografias com ampliação de 2000x, com melhor visualização da morfologia dos grãos

Fig. 3 – Micrografias das regiões de fratura das amostras sinterizadas com magnificação de 500x: (a) Al_2O_3/Nb_2O_5 ; (b) $Al_2O_3/Nb_2O_5/LiF$; (c) $Al_2O_3/TiC/Nb_2O_5$; (d) $Al_2O_3/TiC/Nb_2O_5/LiF$.



As micrografias da **figura 3** apresentam com mais detalhes a morfologia dos grãos. As amostras dos grupos $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}_2\text{O}_5$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{LiF}$ apresentam grãos arredondados, além da formação de pescoços bem definidos, resultado de uma boa compactação e sinterização. Também há a presença de poros, contudo estes poros são pequenos e bem distribuídos ao longo das amostras, sendo resultado do bom molhamento da fase líquida durante a sinterização.

As amostras dos dois grupos com adição de TiC ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{LiF}$) apresentaram grande quantidade de poros, além de grãos com dimensões variadas. Isso pode ter acontecido devido a uma má homogeneização durante a moagem, seguido de dificuldade de compactação das amostras e uma sinterização que provocou o empobrecimento das amostras.

4. Considerações Finais

Neste trabalho foram produzidos quatro diferentes grupos de compósitos de matriz cerâmica por meio de prensagem uniaxial a frio e sinterização convencional, e

Referências

- [1] B. Tepeduzu, R. Karakuzu. Ballistic performance of ceramic/composite structures, *Ceramics International*, 2019, 45(2), pgs 1651-1660.
- [2] Yadav, S. and Ravichandran, G., 2003. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. *International Journal of Impact Engineering*, 28(5), pp.557-574.
- [3] Silva, M., Stainer, D., Al-Qureshi, H., Montedo, O. and Hotza, D., 2014. Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing. *Journal of Ceramics*, 2014, pp.1-6.
- [4] Karandikar, P., Evans, G., Wong, S., Aghajanian, M. and Sennett, M., n.d. A Review of Ceramics for Armor Applications. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 29(6), pp.163-175.
- [5] Santos, J., Marçal, R., Jesus, P., Gomes, A., Lima, E., Monteiro, S., de Campos, J. and Louro, L., 2017. Effect of LiF as Sintering Agent on the Densification and Phase Formation in Al_2O_3 -4 Wt Pct Nb_2O_5 Ceramic Compound. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(10), pp.4432-4440.
- [6] Santos, J., Marçal, R., Jesus, P., Gomes, A., Lima, É., Navarro da Rocha, D., Santos, M., Nascimento, L., Monteiro, S. and Louro, L., 2018. Mechanical properties and ballistic behavior of LiF-added Al_2O_3 -4 wt% Nb_2O_5 ceramics. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), pp.592-597.
- [7] Seong, W., Ahn, B., Min, Y., Hwang, G., Choi, J., Choi, J., Hahn, B., Cho, Y. and Ahn, C., 2020. Effect of caracterizados por meio de ensaio de Arquimedes e MEV. A partir dos resultados coletados, é possível concluir que as amostras com adições de TiC apresentaram baixa densidade a verde, o que significa que a pressão de 50 MPa não foi suficiente para uma boa densificação dos corpos a verde. As amostras com TiC apresentaram densificação extremamente baixa, dificultando até o recobrimento com material condutor para a análise de MEV, sendo necessário a variação da intensidade do feixe de elétrons para a realização da análise.
- As amostras sem adição de TiC, apresentaram altos valores de densidade a verde e após a sinterização, como já obtido anteriormente em outros trabalhos, mostrando que a sinterização sem a presença do TiC foi satisfatória.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Nb₂O₅ addition on microstructure and thermal/mechanical properties in zirconia-toughened alumina sintered at low temperature. *Ceramics International*, 46(15), pp.23820-23827.

[8] Huang, C. and Chen, Y., 2016. Effect of mechanical properties on the ballistic resistance capability of Al 2 O 3 -ZrO 2 functionally graded materials. *Ceramics International*, 42(11), pp.12946-12955.

[9] Fabris, D., Polla, M., Acordi, J., Luza, A., Bernardin, A., De Noni, A. and Montedo, O., 2020. Effect of MgO·Al₂O₃·SiO₂ glass-ceramic as sintering aid on properties of alumina armors. *Materials Science and Engineering: A*, 781, p.139237.

[10] Cabral, R., Prado da Silva, M., de Campos, J. and Lima, E., 2012. Study of the Sintering of Mixtures Al₂O₃-Nb₂O₅ and Y₂O₃-Nb₂O₅. *Materials Science Forum*, 727-728, pp.799-803.

[11] Silveira, P., Jesus, P., Ribeiro, M., Monteiro, S., Oliveira, J., Gomes, A., 2020. Sintering Behavior of Al₂O₃ Ceramics Doped with Pre-Sintered Nb₂O₅ and LiF. *Materials Science Forum*, 1012, pp.190-195.

[12] Fu, Z. and Koc, R., 2017. Pressureless sintering of submicron titanium carbide powders. *Ceramics International*, 43(18), pp.17233-17237.

[13] Compton, B. and Zok, F., 2013. Impact resistance of TiC-based cermets. *International Journal of Impact Engineering*, 62, pp.75-87.

[14] Cheng, L., Xie, Z., Liu, G., Liu, W. and Xue, W., 2012. Densification and mechanical properties of TiC by SPS-effects of holding time, sintering temperature and pressure condition. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(12), pp.3399-3406.

[15] Koc, R. and Folmer, J., 1997. Carbothermal Synthesis of Titanium Carbide Using Ultrafine Titania Powders. *Journal of Materials Science*, 32(12), pp.3101-3111.

[16] Koc, R., 1997. Kinetics and phase evolution during carbothermal synthesis of titanium carbide from carbon-coated titania powder. *Journal of the European Ceramic Society*, 17(11), pp.1309-1315.

[17] NBR 16661:2017. Material refratário denso conformado – determinação de volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade da massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção. ABNT. 2^a edição; 2017.

[18] Kong, F., Lv, L., Wang, J., Jiao, G., Tao, S., Han, Z., Fang, Y., Qian, B. and Jiang, X., 2018. Graphite modified AlNbO 4 with enhanced lithium — Ion storage behaviors and its electrochemical mechanism. *Materials Research Bulletin*, 97, pp.405-410.

[19] Huang, F., Zhao, H., Yan, A., Li, Z., Liang, H., Gao, Q. and Qiang, Y., 2017. In situ thermal decomposition for preparation of Nb₃O₇F/Nb₂O₅ hybrid nanomaterials with enhanced photocatalytic performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, pp.489-495.

Proposta de metodologia para avaliação temporal de estações de redes de nívelamento empregando a Teoria dos Grafos

Jessica Caroline dos Santos Siqueira^a, Leonardo Castro de Oliveira^b, Ivanildo Barbosa^c

Engenharia Cartográfica - IME

^ajcssiqueira.jj@gmail.com

^bleonardo@ime.eb.br

^civanildo@ime.eb.br

RESUMO: A remediação dos desniveis das seções por meio da técnica de nívelamento geométrico é uma atividade comum em redes de nívelamento e que gera várias observações de uma mesma seção. Esse conjunto de observações precisa ter sua consistência checada a fim de minimizar a inserção de possíveis outliers aos dados. Neste trabalho é proposta, para avaliação temporal dos dados de nívelamento, uma metodologia que: otimiza o método usual de análise; explora alternativas quando esse não é passível de aplicação, com o aproveitamento das informações disponíveis; adicionalmente, visa tornar a avaliação mais homogênea e não subjetiva. Para atingir tal objetivo, a rede foi tratada como um grafo, assim, foram empregados conceitos e algoritmos oriundos da Teoria dos Grafos, como todos os ciclos e caminhos. Esse paradigma possibilitou a geração de um conjunto de insumos para análise dos dados. A aplicação da metodologia na Rede Altimétrica Brasileira – RAAP – demonstrou resultados consistentes, desde que a rede possua redundância suficiente que permita a detecção e a confirmação de possíveis abalos.

PALAVRAS-CHAVE: Consistência das observações. Nívelamento. Outliers. Movimentação temporal. Ciclos e caminhos em grafos.

1. Introdução

Uma rede de nívelamento, ou uma Rede de Referência Altimétrica (RRA), consiste em um conjunto de Referências de Nível (RRNN) materializadas no terreno, onde são realizadas medições de diferenças de nível e distância entre as mesmas. As redes podem ser locais ou nacionais e ambas têm como finalidade fornecer valor de altitude com precisão adequada aos seus propósitos em uma dada região. As redes nacionais possuem a vantagem de fornecer um referencial único e homogêneo para as mais diversas atividades que demandam um adequado posicionamento vertical, tais como: processos de monitoramento de bar-

ABSTRACT: The remeasurement of height differences of the sections through the geometric leveling technique is an everyday activity in leveling networks. It generates many observations of the same section. This set of observations needs to be checked for consistency to minimize possible outliers' insertion into the data. This work proposes, for the temporal evaluation of the leveling data, a methodology that: optimizes the usual method of analysis; explores alternatives when it cannot be applied taking advantage of available information; additionally it aims to make the assessment more homogeneous and non-subjective. To achieve this goal, the network was treated as a graph. Thus, concepts and algorithms from Graph Theory were used, like all cycles and paths. This paradigm made it possible to generate a set of inputs for data analysis. The application of the methodology in the Brazilian Altimetric Network – RAAP – showed consistent results, as long as the network has enough redundancy to allow detection and confirmation of possible temporal movements.

KEYWORDS: Consistency of observations. Levelling. Outliers. Temporal movements. Cycles and paths in Graphs.

ragens, projetos de irrigação e drenagem, obras de infraestrutura como construção de rodovias e saneamento, entre outras.

É comum que as RRA, principalmente as nacionais, sejam construídas por etapas e, ocasionalmente, sejam realizadas densificações, em função da lentidão inerente ao método de medição por nívelamento geométrico. Com este processo, surge a necessidade de conectar novos níveis às estruturas das redes já existentes, além de existir casos em que linhas novas passam próximas das antigas, resultando que as RRNN das linhas antigas encontradas visualmente em bom estado de conservação sejam reniveladas. Neste trabalho, essas seções remediadas em diferentes épocas serão denominadas de seção

de cheque ou arestas de cheque. Essas seções demandam uma avaliação específica de tais dados – sendo este processo denominado de avaliação temporal.

A avaliação temporal é uma etapa que contribui com a análise robusta de redes altimétricas, pois qualquer RN que tenha sido movimentada pode gerar outlier(s) naquela região e até comprometer a qualidade da rede. Além disso, o processo permite validar se existiu ou não uma conexão consistente entre nivelamentos realizados em épocas distintas. É importante ressaltar que esta fase de análise de uma RRA antecede o ajustamento por mínimos quadrados e a aplicação dos métodos estatísticos e robustos para identificação de outliers. As avaliações são realizadas diretamente sobre os dados primários e não existe a influência de qualquer ajuste.

Neste trabalho, propõe uma metodologia para identificação e avaliação dessas seções de cheque baseada em conceitos da Teoria dos Grafos. Espera-se gerar de forma automática insumos consistentes que viabilizem a identificação de possíveis abalos temporais nas redes de nivelamento, contribuindo assim com o processo de refinamento e processamento dessas redes.

2. Teoria dos Grafos e Redes Altimétricas

Para a avaliação temporal das seções de cheque empregando a Teoria dos Grafos é necessário entender a rede de nivelamento como um grafo, ou seja, associar os elementos de uma rede de nivelamento aos elementos inerentes à Teoria dos Grafos. Essa associação é imprescindível, pois permite realizar a devida correspondência entre as duas áreas – no caso, a Geodésia e o Grafo – e empregar conceitos e algoritmos oriundos da Teoria dos Grafos na modelagem da proposta para avaliação das seções de cheque.

