



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LUCAS ALBUQUERQUE NUNES FERRAZ

**USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA
LEVANTAMENTO DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DE
PAVIMENTOS**

RECIFE, 2024

LUCAS ALBUQUERQUE NUNES FERRAZ

**USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS NO
LEVANTAMENTO DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DE
PAVIMENTOS**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação
em Engenharia Civil, apresentado à
Universidade Federal de Pernambuco, tendo
como orientador, o Prof. Dr. Reuber Arrais
Freire.

Áreas de concentração: Infraestrutura de
Transportes.

RECIFE, 2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ferraz, Lucas Albuquerque Nunes.

Uso de veículos aéreos não tripulados no levantamento da condição superficial
de pavimentos / Lucas Albuquerque Nunes Ferraz. - Recife, 2024.
65 : il., tab.

Orientador(a): Reuber Arrais Freire

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. VANT. 2. Pavimento. 3. Ortomosaico. 4. Levantamento de defeitos. 5.
IGG. I. Freire, Reuber Arrais. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUCAS ALBUQUERQUE NUNES FERRAZ

USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS NO LEVANTAMENTO DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS

Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia Civil, apresentado à Universidade Federal de Pernambuco, tendo como orientador, o Prof. Dr. Reuber Arrais Freire.

Áreas de concentração: Infraestrutura de Transportes.

.

Aprovado em: 19 / 04 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Reuber Arrais Freire (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Mauricio Oliveira de Andrade (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Lyneker Souza de Moura (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo que me proporcionou dos desafios até as conquistas, sem esses momentos de aprendizado, não teria me tornado o que sou e nem teria capacidade de alçar caminhos mais altos.

Agradeço a minha família pelo apoio, e por compartilharem comigo dos momentos difíceis e duros dessa jornada. Em especial, um agradecimento a minha mãe, não só pelos sacrifícios que ela fez por mim, mas todo cuidado e dedicação que me norteou a seguir a minha melhor versão. Ao meu pai, que sempre me mostrou que mais importante do que evitar cair na caminhada, é se erguer depois da queda, mantendo sempre a alegria, entusiasmo e foco dos seus objetivos.

Agradecer a UFPE e aos professores que moldaram meus pensamentos profissionais, compartilhando histórias e conhecimentos inestimáveis ao meu desenvolvimento. Gostaria de agradecer a Reuber, meu orientador e a professora Bruna Soares Fernandes que em um momento de dificuldades tornaram mais claro que a faculdade era muito mais que notas e aprovações era um local de aprendizado e oportunidades.

A minha caminhada na faculdade não teria sido a mesma sem todos os amigos, cada um dos mais próximos aos mais distantes, que me deram um apoio em sua convivência, me fazendo bem e ajudando nessa jornada nos momentos de grandes reprovações ou aprovações gloriosas.

Meu obrigado a todos meus colegas de trabalho que me ensinaram ideias e pontos de vista a quais eu não conhecia, um agradecimento especial aos meus colegas da Estratégica Engenharia, que tem sido meu berço profissional e que me apresentou pessoas dispostas a ajudar a desenvolver habilidades nessa nossa grande indústria. Agradeço de coração a todos eles, em especial a Horisman Mattos e Jailson de Oliveira que disponibilizaram seu precioso tempo para me ensinar e ajudar na composição dessa pesquisa. Também agradecer a Evelyn Matias, que por muitas vezes foi a voz da razão e do discernimento em meio aos problemas enfrentados e a Ivana Maia pelos vários ensinamentos proporcionados e dados em âmbito profissional. Não posso esquecer de reconhecer minha líder Layza, que me deu a oportunidade de evoluir e conhecer pessoas únicas na minha carreira profissional. Ao agradecer a todos com a mais elevada estima posso citar.

RESUMO

A utilização dos veículos aéreos não tripulado (VANTs) em ambientes recreativos ou profissionais, está em uma constante crescente devido a sua capacidade de tornar processos mais rápidos e eficientes. Na engenharia de pavimentos, a aplicação desse equipamento pode ser utilizada nos Sistemas de Gerência de Pavimentos, para análise da condição dos milhares de quilômetros que formam a malha rodoviária Brasileira. Sabendo disso, esse trabalho propõe investigar os parâmetros para o uso de veículo aéreo não tripulado no levantamento superficial de condição de pavimento, bem como apresentar as diretrizes aplicadas nos voos de VANT em projetos topográficos. Para a análise e comparação dos dados adquiridos no levantamento real e modelo VANT, foi realizado o cálculo do IGG para todas as diferentes alturas como também um estudo sobre a acurácia dos modelos, apresentando os valores de GSD necessários e as principais variações na qualidade dos dados de acordo com a altura.

Palavras-chave: VANT; Pavimento; Ortomosaico; Levantamento de defeitos; IGG.

ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in recreational or professional environments is constantly growing due to their ability to make processes faster and more efficient. In pavement engineering, the application of this equipment can be used in Pavement Management Systems, to analyze the condition of the thousands of kilometers that make up the Brazilian road network. Knowing this, this work proposes to investigate the parameters for the use of unmanned aerial vehicles in surface survey of pavement conditions, as well as present the guidelines applied in UAV flights in topographic projects. For the analysis and comparison of data acquired in the real survey and the UAV model, the IGG calculation was carried out for all different heights, as well as a study on the accuracy of the models, presenting the necessary GSD values and the main variations in data quality according to height.

Keywords: UAV; Pavement; Orthomosaics; Defect survey; IGG.

.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Critérios de pontuação da nota do QID	15
Figura 2 - Divisão de pesos para a pontuação do indicador Operacional	16
Figura 3 - Estrutura dos diferentes tipos de pavimentos	19
Figura 4 - Comparativo entre pavimentos rígidos e flexíveis	20
Figura 5 - Patologia, tipo buracos e painéis.....	21
Figura 6 - Patologia do tipo Ondulação	22
Figura 7 - Fissuras longitudinais no pavimento	23
Figura 8 - Exemplo de Exsudação.....	24
Figura 9 - Degradação da camada superficial do pavimento por desgaste.....	25
Figura 10 - Medidor de flecha de ATR apontando o defeito	26
Figura 11 - Trinca isolada paralela longa.....	27
Figura 12 - trinca interligada – tipo jacaré	28
Figura 13 - Trinca interligada – tipo bloco.....	28
Figura 14 - Curvas de desempenho e ciclos de intervenções em pavimento rodoviário.....	30
Figura 15 - Formulário de Inventário do estado da superfície do pavimento	31
Figura 16 - Codificação e Classificação do Inventário	31
Figura 17 - Comparativo de tempo gasto para realização de vistorias.....	37
Figura 18 - Visualização da área analisada	41
Figura 19 - Fluxograma da metodologia adotada.....	42
Figura 20 - VANT prestes a realizar o voo de 20m	43
Figura 21 - Imagem do processamento utilizando Drone Deploy®.....	45
Figura 22 - Levantamento da condição do pavimento.	47
Figura 23 - Comparação para composição de cálculo de acurácia.....	48
Figura 24 - Sobreposição de imagens utilizadas: a) Voo de 15m; e voo de 20m.....	49
Figura 25 - Modelo de elevação digital: a) Voo de 15m; e b) Voo de 20m.....	50
Figura 26- Ortomosaico modelo do voo de 15m.....	50
Figura 27 - Ortomosaico modelo do voo de 20m.....	51
Figura 28 - Visualização de estacas e estações	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor do fator de ponderação.....	32
Tabela 2 - Índice de relação do conceito do pavimento.....	33
Tabela 3 - Índice de Condição do Pavimento.....	33
Tabela 4 - Resumo de pesquisas internacionais no uso de VANT.....	38
Tabela 5 – Modelo da tabela de Inventario do trecho - Parte01.....	46
Tabela 6 - Modelo da tabela de Inventario do trecho - Parte 02.	46
Tabela 7 - Modelo da tabela de Inventario do trecho - Parte 03.	47
Tabela 8 - Dados de processamento de voo.	49
Tabela 9 - Dimensões das estações.	52
Tabela 10 – Frequência absoluta de defeitos levantados no modelo VANT 20m	53
Tabela 11 - Cálculo do IGG com modelo VANT 20m.	53
Tabela 12 - Frequência absoluta de defeitos levantados no modelo VANT 15m	54
Tabela 13 - Cálculo do IGG com modelo VANT 15m.	54
Tabela 14 - Quantidade de defeitos levantados modelo real	55
Tabela 15 - Cálculo do IGG Real.....	55
Tabela 16 - Cálculo de taxa de erro e acurácia.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALP	Afundamento Local Plástico
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ATR	Afundamento de trilha de roda
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CCP	Concreto de cimento Portland
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CTG	Centro de Tecnologia e Geotécnica
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GSD	<i>Ground Sampling Distance</i>
IGI	Índice de Gravidade Individual
NHI	<i>National Highway Institute</i>
QID	Quadro de Indicadores de Desempenho
SGP	Sistema de gerência de pavimentos
VANT	Veículos aéreos não tripulados
WEF	<i>World Economic Forum</i>
WGS-84	<i>World Geodetic System</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	IMPORTÂNCIA DO TEMA	13
1.2.	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	14
1.3.	OBJETIVOS GERAIS	17
1.4.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1.	PAVIMENTAÇÃO	18
2.2.	DEFEITOS NOS PAVIMENTOS	21
2.2.1.	Buracos e Panelas	21
2.2.2.	Ondulações ou corrugações	22
2.2.3.	Fissuras	23
2.2.4.	Escorregamento	23
2.2.5.	Exsudação	24
2.2.6.	Desgaste	25
2.2.7.	Afundamento de trilha de roda	26
2.2.8.	Trincas	27
2.2.8.1.	Trincas Isoladas	27
2.2.8.2.	Trinca interligada do tipo couro de jacaré	28
2.2.8.3.	Trinca interligada em Bloco	28
2.3.	AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS	29
2.3.1.	Índice de gravidade global (IGG)	30
2.3.2.	Índice de condição do pavimento (ICP)	33
2.4.	SENSORIAMENTO REMOTO	35
2.5.	VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS	36
2.6.	AVALIAÇÃO POR MACHINE LEARNING	39
3.	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	41
3.1.	ETAPAS DOS LEVANTAMENTOS	42
3.2.	LEVANTAMENTO DE CAMPO MODELO VANT	43
3.2.1.	Tratamento de dados do VANT	45
3.3.	LEVANTAMENTO DE DADOS PARA MODELO REAL	45
3.4.	MÉTODO DE COMPARAÇÃO	48
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	49
4.1.	APRESENTAÇÃO DE DADOS PROCESSADOS	49
4.2.	RESULTADO DE IGG	52
4.2.1.	IGG utilizando modelo VANT 20m	53

4.2.2.	IGG utilizando modelo VANT 15m.....	54
4.2.3.	Apresentação do IGG utilizando levantamento real.....	55
4.2.4.	Comparação entre diferentes formas de cálculo de IGG.....	55
4.3.	ANÁLISE DE ACURÁCIA DOS MODELOS DE VANT	57
5.	CONCLUSÃO	59
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA

A importância da construção e gestão de infraestrutura de transportes remete aos tempos antigos, devido a importância do traslado e movimento de carga para os seres humanos. Na Roma antiga a criação e expansão de suas estradas era de suma importância para a cultura expansionista e mercantilista do império que se estendia numa média de 90.000 km, a partir de traduções de documentos da época, citados no Itinerário Antonino (1877), Roma conseguiu se expandir e se manter como uma potência até a sua queda devido a sua tecnologia e métodos inovadores de engenharia, que são evidenciados até hoje. A concomitância desse tema com outros, como economia e desenvolvimento é o ponto chave para o índice de desenvolvimento de um país e é evidenciado quando o Fórum Econômico Mundial (*World Economic Forum*, WEF em inglês) torna o indicador da qualidade das estradas um de seus parâmetros para o Índice de Competitividade Global, sendo ele um dos principais fatores para acompanhar a prosperidade de um país.

No Brasil, a gestão de redes de transportes vem sendo colocada a teste, devido a sua continua demanda e estado de conservação. O transporte rodoviário é responsável pelo tráfego de aproximadamente 90% dos passageiros e de mais de 60% das cargas que circulam no país. Cerca de 12,4% da extensão total das rodovias brasileiras é pavimentada, o que corresponde a cerca de 213,5 mil quilômetros (CNT, 2021). Porém, das rodovias pavimentadas, apenas 38,2% estão em um estado geral de conservação bom ou ótimo (CNT, 2022).

O impacto desses dados pode ser observado nos índices econômicos e de sustentabilidade ambiental, isso é, a baixa operacionalidade nas rodovias brasileiras gera prejuízos diretos a economia do país, estimativas indicam que são gastos em média 4,21 bilhões de reais em custos operacionais (CNT, 2021) e de acordo com pesquisas realizadas pela empresa Quanta Consultoria em 2008, o Brasil perdeu, em média, mais de R\$ 267 bilhões por ano por causa dos congestionamentos no caminho para o trabalho.

A expansão da malha e a adequada manutenção dessas vias são, portanto, fatores determinantes para o desenvolvimento nacional. Entretanto, estimativas indicam que para fazer a recuperação da malha rodoviária seria necessário 8,55 bilhões de reais (CNT, 2021) e para a sua expansão 96,1 bilhões em 981 projetos de infraestrutura (CNT, 2018).

Os investimentos federais conseguem suprir apenas as estimativas para a necessidade de manutenção das rodovias, de acordo com a CNT, pelo seu boletim de conjuntura econômica,

os dados de 2024 mostram que os investimentos e valores estipulados são muito aquém das reais necessidades que a infraestrutura brasileira possui (CNT, 2023).

