

Estudo de método para identificação de placas e remendos em pavimentos urbanos com a utilização de UAS quadricóptero

Study of method for identifying potholes and patches on urban pavements using quadrotor UAS

Estudio de método para identificación de agujeros y remiendos en pavimentos urbanos con la utilización de UAS cuatricóptero

Étude d'une méthode pour identifier des trous et des réparations sur chaussées urbaines avec l'utilisation de drones quadcopter

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

heber@det.ufc.br
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Arielle Elias Arantes

aearantes@det.ufc.br
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Paulo de Souza de Lima Neto

paulodesouza@det.ufc.br
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Resumo

O uso de sistemas aéreos não tripulados (*Unoccupied Aerial Systems* – UAS) para estudos na área de pavimentação rodoviária e urbana ainda é incipiente no Brasil. Nesse sentido, este artigo avaliou o potencial de um UAS quadricóptero para identificar defeitos superficiais, do tipo placa e remendo, em pavimentos urbanos, empregando dois métodos de levantamentos (*grid* e *linear*) e quatro alturas de voo (30, 40, 50 e 60 m), comparando as medidas realizadas nos mosaicos fotogramétricos com as medidas efetuadas *in loco* em revestimento asfáltico. Os erros do levantamento variaram de 1,21% nas medidas de comprimento dos remendos, utilizando o método *linear*, a 4,82% nas medidas de largura das placas, utilizando o método *grid*. Observou-se, ainda, que os erros aumentaram com o aumento da altura de voo, porém apresentando coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,90, mostrando-se um método viável para identificação de defeitos de superfície em vias urbanas.

Palavras-chave: Defeitos; Pavimentos; Processamento Digital de Imagens.

Abstract

The use of Unoccupied Aerial Systems (UAS) for studies in road and urban paving is still incipient in Brazil. In this sense, this paper evaluated the potential of a UAS Quadricopter to identify surface distress, like pothole and repair, in urban pavements, using two survey methods (*Grid* and *Linear*) and four flight heights (30, 40, 50 and 60 m) comparing the measurements made on the photogrammetric mosaics with measurements take in loco in asphalt wearing course. The errors in the measurements ranged from 1.21% in the length measurements of the repair using the *Linear* method to 4.82% in the width measurements of the potholes using the *Grid* method. It was also observed that the errors increased with the increase of the flight height, however presenting a coefficient of determination (R^2) greater than 0.90, showing to be a viable method for identifying surface distress in urban roads.

Keywords: Distress; Pavements; Digital Image Processing.

Resumen

El uso de sistemas aéreos no tripulados (*Unoccupied Aerial Systems* – UAS) para estudios en el área de pavimentación de carreteras y urbana aún es incipiente en Brasil. En este

sentido, este artículo evaluó el potencial de un UAS cuadrirrotor para identificar defectos superficiales, del tipo agujero y remiendo, en pavimentos urbanos, empleando dos métodos de búsquedas (*grid* y *linear*) y cuatro alturas de vuelo (30, 40, 50 y 60m), comparando las medidas realizadas en los mosaicos fotogramétricos con las medidas sacadas *in loco* en revestimiento asfáltico. Los errores de la búsqueda variaron de 1,21% en las medidas de longitud de los remiendos, utilizando el método *linear*, a 4,82% en las medidas de ancho de los agujeros, utilizando el método *grid*. Se observó, aún, que los errores aumentaron con el aumento de la altura de vuelo, pero presentando coeficiente de determinación (R^2) superior a 0,90, demostrando ser un método viable para identificación de defectos de superficie en vías urbanas.

Palabras-clave: Defectos; Pavimentos; Procesamiento Digital de Imágenes.

Résumé

L'utilisation de systèmes aériens sans pilote (Unoccupied Aerial Systems - UAS) pour les études dans le domaine du revêtement routier et urbain est encore en développement au Brésil. En ce sens, cet article a évalué le potentiel d'un drone quadcopter pour identifier des défauts de surface, les modalités de trous et de réparations sur des chaussées urbaines. Pour cela, on a utilisé deux méthodes d'enquête (la grille d'entretien et la linéaire) et quatre hauteurs de vol (30, 40, 50 et 60 m). Donc, on a pu comparer les mesures effectuées sur les mosaïques photogrammétriques avec les mesures prises *in loco* au revêtement en asphalte. Les erreurs d'enquête variaient de 1,21% dans les mesures de la longueur des réparations, en utilisant la méthode linéaire, à 4,82% dans les mesures de la largeur des trous, en utilisant la méthode grille. Il a également été observé que les erreurs augmentaient avec l'augmentation de la hauteur de vol, ce qui a présenté toutefois un coefficient de détermination (R^2) supérieur à 0,90. Donc, il peut être considéré une méthode viable pour identifier les défauts de surface des routes urbaines.

Mots-clés: défauts; revêtement; traitement d'image numérique.

1 Introdução

Uma das ferramentas introduzidas no mercado, na última década, e que vem sendo cada vez mais aplicada em diversos campos da Engenharia são os veículos remotamente pilotados (*Remotely-Piloted Aircrafts* – RPA), também denominados de sistemas aéreos não tripulados (*Unoccupied Aerial Systems* – UAS). Sua empregabilidade vai desde a obtenção de imagens e filmagens de eventos pela mídia (SILVA *et al.*, 2016) até técnicas da aerofotogrametria visando o monitoramento ambiental (ARNOLD *et al.*, 2010, FONTES e POZZETTI, 2016) e de tráfego (PURI, VALAVANIS e KONTITSIS, 2007, KANISTRAS *et al.*, 2013), entre outras aplicações. Estudos de Pessoa, Carrilho e Miyoshi (2017) e Komazaki *et al.* (2017) mostraram que é possível se obter resultados favoráveis, qualitativos e quantitativos, aplicando esses veículos no auxílio dos levantamentos aerofotogramétricos.