A Teoria dos Grafos é um ramo da matemática discreta que surgiu no início do século XVIII e vem sendo empregado na busca pela solução de diversos problemas práticos. Caracteriza-se um grafo pelo seu conjunto não vazio de vértices, por um conjunto de arestas e uma função (Ψ) que associa cada aresta a um par não ordenado de vértices pertencentes ao grafo, podendo esses vértices serem distintos ou não [1].

Na **tabela 1** são apresentados os principais elementos da rede altimétrica empregados na modelagem desta proposta e a sua devida correspondência no universo da Teoria dos Grafos. Informações adicionais sobre os elementos de uma rede altimétrica podem ser obtidas em [2], bem como sobre grafos recomenda-se [1] e [3].

Tab. 1 - Correspondência entre elementos de uma rede de nivelamento e a teoria dos grafos

Rede Altimétrica	Teoria dos Grafos	Ilustração
RN ou RN nodal	Vértice	
Seção ou Linha internodal	Aresta	
Seção de cheque	Aresta Paralela	
Círculo	Ciclo	
Círculo Uni-Nodal (pontos como triângulos)	Self-loops	

Fonte: Autoria própria.

3. Avaliação Temporal e Arestas de Cheque

A avaliação temporal é o procedimento de verificar a consistência dos desníveis mensurados em épocas distintas, a fim de garantir que não ocorreu uma variação na ordenada altimétrica. Essa variação pode ser devida a uma movimentação vertical ou mesmo horizontal da referência de nível acima de uma tolerância estabelecida para a rede em análise. Existem 4 situações básicas em que uma seção ou aresta de cheque aparece em uma rede. A primeira situação seria o caso em que a aresta de cheque possui outras arestas de cheque adjacentes – nesta situação a avaliação temporal é feita diretamente a fim de identificar se ocorreu ou não um abalo nas RRNN envolvidas. Esta é a avaliação usualmente realizada, recomendada e descrita nas

Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) [2]. O segundo caso é quando as arestas de cheque adjacentes são uma composição de desníveis e distâncias mensurados entre RRNN na região, ocasionadas em grande parte das vezes pela destruição das estações entre um nivelamento ou outro. Neste trabalho, a composição máxima adotada foi da ordem de 10 km de distância nivelada. Optou-se por limitar esta distância na composição das seções devido à propagação de erros, pois composições mais extensas podem influenciar na avaliação temporal.

O terceiro caso considera que ocorreu um renivelamento de apenas uma única sessão na rede e esta seção encontra-se em uma linha. Já o quarto caso é quando a única seção renivelada encontra-se em um ramal. O segundo e o terceiro caso são situações que fogem a recomendação padrão de avaliação temporal, mas que estão sendo consideradas neste trabalho, pois também apresentam potencial de fornecer informações consistentes para identificação de abalo temporal das estações. O emprego da Teoria dos Grafos nesses dois casos possibilita tornar esse processo mais objetivo e otimiza o tempo de avaliação, uma vez que identifica e gera de forma automática as análises.

As seções do quarto caso possuem avaliação restrita, pois estão localizadas em ramais. Os ramais são elementos que não atendem ao conceito de rede e não possuem redundância. Na **figura 1** são ilustradas as 4 situações que as arestas de cheque podem ser encontradas em uma rede.

Fig. 1 – As quatro situações básicas que uma aresta de cheque aparece em uma rede de nivelamento.



Fonte: Autores.

4. Metodologia

Na **figura 2** apresenta-se um diagrama contendo os passos da metodologia implementada para a avaliação das seções de cheque de uma rede. Os retângulos tracejados ressaltam as fases da metodologia em que os conceitos e algoritmos da Teoria dos Grafos são empregados. Foram usados os seguintes conceitos: grau do vértice, vértices adjacentes, grafos ponderados, grafos conexos, sub grafos, caminhos e ciclos. Todos estes são apresentados em detalhes por [1] e [3]. Alguns algoritmos utilizados foram os de identificação de ciclos mínimos, conforme abordado por [4], e os algoritmos de busca em profundidade (*Depth-First Search – DFS*) e de caminhos mínimos, explicados por [5].

As características de uma RRA permitem a sua modelagem e armazenamento como um grafo conexo e não direcionado, com as arestas ponderadas pela distância nivelada (em quilômetros) da seção, sendo as RRNN os vértices do grafo e as arestas a representação da existência de uma medição entre duas RRNN. O valor de desnível da seção é a média entre o nivelamento e o contranivelamento. O nivelamento é a medição da diferença de nível entre duas RRNN em um dado sentido e o contranivelamento a remediação deste desnível no sentido contrário.

O script inicia lendo os dados de desnível e distância média de cada seção, bem como a data (mês e ano) de medição. Em seguida, o mesmo identifica as arestas de cheque existentes e verifica se as diferenças no valor de desnível nas diversas medições da mesma seção estão dentro de um valor de tolerância estipulado no planejamento da rede. Caso estejam, é realizado o cálculo da média dos desníveis e das distâncias nos diferentes levantamentos e gerado um arquivo texto com todas as avaliações calculadas. No caso negativo, essas diversas medições da mesma seção são substituídas por uma única observação, onde o desnível é zerado e a distância é assumida como a média entre os levantamentos. O desnível zerado serve para marcar no arquivo de

desníveis quais seções ainda serão avaliadas e a distância não zerada foi uma estratégia para viabilizar a etapa de redução internodal e, consequentemente, a identificação de arestas de cheque obtidas pela composição de outras seções. Tal conduta permite que a rede seja armazenada como um grafo simples e a partir deste calculada a rede intermodal, isto é, a parte do nivelamento que atende aos requisitos de rede e permite que sejam realizadas avaliações explorando a sua redundância.

Nesta fase são gerados arquivos com listas de ramais e self-loops identificados. Durante a identificação da rede internodal as arestas de cheque geradas da composição de uma ou mais seções e que tenham distância acumulada menor ou igual a 10 km são identificadas e separadas.

O passo seguinte é juntar em um único arquivo todas as arestas de cheque encontradas, as oriundas das seções diretas do nivelamento e as obtidas após a composição internodal, tanto as que estavam acima como abaixo da tolerância.

Este novo arquivo de arestas de cheque é transformado em um novo grafo. Este grafo é subdividido em componentes conexas e cada componente é colocado em um grupo. Existem dois grupos, um com as componentes que tenham apenas 1 única aresta de cheque e outro das componentes com 2 ou mais arestas de cheque. São geradas análises temporais e figuras ilustrativas do grafo das componentes com 2 ou mais arestas de cheque, para que assim o analista possa ter subsídio para tomada da decisão mais adequada.

No caso das arestas de cheque únicas localizadas em ramais, estas são impressas em uma lista separada. No caso das arestas únicas localizadas em linhas, a ideia é utilizar a rede internodal anteriormente gerada e calcular os ciclos mínimos na região. Com estes ciclos, extraír aqueles que possuem as arestas de cheque únicas e realizar uma avaliação com todos os caminhos e ciclos deste conjunto. Esta avaliação tem como finalidade gerar insumos adicionais que permitam a identificação de possíveis abalos ou

até mesmo verificar a consistência da rede com cada observação de forma independente.

Nesta fase em que se utilizam os ciclos no entorno da aresta de cheque que está sendo avaliada, é possível escolher conjuntos maiores de ciclos no seu entorno, tanto quanto seja necessário. Contudo, quanto mais dados forem utilizados para gerar todos os caminhos e todos os ciclos, maior será o tempo computacional exigido.

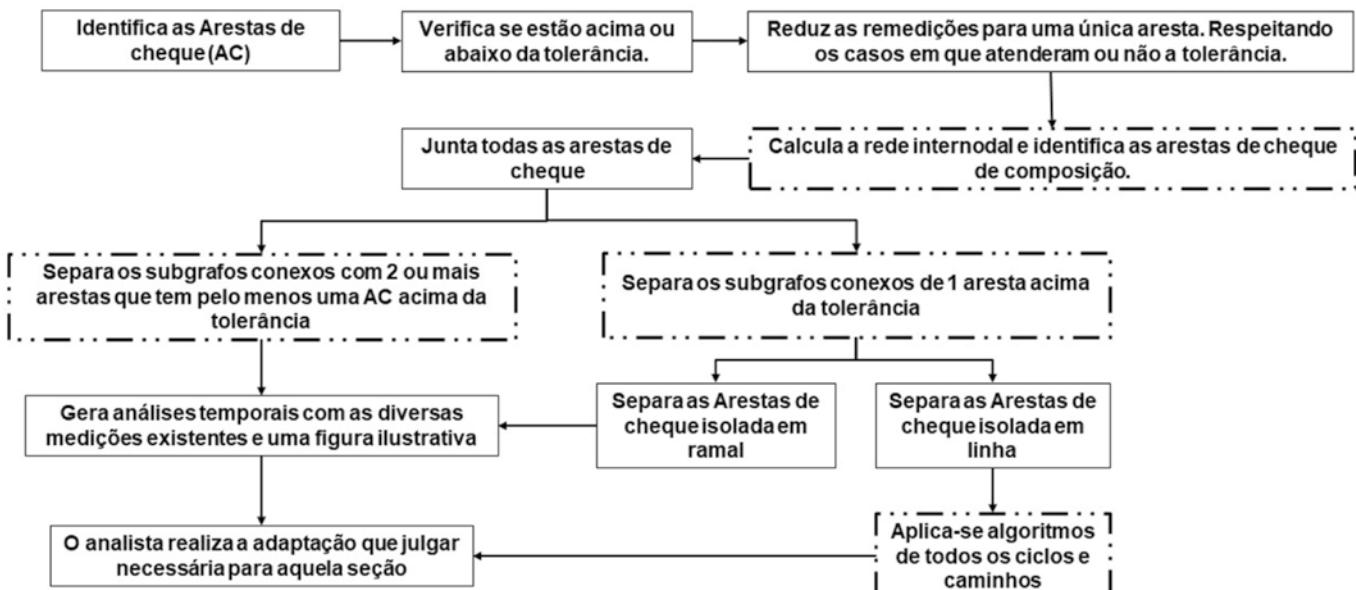
É importante frisar que na literatura um outlier é definido como uma observação atípica na amostra e que, segundo [6], pode ser ocasionado por qualquer um dos três tipos comuns de erros, como os grosseiros, aleatórios e sistemáticos, bem como pela composição destes. No entanto, quando uma RN sofre um abalo, esta pode gerar um outlier na amostra, mesmo as observações (os desníveis mensurados) não tendo a presença de nenhum dos três erros. Este fato ocorre porque uma RN, quando abalada, não materializa mais a posição original de quando foi implantada e nivelada. A mudança da posição original gera, na verdade, uma “nova” referência de nível. Neste contexto, avaliar este tipo de situação é imprescindível para minimizar fontes de erros que frequentemente acabam sendo ignoradas ou desconhecidas.

5. Desenvolvimento de Script

Para a elaboração dos scripts foi empregada a linguagem Python. Duas bibliotecas escritas nesta linguagem foram fundamentais para o desenvolvimento desta proposta, a Pandas [7] e a NetworkX [8].

Na fase de gerar todos os caminhos foi empregada a função já implementada na biblioteca NetworkX, denominada *“all_simple_paths”*. No caso do script que gera todos os ciclos, ele foi elaborado pela autora e inspirado tanto na lógica da função *“all_simple_paths”* quanto no algoritmo apresentado por [9].

Fig. 2 – Diagrama com as fases implementadas da metodologia de avaliação temporal de referências de nível (RRNN) empregando a Teoria dos Grafos.



Fonte: Autores.