Quanto ao estado de conservação de um pavimento, este está ligado ao método utilizado para avaliá-lo. Em 1980, o interesse da criação de um método foi crescente visto o envelhecimento dos pavimentos e a exigência por parte dos órgãos financiadores. Também levando em consideração a escassez dos recursos a serem aplicados no setor rodoviário, se fez necessário saber e pontuar os locais que mais precisavam de uma intervenção, tornando-se necessário um avanço da tecnologia do país, com o emprego de métodos e equipamentos mais modernos (DNIT, 2011). Essa demanda por avanços tecnológicos continua nos dias de hoje, mas agora devido a necessidade de viabilidade econômica dos projetos necessários.

A Indonésia tem similaridades geográficas e sociais com o Brasil, ambos têm uma temperatura tropical e uma grande demanda de tráfego, fatores esses que limitam o uso de um levantamento visual, dificultando as devidas avaliações, por conta disso foram necessárias fazer algumas adaptações na forma que os dados para avaliação das rodovias eram obtidos (Samsuri *et. al*, 2019). A solução veio por meio do uso de VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados) ou drones, que são hoje uma tecnologia inovadora e aplicada em vários setores da indústria da construção civil (Chai *et al.*, 2022).

Os VANTs são hoje amplamente usados no setor de levantamento de dados para projetos topográficos e ajudam com vistorias técnicas, controle de inventário e supervisão de informações de condição e manutenção de estradas (Outay *et. al*, 2020).

Todos os dados apresentados, mostram o impacto do estado geral das estradas brasileiras e os seus reflexos na economia, evidenciando sua influência no cotidiano nacional e importância na construção de novas técnicas para tornar o país competitivo e mais assertivo nas resoluções de problemas.

1.2. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A utilização de indicadores sociais, econômicos e tecnológicos são necessários para a melhor compreensão de como os investimentos e escolhas estão impactando a sociedade analisada (Mattedi *et. al*, 2015). Como citado anteriormente, a qualidade das estradas é um dos indicadores para a competitividade e prosperidade de um país. O Brasil ficou em 114º lugar de dos 141 países avaliados no ranking de Índice de Competitividade Global, recebendo uma nota 3, no indicador da qualidade das estradas (The Global Economy, 2023). Junto ao fato que os valores de investimentos do Governo Federal, esperados para 2024, são ainda abaixo dos

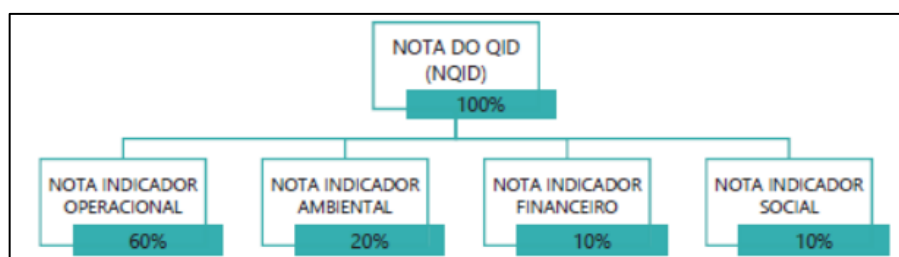
necessários para manutenção das rodovias (CNT, 2023), fica evidente que estamos distantes de um cenário onde vamos expandir e otimizá-las, fato esse que se atenua com a verdade de que o sistema rodoviário brasileiro é responsável por mais de 90% do tráfego de passageiros e 60% do tráfego de cargas (CNT, 2021) agravando o seu estado de precariedade.

Considerando a grande quantidade de deslocamento que se realiza todos os dias sobre a superfície de rolamento do pavimento, é inegável a importância dessas estruturas na economia do país, independentemente do tipo, seja flexível, rígido ou semirrígido. Esses dados são ainda mais preocupantes quando são apresentados os desafios associados a manutenção de estradas que são agravadas pelas mudanças rápidas em todos os elementos que constituem a rede rodoviária. Isso é, a mudança nos indicadores como nível de serviço, demanda, mudanças climáticas e intemperismo podem tornar os estados de conservação ainda pior.

Como citado em Haas, Hudson e Zaniewski (1994), um sistema de gerência de pavimentos (SGP) consiste em um leque de atividades coordenadas e relacionadas com o planejamento, projeto, construção, manutenção e avaliação cujo objetivo principal é utilizar informações confiáveis em critérios de decisão para a produção de programas que junto a construção, manutenção e reabilitação de pavimentos dê o máximo retorno possível para os recursos disponíveis e empregados. E para atingir seu objetivo, um sistema de gerenciamento deve ser capaz de comparar, priorizar e alocar os recursos de seu programa de manutenção e reabilitação entre todas as partes da rede viária.

Um exemplo de método de Sistema de gerenciamento de pavimento (SGP) é o utilizado atualmente no sistema viário do Paiva, localizado no Cabo de Santo Agostinho, no estado de Pernambuco. O sistema está concedido pelo poder público a uma empresa privada, responsável pela manutenção da via. O governo do estado avalia a via concessionada por meio de um agente independente usando um sistema avaliativo por meio do sistema do Quadro de Indicadores de Desempenho (QID), conforme é apresentado na Figura 1.

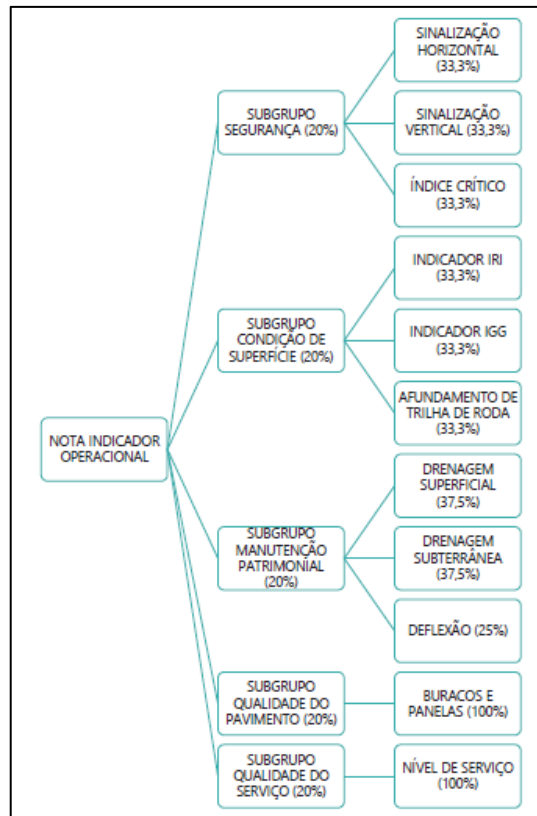
Figura 1 - Critérios de pontuação da nota do QID



Fonte: Governo do Estado de Pernambuco (2023).

Onde o indicador mais importante no peso dos pontos é o operacional, sendo responsável por 60% da pontuação. Ele é subdividido em subgrupos de segurança, condição da superfície, manutenção patrimonial, qualidade do pavimento e qualidade do serviço que usam como métrica ensaios e estudos já consolidados no gerenciamento de pavimentos, a exemplo do índice crítico que acompanha os acidentes e causas que acontecem na rodovia, apresentados conforme na figura 2.

Figura 2 - Divisão de pesos para a pontuação do indicador Operacional



Fonte: Governo do Estado de Pernambuco (2023).

Porém é possível a aplicação desse método devido a pequena extensão da Pista avaliada, 6,6 km, com a concessão da pista ao poder privado que aplica taxa aos usuários para poder manter o seu alto nível de qualidade. Quando observamos fora da esfera privada o problema é evidente, pois, mais do que não ter o devido método, falta também mão de obra qualificada, dinheiro e equipamento para levantar dados das rodovias, sendo esse o primeiro passo do SGP.

Já usado em países do oriente como a Indonésia, uma forma de automatizar e viabilizar o levantamento de dados sobre a condição dos pavimentos é a utilização de VANT, essa tecnologia apesar de ser amplamente aplicada em diferentes indústrias, apresenta como metodologia ou parâmetros, a norma PRO-008 que não tem as diretrizes necessárias para a melhor aplicação do uso do equipamento na avaliação de pavimentos.

A falta de recurso observada e citada torna necessário a busca por novos métodos e tecnologias que ajudem na avaliação superficial dos pavimentos, esse fato somado a desqualificação dos parâmetros nacionais da aplicação do uso da tecnologia VANT no levantamento de dados da condição de pavimentos, torna-se necessário a pesquisa sobre as informações que possam nortear a melhor forma da aplicação dessa diferente tecnologia.

1.3. OBJETIVOS GERAIS

Como objetivo principal, este trabalho busca investigar o uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) no levantamento da condição superficial de pavimentos viários.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Já como objetivos específicos, têm-se as seguintes metas:

- I. Investigar as melhores formas de se fazer o uso de VANT no levantamento da condição superficial de pavimentos.
- II. Identificar os parâmetros de uso e plano de voo de VANT aplicados em outros locais do mundo.
- III. Analisar a acurácia dos dados obtidos pelos modelos criados por VANTs em comparação com o levantamento de campo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. PAVIMENTAÇÃO

O termo "pavimentação" se refere ao processo de construir uma superfície pavimentada, ou seja, uma superfície plana e regular geralmente feita de diferentes materiais, para criar estradas, calçadas, estacionamentos, pátios e outras superfícies semelhantes. Onde seu principal objetivo é de tornar a superfície mais adequada para o tráfego de veículos e pedestres, melhorando a acessibilidade de maneira durável.

Medina e Motta (2015) definem o pavimento, do ponto de vista estrutural, como um “arranjo de camadas de diferentes espessuras, constituída sobre uma superfície dimensionada de terraplanagem, sendo ela projetada para suportar os esforços oriundos do tráfego de veículos e ações intempéries da região, proporcionando ao usuário a melhores condições de uso, com conforto, economia e segurança.”

Para Souza (1980), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem por meio de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade. Esta estrutura, assim constituída, apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações.

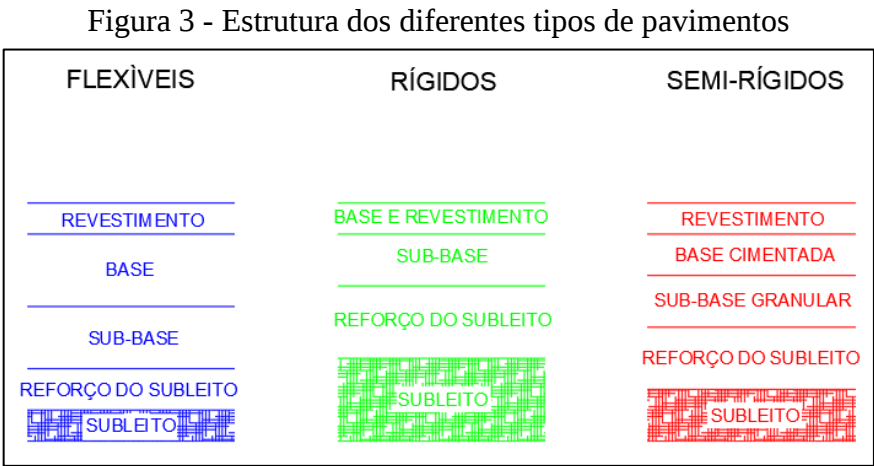
Para Huang (2003), os pavimentos se classificam em: pavimentos rígidos, normalmente compostos por concreto de cimento Portland (CCP); pavimentos flexíveis, normalmente compostos por materiais asfálticos; e pavimentos compostos (semirígidos). O pavimento rígido é constituído por placas de concreto de cimento Portland em sua camada de revestimento, camada essa que desempenha o papel de revestimento e base ao mesmo tempo. Isso se deve à importância da placa de concreto no pavimento rígido, a resistência do concreto é o fator mais importante no projeto, principalmente a resistência à tração. Em seguida, uma sub-base que tem como objetivo melhorar a capacidade de suporte do subleito. A maior parte da capacidade estrutural é provida pela própria placa, ao contrário de pavimentos flexíveis onde a capacidade estrutural é atingida através de camadas de sub-base, base e revestimento.

Os pavimentos flexíveis são aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, e devido a isso, a carga se distribui em parcelas quase equivalentes entre as camadas, (DNIT, 2006). De forma mais comum, os revestimentos asfálticos são constituídos por agregados, filler e ligantes asfálticos. Ademais, é formado por pelo menos quatro camadas, sendo elas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Ainda, pode ter a presença de camadas de reforço, todas elas dimensionadas com base

nas recomendações do manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), que indica os valores adequados para o ISC (Índice de suporte Califórnia), expansão dos materiais granulares constituintes e da solicitação em função do eixo padrão (8,2 ton.) esperada (número N).

No semirrígido segundo o Manual Pavimentos Flexíveis e Rígidos do DER-Paraná (2008), caracterizam-se por uma base enrijecida. Compõem-se de: revestimento, base cimentada, sub-base granular, reforço do subleito e subleito. Assim como nos flexíveis, os pavimentos semirrígidos também são revestidos de material asfálticos. O que torna eles diferentes é a presença de ligantes hidráulicos (cimento Portland ou cal hidratada) em sua base, com o intuito de se alcançar uma camada com rigidez suficiente para resistir às cargas de tráfego de projeto. Os diferentes tipos são reflexos da busca de novos métodos que se adequem aos diferentes projetos cada um com suas especificidades e nuances.

A seguir a Figura 3 ilustra como é constituída as camadas bases principais dos diferentes métodos.



Fonte: Autor, (2024)

Segundo Bianchi *et. al* (2008), a principal diferença entre os pavimentos flexível e rígido é a distribuição de tensões nas camadas subjacentes. No flexível funciona como camada de rolamento, e quem absorve os esforços devido ao tráfego é a fundação, enquanto no rígido a camada de rolamento também funciona como estrutura, redistribuindo os esforços e diminuindo a tensão imposta à fundação. Referente aos custos de manutenção e implantação dos diferentes métodos, Biroli (2003) chegou a algumas conclusões sendo elas que os pavimentos de método rígido tem um custo inicial superior de 40% a 60% comparado ao flexível, porém, quando se analisa custos totais os flexíveis apresentam custo superiores, em até 8%, sendo esse valor verdade apenas para maiores volumes de tráfego e períodos de projeto mais longos.