Com a constante evolução das ferramentas e métodos empregados em pavimentação, a *Federal Highway Administration* desenvolveu um *roadmap* para auxiliar na identificação de lacunas existentes na gerência de pavimentos e determinar iniciativas e prioridades de pesquisa e desenvolvimento (ZIMMERMAN, PIERCE e KRSTULOVICH, 2010). Castelo Branco (2016), analisando esse *Roadmap*, identificou uma lista de desafios, sendo um desses o uso de imagens aéreas para análise de defeitos em pavimentos.

O emprego das UAS na engenharia de transportes ainda se encontra em um estágio inicial, existindo alguns trabalhos teóricos e práticos. A engenharia rodoviária é um dos segmentos que começou há pouco tempo a utilizar UAS como meio de obtenção de dados para projetos e construção de novas vias (ALMEIDA *et al.*, 2016, BARROS *et al.*, 2017), para determinação do volume de jazidas de solos para pavimentação (SIEBERT e TEIZER, 2014), contagem de tráfego (PURI, VALAVANIS e KONTITSIS, 2007) e verificação de defeitos de pavimentos (ZHANG, 2008; PAN *et al.*, 2017; INZERILLO, MINO e ROBERTS, 2018; LIMA NETO, OLIVEIRA e ARANTES, 2019).

No contexto da gerência dos pavimentos é necessário que os defeitos presentes em pavimentos sejam identificados e corrigidos, para que não proporcionem risco de acidentes e maiores custos aos usuários. Existem alguns métodos para identificação e levantamento de defeitos de pavimentos no Brasil, como a avaliação objetiva (DNIT, 2003a) e subjetiva da superfície e o levantamento visual contínuo (DNIT, 2003b). Todavia a maioria desses métodos demandam bastante tempo e custo, além de serem bastante subjetivos, com presença intensa de mão de obra humana. Assim sendo, para que seja possível diminuir tempo, custos e erros, é necessária a aplicação de novas tecnologias, a exemplo dos UAS.

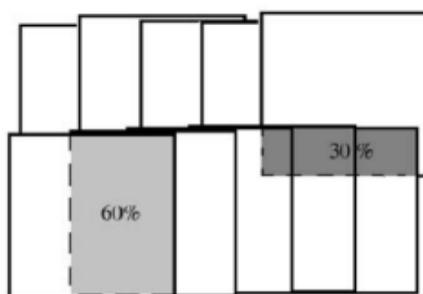
Por meio de um UAS é possível identificar e mensurar os defeitos superficiais em pavimentos de modo célere, racional e com baixo custo, pois as imagens geradas possuem poucos centímetros de resolução espacial, possibilitando a detecção de defeitos com dimensões superiores a alguns centímetros (EISENBEISS, 2006). Assim, com levantamentos periódicos na infraestrutura, torna-se possível uma análise de desempenho do ciclo de vida do pavimento, contribuindo para a estruturação do banco de dados de um sistema de gerência de pavimentos.

Diante do exposto, o objetivo deste artigo é avaliar o potencial de um UAS quadrrorotor para identificar defeitos do tipo panela e remendo em pavimentos asfálticos urbanos, empregando dois métodos de levantamentos (*grid* e *linear*) e quatro alturas de voo (30, 40, 50 e 60 m), comparando-os com medidas efetuadas *in loco*.

2 Fotogrametria e aerofotogrametria com UAS

Nos levantamentos fotogramétricos, para que seja possível uma melhor visualização da ampla área fotografada, são feitas montagens das imagens, conhecido por mosaico fotogramétrico (FIGUEIREDO e FIGUEIREDO, 2018). Esse procedimento causa uma impressão de continuidade entre as fotografias, pois se faz entender que é uma única fotografia formada por todas as outras. Para entender melhor a formação dos mosaicos, é necessário compreender que existem imagens sobrepostas em um recobrimento aéreo. Segundo Coelho Filho e Brito (2007), com o número de fotografias maior, o recobrimento permite um maior detalhamento das imagens captadas. Dois tipos distintos de sobreposição podem ser executados: lateral e longitudinal; a primeira sendo aquela cujo valor é da ordem de 30% e ocorre entre as faixas do bloco, e a segunda, superior a 60%, ocorre entre as fotografias, como mostrado na Fig. 1.

Figura 1 – Sobreposição lateral e longitudinal em voos fotogramétricos.



Fonte: Coelho Filho e Brito, 2007.

Na fotogrametria com UAS, a taxa de sobreposição deve ser aumentada para um valor de 70% lateral e 80% longitudinal (FIGUEIREDO e FIGUEIREDO, 2018), visto que esse equipamento tem uma menor estabilidade em relação a aeronaves tripuladas e, assim, maior distorção geométrica e arraste das fotografias aéreas, dificultando o seu processamento. Dessa maneira, com uma maior sobreposição, há uma maior quantidade

de fotos do mesmo local, aumentando a qualidade do ortomosaico, visto que serão selecionadas as melhores fotos (menor distorção, arraste e sombra), contribuindo para o processamento digital das imagens.

Há cerca de 15 anos, a aerofotogrametria somente era feita com equipamentos de alto custo e grandes dimensões, como aviões e helicópteros. Com a evolução dos UAS e dos *softwares* de processamento de imagens, ocorreu uma melhoria na obtenção de imagens e dados aerofotogramétricos. Saad e Tahar (2019), utilizando um UAS multirrotor de baixo custo, compararam o diâmetro e a área de remendos e painéis medidos em campo com os estimados a partir de ortomosaicos, e obtiveram um erro máximo no diâmetro de um remendo de 14 cm para um voo realizado a 40 m de altura, sendo que a maioria dos remendos e painéis apresentaram erros inferiores a 5 cm. Comparando as medidas de profundidade e volume de painéis extraídas de fotografias obtidas com um UAS e medidas *in loco*, Romero-Chambi *et al.* (2020) buscaram avaliar como mudanças na altura de voo e no percentual de sobreposição longitudinal das fotos aumentava ou diminuía o erro das estimativas de profundidade, largura e volume das painéis. Estudos de Cardoso, Carvalho e Pessoa (2017) mostraram que existe a possibilidade de fazer levantamentos de defeitos em pavimentos com UAS, sendo usadas aeronaves diferentes, que realizavam voos de maiores altitudes, porém com maior custo de aquisição.