6. Cenário De Aplicação

Para a aplicação da metodologia proposta, foi escolhida a Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP, referência básica altimétrica para o país, que é estabelecida e mantida desde a década de 1940 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi a escolhida. Devido às dimensões continentais do país e suas peculiaridades, a RAAP vem sendo densificada ao longo de vários anos e isto gerou a necessidade de diversas remedições de seções. Assim sendo, possibilitou o surgimento das 4 situações básicas anteriormente mencionadas, o que torna a RAAP um ambiente favorável de testes para a metodologia.

7. Resultados e Discussão

O arquivo bruto de nivelamento da RAAP que foi cedido pelo IBGE para fins de pesquisa contém 71.384 seções (incluindo as remedições). Após aplicar a metodologia identificou-se 1.572 seções que possuem duas ou mais remedições. Destas, 1.522 encontram-se dentro da tolerância aceitável para as

diferenças entre os desníveis de cada época. A tolerância adotada no caso da RAAP foi de 4mmv/k, sendo k a distância nivelada da seção em quilômetros. Este valor está de acordo com a precisão de levantamento adotada para a grande maioria da rede, conforme descrito pelo IBGE [2], considerando a idade da rede e as épocas em que a maior parte dos levantamentos ocorreram.

Seguindo a metodologia, as 50 seções que tinham remedições que não atendiam a tolerância foram subdivididas em três grupos: 27 seções que possuem outras arestas adjacentes (considerando tanto as arestas diretas como as obtidas pela composição de seções), sendo possível realizar a avaliação temporal padrão; 13 seções sem outras adjacentes e que estão localizadas em ramais; e 10 que estão localizadas em linhas.

A **figura 3** ilustra um trecho de um dos arquivos texto gerados com a metodologia. Este é o formato padrão de saída de todas as análises, sejam das seções acima ou abaixo da tolerância, com arestas únicas ou com outras adjacentes. É importante ressaltar que o arquivo de avaliação temporal gerado considera a combinação de análise de todas as

épocas para uma mesma seção, desta forma o analista terá o máximo possível de informações para a tomada de decisão. Um exemplo deste tipo de situação também é mostrado na **figura 3**.

A avaliação das seções de cheque quando se tem outras adjacentes – casos 1 e 2 – deve seguir o procedimento usual. A vantagem desta metodologia é que são gerados insumos de forma automática com o máximo de informações disponíveis na região de análise, buscando sempre tornar o processo mais objetivo e homogêneo. No caso das seções únicas localizadas em ramais, mesmo que o procedimento usual não possa ser aplicado, sua identificação pelos scripts é importante de ser registrada. Esse registro pode servir, por exemplo, para deixar indicado uma ressalva na região nos casos de estudos de futuras densificações.

O caso das seções únicas localizadas em linhas é o que necessita de uma avaliação mais minuciosa, uma vez que, como essas seções não possuem outras seções de cheque adjacentes que permitam uma avaliação usual, a estratégia adotada é explorar a redundância da rede para gerar o máximo de insumos possíveis, a fim de subsidiar a tomada de decisão. Um exemplo interessante que foi detectado após aplicar a metodologia para identificar as seções de cheque da RAAP é o ilustrado na **figura 4**.

A seção 9320D-453G possui duas medições, uma realizada em 1960 e outra em 1987. A diferença entre os nivelamentos é de -13,55mm, o que acarreta um erro de fechamento entre as duas medições de -24,53 mm/k.

Fig. 3 - Trecho ilustrativo do arquivo de avaliação temporal quando a seção de cheque possui 3 ou mais remediations para entrar na avaliação.

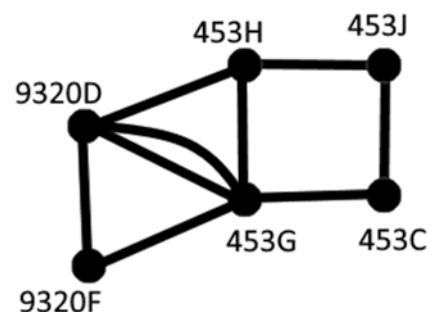
RNP	RNC	Desn	Dist	mes	ano_aaaa	ano_decimal	datas	Diferenca_mm	Erro relativo (mm/km)
2806S	9351C	-4,69655	0,65	7	1985	1985,58			
2806S	9351C	-4,6936	0,645	6	1996	1996,50			
2806S	9351C	-4,69508	0,6475				7/1985-6/1996	-2,95	-3,67
2806S	9351C	-4,69655	0,65	7	1985	1985,58			
2806S	9351C	-4,6947	0,65	6	2003	2003,50			
2806S	9351C	-4,69563	0,65				7/1985-6/2003	-1,85	-2,29
2806S	9351C	-4,6936	0,645	6	1996	1996,50			
2806S	9351C	-4,6947	0,65	6	2003	2003,50			
2806S	9351C	-4,69415	0,6475				6/1996-6/2003	1,1	1,37

Fonte: Autores.

Como não existem outras remediations nas arestas adjacentes que permitam os scripts gerarem dados para uma avaliação temporal usual, foi seguida a metodologia proposta para avaliação das seções de cheque únicas localizadas em linhas.

Identificaram-se os circuitos mínimos na região, separando aqueles que eram adjacentes à seção em análise **figura 4**. Calculou-se todos os caminhos que ligavam os vértices 9320D-453G e comparou-se com o desnível da medição direta da seção 9320D-453G nas duas épocas de nivelamento, um de cada vez. Posteriormente foram gerados todos os circuitos daquele conjunto. Dependendo da magnitude do abalo temporal, a propagação dos erros aleatórios da amostra pode acabar inviabilizando a análise, por isso a avaliação foi realizada considerando os circuitos mais próximos da seção de verificação.

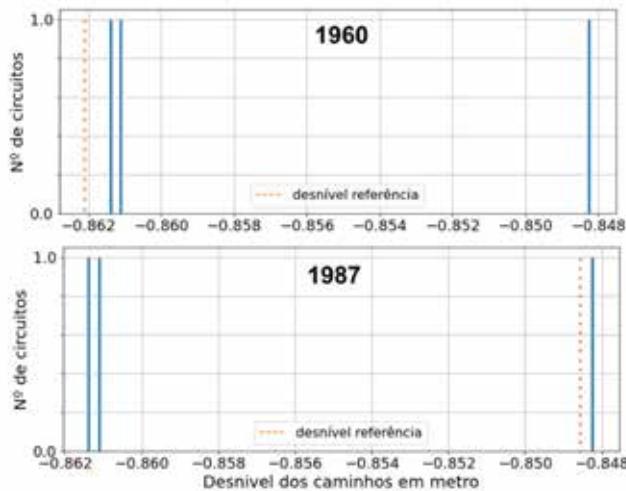
Fig. 4 – Ilustração dos circuitos adjacentes da seção 453G-9320D indicados pela metodologia e utilizados na avaliação temporal. Cada aresta representa uma medição.



Fonte: Autores.

Na avaliação dos caminhos, visualizados pelos histogramas da **figura 5**, percebe-se que a medição de 1960 concorda com 2/3 dos caminhos detectados, enquanto que a de 1987 com 1/3. Buscando avaliar este comportamento, partiu-se para a análise dos circuitos.

Fig. 5 – Histogramas com os desniveis calculados dos 3 caminhos detectados mais o desnível da aresta 453G-9320D, em tracejado.



Fonte: Autores.

A **tabela 2** apresenta os resultados dos fechamentos dos circuitos, considerando as duas medições da seção 453G-9320D e as épocas de levantamento das seções envolvidas. E a **figura 6** ilustra os desenhos dos circuitos identificados e calculados conforme a **tabela 2**.

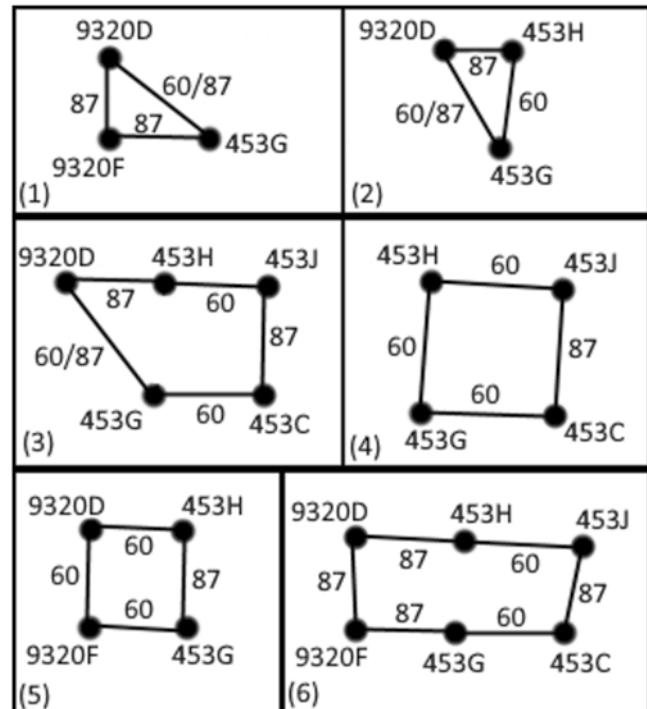
Com esses dados percebe-se que, sempre que os circuitos utilizam ao mesmo tempo medições de 1960 e 1987 sobre a RN 453G, os mesmos apresentam um erro de fechamento entre 12 e 14 mm, enquanto que nos demais casos os erros de fechamento são menores ou igual a 1 mm. No entanto, este fato não ocorre com a 9320D, indicando que muito provavelmente a RN 453G foi abalada entre os dois levantamentos. Logo, mesmo não sendo possível aplicar o método usual de avaliação, os insumos gerados com a metodologia proposta permitiram, neste caso, indicar com alta possibilidade a existência de um abalo da RN 453G.

Tab. 2 - Erro De Fechamento dos Circuitos Da **Figura 6**.

	1960	1987
Circuito 01	-13,9 mm	-0,3 mm
Circuito 02	-0,7 mm	12,8 mm
Circuito 03	-1,0 mm	12,6 mm
Circuito 04		-0,3 mm
Circuito 05		-13,2 mm
Circuito 06		12,9 mm

Fonte: Autores.

Fig. 6 – Desenho dos circuitos considerando as duas medições da seção 453G-9320D (1960 e 1987).



Fonte: Autores.

8. Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma metodologia que otimiza o método usual, explora alternativas quando o mesmo não é passível de aplicação, aproveitando as informações disponíveis, e que visa tornar a avaliação temporal dos dados de nivelação mais homogênea e menos subjetiva.

A metodologia se mostrou promissora na geração de insumos para subsidiar o analista no processo de avaliação temporal. Quando não existem informações suficientes que permitam a aplicação do método usual de avaliação temporal seja aplicado, a metodologia possibilita indicar a medição mais consistente com a rede no entorno.

Adicionalmente, por estar automatizada, a metodologia possibilita explorar as composições possíveis na região para incrementar a análise, o que pode ser visto como um ganho sobre o método usual.

Esta pesquisa é parte da dissertação de mestrado em desenvolvimento, onde está sendo aplicada

a Teoria dos Grafos aplicada ao processo de avaliação dos dados primários de redes de nívelamento, com a finalidade de detectar e identificar outliers e contribuir com o processo de refinamento e processamento de redes de referência altimétrica. Informações adicionais sobre a dissertação em [10].