Bianchi *et. al* (2008) chegou à conclusão que é muito difícil dar uma única solução, levando em consideração todos os fatores que podem mudar a criação do projeto. Eles destacaram na figura 4 a seguir as principais características de cada tipologia de pavimento.

Figura 4 - Comparativo entre pavimentos rígidos e flexíveis

PAVIMENTOS RÍGIDOS	PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
Estruturas mais delgadas de pavimento.	Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimento de terra) e camadas múltiplas.
Resiste a ataques químicos (óleos, graxas, combustíveis).	É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleo, graxas, combustíveis).
Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança.	A visibilidade é bastante reduzida durante a noite ou em condições climáticas adversas.
Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções.	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, com prejuízos ao tráfego e custos elevados.
Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade.	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação (30 vezes mais durável).
Vida útil mínima de 20 anos.	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção).
Maior segurança à derrapagem em função da textura dada à superfície (veículo precisa de 16% menos de distância de frenagem em superfície seca, em superfície molhada 40%).	A superfície é muito escorregadia quando molhada.
De coloração clara, tem melhor difusão de luz. Permite até 30% de economia nas despesas de iluminação da via.	De cor escura, tem baixa reflexão de luz. Maiores gastos com iluminação.
O concreto é feito com materiais locais, a mistura é feita a frio e a energia consumida é a elétrica.	O asfalto é derivado de petróleo importado, misturado normalmente a quente, consome óleo combustível e divisas.
Melhores características de drenagem superficial: escoar melhor a água superficial.	Absorve a umidade com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos.
Mantém íntegra a camada de rolamento, não sendo afetado pelas intempéries.	Altas temperaturas ou chuvas abundantes produzem degradação.

Fonte: Adaptado de Bianchi *et. al* (2008).

2.2. DEFEITOS NOS PAVIMENTOS

O termo patologia deriva-se do grego *pathos* significando doença e *logos* estudo, sendo assim, possui definição de estudo das doenças e/ou enfermidades em seus amplos e variados sentidos como estado anormal de causas desconhecidas e conhecidas. Nas manifestações de defeitos em pavimentos asfálticos, são os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser identificados a olho nu e classificados segundo o (DNIT 005/ 2003).

Segundo Segre (2019), os danos em pavimentos flexíveis são problemas na superfície de rolamento e são causados por imperfeições na construção, por atos do meio ambiente e por ações decorrentes do tráfego. Esses problemas comprometem a capacidade funcional e estrutural do pavimento, afetando o conforto e segurança do usuário.

2.2.1. Buracos e Painelas

Figura 5 - Patologia, tipo buracos e painelas



Fonte: DNIT PRO005 (2003).

Os buracos, conforme Figura 5, são cavidades no revestimento asfáltico, podendo ou não atingir camadas subjacentes (Bernucci, Motta, *et al*, 2010). Esse tipo de defeito é de extrema gravidade, podendo afetar estruturalmente o pavimento e permitindo o acesso de infiltração de água em seu interior, comprometendo completamente a estrutura (Martinhão *et al*. 2018).

Defeito esse que surge com a evolução de outras, como fendas, desgastes, afundamentos e falta de aderência entre camadas, formando um buraco ou cavidade no revestimento, suscetível a passar para a base (Pinto, 2003).

2.2.2. Ondulações ou corrugações

As ondulações são também deformações transversais ao eixo da pista, em geral decorrentes da consolidação diferencial do subleito. (Bernucci, Motta, *et al*, 2010). Segundo a CNT (2018), tem como suas principais causas a falta de estabilidade da mistura asfáltica; excessiva umidade do solo subleito; contaminação da mistura asfáltica; falta de aeração das misturas líquidas de asfalto.

Figura 6 - Patologia do tipo Ondulação



Fonte: DNIT PRO005 (2003).

2.2.3. Fissuras

A fissura é um tipo de fenda incipiente de largura capilar, que se apresenta longitudinalmente, transversalmente ou obliquamente na direção do eixo da via, somente perceptível, à olho nu, de uma distância inferior a 1,50 metros. Não causam problemas funcionais ao revestimento, não sendo assim consideradas quanto à gravidade nos métodos atuais de avaliação das condições de superfície (DNIT, 2003).

Figura 7 - Fissuras longitudinais no pavimento



Fonte: CNT (2018).

2.2.4. Escorregamento

Figura 7 - escorregamento do revestimento



Fonte: Medina e Motta (2015).

Segundo o DNIT (2003), a causa do escorregamento ocorre pela compactação deficiente das camadas do pavimento e a imprimação ineficaz entre uma camada e outra, como observado na Figura 7. Silva (2018) relata que é regularmente detectado em trechos do pavimento que há partes de aceleração: aclives e declives; curvas; pontos de parada ou barreiras como lombada e parada de ônibus.

2.2.5. Exsudação

É um defeito característico de pavimentos flexíveis e rígidos. Nos rígidos é um fenômeno que resulta no aparecimento de água na superfície do concreto após ele ser lançado e adensado, e antes de ocorrer a pega (Mennucci *et. al* ,2015). Nos flexíveis, de acordo com a CNT (2018), é um filme de material betuminoso que aparece na superfície do pavimento criando um brilho causado pela migração do ligante por meio do revestimento. Segundo Silva (2018), quando não há espaço de vazios ou excesso de ligante asfáltico, ao dilatar-se devido ao calor, o asfalto fica sem espaço para ocupar, por isso ocorre à exsudação.

Figura 8 - Exemplo de Exsudação



Fonte: Autor, (2024)

2.2.6. Desgaste

O desgaste é o efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, o qual é caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego (DNIT, 2003).

Figura 9 - Degradação da camada superficial do pavimento por desgaste



Fonte: DNIT (005/2003).

O desgaste resulta da falha na ligação entre os elementos das misturas betuminosas ou a sua péssima formulação, do uso de materiais não adequados e de equívocos na construção. (RIBEIRO, 2017).

O desgaste está relacionado às condições de tráfego e intemperismo. Essa patologia, normalmente, é resultado de deficiência na ligação entre os componentes das misturas betuminosas ou a sua má formulação, da utilização de materiais não apropriados e de erros de execução do revestimento. À medida que o estágio de desgaste superficial avança, ocorre o arrancamento progressivo dos agregados, tornando a superfície do pavimento mais áspera (MENDES, 2019).

2.2.7. Afundamento de trilha de roda

Conforme apresentado na Figura 10, o afundamento de trilha de roda (ATR) é um defeito na forma de deformação permanente vertical no pavimento, que se forma onde tem a passagem das cargas, ou seja, por onde as rodas passam. Esse defeito é também contribui para o efeito de hidroplanagem, que ocorre em um pavimento com baixa declividade transversal e nos quais as flechas nas trilhas de roda atingem cerca de 13 mm.

Figura 10 - Medidor de flecha de ATR apontando o defeito



Fonte: DNIT (005/2003).

Segundo Pinto (2003), devido às deficiências na sua formação ou execução, altas temperaturas e por conta do tempo de aplicação das cargas, as pistas de rolamento acabam por não ter uma capacidade de carga adequada. Araújo (2019) define que consiste na deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento sem estar acompanhado de solevamento (compensação volumétrica lateral). Para extensões maiores que 6 m e se for localizado ao longo da trilha de roda, denomina-se afundamento de consolidação de trilha de roda.

2.2.8. Trincas

Ocorre em ambas as direções da pista, transversal ou longitudinal, segundo a norma DNIT (005/2003), as trincas são fendas existentes no revestimento que podem ser facilmente visíveis a vista desarmada, possuindo uma abertura superior à da fissura e devem-se apresentar sob a forma de trinca isolada ou interligada. De acordo com Rocha (2009), as prováveis causas do aparecimento da trinca isolada longitudinal é a má execução da junta de construção, contração ou dilatação do revestimento ou pela propagação de trincas das camadas subjacentes.

2.2.8.1. Trincas Isoladas

Surgem tanto nas direções ortogonal ou paralela ao eixo se aparecer na ortogonal recebe os nomes de trinca transversal caso apareça na paralela, longitudinal. Quando menor que 100 cm é classificada como curta, se maior que 100 cm é longa (DNIT, 2003).

Figura 11 - Trinca isolada paralela longa



Fonte: DNIT (005/2003).

2.2.8.2. Trinca interligada do tipo couro de jacaré

Reunião de trincas associadas, que não apresentam direções determinadas. Podem ser acompanhadas de erosão acentuada nas bordas (DNIT, 2003).

Figura 12 - trinca interligada – tipo jacaré



Fonte: DNIT (005/2003).

2.2.8.3. Trinca interligada em Bloco

Aglomeração de várias trincas associadas, com direções definidas, podem apresentar erosão acentuada nas bordas (DNIT, 2003).

Figura 13 - Trinca interligada – tipo bloco



Fonte: DNIT (005/2003).

2.3. AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

De acordo com a *National Highway Institute* – NHI (1998), o primeiro Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) foi desenvolvido nos EUA na metade dos anos 70, utilizando um banco de dados digital. Para Gontijo (1995), a avaliação de pavimentos deve ter como meta fornecer dados para a execução acertada de intervenções corretivas na sua estrutura, promovendo o restabelecimento do conforto, segurança e economia aos usuários das vias.

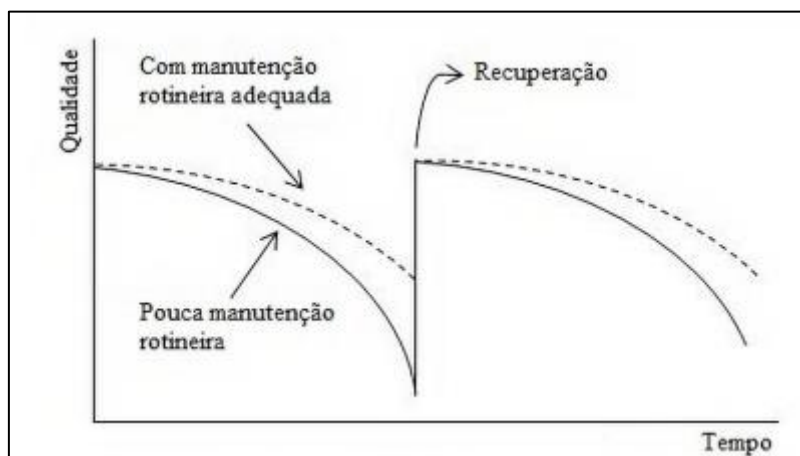
A avaliação de um pavimento compreende um conjunto de atividades destinadas à obtenção de dados, informações e parâmetros que permitam diagnosticar os problemas e interpretar o desempenho apresentado pelo pavimento, de modo que possa detectar as suas necessidades atuais e futuras de manutenção, podendo fornecer as consequências da implementação de estratégias alternativas de manutenção. (GONÇALVES, 1999).

De acordo com o DNIT (2006), a avaliação funcional considera o levantamento visual contínuo do trecho em questão, objetivando a avaliação da superfície do pavimento existente, fazendo o levantamento de irregularidades na superfície longitudinal do pavimento e o simultâneo cadastro dos reparos superficiais e profundos. As irregularidades podem ser medidas por meio de aparelhos caros e automatizados, como os que funcionam à base de sensores a laser, ou simplesmente utilizando-se equipamentos citados na norma DNER PRO-08/78. No primeiro caso é formado um registro contínuo e confiável do perfil, enquanto outros equipamentos, como o segundo citado, medem-se apenas algumas irregularidades pontuais.

A avaliação de superfície dos pavimentos é uma atividade que, mediante a procedimentos padronizados de medidas e observações, permite inferir condições funcionais e estruturais aos pavimentos, levantando uma diretriz sobre o desempenho do pavimento, sendo essa a variação de qualidade ao longo do tempo. Também se deve considerar o desempenho estrutural do pavimento em projeto, ou seja, o tempo em que o pavimento resiste aos defeitos existentes e ao acúmulo de deformações plásticas, quando submetido ao tráfego esperado (GONÇALVES, 1999).

A figura 14 apresentada a seguir, ilustra a taxa de diminuição do desempenho ao longo do tempo de vida até suas devidas intervenções:

Figura 14 - Curvas de desempenho e ciclos de intervenções em pavimento rodoviário



Fonte: Adaptada de Yoder e Witczak (1975)

2.3.1. Índice de gravidade global (IGG)

O Índice de Gravidade Global (IGG) é um índice combinado de falhas que nos permite classificar um trecho homogêneo de pavimento, em razão da ocorrência dos defeitos de superfície, atribuindo um conceito de condição do pavimento em função do valor encontrado, sendo regido pela norma DNIT 006/2003-PRO. Segundo Bernucci *et al.* (2008), o IGG não é determinado para toda a pista, mas sim, feito por amostragem, sendo está determinada por especificação do DNIT. Em caso de pista simples, as estações são inventariadas a cada 20 m, alternando-se a faixa a cada avaliação. No caso de pista dupla a cada 20 m, na faixa mais solicitada pelo tráfego, em cada uma das pistas.

Tem como finalidade chegar a um valor numérico para a condição em que se apresenta o pavimento aonde, varia de 0 (ótimo) a 160 (péssimo). Ainda na norma encontramos os métodos de avaliações dos defeitos, as equações para os cálculos e as tabelas utilizadas para o levantamento de dados, o exemplo da tabela citada está apresentado na figura 15 e a descrição de suas siglas está na figura 16.

Figura 15 - Formulário de Inventário do estado da superfície do pavimento

[illegible]

Fonte: DNIT (006/2003).