Outros estudos buscaram avaliar a acurácia de diferentes algoritmos de segmentação e classificação de imagens na identificação automática de diferentes tipos de defeitos de pavimentos. Inzerillo *et al.* (2018) mostraram o potencial de um UAS associado a um *laser scan* para a identificação de defeitos em pavimentos. Pehere *et al.* (2020) desenvolveram um método para a detecção automática de painéis utilizando algoritmos de segmentação de imagens obtidas de UAS. Igualmente, Castelo Branco e Segantine (2015) buscaram identificar defeitos em pavimentos de forma automática por meio do uso de técnicas de contraste, filtragem e classificação de imagens. Da mesma forma, Pan *et al.* (2017) avaliaram a acurácia de diferentes classificadores na classificação automática de defeitos de pavimentos do tipo painel e trinca, obtendo uma acurácia geral na detecção automática dos defeitos de 98%.

A carência quantitativa de publicações nacionais e internacionais sobre a aplicação de UAS para auxílio no levantamento de defeitos de pavimentos justifica a necessidade de estudos para se analisar a viabilidade de aplicação dessas novas tecnologias na infraestrutura rodoviária.

3 Método de pesquisa

Este artigo foi executado em quatro fases. Na primeira fase foi feita a seleção da área de estudo, com o reconhecimento *in loco* das condições do pavimento e a seleção dos materiais, isto é, trena, UAS e *softwares* para o planejamento, execução e processamento dos dados (*Pix4D Grid*, *Map Pilot* e *Agisoft Photoscan*). A fase seguinte consistiu na elaboração dos planos de voo e na captura dos dados, incluindo a medição com auxílio de trena e a captura de fotos utilizando um UAS. A partir dos dados capturados foi feito o processamento das imagens no *software Agisoft Photoscan*. Por fim, na quarta etapa, foram realizados os cálculos das porcentagens de erro entre as medidas *in loco* e as obtidas no mosaico fotogramétrico. Um detalhamento das etapas metodológicas aplicadas neste artigo é descrito nos próximos subitens.

3.1 Área de estudo

Foi escolhido um trecho urbano de cerca de 400 metros de extensão, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará (localizado nas seguintes coordenadas 559157,52 E, 9581945,84 N - 559062,77 N, 9581150,48 N Fuso 24 S). A via em questão sugere ter quatro faixas de tráfego mais acostamentos externos, pois não há sinalização horizontal para essa divisão. Além disso, é pavimentada em concreto asfáltico e tem canteiro central dividindo-a em duas pistas de rolamento. Medidas *in loco* indicam uma largura de 8,0 m para cada pista (ou seja, cada faixa com cerca de 3,5 m e acostamento 1,0 m) e de 5,0 m para o canteiro central, totalizando 21 m de largura total (Fig. 2).

Figura 2 - Localização da via estudada.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

A via apresenta um fluxo de tráfego leve e predominante de veículos de passeio, com pavimentação em estado superficial regular, com poucos defeitos, sendo os mais recorrentes as panelas e os remendos nas quatro faixas de tráfego (Fig. 3). Além disso, o local possui campos abertos apropriados para o pouso e a decolagem do UAS quadrrrotor, facilitando a realização dos levantamentos necessários.

Figura 3 - Defeitos encontrados via estudada.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

3. 2 Materiais e softwares

3. 2. 1 UAS e trena

Para a coleta das imagens deste artigo, utilizou-se o UAS quadrrrotor, modelo *Phantom 4 Pro* (Fig. 4), composto de GPS, controle remoto e câmera. O equipamento compreende uma plataforma aérea com sensores e câmera acoplados que possibilitam a obtenção de imagens fotogramétricas, sensores que aumentam a estabilidade da aeronave, como também a transmissão de dados para que seja possível o acompanhamento da missão em tempo real. As especificações técnicas do equipamento estão na Tab. (1).

Figura 4 – UAS quadricóptero modelo *Phantom 4 Pro*.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Tabela 1 – Especificações técnicas do *Phantom 4 Pro*.

Característica	Especificação
Dimensões (diagonal)	350 mm
Peso	1388 gramas
Altura máxima de voo	6 km
Distância máxima de alcance	7 km
Velocidade máxima	72 km/h
Autonomia de voo	30 minutos
Capacidade de armazenamento	128 GB
Câmera	20 MP
Localização	GPS e GLONASS

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

O UAS escolhido vem acoplado com uma câmera, que possui um sensor de 1 polegada, atualizado com capacidades fotográficas de 20 *megapixels*. Esse sensor permite 11,6 pontos de alcance dinâmico, o que mantém uma alta precisão, mesmo em situações de iluminação ruim. Além disso, a câmera é acoplada a um gimbal avançado de 3 eixos, que elimina vibrações e movimentos indesejados durante o voo, permitindo que a câmera capture imagens suaves e fluidas mesmo durante manobras complexas.

Por fim, outro material utilizado neste estudo, para auxílio nos levantamentos de campo, foi uma trena de 10 metros, usada para medir *in loco* o tamanho (comprimento e largura) dos remendos e (maior comprimento e profundidade) das panelas.