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) por ceder os dados de nívelamento da RAAP para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] J. A. Bondy, U. S. R. Murty. Graph Theory with Applications. Ontario: Elsevier Science Publishing Co., Inc, 1976. 270p.
- [2] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro, Manual Técnico, Rio de Janeiro, 2017. 56p. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf>
- [3] G. O'Regan. Guide to Discrete Mathematics. [s.1.] Springer, 2016. 378p. DOI: 10.1007/978-3-319-44561-8_1.
- [4] T. Kavitha. et al. An $\tilde{O}(m^2n)$ Algorithm for Minimum Cycle Basis of Graphs Algorithmica 52, p. 333-349, 2008. DOI: 10.1007/s00453-007-9064-z.
- [5] K. D. Lee, S. Hubbard. Data Structures and Algorithms with Python. Springer, 2015. 369p.
- [6] S. S. Suraci. Aplicação das normas L_1 e L_∞ em redes altimétricas: identificação de outliers e construção do modelo estocástico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica). Instituto Militar de Engenharia. Brasil, 2018.
- [7] Pandas. Pandas documentation. Versão 1.0.5. 2020. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/pandas-docs/version/1.0.5/>>.
- [8] A. A. Hagberg, D. A. Schult, P. J. Swart. Exploring network structure dynamics, and function using NetworkX. Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008). G. Varoquaux, T. Vaught, J. Millman (Eds.) p. 11-15, 2008. Disponível em: <<https://networkx.org/documentation/stable/index.html>>.
- [9] A. L. T. Penha. et al. Identificação de erros grosseiros em dados geodésicos unidimensionais. Projeto de fim de curso em Engenharia Cartográfica. Instituto Militar de Engenharia, Brasil, 2007.
- [10] J. C. S. Siqueira. Teoria dos Grafos aplicada ao processo de avaliação dos dados primários de redes de nívelamento. Dissertação de Mestrado em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia de Defesa). Instituto Militar de Engenharia, Brasil.

Avaliação dos principais modelos de admitância da sonda coaxial aberta para medidas de permissividade elétrica

Daniel Henrique da Silva Souza^a, José Carlos Araujo dos Santos^b

Engenharia Elétrica e Eletrônica - IME

^adanhens.br@gmail.com

^baraujo@ime.eb.br

RESUMO: O conhecimento preciso das propriedades dielétricas dos materiais, sobretudo permissividade, é essencial em diversas áreas da engenharia. O presente trabalho trata do método reflexivo de caracterização dielétrica baseado em sensores coaxiais. Apresenta uma avaliação criteriosa dos diversos modelos de admitância disponíveis na literatura para o sensor e uma comparação entre eles, de forma a evidenciar um modelo preciso e de computação rápida para implementação prática. Neste contexto, são abordados os dois problemas inerentes ao método da sonda coaxial, um relativo à determinação da admitância em função da permissividade (problema direto) e outro relativo à determinação da permissividade em função da admitância (problema inverso). No presente trabalho são consideradas as soluções do problema direto para os modelos da literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Ponta de teste coaxial, sensor coaxial, coeficiente de reflexão, medidas de permissividade.

ABSTRACT: The accurate knowledge of the dielectric properties of materials, especially permittivity, is essential in several areas of engineering. The present work deals with the reflective method of dielectric characterization based on coaxial sensors. It presents an evaluation of various admittance models available in the literature for the sensor and a comparison between them, attempting to identify a fast and accurate model for practical applications. In this context, the two inherent problems to the coaxial probe method are addressed, one related to the admittance determination as a function of permittivity (direct problem) and another related to the permittivity determination as a function of admittance (reverse problem). In the present work, the solutions of the direct problem available in the literature are addressed.

KEYWORDS: Coaxial probe, open-ended coaxial sensor, reflection coefficient, permittivity measurement.

1. Introdução

A sonda coaxial aberta (do inglês open-ended coaxial probe) é um dispositivo amplamente utilizado na comunidade científico-tecnológica para medição de permissividade de líquidos, sólidos e semissólidos dentro de uma extensa faixa de frequências. Neste contexto, associados à sonda coaxial, há na literatura diversos métodos de medida, que diferem entre si em complexidade, confiabilidade e precisão.

Em teoria, um método para medida dielétrica com a sonda coaxial deve ser capaz de determinar a admitância de um material em teste (MUT, do inglês *Material*

Under Test) a partir de um valor conhecido de permissividade. São estabelecidos assim os denominados modelos de admitância da sonda.

Na bancada, a essência do método consiste em medir o coeficiente de reflexão de entrada da ponta de teste imersa ou em contato com o MUT e realizar cálculos, através de modelos adequados, para extração da permissividade, usualmente com o auxílio de ferramentas de CAD.

Quando existe uma diferença de impedância entre a linha de transmissão da sonda coaxial e o material em avaliação em seu terminal aberto, parte do sinal incidente no sensor é absorvida pelo material e parte é refletida para a linha. Funcionalmente, a sonda (ou ponta

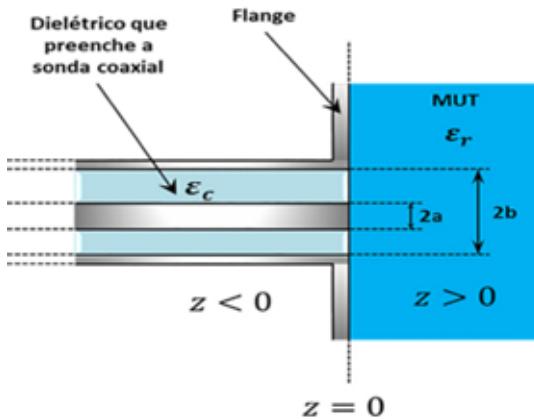
de teste) coaxial é uma linha de transmissão com uma terminação em aberto.

A estrutura básica da sonda é ilustrada na **figura 1**, onde a é o raio do condutor interno, b é o raio do condutor externo e ϵ_c é o dielétrico de baixa perda que preenche a linha de transmissão da sonda. O terminal aberto, no plano $z = 0$, é formado por um flange metálico plano que teoricamente se estende para o infinito na direção transversal.

O material a ser medido é assumido como homogêneo, isotrópico, linear e não magnético, de permissividade complexa relativa ϵ_r , o qual deve preencher completamente o semi-espaco $z > 0$.

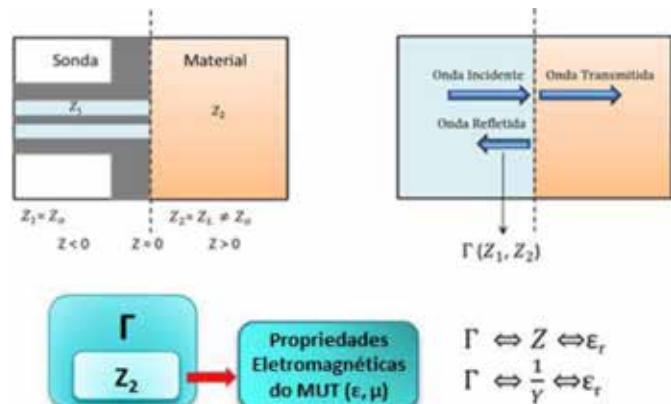
As dimensões da ponta de teste coaxial e sua frequência superior de operação são selecionadas para permitir a propagação somente do modo TEM dominante, o qual deve ser usado para excitar a ponta e fazer as medições. A descontinuidade que aparece na abertura em $z = 0$ produz uma reflexão da onda TEM, que se propaga de volta para a linha coaxial. Tal descontinuidade também provoca o aparecimento de modos de ordem superiores na sonda, evanescentes, que, portanto, decaem rapidamente na direção da fonte do sinal. No material, campos eletromagnéticos são irradiados devido ao modo TEM e a modos superiores (TM_{0n}) a partir do plano de abertura [1]. Somente alguns modelos de admitância consideram os modos de ordem superiores no material. Um passo importante na caracterização completa de uma sonda é a obtenção de um modelo que represente seu comportamento real.

Fig. 1 – Seção transversal de uma ponta de teste coaxial com a indicação de seus parâmetros dimensionais.



O método da sonda coaxial é, efetivamente, um “método reflexivo”, no qual as medidas são obtidas a partir da reflexão de um sinal eletromagnético incidente sobre o material [1].

Fig. 2 – Síntese do método reflexivo de medição.



A essência do método é representada na **figura 2**. A terminação aberta da sonda é imersa no meio em investigação ou é colocada em contato com ele. O coeficiente de reflexão complexo desta terminação é univocamente relacionado à frequência do sinal de teste, aos parâmetros da sonda e à permissividade complexa ϵ_r do material em teste. Para determinar ϵ_r precisamente, é necessário resolver dois problemas:

a) O problema direto, onde se determina a admitância da sonda em função da permissividade.

$$Y = f(\epsilon_r) \quad (1)$$

b) O problema inverso, onde se determina a permissividade em função da admitância medida.

$$\epsilon_r = f^{-1}(Y) \quad (2)$$

Nas duas situações, os cálculos são referenciados ao plano de abertura da sonda ($z = 0$, na **figura 3**).

Os dois problemas devem ser resolvidos. A solução do problema direto fornece a admitância complexa real (Y_{real}) do material ou, equivalente-mente, o coeficiente de reflexão real do material (Γ_{real}), conforme (3). Este valor é necessário nos

procedimentos de calibração com o modelo de uma porta de analisadores de redes

$$Y_{\text{real}} = \frac{1 - \Pi_{\text{real}}}{(1 + \Pi_{\text{real}}) * Y_0} \quad (3)$$

A solução do problema inverso, por outro lado, fornece a permissividade complexa (ϵ_r), a qual é, de fato, o parâmetro que se deseja extrair do material.

Com relação ao objeto do presente trabalho, uma extensa e variada gama de modelos de admitância pode ser encontrada na literatura. Modelos baseados na aproximação da sonda para um circuito equivalente concentrado permitem rápida determinação da permissividade complexa [2]-[5]. Nos modelos baseados na solução da onda completa, rigorosas análises eletromagnéticas são realizadas nos semi-espacos $z < 0$, $z = 0$ e $z > 0$, as quais envolvem técnicas variacionais e normalmente são computacionalmente pesadas [11]-[15].

Há modelos baseados na simplificação do modelo de onda completa que consideram somente o modo dominante TEM ou que inicialmente usam apenas o modo TEM e em seguida contabilizam os modos de ordem superior gerados na abertura da sonda, a partir do ajuste do modelo teórico a dados experimentais [9], [18].

Por fim, destacam-se dois outros modelos, um com o cálculo da onda completa a partir do método dos momentos e o ajuste do resultado numa função racional para obter a equação da admitância [16], e outro baseado numa aproximação da relação entre coeficiente de reflexão e permissividade para implementar um função bilinear que relaciona o coeficiente de reflexão e a permissividade, segundo Anderson J. M. [16]. A solução do problema inverso, por outro lado, fornece a permissividade complexa (ϵ_r) do material, a qual é, de fato, o parâmetro que se deseja extrair do material. Dependendo do modelo de admitância para a ponta de teste, técnicas específicas de extração de permissividade devem ser utilizadas.

Este trabalho está dividido em cinco seções, incluin-

do a atual, introdutória. A **seção 2** apresenta os principais modelos de admitância para a sonda coaxial. A **seção 3** apresenta sinteticamente as principais técnicas de extração de permissividade, segundo os autores. A **seção 4** apresenta uma comparação entre os modelos, aprofundando a análise das principais características de cada um. A **seção 5** apresenta as conclusões do trabalho

2. Modelos De Admitância Para Sonda Coaxial

Um passo importante na caracterização da sonda é obter um modelo direto que se aproxime ao máximo do seu comportamento real.

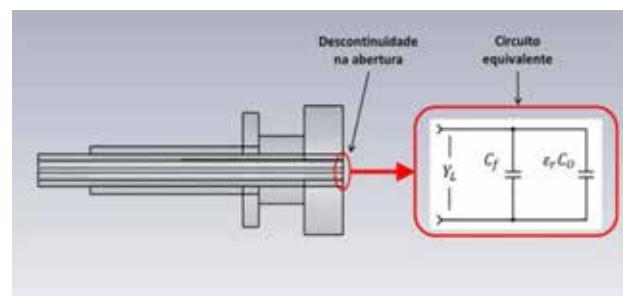
Os modelos propostos na literatura variam desde um simples circuito equivalente concentrado até aqueles baseados na solução numérica das equações de Maxwell e em técnicas de inteligência artificial.