Figura 16 - Codificação e Classificação do Inventário

FENDAS				CODIFICAÇÃO	CLASSE DAS FENDAS		
Fissuras				FI	-	-	-
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Jacaré"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Bloco"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-	-	FC-3

OUTROS DEFEITOS					CODIFICAÇÃO
Afundamento	Plástico	Local	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ALP	
		da Trilha	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ATP	
	De Consolidação	Local	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ALC	
		da Trilha	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ATC	
Ondulação/Corrugação - Ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base					O
Escorregamento (do revestimento betuminoso)					E
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento					EX
Desgaste acentuado na superfície do revestimento					D
"Painéis" ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores					P
Remendos			Remendo Superficial		RS
			Remendo Profundo		RP

Fonte: DNIT (006/2003).

Por fim o IGG é obtido pela equação 1:

$$IGG = \sum IGI \quad (1)$$

Onde o IGI é o Índice de Gravidade Individual, calculado pela equação 2:

$$IGI = fr * fp \quad (2)$$

Onde:

$$fr = \frac{fa * 100}{n} \quad (3)$$

fr – Frequência relativa;

fa – Frequência absoluta, corresponde ao número de vezes em que a ocorrência foi verificada;

n – número de estações ou estacas levantadas;

fp – Fator de ponderação, obtido de acordo com a tabela 1;

Tabela 1 - Valor do fator de ponderação

Ocorrência Tipo	Codificação de ocorrências de acordo com a Norma DNIT 005/2002-TER "Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos - Terminologia"	Fator de Ponderação
1	Fissuras e Trincas Isoladas (FI, TTC, TTL, TLC, TLL e TRR)	0,2
2	FC-2 (J e TB)	0,5
3	FC-3 (JE e TBE) Nota: Para defeitos de ponderação quando em uma mesma estação forem constatadas ocorrências tipos 1, 2 e 3, só considerar tipo 3 para o cálculo da frequência relativa em porcentagem (<i>fr</i>) e Índice de gravidade Individual (IGI); do mesmo modo, quando forem verificadas ocorrências tipos 1 e 2 em uma mesma estação, só considerar as do tipo 2.	0,8
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0,9
5	O, P, E	1
6	EX	0,5
7	D	0,3
8	R	0,6

Fonte: DNIT (006/2003).

Tabela 2 - Índice de relação do conceito do pavimento

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$

Fonte: DNIT (2003)

2.3.2. Índice de condição do pavimento (ICP)

Assim como o IGG, a finalidade do ICP é chegar a um valor numérico que caracterizará a condição do pavimento, esse valor varia de 0 (péssimo) a 100 (excelente). Este modelo matemático sugere que o pavimento parte de uma condição ótima, equivalente a 100 e cada defeito, segundo a severidade e extensão, representa um fator de redução da nota, apresentando piores índices de condição do pavimento.

Tabela 3 - Índice de Condição do Pavimento

ICP	Conceito
100 - 86	Excelente
85 - 71	Muito Bom
70 - 56	Bom
55 - 41	Regular
40 - 26	Ruim
55 - 11	Muito Ruim
10 - 0	Péssimo

Fonte: SHOJI (2000).

Para o cálculo do ICP pode-se utilizar a equação 4, cujas variáveis D_{ij} e f_{ij} são respectivamente, extensão e fator de ponderação do defeito i com o nível de severidade j (FERNANDES JR. *et al.*, 1999).

$$ICP = 100 - \sum_i \sum_j A(T_i, S_j, D_{ij}) F(t, q) \quad (4)$$

Onde:

A = valor deduzível, dependente do tipo do defeito (T_i), do grau de severidade (S_j) e da densidade de defeitos (D_{ij});

i = contador para tipos de defeitos;

j = contador para graus de severidade;

p = número total de placas defeituosas;

m_i = número de graus de severidade para o tipo de defeito;

$F(t,q)$ = uma função de ajustamento para defeitos múltiplos que varia com o valor deduzível somado (t) e o número de deduções (q).

Também existe um nível de interpretação dos dados, isso é os valores finais apresentados constituem a base para a intervenção a ser tomada, ou sugerida pelo técnico responsável.

2.4. SENSORIAMENTO REMOTO

A fotografia aérea é uma perspectiva geométrica relacionada com o tipo de câmera usada, podendo ser uma fotografia vertical, tirada com o eixo da câmera apontada para baixo, ou uma fotografia oblíqua, tirada com o eixo da câmera propositalmente inclinado em relação à vertical do lugar. A escala da fotografia aérea é decorrente de relação entre a distância focal da câmera e a altura de voo da aeronave. Entende-se que quando a distância focal aumenta, a escala também aumenta. Se uma fotografia for ampliada ou reduzida, a distância focal para esta fotografia será também alterada em proporção direta com o valor da ampliação ou redução. Os conceitos citados acima são utilizados na ciência da fotogrametria, onde de acordo com ASP (1966), é a arte, ciência e tecnologia de obter informações de confiança sobre áreas delimitadas com o uso de processos de registro, medições e interpretações das imagens e padrões de energia eletromagnéticas levantados. Florenzano (2011) define sensoriamento remoto como tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, a partir da captação e registro da energia refletida/emitida pela superfície. O processamento, a análise e interpretação desses dados também integram o sensoriamento remoto, considerado uma ciência a Fotogrametria.

O sensoriamento remoto e o geoprocessamento são técnicas fundamentais para o contínuo registro do uso da terra ao longo do tempo. As imagens de satélite, tanto em forma digital quanto em papel, são de suma importância e utilidade, uma vez que permitem avaliar as mudanças na paisagem de uma região ao decorrer de um tempo, registrando a cobertura vegetal em cada momento (CAMPOS *et al.*, 2004). Para compor os dados levantados, se faz necessário o georreferenciamento, que consiste em atribuir coordenadas aos pontos de uma imagem a partir de coordenadas conhecidas (campo), sendo essas informações compostas por um sistema de referência.

No Brasil o sistema geodésico de referência adotado é o SIRGAS 2000 que tem equivalência ao sistema geodésico de referência *World Geodetic System* de 1984 (WGS-84)

2.5. VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Em levantamento topográfico, o uso do VANT é significativo, sendo eles considerados um multirotor, onde, segundo Vieira (2011), são veículos aéreos de asas rotativas, decolagem e pouso feito verticalmente, sendo eles mais pesados que o ar. Eles ainda são característicos por possuir asas fixas. A distribuição de suas hélices varia com o número das mesmas, porém são mais comuns no esquema de quatro propulsores divididos em dois pares, sendo que um par gira em sentido oposto ao outro.

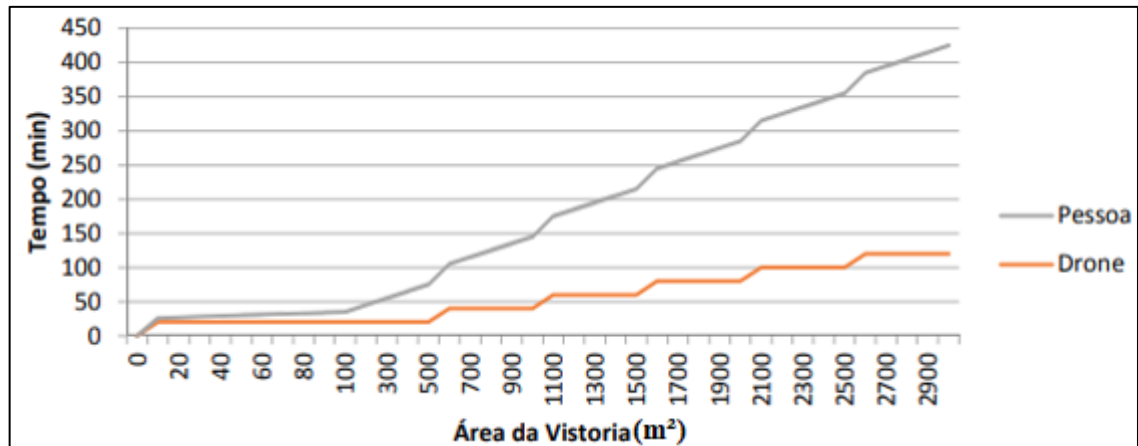
Para Quaritsch *et al.* (2008), os quadrotores destacam-se pela sua simplicidade mecânica e ainda por ter uma grande facilidade na execução de manobras durante o voo, passando a ser o foco de muitas pesquisas. Por possuir muita liberdade nos voos, eles passam a ser explorado de forma a obter informações antes não possíveis, pois incorporam tecnologias que permitem decolagem vertical, voo pairado, facilidade de aterrissagem em pouco espaço, sensores inerciais e de presença de obstáculos. Somando-se a isso permitem, a obtenção de uma ampla visão do meio ambiente, sendo importante em muitas aplicações, como monitoramento ambiental, vigilância e gestão de desastres, entre outras.

Notou-se, por meio das pesquisas, que o uso de VANT na construção civil auxilia os profissionais na inspeção predial, perícia, segurança e gerenciamento do canteiro de obras e levantamento de dados, reduzindo custos e contribuindo para melhor controle e qualidade da construção e projetos. O crescente uso desse equipamento está ligado a sua praticidade e seu potencial de trazer benefícios a indústria da construção civil, podendo ser definido como uma aeronave que voa sem a presença de uma tripulação e que são utilizadas, geralmente, para atuar em áreas de difícil acesso ou perigo eminente (FURTADO *et al.*, 2008).

Nas últimas décadas, com o avanço tecnológico, vem crescendo o uso constantemente de VANT, apresentando vantagens técnicas e econômicas em relação aos levantamentos convencionais (FERREIRA *et al.*, 2013). Hoje no Brasil e no mundo existem várias pesquisas que buscam elucidar o uso de VANT na construção civil. No âmbito de controle de obras, os VANTs têm sido fundamentais para as inspeções em prédios e obras especiais, sendo realizado por meio de um levantamento fotogramétrico das fachadas. Esses parâmetros de medição foram observados no trabalho de Ballesteros e Lordsleen Junior (2021) que utilizaram o drone para realizar um monitoramento e manifestações patológicas na fachada de prédios e encontraram fissuras, trincas, bolor e mofo, por meio das imagens captadas pelo VANT, mostrando a eficácia economia e o detalhamento que traz esse instrumento. Em uma avaliação realizada por

Honorato e Cunha (2018), o tempo necessário para a prática de uma vistoria em obras utilizando um VANT foi comparado com o equivalente realizado por uma pessoa, conforme apresentado na Figura 17. Em áreas na ordem de 2900 m², o tempo gasto pelo VANT foi no mínimo três vezes menor.

Figura 17 - Comparativo de tempo gasto para realização de vistorias



Fonte: Honorato e Cunha (2018)

Apesar das aplicações citadas, no Brasil o uso de VANT na construção civil ainda sofre com algumas limitações, sejam devido a custo ou a falta de conhecimento operacional, porém possui outras aplicações além da inspeção predial como o gerenciamento de obras diversas, marketing de vendas e no mapeamento de áreas (GOUVEIA *et al.*, 2021). A área da construção civil é dominada por uma demanda por tecnologia que é alavancada por um rápido desenvolvimento tecnológico e alta demanda por leitura e interpretação de dados, nas mais variadas formas, todos esses fatores tornam o uso de VANT uma forma singular para o possível corte de custos, aumento em precisão e maior acurácia dos dados analisados.

Em pesquisas internacionais, é possível ver que a aplicação dos VANTs já vai além da aplicação em disciplinas mais comum como vistorias de canteiros de obras e obras verticais, indo para áreas muito abrangentes da indústria, na tabela 4 podemos ver algumas pesquisas e suas variadas áreas.

Tabela 4 - Resumo de pesquisas internacionais no uso de VANT

Pesquisas Catalogadas		
Ano	Autor	Objetivo
2023	Qiong	Estudo das características espaciais de campos eólicos próximos à costa utilizando VANT.
2022	Mingtang	Caracterização dos danos da Rodovia Qinghai-Tibet em região de permafrost com base em imagens de VANT.
2020	Umar	Investigar as aplicações do VANT relacionados com a segurança do trabalhador nos países do conselho de cooperação do Golfo.
2018	Gordon	Uma investigação das características espectrais e radio métricas de câmeras digitais de baixo custo para uso em sensoriamento remoto de VANT.

Fonte: Autor (2024).

Para se ter acesso ao espaço aéreo no Brasil na intenção de utilização de VANT, é necessário atender aos critérios de legislação dados pela Lei nº. 7.565/86 que é necessária para a operação de qualquer aeronave. No âmbito da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), a Instrução Suplementar (IS nº 21-001) de 2012 prevê a emissão de autorização para uso de VANT somente para pesquisa e desenvolvimento, assim como treinamento de pilotos. Essas autorizações da ANAC não excluem a necessidade da autorização de outros agentes públicos como Departamento de Controle do Espaço Aéreo - DECEA.

Para fins de pesquisas, além da autorização de uso do equipamento junto à ANAC, os pilotos precisam fazer o requerimento da liberação de voo aos órgãos regionais do DECEA (Cindacta I, Cindacta II, Cindacta III, Cindacta IV, SRPV-SP).

2.6. AVALIAÇÃO POR MACHINE LEARNING

Machine Learning ou Aprendizado de Máquina vem impactando nossa sociedade ao servir como agente de potencialização de inovações para uma ampla gama de aplicações, a exemplo de recomendações de anúncios e produtos e pesquisas de navegação inteligentes, etc. No entanto, a maioria das pessoas não entende a tecnologia implementada, dando ao tema um panorama irreal ou até mesmo assustador, ofuscando seu potencial positivo nas diferentes áreas da sociedade (Evangelista *et al.*, 2018).