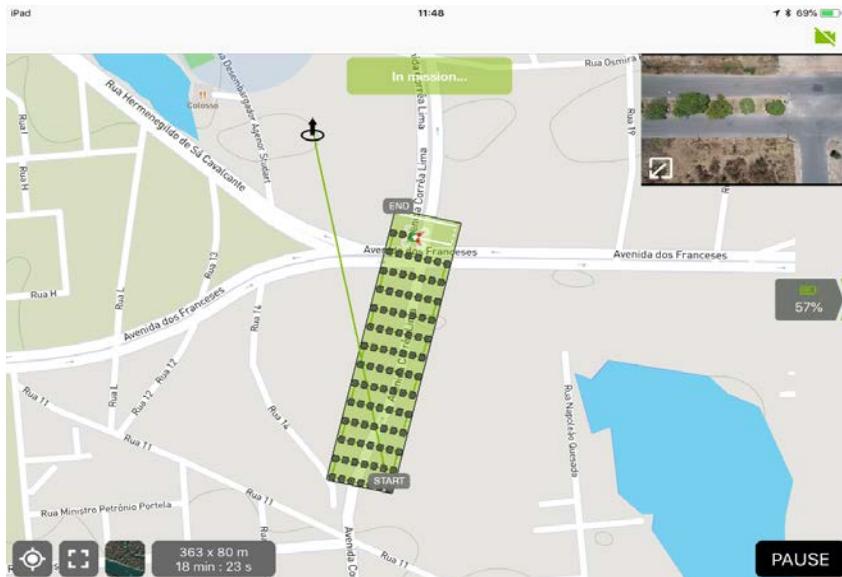
3. 2. 2 *Softwares* para planejamento dos voos

Para o planejamento dos voos autônomos foram utilizados dois *softwares*: um para missões do tipo *grid*, no qual o UAS passa de forma transversal à localidade delimitada, capturando as imagens de acordo com a sobreposição desejada; outro, para missões do tipo linear, percorrendo a via estudada em linha reta, capturando as imagens de acordo com a sobreposição desejada.

Para as missões do tipo *grid*, foi utilizado o *software Pix4D capture*, versão 4.5.0. Nele é possível selecionar a área que deseja sobrevoar e determinar o plano de voo, a velocidade (rápida, média ou lenta) e a altura desejada (Fig. 5). Assim, o equipamento calcula automaticamente a área, o tempo de voo, o consumo de bateria e o *ground sample distance* (GSD), que é a distância entre o centro de dois *pixels* consecutivos medidos no terreno. O GSD está diretamente relacionado à altura de voo, ou seja, quanto maior a altura de voo, maior o GSD. Quanto maior o valor do GSD (por exemplo, 10 cm ao invés de 5 cm), menor a resolução espacial e menor a quantidade de detalhes que será visível na imagem. Nesse sentido, é preferível voar mais baixo e obter um menor valor de GSD (3-5 cm), a fim de detectar uma maior quantidade de detalhes das

painelas, trincas e remendos. Durante o voo, é possível verificar onde estão sendo capturadas as imagens e o trajeto que UAS está fazendo em tempo real.

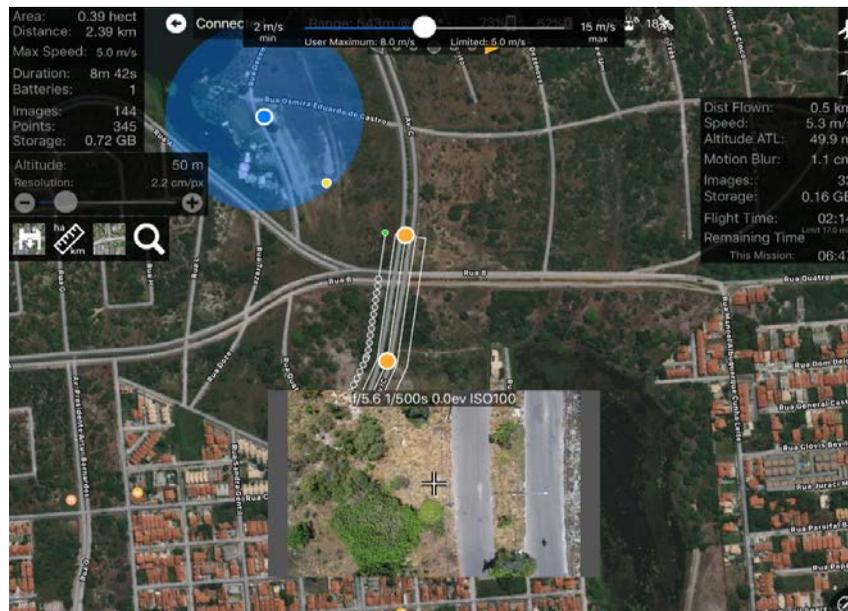
Figura 5 – Plano de voo no *software Pix4D Grid Mission*.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Para as missões do tipo linear, foi utilizado o *software Map Pilot*. Nele, também podem-se definir altura, sobreposição de imagens, quantidade de baterias necessárias, entre outros. Sua interface também é bastante desenvolvida, mostrando a localização da área de estudo, obtida a partir do GPS, área, distância, velocidade máxima da aeronave, altitude, GSD e duração do voo (Fig. 6), possibilitando acompanhar a movimentação do UAS em tempo real.

Figura 6 – Plano de voo no *software Map Pilot*.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Para a presente pesquisa, o *software* escolhido para o processamento das imagens foi o *Agisoft PhotoScan*, versão 1.4.2, que realiza o processamento das fotografias e gera os ortomosaicos e o modelo 3D da área levantada. A tecnologia empregada no *Agisoft PhotoScan* utiliza-se da técnica de fotogrametria digital implementada com métodos de visão por computador, que resulta em um sistema de processamento automatizado e inteligente. Para cumprir uma tarefa de georreferenciamento, o *software* usa dados de GPS aerotransportados, combinados com uma tecnologia de nuvem de pontos para uma execução de resultados mais precisos. Esse *software* possibilita a inserção de pontos de controle em terra, melhorando significativamente a precisão locacional dos objetos presentes no ortomosaico.