O presente trabalho fornece uma visão geral dos principais modelos existentes.

2.1 Modelo capacitivo

No modelo capacitivo a descontinuidade na terminação da sonda coaxial é aproximada por um circuito equivalente concentrado, segundo T. W. Athey [2]. Mais precisamente, a interface entre a sonda coaxial e a amostra é modelada por dois capacitores em paralelo, como na **figura 3**, cujas capacitâncias são consideradas oriundas dos campos de borda do dielétrico interno da sonda (C_f) e dos campos de borda da amostra (C_o).

Fig. 3 – Descontinuidade na abertura modelada por duas capacitâncias em paralelo.



A descontinuidade na abertura do sensor é então modelada como uma admitância que se relaciona às capacitâncias C_f e C_o através de

$$Y_L = j\omega Z_0 C_f + j\omega Z_0 (\epsilon' - j\epsilon'') C_o \quad (4)$$

onde ω é a frequência angular, Z_0 é a impedância do cabo coaxial (normalmente igual a 50Ω) e $(\epsilon' - j\epsilon'')$ $C_o = \epsilon_r C_0 = C(\epsilon_r)$.

O coeficiente de reflexão de entrada no plano de descontinuidade é dado então por

$$\Gamma = |\Gamma| e_j \phi \quad \frac{1 - j\omega Z_0 (C(\epsilon_r) + C_f)}{1 + j\omega Z_0 (C(\epsilon_r) + C_f)} \quad (5)$$

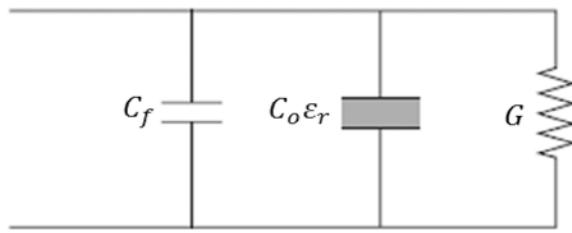
Para se obter as capacitâncias do modelo capacitivo é necessário ter duas medidas de coeficiente de reflexão em função da frequência, de dois materiais cuja permissividade ϵ_r seja bem conhecida. Estas medidas de $\Gamma(f)$ são feitas usualmente com o analisador de redes.

2.2 Modelos de radiação

2.2.1 Modelo de Stuchly et al.

Stuchly et al. [4][5] consideram a sonda coaxial como uma fonte irradiante. Seu modelo é um circuito equivalente de dois capacitores (C_f , $\epsilon_r C_0$), como no modelo capacitivo, e uma condutância (G), conectados em paralelo, como na **figura 4**. A capacitância C_f representa a concentração de campo elétrico dentro da parte da linha coaxial preenchida com o dielétrico interno (teflon). A capacitância $\epsilon_r C_0$ representa a concentração de campo elétrico de borda no dielétrico externo (do MUT). A condutância G é a condutância de radiação e se relaciona à potência irradiada a partir da terminação da sonda coaxial.

Fig. 4– Circuito equivalente para o modelo da radiação[5].



Neste modelo, a admitância normalizada é dada por

$$\bar{Y} = \frac{Y}{Y_0} = j\omega C_f Z_0 + j\omega \epsilon_r C_0 + Z_0 G(\omega, \epsilon_r) \quad (6)$$

onde Y_0 é a admitância característica da linha ($Z_0 = 1/Y_0$). Para a condutância, em correspondência a uma antena infinitesimal, escreve-se [8].

$$G(\omega, \epsilon_r) = \epsilon_r^{5/2} G(\omega, \epsilon_r) \quad (7)$$

2.2.2 Modelo de Gadja e Stuchly

Gadja e Stuchly [6] apresentaram um modelo mais preciso, dado por

$$\frac{Y}{Y_0} = K_1 + K_2 \epsilon_r + K_3 \epsilon_r^2 + K_4 \epsilon_r^{5/2} \quad (8)$$

onde os fatores K_1 , K_2 , K_3 e K_4 são complexos, calculados no processo de calibração da sonda. A admitância complexa é referenciada ao plano de terminação da geometria coaxial.

2.2.3 Modelo de Staebell e Misra

Usando análise quase-estática, Staebell e Misra [7] favoreceram a aproximação

$$\frac{Y}{Y_0} = K_1 \epsilon_r + K_2 \epsilon_r^2 + K_3 \epsilon_r^{5/2} \quad (9)$$

Em baixas frequências, este modelo torna-se

$$\frac{Y}{Y_0} = K_1 \varepsilon_r + K_2 \varepsilon_r^2 \quad (10)$$

Como no modelo anterior, a determinação dos parâmetros K_i é alcançada com calibração, sendo a permissividade calculada a partir de

$$\varepsilon = A - \frac{G_0}{\omega C_0} b \quad (11)$$

$$\varepsilon = B - \frac{G_0}{\omega C_0} g \quad (12)$$

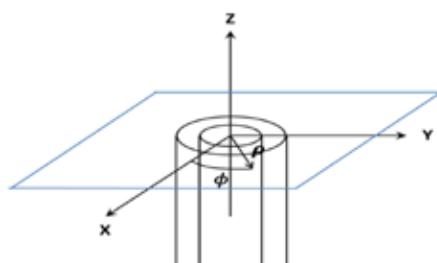
Onde A e B são respectivamente as partes real e imaginária da permissividade, calculadas desconsiderando a condutância de radiação, e b e g são variáveis dependentes da tangente de perda e da parte real da permissividade [4][5].

2.3 Modelo quase-estático

Marcuviz [4] apresenta uma formulação aproximada para uma linha coaxial semi-infinita terminada em um plano metálico infinito, irradiando para o espaço livre (no modo fundamental da linha). Em seu modelo, a admitância da sonda é expressa como uma integral sobre sua abertura, dada por

$$\bar{Y}_L = j \frac{k^2}{\pi k_c \ln(b/a)} \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \cos \phi' \frac{\exp(-jkr)}{r} d\phi' d\rho' d\rho \quad (13)$$

Fig. 5 – Geometria do plano de abertura da sonda [9].



Misra [9] verificou que se a abertura coaxial é eletricamente muito pequena, **equação 13** pode ser aproximada pelos dois primeiros termos de sua expansão em série de potência. Esta forma corresponde a uma aproximação quase-estática para a equação de Marcuvitz, sendo dada por

$$\bar{Y}_L = \frac{Y}{Y_0} = j \frac{k^2}{\pi k_c \ln(b/a)} \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \left\{ \frac{\cos \phi'}{r} - jk \cos \phi' - \frac{k^2 r}{2} \cos \phi' + j \frac{k^3 r^2}{6} \cos \phi' \right\} d\phi' d\rho' d\rho \quad (14)$$

Onde;

$$Y_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_c} \ln(b/a)}} \quad (15)$$

Usando a relação para a impedância característica da linha coaxial dada pela **equação 15**, a equação para a admitância na abertura da sonda pode ser escrita como

$$Y_L = j \frac{2\omega \varepsilon_r}{[\ln(b/a)]^2} \left[I_1 - \frac{k^2 I_3}{2} \right] + \frac{k^3 \pi \omega \varepsilon_r}{12} \left[\frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)} \right] \quad (16)$$

Onde;

$$I_1 = \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \frac{\cos \phi'}{[\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \phi']^{1/2}} d\phi' d\rho' d\rho \quad (17)$$

$$I_3 = \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \cos \phi' [\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \phi']^{1/2} d\phi' d\rho' d\rho \quad (18)$$

Modelos do tipo quase-estático representam uma aproximação que não contabiliza a excitação de modos de ordem superiores na abertura [12].

2.4 Modelo de Marcuvitz expandido

No denominado modelo de Marcuvitz expandido, Misra [10] utilizou a equação de admitância original de Marcuvitz e a transformou numa expansão em série de potência truncada em 7 termos.

Os resultados alcançados mostraram que o modelo obtido é mais preciso do que o modelo quase-estático.

$$Y = G + jB \quad (19)$$

$$G = \frac{Y_{0\sqrt{\varepsilon_r}}}{\ln(b/a)\sqrt{\varepsilon_c}} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sin\theta} [J_0(k_0\sqrt{\varepsilon_r}b \sin\theta) - J_0(k_0\sqrt{\varepsilon_r}a \sin\theta)]^2 d\theta \quad (20)$$

$$B = \frac{Y_{0\sqrt{\varepsilon_r}}}{\ln(b/a)\sqrt{\varepsilon_c}}$$

$$B = \int_0^{\pi} [2\sin(k_0\sqrt{\varepsilon_r}(a^2 + b^2 - 2abc\cos\theta)) - \sin(2k_0\sqrt{\varepsilon_r}a \sin(\theta/2)) - \sin(2k_0\sqrt{\varepsilon_r}b \sin(\theta/2))] d\theta \quad (21)$$

As principais equações da expansão são:

$$B(f) = B^1(f) + B^2(f) + B^3(f) + B^4(f) + B^5(f) + B^6(f) + B^7(f) \quad (22)$$

$$G(f) = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_r(f)}{\varepsilon_c}}}{\ln\left[\frac{a}{b}\right]Z_0} (G1(f) + G2(f) + G3(f) + G4(f) + G5(f)) \quad (23)$$

$$K1(f) = \frac{1}{Z_0\pi\ln\left[\frac{a}{b}\right]} \sqrt{\frac{\varepsilon_r(f)}{\varepsilon_c}} \quad (24)$$

$$k(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon_r(f)} \quad (25)$$

Onde $k(f)$ e $K^1(f)$ são funções complexas da permissividade do material. $k(f)$ é a constante de propagação no espaço livre e $K^1(f)$ a constante de propagação no dielétrico interno da sonda coaxial.

$B(f)$ e $G(f)$ são a susceptância e a condutância do material, ou seja, as **equação 20 e 21** expandidas para uma série de 7 e 5 termos, respectivamente. As demais equações da expansão estão detalhadas no modelo de Misra [10].

2.5 Modelos de onda completa

No modelo de onda completa os campos elétrico e magnético são avaliados nas regiões $\mathbf{z} < \mathbf{0}$, $\mathbf{z} = \mathbf{0}$ e $\mathbf{z} > \mathbf{0}$. Neste modelo é realizada uma rigorosa avaliação eletromagnética do problema (a irradiação da linha coaxial de terminação aberta, mesmo para o espaço livre, não tem solução analítica precisa). Existem diferentes variações para o modelo de onda completa [11][15]. A maioria das soluções envolve técnicas variacionais, que são computacionalmente custosas quando se busca a solução para o problema inverso.

2.5.1 Modelo de Levine e Papas

Levine e Papas [11] modelaram um guia coaxial com terminação aberta para o espaço livre com um circuito equivalente. O modo fundamental de propagação na região coaxial foi investigado teoricamente. Os autores derivaram expressões variacionais para os parâmetros do circuito e usaram a **equação 26** para obter uma precisa avaliação numérica da linha coaxial.

$$\frac{Y(0)}{Y_0} = \frac{G(0)}{Y_0} - i \frac{B(0)}{Y_0} = \frac{-ik}{\ln(b/a)} \int_0^\infty \frac{d\zeta}{\zeta(\zeta^2 - k^2)^2} X [J_0(\zeta a) - J_0(\zeta b)]^2 \quad (26)$$

A **equação (26)** preserva os parâmetros originais de H. Levine e C. H. Papas [11], que devem ser consultados para maiores detalhes.