Machine Learning e *Deep Learning* são conceitos introduzidos para buscar o entendimento do termo IA (Inteligência Artificial) onde o *Machine Learning* como o próprio nome já sugere, é o processo de aprendizado contínuo de máquina. Sendo ela uma disciplina da área da inteligência artificial que, por meio de algoritmos, ensina aos computadores a capacidade de identificar padrões e fazer previsões, essa aprendizagem permite que os computadores efetuem tarefas específicas de forma autônoma. Um exemplo bom de sua aplicação são todos os sites com mecanismos de busca como o Google, Yahoo ou Bing, que usam desse método para ler, analisar e dar as respostas, mais aceitáveis aos questionamentos e pesquisas realizadas. Porém quando nos aprofundamos no assunto chegamos até o *Deep Learning* que, resumidamente, é o desenvolvimento do tema anterior para aplicações mais complexas como reconhecimento de fala, identificação de imagens e realizar previsões, estabelecendo parâmetros básicos sobre esses dados que treinam o computador para aprender sozinho ao usar camadas de processamento no reconhecimento de padrões. Dessa forma, interessa ao programador ensinar a máquina a ler os dados, analisando em várias camadas diferentes, diminuindo a interferência humana no contexto de explicações explícitas sobre o tema.

Ao desenvolver um projeto com aplicação de *Machine Learning*, é crucial a utilização de métricas e modelos apropriadas para cada problema. Essa escolha reflete diretamente na análise e nos dados de saída oferecidos pelo sistema, sendo a escolha do tipo de análise das amostras a etapa inicial do desenvolvimento do sistema, assim separados em aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado e aprendizado por reforço. Cada um deles compostos por muitos modelos ou até combinação destes, a exemplo de regressão logística, árvore de decisões, regressão linear entre outros. Assim o melhor modelo é determinado pela situação e resultados desejados.

Ainda existem modelos de *Deep Learning* que consistem em várias camadas de processamento, que buscam extrair recursos de alto nível dos dados fornecidos. Cada camada

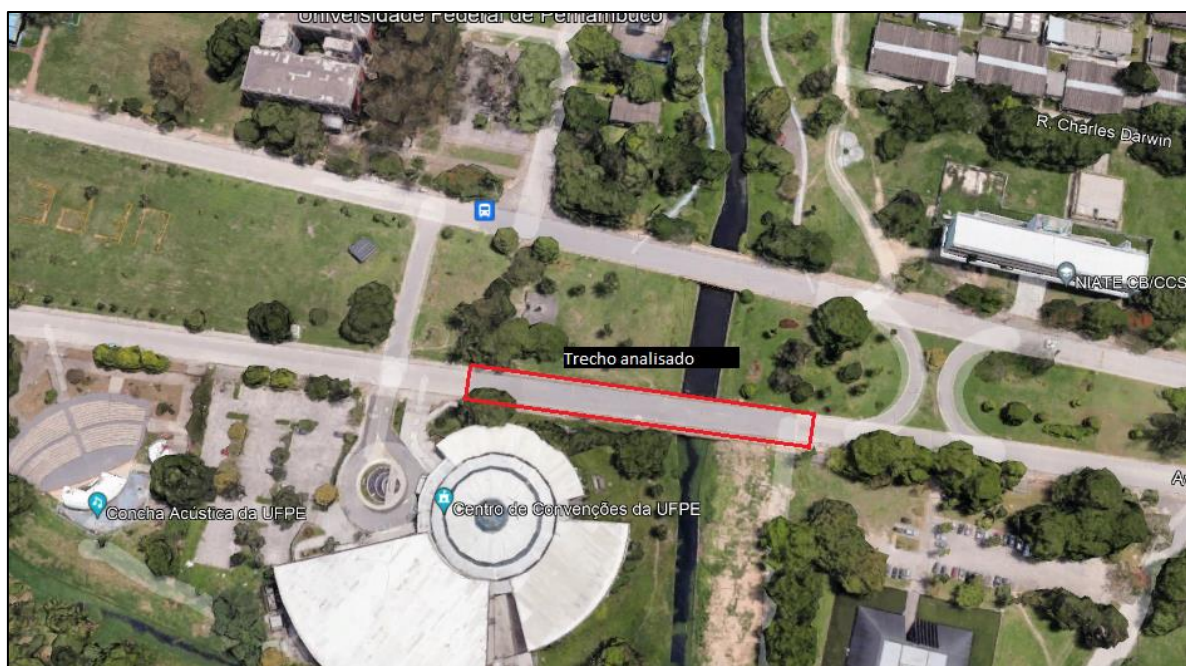
é responsável por transmitir material e dados menos abstratos e mais assertivos para a próxima camada, caracterizando e imitando o panorama de um humano processando informações.

No contexto do desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias para avaliação de pavimentos rodoviários, tem-se o uso de *Machine Learning* na infraestrutura urbana, constata-se suas aplicações por Eriksson *et al.* (2008), que desenvolveram modelos para identificação de buracos, bueiros, entre outros defeitos presentes em pavimentos rodoviários, utilizando as respostas de sensores de velocidade, posição e aceleração embarcados em táxis. Porém a integração desse tema junto a sua aplicação na área de infraestrutura e projetos de pavimentos ainda é morno, podendo ser muito mais explorado.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O estudo foi realizado em uma área na Universidade Federal de Pernambuco localizada no Bairro da Várzea, município de Recife - PE, sendo escolhida uma pista simples, formadas por revestimento flexível com defeitos característicos para análise, com curvas de nível suaves, facilitando o levantamento e análise dos métodos aplicados. O local selecionado dentro da UFPE foi parte da Av. dos Reitores trecho em frente ao centro de convenções. A Figura 18 demonstra a imagem de satélite da área de estudo em questão com suas delimitações.

Figura 18 - Visualização da área analisada



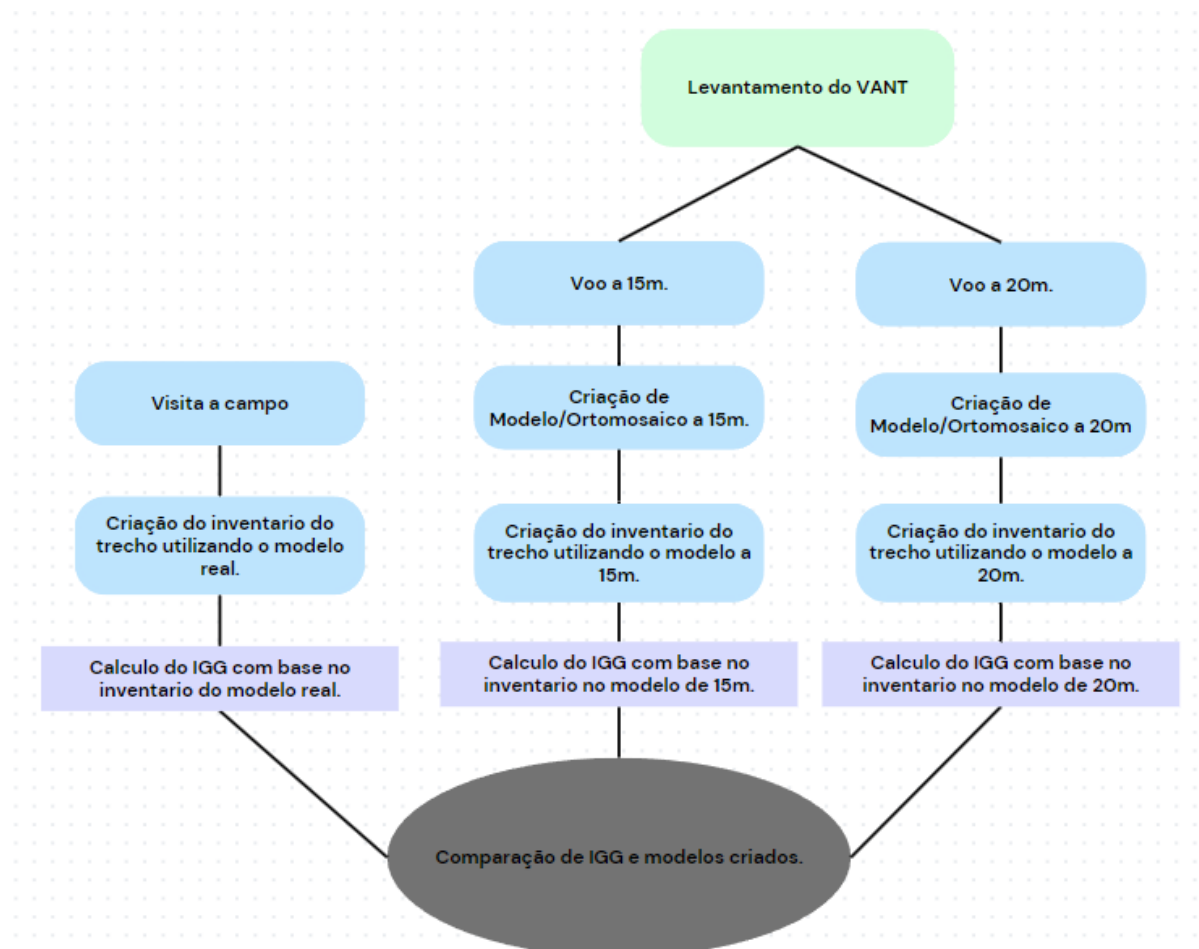
Fonte: Google Earth Pro, com adaptação do autor. (2024)

A área estudada foi selecionada para facilitar os levantamentos devido a fazer parte da UFPE e a baixa passagem de veículos pesados. Composta por 60m de extensão e 7m de largura, com sinalização horizontal aparente e com presença de um pontilhão que transpassa o canal do cavaco, sendo o principal motivo de sua escolha a pouca presença de árvores, tornando mais fácil a visualização dos dados levantados pelo VANT. Foram realizados dois voos com alturas de 15 e 20 metros, para criação de modelos de Ortomosaico, essas alturas foram as menores sem ter a perda de sinal dos satélites com o VANT, compondo a base para o levantamento do IGG utilizando o VANT.

3.1. ETAPAS DOS LEVANTAMENTOS

O trabalho foi composto em duas etapas. Inicialmente, com a parte do planejamento do voo, seguida dos voos realizados em diferentes alturas para a obtenção de imagens que compuseram os dois modelos de Ortomosaico. Em posse dessas informações, foi possível levantar o IGG para cada modelo e compará-lo com o modelo real. A Figura 19 apresenta o fluxo de atividades exemplificado proposto realizado.

Figura 19 - Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Autor (2024).

3.2. LEVANTAMENTO DE CAMPO MODELO VANT

O levantamento de campo foi realizado com o VANT modelo Mavic Air, marca DJI® que possui uma bateria de 2375 mAh, com autonomia para até 25 minutos de voo. O equipamento possui a capacidade de aquisição de imagens fotográficas georreferenciadas com auxílio de um computador e antena de telemetria, que recebe sinal do controle que fica em pose do operador, para controle do levantamento em tempo real. O equipamento também apresenta uma câmera com 1/2.3" de diâmetro, resolução máxima de 12 megapixels (MP), distância focal de 28mm e capacidade de coleta de cenas no espectro da luz visível, ligada ao sistema de posicionamento (GPS) acoplado ao VANT.

No solo foi realizado a programação de rota que o VANT percorreu, sendo ele capaz de começar e terminar o voo de forma autônoma. Toda a missão foi planejada utilizando o software Drone Deploy®, que auxiliou nos três voos realizados, onde, com a área total a ser levantada, foi possível apresentar a quantidade de imagens catalogadas pelo VANT, o tempo total de voo e qual percurso o equipamento realizou.

Como ideia primária, o levantamento seria realizado no estacionamento do CTG, por ser um ambiente mais controlado, porém, dois fatores impactaram negativamente o voo. Primeiro, uma vasta quantidade de árvores ao longo da borda esquerda e a proximidade da edificação do Centro de Tecnologia e Geotécnica (CTG) interferiram no sinal de localização do VANT, para alturas a partir de 20 metros.

Figura 20 - VANT prestes a realizar o voo de 20m



Fonte: Autor (2024).

O primeiro levantamento serviu apenas para calibração do equipamento. A partir do problema encontrado, a solução foi mudar a localização e realizar os dois voos previstos, um

com 15 metros de altura, e o outro com 20 metros. Alturas essas fixadas a partir do valor das “distâncias entre as amostras no chão” ou da sigla em inglês GSD, que é a distância entre os pixels na imagem bruta, fator esse que relaciona o valor que representa um pixel no modelo em comparação ao real. Os cálculos para levantamento do GSD são feitos a partir da relação do tamanho da câmera em comparação ao tamanho da imagem.

$$Tam_{pixel}(x, y) = \frac{C. sensor}{C. imagem} \quad (5)$$

Onde:

TAM_{pixel} = Tamanho do pixel na fotografia.

C.sensor = Comprimento no eixo x ou y do sensor da câmera.

C.imagem = Comprimento no eixo x ou y da imagem gerada.

A câmera utilizada é redonda com 3,5 polegadas, que equivale a 36,3 centímetros de diâmetros e 12MP. Uma imagem quadrada obtida pela câmera corresponde a 3464,102 pixels de comprimento de resolução. Portanto, utilizando a Equação 5, chega-se ao valor 0,010479 cm/pixel.

Em posse desse valor podemos calcular o GSD dado por:

$$GSD = \frac{H * Tam_{pixel}}{f} \quad (6)$$

Onde:

GSD = distância entre os pixels.

H = Altura do voo.

F = Distância focal.