3. 2. 3 Medição *in loco* e planejamento de voos

Foi realizada uma verificação *in loco* na área de estudo descrita anteriormente com o auxílio da trena, a fim de mensurar o maior comprimento e profundidade das painelas, uma vez que a maioria delas tem formato geométrico irregular, bem como o comprimento e a largura dos remendos, estes com geometria quadrada ou retangular, majoritariamente.

Em seguida, foram planejados voos para método *grid* no *software* Pix4D (área coberta de 24.000m², ou seja, 400m x 60m) e para o método linear no *software* Map Pilot (área coberta de 16.000m², 400m x 40 m). Para cada método foram realizados 8 voos, sendo dois para cada altura, totalizando 16 voos sobre a via estudada e 1.120 fotos capturadas. Os voos foram realizados entre 11h30 e 13h, em dias ensolarados, com poucas nuvens. As especificações dos voos para cada método e altura estão descritas na Tab. 2.

Tabela 2 – Parâmetros de voo realizados utilizando os métodos *grid* e linear.

Método	Altura (m)	GSD Grid (cm/px)	Número de fotos	Sobreposição lateral e longitudinal
Grid	30	0,82	222	70% e 80%
	40	1,09	182	
	50	1,36	143	
	60	1,64	130	
Linear	30	1,40	178	70% e 80%
	40	1,70	112	
	50	2,20	83	
	60	2,60	70	

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

3. 2. 4 Processamento digital das imagens e análise dos resultados

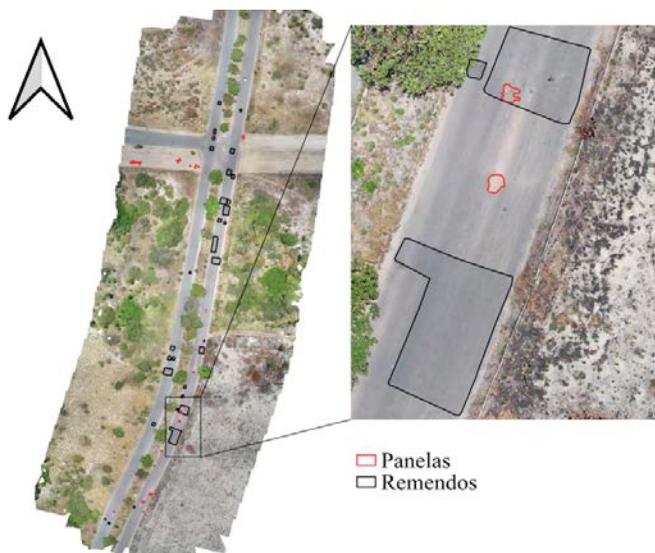
Após o voo, as imagens foram armazenadas no dispositivo de memória do UAS e as missões ficaram registradas nos aplicativos utilizados. Assim, foi possível verificar a quantidade de imagens capturadas e o tempo de voo. As imagens foram transferidas para o computador para que fosse possível realizar os processamentos no *software* *Agisoft PhotoScan*.

O *Agisoft PhotoScan* trabalha em um sequenciamento de etapas. Dessa maneira, para a construção do ortomosaico, cada uma das etapas foi cumprida rigorosamente, a saber: remoção de erros e distorções provenientes do levantamento das imagens, geração de pontos para a fotorretificação, geração de modelo digital de terreno e geração de ortomosaico com precisão.

Após os processos de correção, as imagens foram georreferenciadas pelo mesmo *software*, que obtém os pontos de GPS levantados juntamente com as imagens e, de acordo com as coordenadas, orienta todas para a formação de um mosaico georreferenciado (Fig. 7). Neste trabalho, não foram utilizados pontos de

controle no solo obtidos com receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de alta precisão, visto que não havia disponibilidade de um receptor GNSS geodésico no momento dos levantamentos.

Figura 7 – Mosaico fotogramétrico (a 50m de altura) com delimitação das painelas e remendos na via estudada.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

A partir do mosaico fotogramétrico foram retiradas as medidas de comprimento e largura de cada remendo (total de 31) e painela (total de 23) no *software* QGIS. Dessa maneira, com os dados obtidos, foram comparadas as diferenças medidas entre o levantamento fotogramétrico e *in loco*, sendo calculadas as porcentagens de erros.

4 Análise e discussão dos resultados

A Figura 8 exemplifica um comparativo entre a imagem de uma painela na via estudada obtida com uma câmera de *smartphone* (1) e a mesma obtida dos mosaicos fotogramétricos sobrevoados a 30m de altura, levantados a partir dos dois métodos, linear (2) e *grid* (3).

Figura 8 – Comparação das fotografias de uma mesma painela obtidas com *smartphone* em campo (1) e pelo UAS a 30 m de altura utilizando os métodos linear (2) e *grid* (3).



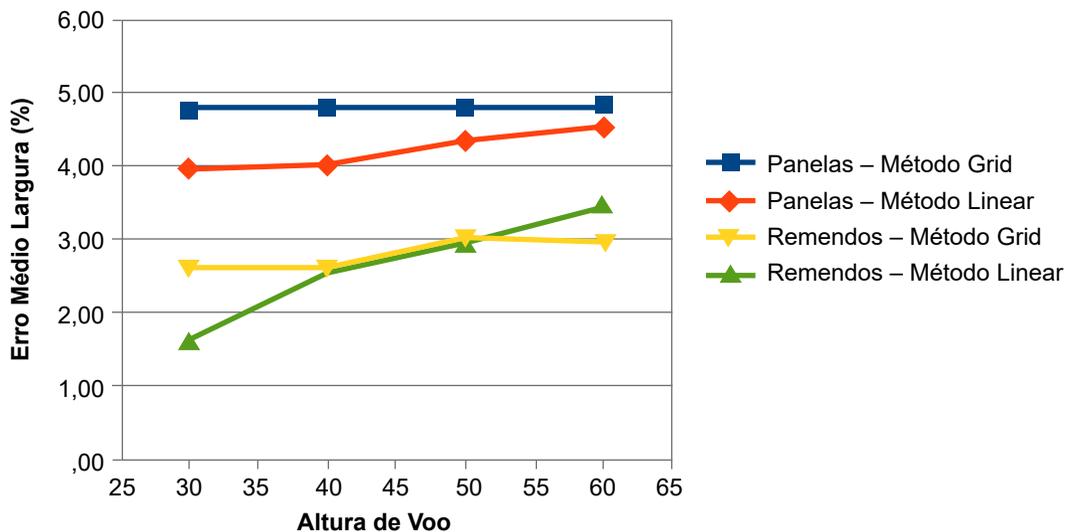
Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Percebe-se, ainda na Fig. 8, que o mosaico gerado a partir do método *grid* (3) apresenta maior detalhamento se comparado ao linear (2). Isso ocorre porque o GSD obtido pelo método *grid* é 59% maior (0,82 cm/px) do que o GSD gerado pelo método linear (1,40 cm/px), o que possibilita a identificação de um maior número de