2.5.2 Modelo de Mosig et al.

Conforme a referência [12], considerando-se as condições gerais apresentadas na **equação 5** para a sonda coaxial, 0 para um sinal harmônico, os campos

$$E_\rho(\rho, z) = \mathbf{U}_0 \left[f_0(\rho) e^{-\gamma_0 z} + \sum_{n=0}^{\infty} R_n f_n(\rho) e^{\gamma_n z} \right] \quad (27)$$

transversais na linha coaxial ($z < 0$) são expressos por

$$H_\varphi(\rho, z) = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_c \mathbf{U}_0 \left[\frac{f_0(\rho)}{\gamma_0} e^{-\gamma_0 z} - \sum_{n=0}^{\infty} R_n \frac{f_n(\rho)}{\gamma_n} e^{\gamma_n z} \right] \quad (28)$$

onde os termos têm a notação do artigo original [12].

O coeficiente $n = 0$ corresponde à onda TEM e $n > 0$ corresponde aos modos de ordem superior. Para o modo TEM, tem-se

$$f_0(\rho) = N^0 / \rho \quad (29)$$

Para os modos TM_{0n} , $n > 0$, tem-se

$$f_n(\rho) = Nn [J^1(\rho n \rho) Y^0(\rho n a) - Y^1(\rho n \rho) J^0(\rho n a)] \quad (30)$$

onde $J_m(x)$ é a função de Bessel de primeira espécie e $Y_m(x)$ é a função de Bessel de segunda espécie de ordem m. Detalhes sobre fator de generalização e autova-

lores ρn podem ser encontrados em Mosig et al. [15]. A dependência radial do campo elétrico transversal do modo n é representada pela função real $f_n(\rho)$.

O coeficiente complexo R_n é o fator de reflexão generalizado do modo TM_{0n} , definido pela razão das amplitudes de campo elétrico transversal refletido pelo campo incidente deste modo no plano $z = 0$. R_0 é o fator de reflexão generalizado do modo TEM.

Os fatores de reflexão R_n são incógnitas do problema e seus valores são determinados pelo procedimento:

1. Deve-se expressar o campo magnético no lado direito ($z > 0$) em termos de campo elétrico no plano de abertura;
2. Combinar as componentes de campo magnético sobre a fronteira no plano de abertura ($z = 0$);
3. Avaliar numericamente as expressões integrais obtidas para cada modo na estrutura;
4. Resolver a equação matricial obtida com a técnica de casamento de modos;
5. Determinar o número de termos requeridos para a precisão desejada;
6. Repetir o procedimento para diferentes valores de ε_r ; e
7. Desenhar um gráfico $R_0(\varepsilon_r)$.

Para abertura e distribuição de campo circularmente simétricas, na ausência de cargas livres, o cam-

$$H_\phi(\rho, z) = \frac{j\varepsilon_m(\omega/c_0)^2}{2\pi\omega\mu_0} \int_a^b \int_0^{2\pi} E_\rho(\rho') \frac{\exp(-j\frac{\omega}{c_0}\sqrt{\varepsilon_m}r)}{r} \rho' \cos\psi \quad (31)$$

Com;

$$\psi = (\phi - \phi') \quad (32)$$

$$r = \sqrt{(\rho'^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos\psi + z^2)} \quad (33)$$

onde (ρ', ϕ') são as coordenadas transversais do ponto central dentro da abertura e rw é a distância

do ponto ao observador. A continuidade $H_\phi(\rho, z = 0-) = H_\phi(\rho, z = 0+)$ resulta em um conjunto infinito de equações para R_n ($n = 0, 1, 2, \dots$)

$$\sum_{n=0}^{\infty} T_n(\rho) R_n = 1 \quad (34)$$

Onde;

$$T_n(\rho) = \frac{f_n(\rho)/\gamma_n + (\varepsilon_r/\varepsilon_c)I_n}{f_0(\rho)/\gamma_0 - (\varepsilon_r/\varepsilon_c)I_0} \quad (35)$$

$$T_n(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_a^b f_n(\rho) \rho' \int_0^{2\pi} \frac{\exp\left(-j\frac{\omega}{c_0} \sqrt{\varepsilon_m} r\right)}{r} \cos\psi d\rho' d\psi \quad (36)$$

$$r = \sqrt{(\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos\psi)} \quad (37)$$

Na aproximação do problema, considera-se somente um número finito de modos. A admitância procurada é determinada por

$$\bar{Y} = \frac{1 - R_0}{1 + R_0} \quad (38)$$

A principal desvantagem deste modelo é a necessidade de cálculos intrincados, especialmente pelo uso de métodos iterativos para a solução do problema inverso para um número suficiente de modos.

2.5.3 Modelo de Langhe et al.

No modelo de Langhe et al. [13], assume-se um MUT de múltiplas camadas e os modos de ordem elevada são levados em consideração. Conforme os autores, inconsistências foram encontradas durante a medição de amostras de diferentes espessuras com o modelo de Levine e Papas [11]. O modelo derivado por Langhe et al. [13] utilizou a técnica de domínio espectral, obtendo assim uma equação de forma fechada para a admitância de uma linha coaxial de terminação aberta (com flange) irradiando para um material planar estratificado terminado por uma placa metálica. Esta nova equação pode ser considerada como uma correção para o modelo de Levine e Papas [11]. O modelo considera os efeitos do modo dominante e dos modos de ordem superiores. Com este modelo, medições de materiais de baixa constante dielétrica foram realizadas junto com uma análise da perturbação da influência das bolhas de ar (entre a sonda e a amostra). Sua equação de admitância é dada por

$$\begin{aligned} Y_0 = & -j \frac{\omega \epsilon_1}{c \sqrt{\epsilon_c} \ln \frac{b}{a}} \frac{1}{b} \int_0^{\infty} d\lambda M(\lambda) \left[\frac{1}{\Gamma_1 \lambda} (J_0(\lambda b) \right. \\ & \left. - J_0(\lambda a))^2 \right] \\ & - j \frac{\omega \epsilon_1}{c \sqrt{\epsilon_c}} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{A_q}{A_0 [1 + K]} \int_0^{\infty} d\lambda \\ & \cdot \frac{\zeta_q^2 - \lambda^2}{\zeta_q^2 - \lambda^2} \frac{M(\lambda)}{\Gamma_1 \lambda} (J_0(\lambda b) - J_0(\lambda a)) \\ & \left(b J_0(\lambda b) R_1(\zeta_q b) - a J_0(\lambda a) R_1(\zeta_q a) \right) \end{aligned} \quad (39)$$

onde os termos têm a notação e os significados do artigo original segundo P. De Langhe [13].

2.5.4 Versão de Pournapopoulous e Misra

Na formulação do modelo quase estático, considera-se que somente os campos no modo TEM estão presentes sobre a abertura coaxial. Porém conforme Pournapopoulous e Misra [15], estes campos podem ser determinados precisamente resolvendo a equação para a componente radial do campo elétrico $E\rho(\rho', 0)$ sobre a abertura:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} + j\pi\omega\epsilon_r\epsilon_0 \int_a^b E_\rho(\rho', 0) K_c(\rho, \rho') \rho' d\rho' \\ = j\omega\epsilon_r\epsilon_0 (1 - j\tan\delta) \\ \int_a^b E_\rho(\rho', 0) \rho' d\rho' \int_0^\pi \cos(\phi) \frac{\exp(-jkr)}{r} d\phi' \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} E_z(\rho, z) = \\ \frac{1}{\pi} \int_a^b E_\rho(\rho', 0) \rho' \int_0^\pi \cos(\phi') \frac{\exp(-jkR')}{R'} x \left[\frac{1}{\rho} \right. \\ \left. - \left(jk + \frac{1}{R'} \right) \frac{\rho - \rho' \cos(\phi')}{R'} \right] d\phi' d\rho \end{aligned} \quad (41)$$

$$Y_L = \frac{2}{\int_a^b E_\rho(\rho', 0) d\rho'} - \frac{2\pi}{\left[\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_l}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]} \quad (42)$$

A **equação 42** é resolvida numericamente (método dos momentos) para o campo de abertura $E_\rho(\rho', 0)$ de uma linha coaxial abrindo em um meio material [15].

A partir de diversos testes e análises, Misra [15] concluiu que as componentes radial e axial de campo decaem muito rapidamente com o aumento da distância horizontal em relação ao condutor central (campos radiais E_ρ) e conforme aumenta a distância em relação ao plano de abertura $z = 0$ (campos axiais E_z). Assim, a equação variacional para a admitância de abertura (proposta por Marcuvitz [9]) pode ser uma boa aproximação, ainda que a presença de modos de ordem elevada seja ignorada.

2.6 Modelo da função racional

O Modelo da Função Racional (RFM) [16] é preciso e possui grande faixa de frequência de operação.

É uma aproximação da solução do Método dos Momentos da onda completa.

O modelo RFM, comparado com modelos anteriores, oferece melhor precisão e permite que as incertezas nas medições dielétricas sejam quantificadas. A equação da admitância de abertura normalizada para a sonda coaxial, em um cabo coaxial de 50Ω , cuja linha é preenchida com Teflon, é dada por

$$Y = \frac{\sum_{n=1}^4 \sum_{p=1}^8 \hat{\alpha}_{np} (\sqrt{\epsilon_r})^p (sa)^n}{1 + \sum_{m=1}^4 \sum_{q=1}^8 \hat{\beta}_{mp} (\sqrt{\epsilon_r})^q (sa)^n} \quad (43)$$

onde Y é a admitância de abertura, ϵ_r é a permissividade do meio, s é a frequência complexa, a é raio do condutor interno e $\hat{\alpha}_{np}$ e $\hat{\beta}_{mp}$ são coeficientes do modelo [16].

A admitância Y , assim como nos demais modelos, refere-se aquela normalizada em relação à linha coaxial de 50Ω .

O modelo é válido para permissividades nos intervalos $1 \leq \epsilon' \leq 80$, $0 \leq \epsilon'' \leq 80$, sobre uma faixa de frequências normalizadas ($k_0 a$) de 0,01 a 0,19 (1 a 20 GHz). Seus coeficientes e equações para obtê-los são apresentados em por Anderson J. M [16].

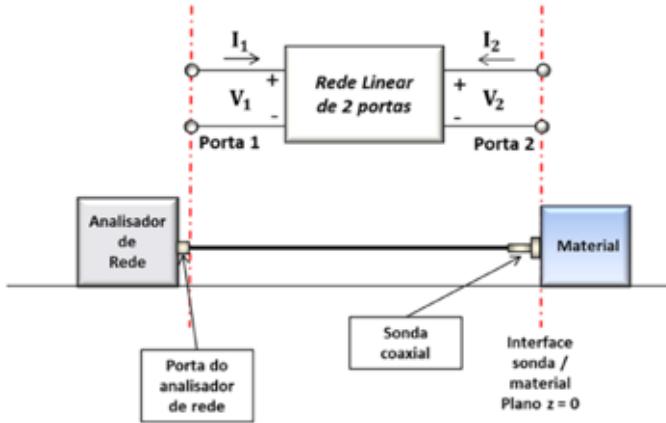
2.7 Modelo da transformação bilinear

No modelo capacitivo, a permissividade complexa é extraída do coeficiente de reflexão sem considerar os efeitos da radiação.

Bao et al. [17] demonstraram que a permissividade complexa de um material sob investigação pode ser determinada a partir do coeficiente de reflexão (“GAMMA bruto”). A partir da **equação 44** é possível determinar a permissividade complexa. No entanto, Γ_{bruto} não é o coeficiente de reflexão real (“GAMMA real”), medido a partir do analisador de redes. Logo, além da informação da interface sonda coaxial / material, diversos efeitos de erro da linha coaxial, conectores e encapsulamento estão incluídos no valor de Γ_{bruto} . Estes são erros sistemáticos e, para eliminá-los, os autores utilizaram um procedimento de calibração específico (diferente do padrão) que se baseia na assunção de que a relação entre o coeficiente

de reflexão e a permissividade é bilinear. Esta relação pode ser representada matematicamente por uma rede linear de duas portas como na **figura 6**.

Fig. 6 – Relação entre Γ medido e ε a partir de uma rede linear de 2 portas.