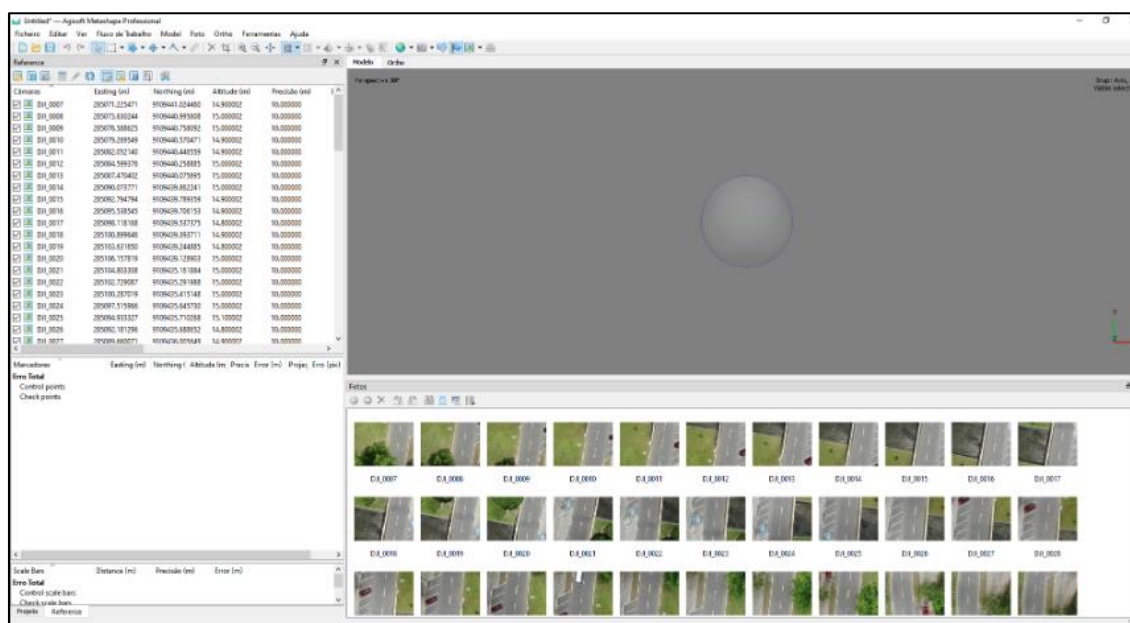
Como o equipamento apresenta uma distância focal de 3,5cm temos que respectivamente nos voos de 15 e 20 metros um GSD de 5,61cm e 7,48cm.

3.2.1. Tratamento de dados do VANT

Foram obtidas imagens digitais individuais, e após a obtenção dessas imagens, gerou-se um ortomosaico utilizando sobreposição delas em *software* específico para composição e uso de imagens de VANT como o Agisoft Metashape® profissional 2022 e Global Mapper® versão 22.1. Para o levantamento de 15 metros foram catalogadas 83 fotos para geração do mosaico e com 20 metros foram necessárias apenas 59 imagens, ambas para recobrir a área de interesse.

A calibração da câmera e orientação das imagens foram feitas na mesma etapa por meio de algoritmos automáticos de reconhecimento de padrões espectrais no software Drone Deploy®.

Figura 21 - Imagem do processamento utilizando Drone Deploy®



Fonte: Autor (2024).

3.3. LEVANTAMENTO DE DADOS PARA MODELO REAL

Para realizar o levantamento da condição do pavimento foi utilizado o método do IGG preconizado pela norma 006/2023 – PRO, que aconselha a delimitação da análise ao trecho mais solicitado, porém para essa pesquisa foi considerada as duas faixas na composição das estações como demonstrado na tabela de inventario apresentada a seguir;

Tabela 5 – Modelo da tabela de Inventario do trecho - Parte01.

INVENTARIO PARA CÁLCULO DE IGG										
TRECHO: km 0,00 ao km 0,060										
ESTACAS	ESTAÇÃO	Sentido	Pista	OK	FC-1					
					F1 (1)	TTC (1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)
0	1	Faixa 01	Dupla	x						
0	2	Faixa 02	Dupla	x						
1	3	Faixa 01	Dupla	x						
1	4	Faixa 02	Dupla	x						
2	5	Faixa 01	Dupla	x						
2	6	Faixa 02	Dupla	x						
3	7	Faixa 01	Dupla	x						
3	8	Faixa 02	Dupla	x						

Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 - Modelo da tabela de Inventario do trecho - Parte 02.

OPERADOR: Lucas										
DATA: 03/2024										
FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	ALC (4)	ATC (4)	O (5)	P (5)	E (5)
J (2)	TB (2)	JE (3)	TBE (3)							

Fonte: Autor (2024).

Tabela 7 - Modelo da tabela de Inventario do trecho - Parte 03.

					FOLHA:	
			ESTACAS		Desnível pista/acostamento	Obs
			0 a 3			
Ex (6)	D (7)	R (8)	FLECHAS (mm)			
			TRI	TRE		
			0	0	0 cm	
			0	0	0 cm	
			0	0	0 cm	OAE
			0	0	0 cm	OAE
			0	0	0 cm	OAE
			0	0	0 cm	OAE
			0	0	0 cm	
			0	0	0 cm	

Fonte: Autor (2024).

Figura 22 - Levantamento da condição do pavimento.



Fonte: Autor (2024)

Para levantamento em campo foi utilizado uma trena de 3m junto a uma cópia da tabela de inventario para identificação dos defeitos. Os inventários com todos as observações, estacas e faixas do trecho, para os três modelos podem ser encontrados no Apêndice A .

3.4. MÉTODO DE COMPARAÇÃO

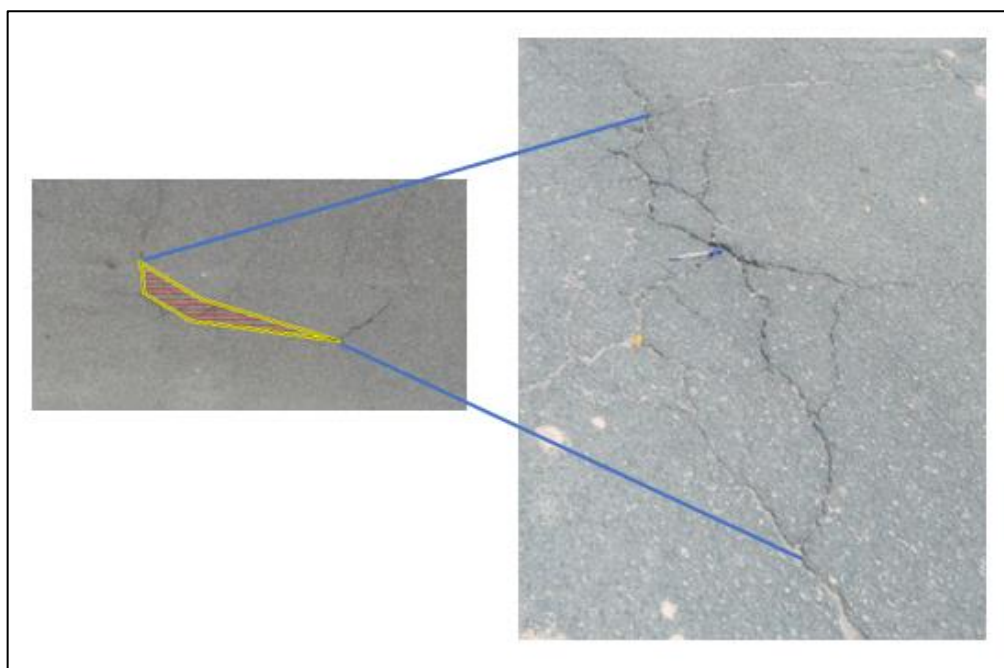
Para comparar os IGG obtidos nos diferentes levantamentos, foi primeiro realizado um levantamento visual utilizando o VANT a 20m em seguida o de 15m, seguido da obtenção dos ortomosaicos nas duas alturas. Em seguida, foi realizado o levantamento visual em campo, denominado neste trabalho de modelo real. A ordem foi escolhida para não haver interferência nas interpretações dos dados.

Foram utilizados como base os valores analisados e calculados do IGG levantados a partir dos três modelos (real, 15m e 20m), criando uma base para análise de todos os valores levantados, também vai ser comparada a acurácia (Acurácia = 100% - taxa de erro%) dos modelos em consideração ao tamanho dos defeitos catalogados, podendo ser eles do tipo trincas jacaré, trincas longitudinais e transversais longas, remendos e painéis.

$$Taxa\ de\ erro = \frac{\sqrt{(\hat{Área\ real} - \hat{Área\ em\ modelo})^2}}{\hat{Área\ real}} \times 100 \quad (7)$$

Pode-se usar como exemplo um dos defeitos analisados neste trabalho, a trinca interligada do tipo jacaré, apresentou no modelo real uma área de 0,774m² e quando levantadas essas mesmas áreas no modelo a 15 metros foi encontrado 0,658m². Logo sua Taxa de erro utilizando a equação 7 é 23% e sua acurácia de 77%.

Figura 23 - Comparação para composição de cálculo de acurácia.



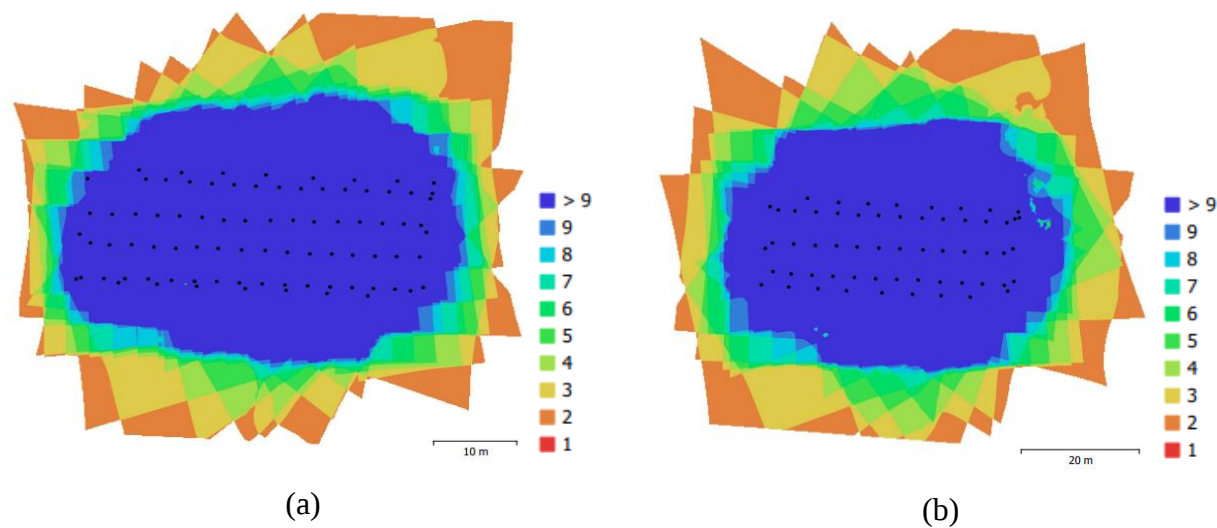
Fonte: Autor (2024)

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. APRESENTAÇÃO DE DADOS PROCESSADOS

Na Figura 24 e Tabela 8, pode-se observar algumas informações geradas pelo software Agisoft Metashape® profissional 2022, como a localização do VANT na hora da captura da foto e quantidade de fotos sobrepostas em determinada delimitação. Na Figura 25 é possível notar o modelo digital de elevação. Nas Figuras 26 e 27, se faz capaz observar os Ortomosaico de 15 e 20 metros.

Figura 24 - Sobreposição de imagens utilizadas: a) Voo de 15m; e voo de 20m



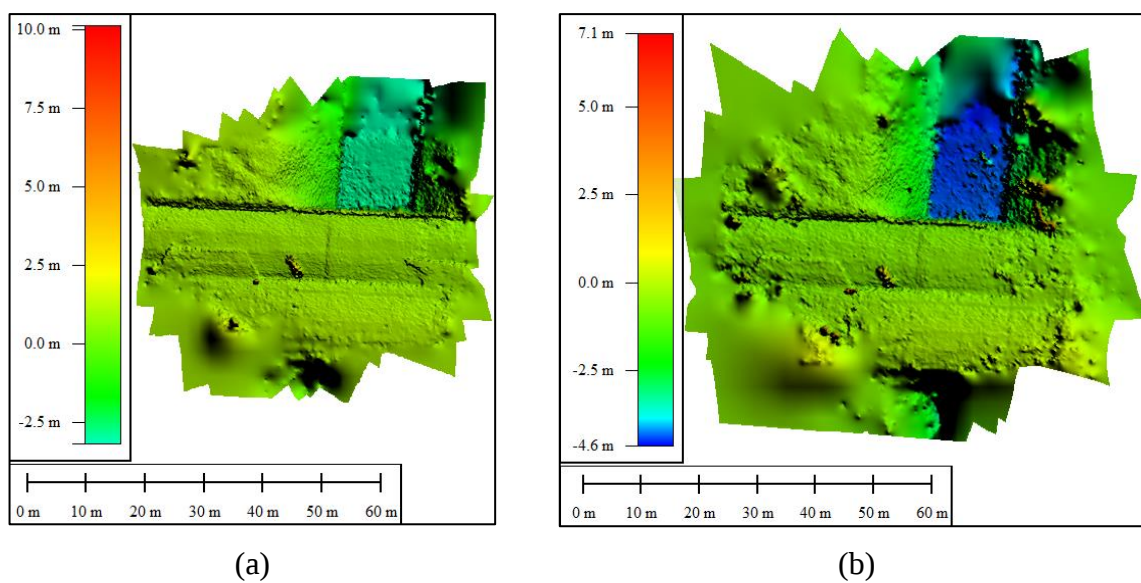
Fonte: Agisoft Metashape® profissional 2022, com adaptação do autor. (2024)

Tabela 8 - Dados de processamento de voo.