detalhes da panela. A qualidade do mosaico fotogramétrico obtido pelo método *grid* também é maior, pois utilizou 222 imagens no seu processamento, já o método linear utilizou 178 imagens.

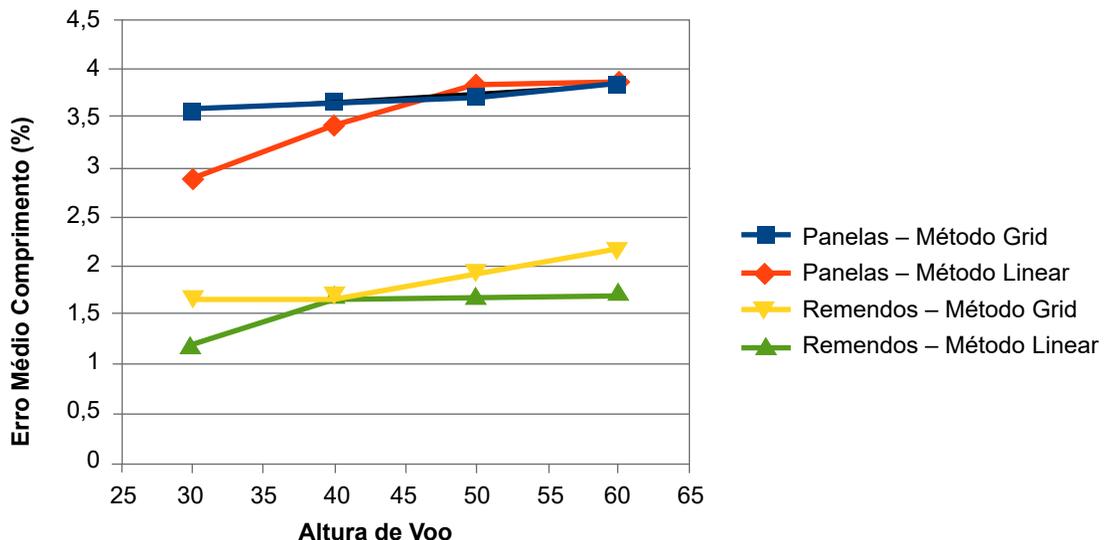
As Figuras 9 e 10 mostram o erro percentual das mensurações das larguras e comprimentos para os defeitos do tipo panela e remendo encontrados na via estudada considerando as quatro alturas de voo (30, 40, 50 e 60 metros) e os dois métodos empregados.

Figura 9 – Comparação entre os erros médios das medidas de largura das panelas e remendos.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Figura 10 – Comparação entre os erros médios das medidas de comprimento das panelas e remendos.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Percebe-se que os erros nas medidas de largura e comprimento são maiores para as panelas se comparados aos remendos, pois as panelas apresentam dimensões bem inferiores aos remendos, e menor contraste nas imagens, dificultando a sua detecção e mensuração manual pelo intérprete em um ambiente

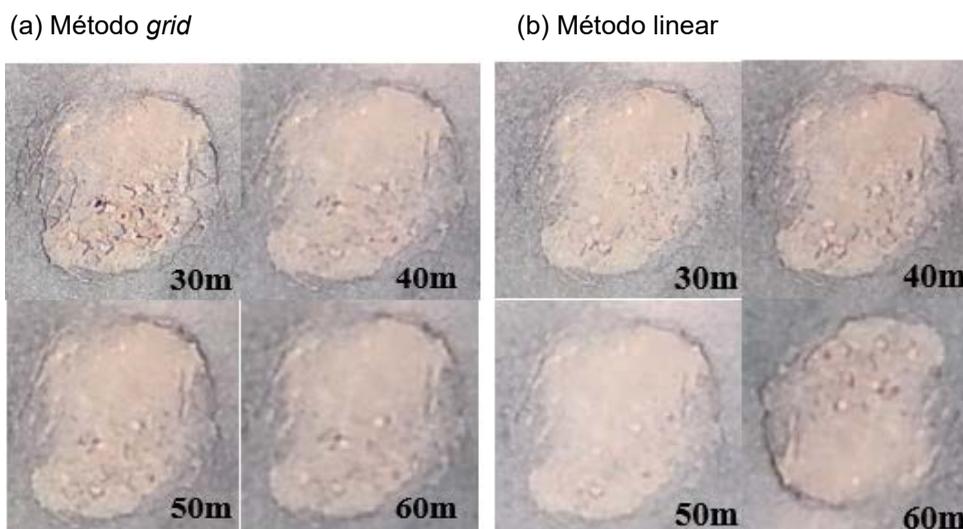
de SIG (Sistema de Informação Geográfica). Por outro lado, os remendos, devido ao seu contraste com o revestimento de fundo, foram mais facilmente identificados durante o processamento das imagens, fornecendo informações de localização mais precisas para o algoritmo realizar o mosaico, aproximando, assim, as medidas realizadas nos mosaicos dos valores medidos *in loco* com a trena.