A partir de tal assunção, do uso de três padrões de medição e de algumas manipulações matemáticas da matriz de espalhamento, os autores chegaram à equação

$$\varepsilon_r = \frac{A_1 \Gamma_{bruto} - A_2}{A_3 - \Gamma_{bruto}} \quad (44)$$

onde A_1 , A_2 e A_3 são três constantes complexas dependentes da frequência e relacionadas aos elementos da matriz de espalhamento, à impedância característica Z_0 e aos elementos de circuito concentrado (C_0 e C_f).

$$A_1 = \frac{1 - S_{22}}{j\omega Z_0 C_0 (1 + S_{22})} + \frac{C_f}{C_0} \quad (45)$$

$$A_2 = \frac{S_{11} - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{j\omega Z_0 C_0 (1 + S_{22})} + \frac{C_f (S_{11} + S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21})}{C_0 (1 + S_{22})} \quad (46)$$

$$A_3 = \frac{S_{11} + S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{1 + S_{22}}$$

(47)

2.8 Modelo de Blackham e Pollard

No modelo quase-estático de Misra [9], obtém-se a equação estacionária equacionando as expressões de campo magnético tangencial em $z = 0$. Em [12], Misra usou a suposição simplificadora $E_r(r, 0) = E_0/r$ para obter a equação estacionária para a admitância de abertura normalizada, que é representada por

$$\bar{Y}_L = j \frac{k^2}{\pi k_c \ln(b/a)} \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \cos \phi' \frac{\exp(-jkR)}{r} d\phi' d\rho' d\rho \quad (48)$$

Blackham e Pollard [18] transformaram a **equação 48** em uma expansão em série de Taylor (truncada em 28 termos). Isto rendeu uma equação onde as integrais são independentes das características do meio. Uma vez que as integrais são calculadas para uma determinada geometria da sonda, a equação polinomial resultante permitiu rápida computação da admitância de abertura normalizada:

$$Y_L = \frac{jk_m^2}{\pi k_c \ln(b/a)} \left\{ j \left[I_1 - \frac{k_m^2}{2} I_3 + \frac{k_m^4}{24} I_5 - \frac{k_m^6}{720} I_7 + \dots \right] + \left[I_2 k - \frac{k_m^3}{6} I_4 + \frac{k_m^5}{120} I_6 - \dots \right] \right\} \quad (49)$$

Onde;

$$I_n = \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi R^{n-2} \cos \phi' d\phi' d\rho' d\rho \quad (50)$$

Os autores verificaram, conforme esperado, que a admitância calculada usando (**equação 49**) desvia-se da admitância real porque os modos de ordem elevada do campo elétrico na abertura não são incluídos na derivação do modelo.

Desta forma os mesmos modificaram as constantes I_n utilizando valores baseados em medições até 20 GHz de diversos materiais com valores de permissividade entre a permissividade do ar e a da água. Ao invés de otimizarem cada parâmetro individualmente, os parâmetros foram agrupados usando a equação

$$I_n = \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi R^{n-2} \cos \phi \, d\phi \, d\rho' \, d\rho \quad (51)$$

Desta forma, os parâmetros de otimização α , β e χ foram ajustados até que a admitância calculada através de **equação 49** fornecesse o melhor casamento com a admitância real.

A **tabela 1** apresenta a síntese dos modelos de admitância da ponta coaxial abordados neste trabalho.

Tab. 1 - Resumo dos modelos de admitância da sonda coaxial

Modelo	Características Principais
Capacitivo	A descontinuidade da abertura da sonda é modelada como dois capacitores em paralelo C_o e C_f [2]
Radiação	Uma condutância de radiação G é adicionada em paralelo ao circuito equivalente do modelo Capacitivo [4][5]
Onda completa	Equações para as regiões $z < 0$, $z = 0$ e $z > 0$ do sistema sonda/material são modeladas por meio de um método variacional. [15]
Quase-estático	Expansão em série para truncamento em 3 termos e aproximação quase-estática do modelo de Marcuvitz [11] para a abertura da sonda. [9]

Marcuvitz expandido	Expansão em série e truncamento em 7 termos para o modelo de Marcuvitz [8] para a abertura da sonda. [10]
Transformação bilinear	Utiliza o conceito de rede linear de duas portas (com parâmetros S) para modelar a relação linear entre permissividade e coeficiente de reflexão. [17]
Função Racional	Equações para as regiões $z < 0$, $z = 0$ e $z > 0$ do sistema sonda/material são obtidas pelo método dos momentos e a solução para tais equações é aproximada por uma função racional. [16]
Quase-estático aprimorado para modos de ordem superior	A solução de Misra [9] para a admitância de abertura é melhorada por meio de valores reais de admitância, de forma a contabilizar modos de ordem elevada gerados pela descontinuidade da abertura. [18]

3. Esquemas De Extração De Permissividade

No processo de extração da permissividade complexa a partir de um dado medido, quando a solução do problema inverso não tem equação explícita, utilize-se alguma técnica recursiva de otimização. Dentre as mais comuns, pode-se citar: Nelder e Mead, Newton, Simplex, Algoritmo genético (AG) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO) .

Segundo Peres [19], ajudam na seleção do esquema de extração:

- Modularidade
- Interconectabilidade
- Robustez
- Velocidade
- Acurácia
- Custo computacional

Estes parâmetros estão relacionados às características de cada modelo. No presente trabalho são

apresentados três esquemas de extração baseados nos algoritmos Simplex Point Matching, Gradient Point Matching e Particle Swarm Optimization (PSO) , os quais são detalhados em [19].

3.1 Esquema 1 - Simplex Point Matching

Um esquema adequado para extrair um valor de permissividade de uma equação de admitância é o algoritmo Simplex Point Matching [19]. Neste esquema é necessário criar uma tabela de permissividade cujos elementos são o domínio de dados de entrada para a pesquisa definida pela janela de análise (máxima e mínima permissividade consideradas) e pela resolução (distância entre elementos).

Através desta tabela de permissividade é criado o modelo de admitância. A partir da tabela de admitâncias, o elemento que aproxima o melhor valor medido. Uma vez mantida a associação entre elementos de admitância e elementos de permissividade, é possível recuperar a permissividade e a estimação terminada.

3.2 Esquema 2 - Gradient Point Matching

Neste método não se calcula uma tabela de permissividade como no método anterior. Define-se as mesmas janelas de análise e então toma-se decisões sobre como um movimento no plano de permissividade afeta o plano de admitância, de modo a ficar mais perto do valor medido. Desta forma, a estimação é utilizada.

Existe um estado inicial, onde ϵ_0 é o ponto inicial no domínio da permissividade para início da busca. O vetor de separação ΔY_0 é considerado como um indicador de proximidade (proximidade à admitância medida no domínio da admitância).

Uma vez que um deslocamento no plano de permissividade corresponde a um deslocamento desconhecido no plano da admitância, utiliza-se um vetor testador (buscador) para analisar todas as direções (geralmente 8 são consideradas), com passo normalizado (a magnitude do movimento é uma valor fixo) , que é a resposta no plano de admitância usada uma

como indicação do quão bom é o indicador de proximidade ΔY .

O ponto de partida para cada etapa de pesquisa é chamado de Ponto real denotado como ϵ_A e Y_A em cada plano, respectivamente. O ponto final de cada etapa de pesquisa é chamado de Ponto Futuro e é denotado como ϵ_F e Y_F em cada plano, respectivamente.

3.3 Esquema 3 - Particle Swarm Optimization (PSO)

É um método computacional meta-heurístico que otimiza um problema tentando iterativamente melhorar uma solução candidata com relação a um dado medida de qualidade.

A PSO otimiza um problema ao ter uma população de soluções candidatas (partículas) e ao mover essas partículas em torno do espaço de busca de acordo com fórmulas matemáticas simples sobre a posição e velocidade da partícula.

O movimento de cada partícula é influenciado por sua posição local mais conhecida e também é orientado para as posições mais conhecidas no espaço de busca. Estes por sua vez, são atualizados conforme melhores posições são encontradas por outras partículas. Espera-se que o enxame de partículas seja movido para as melhores soluções.

4. Comparação Entre Os Modelos

Na definição de um modelo de admitância, deve-se levar em consideração a aplicação de interesse. Cada modelo possui propriedades que se relacionam com os parâmetros do sistema de medição (velocidade, exatidão, frequência máxima, necessidade de calibração, uso de materiais de referência, etc.). O mesmo deve também ser compatível com as dimensões físicas da sonda utilizada. As propriedades mais importantes são descritas nos itens a seguir e relacionadas na **tabela 1**, que apresenta a comparação dos modelos tratados neste artigo.

4.1 Equação fechada para a solução inversa

Os modelos da sonda coaxial estabelecem um mapeamento bidirecional entre a admitância na abertura da sonda e a permissividade complexa do material em teste. As equações matemáticas de cada modelo variam de menor a maior complexidade. Existem modelos cuja variável de interesse (\square^*) pode ser isolada algebricamente e, portanto, possuem uma equação fechada para a solução inversa. Este é o caso dos modelos dos itens [2], [4], [17].

Para os demais modelos, as equações diretas não permitem que \square^* seja isolado, sendo necessária a utilização de técnicas numéricas para solução do problema inverso.

4.2 Custo Computacional

Os modelos que não levam em consideração os modos de ordem elevadas na abertura da sonda e cuja solução para o problema inverso é uma equação fechada, apresentam baixo custo computacional. É o caso dos modelos da capacidade, da radiação e da transformação bilinear. Os demais modelos apresentam maior complexidade matemática para a solução direta ou a solução inversa requer a utilização de alguma técnica de otimização.

Os critérios adotados para avaliar o custo computacional toma por base o equacionamento dos modelos da seguinte maneira:

1. Equações com polinômios de primeira e segunda ordem: baixo consumo computacional.
2. Equações com divisões, raízes, polinômios de ordem 3 ou maior: médio consumo computacional.
3. Equações integrais, derivadas, logaritmos: alto consumo computacional.

4.3 Limite de Frequência Superior

Na maior parte dos casos, os modelos que não contabilizam a presença dos modos de ordem superior na abertura não são aplicáveis em frequências elevadas. Conforme observado em [5], os modelos capacitivo e da radiação estão restritos respectivamente aos limites de 2 e 6 GHz.

Nos modelos quase-estático e de Marcuvitz expandido, os quais usam expansões em série das equações de Marcuvitz, o limite de frequência superior é proporcional ao número de termos utilizados. O modelo de Blackham & Pollard, sendo uma forma da equação de Marcuvitz truncada em 28 termos, possui limite de frequência em 20 GHz.

No modelo da Transformação bilinear, que tem base no modelo Capacitivo, os efeitos da radiação são reduzidos a partir da calibração, que está na própria computação dos coeficientes da solução direta.

Numa versão aprimorada do modelo da transformação bilinear [22], embora os efeitos da radiação não estejam incluídos no circuito equivalente, foi mostrado analiticamente que os erros devido à radiação podem ser reduzidos com a implantação de um procedimento de calibração adicional, especialmente quando as propriedades dielétricas dos materiais em teste estiverem próximas dos padrões de calibração.

Os modelos de onda completa e o modelo da função racional, em princípio, não estão limitados em frequência, uma vez que os modos superiores são considerados na formulação. Os seus autores, contudo, efetuaram medições até a frequência de 20 GHz somente.

4.4 Uso de Materiais de Referência

Grande parte dos modelos de admitância da sonda coaxial utilizam materiais de referência para determinar os parâmetros da equação da solução direta. Dentre os analisados, estão os modelos capacitivos, da radiação, da função racional, da transformação bilinear, de Blackham & Pollard.

Materiais de referência típicos são a água, o ar e álcoois cujas respostas de permissividade em

frequência possam ser descritas pelos modelos de relaxação de Debye.