	15m	20m
Número de imagens	83	59
Altitude de voo (m)	14,9	21,7
Resolução (mm/pixels)	5,05	7,37
Área coberta (m²)	2660	4420

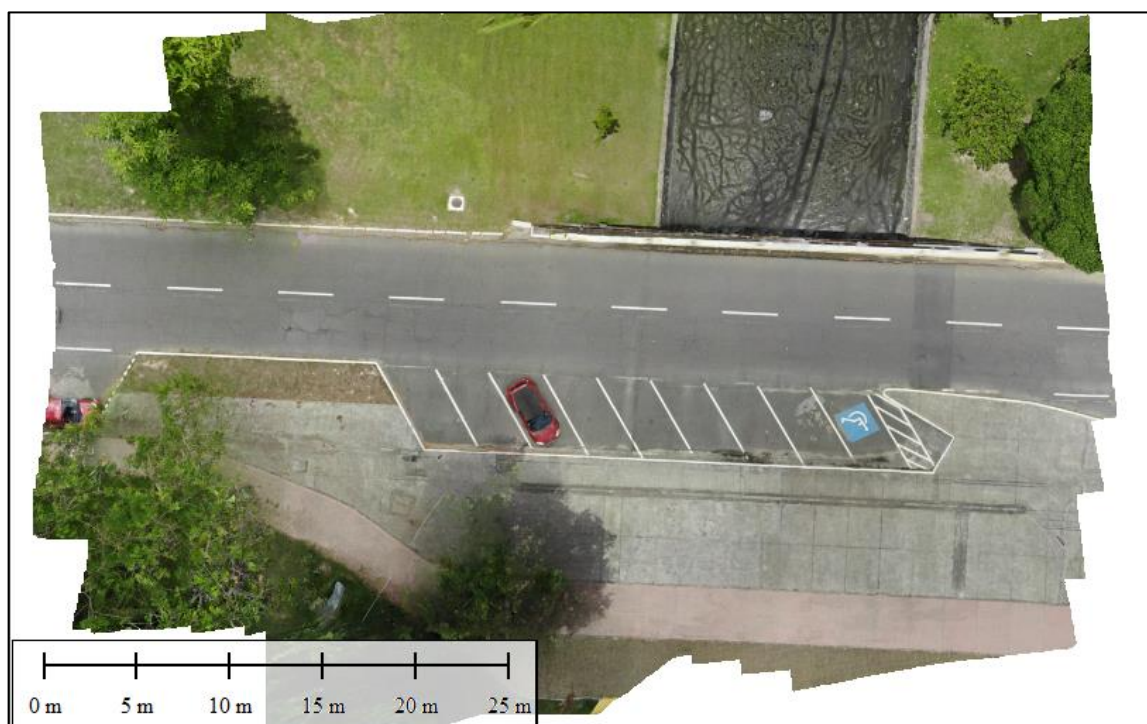
Fonte: Autor (2024)

Figura 25 - Modelo de elevação digital: a) Voo de 15m; e b) Voo de 20m



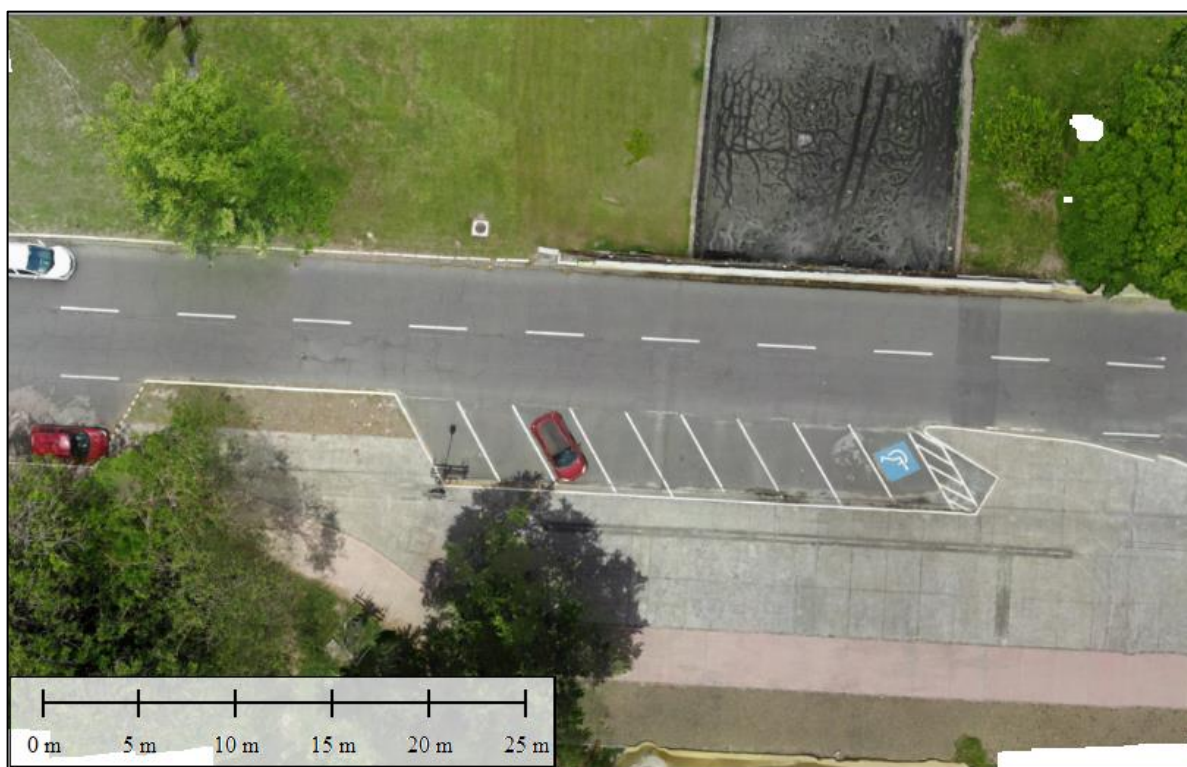
Fonte: Autor (2024)

Figura 26- Ortomosaico modelo do voo de 15m.



Fonte: Autor (2024)

Figura 27 - Ortomosaico modelo do voo de 20m.

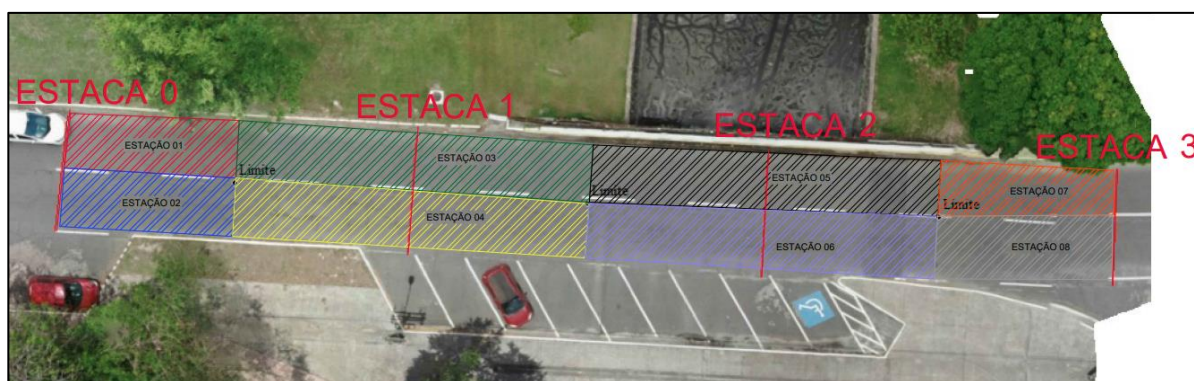


Fonte: Autor (2024)

4.2. RESULTADO DE IGG

A partir dos levantamentos que foram realizados e dos dados tratados, pode ser observado alguns fatores que interferem na visualização dos defeitos, a exemplo de: presença de árvores, alta vegetação lateral no momento da análise e alta frequência de veículos passantes. Para realizar a comparação entre os modelos utilizados, foi realizado o cálculo do IGG para cada um dos modelos, e a partir do valor numérico de IGG, os conceitos de condições superficial foram obtidos para cada modelo usando a relação apresentada na Tabela 2. Na Figura 28 é possível observar as delimitações de cada estação que são compostas de acordo com a Tabela 9. O inventário para composição do cálculo do IGG de todos os modelos está presente no Apêndice A.

Figura 28 - Visualização de estacas e estações



Fonte: Autor (2024)

Tabela 9 - Dimensões das estações.

Estações	Comprimento	Largura
1	10m	3,225m
2	10m	3,225m
3	20m	3,225m
4	20m	3,225m
5	20m	3,225m
6	20m	3,225m
7	10m	3,225m
8	10m	3,225m

Fonte: Autor (2024)

4.2.1. IGG utilizando modelo VANT 20m

Ao realizar o levantamento dos defeitos no modelo a 20 metros, foi observado uma dificuldade na identificação dos padrões de trincas, quanto a interpretação das dimensões e se estavam interligadas ou não. Entretanto, ainda assim foi possível catalogar a maioria dos defeitos presentes. A Tabela 10 apresenta de forma resumida os valores levantados para o cálculo do IGG.

Tabela 10 – Frequência absoluta de defeitos levantados no modelo VANT 20m

FC-1						FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	ALC (4)	ATC (4)	O (5)	P (5)	E (5)	Ex (6)	D (7)	R (8)
F1 (1)	TTC (1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)	J (2)	TB (2)	JE (3)	TBE (3)										
1	0	2	1	3	1	0	5	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 11 a seguir é possível observar o cálculo do IGG que apresentou um valor de 90,0 indicado o trecho como ruim de acordo com os conceitos apresentados na Tabela 2.

Tabela 11 - Cálculo do IGG com modelo VANT 20m.

Item	Natureza do defeito	Frequência Absoluta		Frequência Relativa (%)	Fator de Ponderação	IGI
1	FC-1	8		100%	0,2	20
2	FC-2	5		63%	0,5	31,25
3	FC-3	0		0%	0,8	0
4	ALP, ATP, ALC, ATC (4)	0		0%	0,9	11,25
5	O, P, E (5)	1		13%	1	12,5
6	Ex (6)	0		0%	0,5	0
7	D (7)	0		0%	0,3	0
8	R (8)	2		25%	0,6	15
9	Média das flechas de TRI e TRE	TRE	TRI	Fator de ATR	1,3	0
		0	0	0		
10	Variância TRI e TRE	TRE	TRI	Variância do Fator ATR	1	0
		0	0	0		
Nº de Estações	8	Índice de Gravidade Global (IGG)				90,0

Fonte: Autor (2024)

4.2.2. IGG utilizando modelo VANT 15m

Para a análise realizada no modelo de 15 metros, foi possível observar mais alguns padrões devido a sua melhor nitidez. Por essa razão, algumas fissuras puderam ser caracterizadas de forma mais assertiva, a exemplo das trincas transversais curtas ou longas, porém, apesar do maior nível de detalhamento, a variação dos valores contabilizados fora nulas, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Frequência absoluta de defeitos levantados no modelo VANT 15m

FC-1						FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	ALC (4)	ATC (4)	O (5)	P (5)	E (5)	Ex (6)	D (7)	R (8)
F1 (1)	TTC (1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)	J (2)	TB (2)	JE (3)	TBE (3)										
1	0	2	1	3	1	0	5	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 13 a seguir, é possível observar o cálculo do IGG que apresentou um valor idêntico ao obtido anteriormente para o modelo VANT 20m, de 90,0. Apesar do inventário dos dois modelos gerados pelo VANT serem diferentes, a contagem de defeitos para composição de IGG foi a mesma. Ambos conceituaram o trecho como ruim de acordo com os limites apresentados na Tabela 2.

Tabela 13 - Cálculo do IGG com modelo VANT 15m.

Item	Natureza do defeito	Frequência Absoluta		Frequência Relativa (%)	Fator de Ponderação	IGI
1	FC-1	8		100%	0,2	20
2	FC-2	5		63%	0,5	31,25
3	FC-3	0		0%	0,8	0
4	ALP, ATP, ALC, ATC (4)	0		0%	0,9	11,25
5	O, P, E (5)	1		13%	1	12,5
6	Ex (6)	0		0%	0,5	0
7	D (7)	0		0%	0,3	0
8	R (8)	2		25%	0,6	15
9	Média das flechas de TRI e TRE	TRE	TRI	Fator de ATR	1,3	0
		0	0	0		
10	Variância TRI e TRE	TRE	TRI	Variância do Fator ATR	1	0
		0	0	0		
Nº de Estações	8	Índice de Gravidade Global (IGG)				90,0

Fonte: Autor (2024)

4.2.3. Apresentação do IGG utilizando levantamento real.

Na constituição do modelo real, foi possível observar que os defeitos que pareciam menos severos, nos modelos anteriores, eram mais severos quanto ao desgaste e erosão. Além disso, foi possível observar um defeito que não havia sido localizado nos modelos anteriores: um afundamento plástico local na transversal da estação 6.

Tabela 14 - Quantidade de defeitos levantados modelo real

FC-1						FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	ALC (4)	ATC (4)	O (5)	P (5)	E (5)	Ex (6)	D (7)	R (8)
F1 (1)	TTC (1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)	J (2)	TB (2)	JE (3)	TBE (3)										
0	0	2	0	5	1	0	5	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	2

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 15 é possível observar o resultado do índice, conceituando a pista ao estado ruim de conservação apresentando um IGG de 101,3.

Tabela 15 - Cálculo do IGG Real.