Tanto para as panelas como para os remendos, os erros nas medidas de largura foram maiores, provavelmente devido a uma menor sobreposição lateral das fotos (70%) quando comparada com a longitudinal (80%), ou seja, o algoritmo de processamento encontrou menos pontos homólogos na direção lateral do que na longitudinal, diminuindo a precisão das medidas laterais.

Para os dois tipos de defeitos, verificou-se que o aumento da altura do voo aumentou o GSD e minimizou os detalhes visíveis nos mosaicos fotogramétricos e, por consequência, os erros percentuais tenderam a aumentar. A correlação entre altura de voo e percentual de erro nas medidas de largura dos remendos e panelas apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,98, com exceção dos erros nas medidas de largura para os remendos utilizando o método *grid*, cujo R^2 foi igual a 0,85. A correlação entre os erros nas medidas de comprimento e nas alturas de voo foi menor para as medidas dos remendos utilizando o método linear (com R^2 igual a 0,80) e maior para as medidas das panelas utilizando o método *grid* (R^2 igual a 0,97).

Quanto menor a altura de voo, maior é o GSD e mais detalhes podem ser observados nos mosaicos fotogramétricos (Fig. 11a e 11b), facilitando, assim, a identificação e delimitação manual detalhada dos defeitos no *software* QGIS pelo intérprete, minimizando os erros na delimitação dos defeitos e nas medidas de largura e comprimento de cada um.

Figura 11 – Comparação de panela em diferentes alturas nos métodos *grid* e linear.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Mesmo com essas diferenças percentuais, é possível perceber que a taxa de erros nos levantamentos é pequena, variando, para panelas, de 3,59% a 4,82% utilizando o método *grid*, e de 2,90% a 4,55% para o método linear. Para remendos, a variação é de 1,67% a 4,77% para o método *grid* e de 1,21% a 4,71% para o método linear. Pode-se concluir, portanto, que existe uma similaridade dos valores do levantamento e do processamento digital com os valores reais.

É perceptível verificar que, mesmo os dois métodos possuindo erros percentuais pequenos (pelo método *grid*, média de 4,21% nas panelas), o linear obtém resultados melhores para o levantamento de defeitos em pavimentos com revestimento asfáltico, mesmo sem os pontos de controle. A provável causa dessa diferença é a forma de voo: no método linear ocorrem sobreposições longitudinais, de modo que panelas e remendos aparecem em mais imagens do que quando sobrepostos transversalmente no outro método. Além disso, em

voos transversais e em deslocamentos longitudinais no método *grid*, o UAS fica mais suscetível a adornamentos laterais e instabilidades de voo pela ação de ventos, o que demanda maior esforço de estabilização da aeronave e, por consequência, maiores incertezas.

5 Conclusões

Os resultados deste artigo foram obtidos a partir de voos utilizando um UAS quadricóptero e processamentos digitais de imagens, que analisaram alturas e métodos de levantamento de defeitos de superfícies de revestimentos asfálticos, especificamente remendos e panelas, por serem os mais constantes em pavimentos urbanos brasileiros com ausência de processos de manutenção frequentes. Verificou-se que, a partir dos mosaicos fotogramétricos obtidos, foi possível mensurar os erros de levantamento com precisão razoável, e que as variáveis de altura de voo e de método têm influência direta para a realização de levantamentos fotogramétricos dos defeitos.

A correlação entre altura de voo e erro nas medidas de largura apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,98, com exceção das larguras para os remendos utilizando o método *grid*. Por outro lado, a correlação entre altura de voo e erros nas medidas de comprimento foi menor, variando o R^2 de 0,80 a 0,97, para as medidas do comprimento dos remendos utilizando o método linear.

A análise dos resultados demonstrou que o método linear é o que melhor se aplica ao levantamento de panelas e remendos em pavimentos urbanos sem utilização de pontos de controle, e que, quanto menor a altura, menores são os erros de medições. Também foi possível concluir que as panelas apresentaram erros muito maiores devido ao seu baixo contraste nas imagens, dificultando a identificação de pontos homólogos. Outra causa para essa dificuldade pode estar relacionada ao intérprete humano, pois a identificação dos defeitos e a sua mensuração correta se tornam difíceis em feições de pequeno tamanho e pouco contraste.

Desse modo, a partir dos resultados obtidos, conclui-se que os mosaicos fotogramétricos gerados por levantamento com UAS podem colaborar no aperfeiçoamento e confiabilidade de um sistema de gerência de pavimentos no ambiente urbano, a partir da identificação dos defeitos de superfície.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Referências

ALMEIDA, I. C.; COSTA, G. C.; SILVA, D. C.; MEDEIROS, J. R. B. Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários. *In.*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 6., **Anais** [...]. Recife: UFPE, 2016. p. 1-10.

ARNOLD, T.; MARTIN, D. B.; ANDREAS, F.; RAYMOND, L. **UAV-based multispectral environmental monitoring**. Waikoloa: IEEE, 2010. p. 61-62.

BARROS, E. R. O.; FILHO MAFRA, F. H. M. G.; ANDRADE, O.; SATO S. S. As potencialidades e limitações do uso do vant no monitoramento de faixas de domínio de rodovias federais. *In.*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27., 2017, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBC, 2017. p. 1102-1106.

CARDOSO, P. D.; CARVALHO, F. N.; PESSOA, P. Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação de patologia superficial em pavimento asfáltico. **Alconpat**, [S. l.], v. 7, n. 2, p.

160-171, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.161>. Acesso em: 20 fev. 2020.