4.5 Necessidade de Calibração do Analisador de Redes

Nas medidas com a sonda coaxial utilizando analisadores de redes, o modelo de erro de uma porta do analisador é utilizado. Tal modelo descreve os erros sistemáticos inseridos nas medidas.

Na bancada, o coeficiente de reflexão bruto da sonda (não corrigido) é obtido do analisador de redes. No procedimento usual da maioria dos modelos, o analisador de redes é calibrado numa primeira etapa, para compensação dos erros sistemáticos nas medidas de coeficiente de reflexão, e a permissividade do MUT é calculada com o modelo da sonda. O modelo da transformação bilinear utiliza um procedimento de calibração particular, no qual sua relação bilinear é também utilizada para quantificar os erros sistemáticos a partir das medidas dos materiais de referência. Desta forma, neste modelo, o efeito dos erros sistemáticos ficam embutidos na própria solução do problema direto.

4.6 Restrição quanto ao diâmetro da sonda

Os modelos baseados em circuito equivalente concentrado (modelo capacitivo, da radiação, da transformação bilinear) e o modelo quase estático, são aplicáveis somente a sondas com diâmetro entre 3 e 6 mm.

O modelo de Blackham e Pollard [18] pode ser aplicado em qualquer situação, pois, segundo os autores, não depende da frequência e das características do meio, mas somente da geometria da sonda. Estendendo tal consideração para o modelo de Marcuvitz expandido, pode-se concluir que a expansão em até sete termos é válida somente para a sonda coaxial do respectivo estudo, que têm diâmetro em entre 3 – 6 mm.

Os modelos de onda completa e o da função

racional não estão limitados em relação à geometria da sonda.

4.7 Exatidão do Modelo

A exatidão do modelo está relacionada ao quanto próximos os resultados obtidos a partir do modelo estão dos resultados reais do material. Para avaliação da exatidão neste trabalho, as curvas de permissividade (parte real e parte imaginária) obtidas por cada modelo foram comparadas com dados de permissividade disponíveis na literatura. Para tal, utilizou-se o erro relativo percentual dado por

(52)

$$E_{RP} = \left(\frac{\varepsilon_{estimado} - \varepsilon_{real}}{\varepsilon_{real}} \right) 100\%$$

onde $\varepsilon_{estimado}$ é a permissividade complexa (parte real ou parte imaginária) medida pelo usuário, ε_{real} é a permissividade complexa (parte real ou parte imaginária) real do material.

Para efeito de comparação, utilizou-se a seguinte escala:

- $E_{RP} < 5\% :$ Exatidão alta
- $5\% < E_{RP} < 10\% :$ Exatidão média
- $E_{RP} > 10\% :$ Exatidão baixa

Os dados relativos à exatidão na **tabela 2** foram determinados a partir de uma análise gráfica aproximada dos resultados de cada modelo na frequência de 6 GHz exclusivamente, exceto para o modelo quase-estático, cuja análise foi feita em 3 GHz.

Tab. 2 - Comparação detalhada entre os modelos de admitância

MODELO	Equação fechada para solução inversa	Consumo Computacional	Limite de Frequência Superior	Uso de matérias de Referência	Erros Sistemáticos embutidos no modelo	Restrição quanto ao diâmetro da sonda	Exatidão / E_{RP}
Modelo Capacitivo	✓	BAIXO	2 GHz	SIM	✗	RESTRITO	BAIXA / 12,15%
Modelo de Radiação (i)	✓	BAIXO	6 GHz	SIM	✗	RESTRITO	ALTA / 4,88%
Modelo de Radiação (ii)	✓	BAIXO	6 GHz	SIM	✗	RESTRITO	Sem informações
Modelo de Radiação (iii)	✓	BAIXO	2,5 GHz	SIM	✗	RESTRITO	ALTA / 0,97%
Modelo Quase-Estático	✓	MÉDIO	10 GHz	NÃO	✗	RESTRITO	BAIXA / 16,3%
Modelo de Marcuvitz Expandido	✗	MÉDIO	18 GHz	NÃO	✗	RESTRITO	MÉDIA / 6,25%
Modelos de Onda Completa (i)	✗	ALTO	Sem informações	NÃO	✗	ILIMITADO	Sem informações
Modelos de Onda Completa (ii)	✗	ALTO	10 GHz	NÃO	✗	ILIMITADO	ALTA / 0,5 %
Modelos de Onda Completa (iii)	✗	ALTO	20 GHz	NÃO	✗	ILIMITADO	BAIXA / 21,38 %
Modelos de Onda Completa (vi)	✗	ALTO	10 GHz - 20 GHz	NÃO	✗	ILIMITADO	ALTA / 3,92%
Modelos da Função Racional	✗	ALTO	20 GHz	SIM	✗	ILIMITADO	ALTA / 3,3%
Modelo da Transformação Bilinear	✓	BAIXO	26 GHz	SIM	✓	ILIMITADO	ALTA / 4,36%
Modelo de Blackham & Pollard	✗	ALTO	20 GHz	SIM	✗	ILIMITADO	ALTA / 2,05%

5. Conclusões

O presente artigo exibe importantes conceitos sobre o uso de modelos de caracterização dielétrica de materiais com o método da ponta de teste coaxial. Foram abordados desde modelos que se baseiam em uma aproximação através de circuitos equivalentes, a modelos baseados em rigorosa análise eletromagnética do problema.

A partir da pesquisa realizada, gerou-se a **tabela 2**, que apresenta uma análise comparativa dos diversos modelos avaliados. Dependendo da aplicação desejada, uma rápida consulta à tabela pode fornecer indicações de quais métodos são adequados, ou quais não são, as medidas pretendidas.

Sugerem-se os modelos mais adequados em relação a importantes parâmetros de medição: considerando faixa de frequência - são os modelos de onda completa e o da função racional; considerando consumo computacional - os modelos de radiação e da transformação bilinear são bastante apropriados, considerando materiais de referência - os modelos da função racional e de Blackham & Pollard e da transformação bilinear são

adequados. Finalmente considerando a exatidão, os modelos da função racional e de Blackham & Pollard são notáveis, pois os modos de ordem elevados são considerados e compensados.

Ao leitor final, indico o modelo da transformação bilinear para uso comercial e o modelo da função racional para uso em pesquisa científica.

Este artigo fornece uma visão geral e orientações para aqueles que desejam desenvolver sistemas de medição de permissividade a partir da sonda coaxial.

Informações e detalhes sutis e relevantes espalhados em inúmeras referências sobre o assunto foram sintetizados neste artigo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também são gratos à equipe do Laboratório de Micro-ondas, que prestou todo o auxílio necessário à montagem de setups de medidas e na busca de soluções para problemas práticos e teóricos.

Referências

- [1] Chen, L.F. Ong, C.K. Neo, C.P. Varadan, V.V. and Varadan, V.K. (2004). "Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization", John Wiley & Sons Ltd, England.
- [2] T. W. Athey, M. A. Stuchly, S. S. Stuchly. "Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: part I" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 30, no. 1, pp. 82-86, Janeiro, 1982.
- [3] T. W. Athey, M. A. Stuchly, G. G. Samaras, G. E. Taylor. "Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: part II – Experimental results" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 30, no. 1, pp. 87-92, Janeiro, 1982.
- [4] M. A. Stuchly, M. M. Brady, S. S. Stuchly, G. Gadja. "Equivalent circuit of an open-ended coaxial line in a lossy dielectric". IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, vol. 31, no. 2, pp. 116-119, Junho, 1982.
- [5] Liao et al, "An Accurate Equivalent Circuit Method of Open Ended Coaxial Probe for Measuring the Permittivity of Materials" Selected Papers from the 2011 International Conference on Electric and Electronics (EEIC 2011) in Nanchang, vol. 3, pp. 779-784, Junho 2011.
- [6] G. B. Gajda, S. S. Stuchly. "An Equivalent Circuit of an Open-Ended Coaxial Line" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 32, no. 4, pp. 506-508, Dezembro, 1983.

- [7] N. K. F. Staebell, D. Misra. "An experimental technique for in vivo permittivity measurement of materials at microwave frequencies" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 38, no. 3, pp. 337-339, Março, 1990.
- [8] Marcuvitz, Ed. New York: McGraw-Hill, 1951, pp. 213-216.
- [9] D. Misra. "A quasi-static analysis of open-ended coaxial lines" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MT=35, pp. 925- 928, Outubro, 1987.
- [10] D. Misra, M. Chabba, B.R. Epstein, M. Mirotznik, K. R. Foster. "Noninvasive electrical characterization of materials at microwave frequencies using an open-ended coaxial line: Test of an improved calibration technique". IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, vol. 38, pp. 8-14, Janeiro, 1990.
- [11] H Levine and C. H. Papas. "Theory of the circular diffraction antenna," J. Appl. Phys., vol. 22,- pp. 29-43: 1951.
- [12] J. R. Mosig, J. C E. Besson, M. Gex-Fabry, F. E. Gardiol. "Reflection of an open-ended coaxial line and application to nondestructive measurement of materials" IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, vol. IM-30, no. 1, pp. 46-51. Março, 1981.
- [13] P. De Langhe, L. Martens e D. De Zutter, "Measurement of Low Permittivity Materials Based on a Spectral-Domain Analysis for the Open-ended Coaxial Probe" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 42, no. 5, pp. 879-886, Outubro, 1993.
- [14] C. L. Li and K. M. Chen, "Determination of electromagnetic properties of materials using flanged open-ended coaxial probe-Full wave analysis" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, pp. 19-27, Fevereiro, 1995.
- [15] D. Misra, "On the measurement of the complex permittivity of materials by an open-ended coaxial probe." IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 5, pp. 161-163, Maio, 1995.
- [16] Anderson J. M., C. L Sibbald, S. S. Stuchly, "Dielectric Measurements Using a Rational Function Model". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 42, no. 2, pp. 199-204, Fevereiro, 1994.
- [17] Z. J. Bao, C. C. Davis, L. M. Swicord, "Microwave Dielectric Measurements of Erythrocyte Suspensions" Biophysical Journal, vol. 66, pp. 2173-2180, Junho, 1994.
- [18] D. V. Blackham, R. D. Pollard. "An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe" IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, vol. 46, no. 5, pp. 1093-1099, Outubro, 1997.
- [19] M. D. Perez. "General effective medium model for the complex permittivity extraction with an open-ended coaxial probe in presence of a multilayer material under test". 172p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Bologna, 2012.
- [20] Bilal Filali et al. "A Design and Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for the Measurement of the Dielectric Properties of Concrete" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, no. 10, pp. 2322-2328, Outubro, 2008.
- [21] Bao J-Z., Swicord M. L., Davis C. C. "Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol" J. Chem. Phys., vol. 104, no. 12, pp. 4441-4450, Março, 1996.
- [22] Folger K. e Tjomsland T. "Permittivity measurement of thin liquid layers using open-ended coaxial probes" Meas. Sci. Technol, vol. 7, pp. 1164-1173, Junho, 1996.

Crédito Imobiliário Digital

Sua casa própria com as melhores condições

Juros baixos para aquisição de imóvel, terreno e material de construção*.



Diferenciais:

Teto IPCA – limite de 6,5% a.a. para a inflação.

Garante30 – possibilidade de alterar, em até 30 meses, a forma de atualização do contrato.

Idade limite – 85 anos.



FHE

POUPEX

poupex.com.br
0800 061 3040

Consulte as normas e condições vigentes.
*Material de construção isométrica para militares das Forças Armadas e conveniados.



PÓS-GRADUAÇÃO NO IME

Bolsas: CAPES, CNPq e FAPERJ

Mestrado

- Engenharia Nuclear
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Transportes
- Sistemas e Computação

Mestrado e Doutorado

- Química
- Ciência dos Materiais
- Engenharia de Defesa



Apoio:



Matrículas: Fluxo Contínuo

Tel.: (21) 2546-7114 – Fax: (21) 2546-7089 – www.ime.eb.br – sd1@ime.eb.br