CASTELO BRANCO, L. H. **MANIAC**: uma metodologia para o monitoramento automatizado das condições dos pavimentos utilizando VANTs. 2016. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CASTELO BRANCO, L. H.; SEGANTINE, P. C. L. MaNIAC-UAV - a methodology for automatic pavement defect detection using images obtained by Unmanned Aerial Vehicle. **Journal of Physics**, [S. l.], v. 633, n. 1, 2015.

COELHO FILHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: UERJ, 2007.

DNIT. **Norma DNIT 006/2003 – PRO**: avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos: procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2003.

DNIT. **Norma DNIT 008/2003 – PRO**: levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos: procedimento. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2003.

EISENBEISS, H. Applications of photogrammetric processing using an autonomous model helicopter. **Remote Sensing and Spatial Information Science**, Zürich, 2006. Disponível em: <http://isprs.free.fr/documents/Papers/T08-35.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2020.

FIGUEIREDO, E. O.; FIGUEIREDO, S. M. M. **Planos de voo semiautônomos para fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas de classe 3, circular técnica 75**. Rio Branco: [s. n.], 2018.

FONTES, J. C.; POZZETTI, V. C. The use of the unmanned vehicles in environmental monitoring in the Amazon. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, v. 2, n. 2, p. 149-164, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.21902/>. Acesso em: 19 fev. 2020.

KANISTRAS, K.; MARTINS, G.; RUTHERFORD, M. J.; VALAVANIS, K. P. A. Survey of unmanned aerial vehicles (UAVs) for traffic monitoring. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS, 13., 2013, Atlanta. **Proceedings** [...]. Atlanta: ICUAS Association, 2013. p. 2643-2666.

KOMAZAKI, J. M.; CAMARGO, P. O.; GALO, M.; AMORIM, A. Avaliação da qualidade geométrica de modelos digitais do terreno obtidos a partir de imagens adquiridas com VANT. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27., Rio de Janeiro, **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBC, p. 576-580, 2017.

INZERILLO, L.; MINO, G. D.; ROBERTS, R. Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 96, p. 457-469, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.010>. Acesso em: 20 mar. 2020.

LIMA NETO, P. S.; OLIVEIRA, F. H. L.; ARANTES, A. E. Avaliação do levantamento aéreo de defeitos em pavimentos asfálticos urbanos. *In*: CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO: RETOS Y OPORTUNIDADES EN EL MUNDO DEL ASFALTO, 20., Guadalajara, **Anais** [...]. Guadalajara: Asociación Mexicana del Asfalto, p. 906-917, 2019.

PAN, Y.; ZHANG, X.; SUN, M.; ZHAO, Q. Object-based and supervised detection of potholes and cracks from the pavement images acquired by UAV. **The International Archive of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Tehran, v. 42, p. 7-10, 2017.

PEHERE, S.; SANGANWAR, P.; PAWAR, S.; SHINDE, A. Detection of pothole by image processing using UAV. **Journal of Science and Technology**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 2456-5660, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.46243/jst.2020.v5.i3.pp101-110>. Acesso em: 13 jul. 2020.

PESSOA, G. G.; CARRILHO, A. C.; MIYOSHI, G. T. Análise da qualidade posicional de modelo digital de superfície gerado a partir de correspondência de imagens aéreas obtidas por VANTs. *In*: CONGRESSO

BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27., 2017. Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBC, 2017. p. 763-767.

PURI, A.; VALAVANIS, K. P.; KONTITSIS, M. Statistical profile generation for traffic monitoring using real-time UAV based video data. *In*: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, 7., 2007, Athens. **Proceedings** [...]. Athens: [s. n.], 2007. p. 1-6.

ROMERO-CHAMBI, E.; VILLARROEL-QUEZADA, S.; ATENCIO, E.; MUNOZ-LA RIVERA, F. Analysis of optimal flight parameters of unmanned aerial vehicles (UAVs) for detecting potholes in pavements. **Applied Sciences**, [S. l.], n. 10, p. 4157, 2020. Disponível em: <https://doi:10.3390/app10124157>. Acesso em: 13 jul. 2020.

SAAD, A. M.; TAHAR, K. N. Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV). **Measurement**, [S. l.], v. 137, p. 647-654, 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SIEBERT S.; TEIZER J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 41, p. 1-14, 2014. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>. Acesso em: 19 mar. 2020.

SILVA, F. F.; BARBOSA, K.; Simões, A.; AZEVEDO, A.; CARVALHO, D. Drones in journalism: ethical implications and mobility. **Revista Latino-americana de Jornalismo**, João Pessoa, v. 3, n. 2, p. 125-140, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.21204/2359-375x/ancora.v3n2p125-140>. Acesso em: 19 mar. 2020.

ZHANG, C. An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment. **The international archives remote sensing and spatial information sciences**. Beijing: [s. n.], v. 37, p. 627-631, 2008.

ZIMMERMAN, K. A.; PIERCE, I. M.; KRSTULOVICH, J. **FHA - pavement management roadmap. Executive Summary**. Washington: [s. n.], 2010.

Sobre os autores

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Doutor em Engenharia de Transportes pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (Petran/UFC). Professor adjunto do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (DET/UFC). Tem experiência em transporte aéreo e aeroportos, operação, manutenção e reabilitação de infraestruturas aeroportuárias, especialmente em pavimentos flexíveis e rígidos de pátios e de pistas de pouso e decolagem.

Arielle Elias Arantes

Graduada em Ciências Ambientais, mestre em Geografia e doutora em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás. Foi pesquisadora no Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás, de 2009 a 2017, com participação em diversos projetos voltados para estudos da produtividade e da capacidade de suporte das pastagens, a partir do uso de séries temporais de imagens de resolução moderada. No momento, atua na área de Geomática no Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará.

Paulo de Souza Lima Neto

Engenheiro Civil formado pela Universidade de Fortaleza (Unifor). Mestrando em Engenharia de Transportes, área de concentração Infraestrutura de Transportes, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (Petran/UFC).

Recebimento em: 26.04.2020

Aceito em: 21.07.2020