Item	Natureza do defeito	Frequência Absoluta		Frequência Relativa (%)	Fator de Ponderação	IGI	
1	FC-1	8		100%	0,2	20	
2	FC-2	5		63%	0,5	31,25	
3	FC-3	0		0%	0,8	0	
4	ALP, ATP, ALC, ATC (4)	2		25%	0,9	22,5	
5	O, P, E (5)	1		13%	1	12,5	
6	Ex (6)	0		0%	0,5	0	
7	D (7)	0		0%	0,3	0	
8	R (8)	2		25%	0,6	15	
9	Média das flechas de TRI e TRE	TRE	TRI	Fator de ATR	1,3	0	
		0	0	0			
10	Variância TRI e TRE	TRE	TRI	Variância do Fator ATR	1	0	
		0	0	0			
Nº de Estações	8	Índice de Gravidade Global (IGG)					101,3

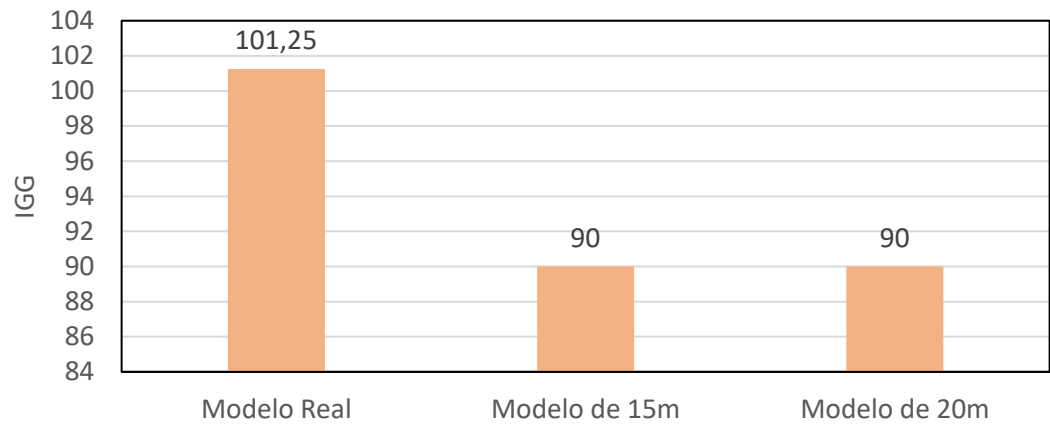
Fonte: Autor (2024)

4.2.4. Comparação entre diferentes formas de cálculo de IGG

Ao analisar todos os valores, é possível notar que em ambos os modelos obtidos pelo VANT (de 15 e 20 metros), obtiveram o mesmo valor para o IGG (90,0), e ambos classificaram a pista como ruim. Entretanto, quando é observado e comparado com o modelo real, é possível notar uma variação de 11,25 em seus valores, sendo esta variação devido a não consideração do

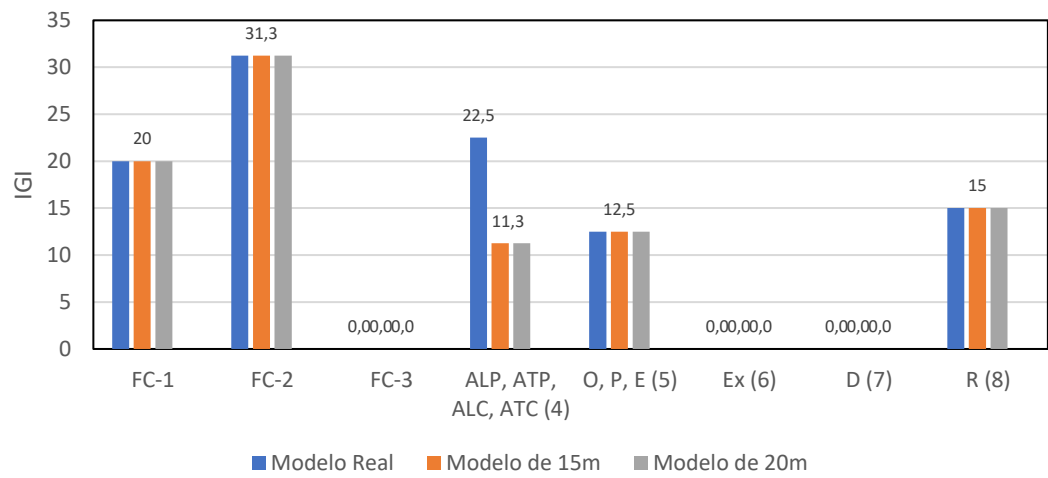
defeito do tipo ALP na estação 6, que não foi observado nos modelos criados pelo VANT. Essa variação fica notável ao observar os valores dos IGI calculados, apresentados no Gráfico 2:

Gráfico 1 - Comparação dos IGG em cada modelo.



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 2 - Comparação dos IGI em cada modelo



Fonte: Autor (2024)

4.3. ANÁLISE DE ACURÁCIA DOS MODELOS DE VANT

Para compor a acurácia dos levantamentos, foi realizado a medida física dos defeitos que mais se repetiram nos modelos construídos pelo uso do VANT e do maior defeito observado, sendo eles as trincas transversais longas, painelas, trincas longitudinais longas, trincas jacaré e remendos. A partir da área desses defeitos foi calculado a taxa de erro utilizando a Equação 7. Na Tabela 16 é possível observar as taxas de erro e a acurácia calculada e detalhada respectivamente.

Tabela 16 - Cálculo de taxa de erro e acurácia.

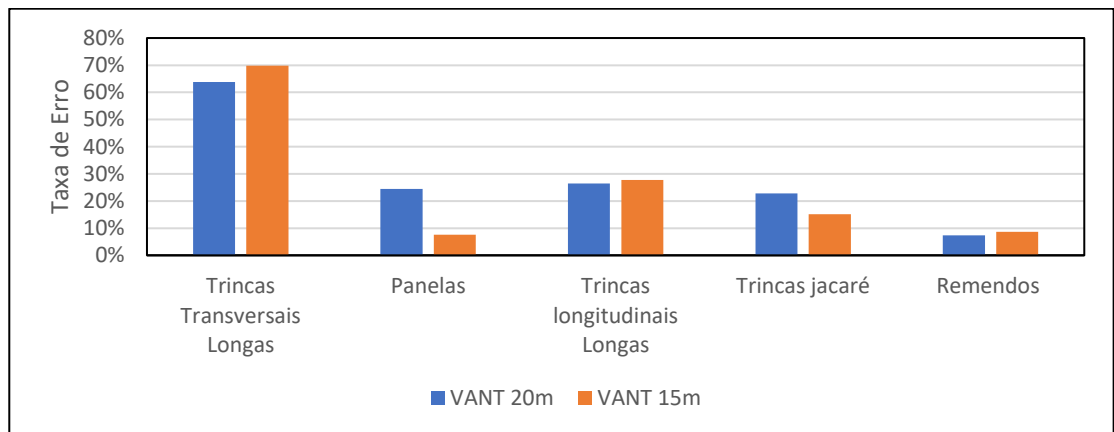
Defeito	Acurácia em 20m	Acurácia em 15m	Taxa de erro		Área		
			20m	15m	Real	20m	15m
Trincas Transversais Longas	36%	30%	64%	70%	0,064	0,023	0,019
Panelas	76%	92%	24%	8%	0,224	0,169	0,207
Trincas longitudinais Longas	74%	72%	26%	28%	0,490	0,619	0,626
Trinca jacaré	77%	85%	23%	15%	0,774	0,598	0,658
Remendos	93%	91%	7%	9%	15,436	14,293	14,091

Fonte: Autor (2024)

Pode-se observar que os valores mais discrepantes são os de Trincas Transversais a 15m que apontaram a menor acurácia, sendo ela de 30% e com a maior acurácia a de Remendos a 20m com 93%. Esses valores podem ser observados respectivamente nos defeitos com menor e maior dimensão, caracterizando um erro proporcional ao detalhamento do voo realizado. Entretanto, mesmo com uma menor altura de voo, não houve uma tendência de aumento de acurácia para todos os defeitos. Trincas longas apresentaram uma menor acurácia no levantamento com altura de voo mais próxima ao solo e para defeitos como o Remendo que apresentam uma grande área, é notável um aumento na acurácia. No Gráfico 3 podemos observar melhor essas informações.

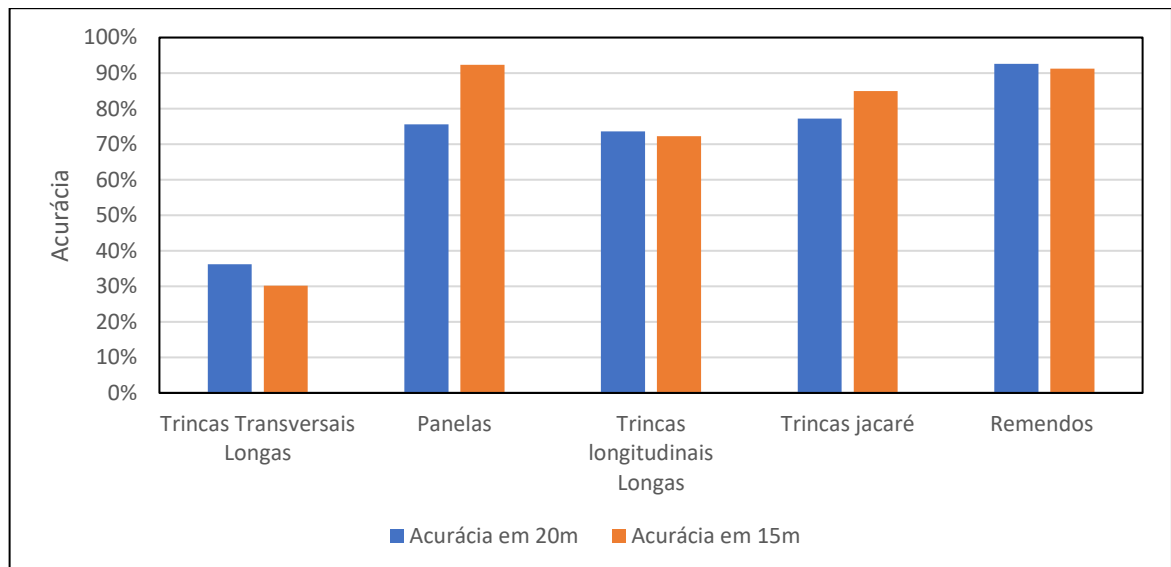
Também é possível perceber que mesmo com áreas pequenas, ordem de grandeza abaixo de 1m², como nos defeitos de painelas e trincas, os modelos de VANT conseguem tem uma acurácia maior que 70%.

Gráfico 3 - Taxa de erros dos defeitos nos modelos VANT



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 4 - Acurácia dos defeitos nos modelos VANT



Fonte: Autor (2024)

5. CONCLUSÃO

Ficou notório nesse trabalho a facilidade que o voo de VANT proporciona ao usuário para compor a análise do pavimento, começando pela criação do plano de voo até o acompanhamento do equipamento na finalização da sua missão, tendo como percalços o entendimento dos parâmetros utilizados, conhecimento acerca da legislação do equipamento e limitações que podem aparecer no campo, a exemplo de árvores, roçado e grandes construções podendo essas impedir a visualização das estações.

Para buscar a melhor forma da aplicação do VANT no levantamento da condição do pavimento, é de suma importância a criação de um Ortomosaico com qualidade suficiente para observar os defeitos mais minuciosos das estações delimitadas, sendo essa nitidez inversamente proporcional ao GSD calculado no plano de voo, sendo aceitável valores abaixo de 7,5 que como apresentado nesse trabalho, foi capaz de criar um modelo suficientemente nítido e apto para compor um IGG, não tão variante do real levantado, tendo todos chegado a mesma condição (ruim).

Para a comparação dos modelos VANT e o levantamento real, é possível observar a acurácia calculada para os defeitos mais observados nas estações, e chegar à conclusão que o método apresenta viabilidade e potencial de aplicação, tendo em vista que conseguiu apresentar para maioria dos defeitos um acurácia maior que 70% entre os modelos de VANT e o real, também foi perceptível que alguns defeitos foram mais difíceis de serem observados no modelo VANT a exemplo de deformações plásticas localizadas e defeitos de pequena área de abrangência como pequenas trincas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, M. A. Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento**. São Paulo, ano 01, ed. 11, v. 10, pp. 187-196, novembro de 2016. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenhariacivil/metodosde-pavimentacao>. Acesso em: 14 de maio de 2019.

BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, Imprinta, 2010.

BIANCHI, F. R. **Estudo Comparativo Entre Pavimento Rígido e Flexível**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste, São Paulo.

CAMPOS, S.; ARAÚJO JÚNIOR, A.A; BARROS, Z.X.; CARDOSO, L.G.; PIROLI, E.L. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao uso da terra em microbacias hidrográficas, Botucatu-SP. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.24, n.2, p.431-435, ago. 2004

Chai, M., Li, G., Ma, W., Chen, D., Du, Q., Zhou, Y., ... Jia, H. (2023). Damage characteristics of the Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions based on UAV imagery. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2).
<https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2038381>

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT: Transporte rodoviário desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. Brasília, 2018.

DNIT. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos terminologia. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.

ERIKSSON, J.; L. GIROD; B. HULL R. NEWTON; S. MADDEN e H. BALAKRISHNAN (2008) **The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. MobiSys, Breckenridge, Colorado, USA**

Evangelista, I.; Blesio, G.; Benatti, E. Why Are We Not Teaching Machine Learning at High School? A Proposal. **World Engineering Education Forum**, Albuquerque, NM, USA.,2018.

FERNANDES Jr., J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L. F. Defeitos e atividades de manutenção e reabilitação em pavimentos asfálticos. Apostila Didática. **Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos** –Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1999.

FILHO, J. M. M.; ROCHA, E. G. A.. Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, junho de 2018. ISSN:2448-0959

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GONÇALVES, Fernando José Pugliero. **O desempenho dos pavimentos flexíveis**. Passo Fundo, 1999

GONÇALVES, Fernando José Pugliero. **O diagnóstico e a manutenção dos pavimentos**. Passo Fundo, 1999, b

GONTIJO, P. R. A., GUIMARÃES, F. H. R. Método PARAGON para Avaliação e Diagnóstico de Pavimentos Rodoviários. Cuiabá: **29º Reunião Anual de Pavimentação**, 1995.

GOUVEIA, A. A. DE et al. **Inovação tecnológica na construção civil- utilização de drone para gerenciamento de obra**. In: Tópicos em construção civil: Tecnologia, inovação e metodologias aplicadas. 1o ed. Belo Horizonte: Poisson, 2021.

Haas, R., Hudson, W. and Zaniewski, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Company, Malabar. 1994.

MARTINHÃO, G. A., NASCIMENTO, J. C. A., PARO, G. M., BONIN, M. H. S. Patologia em pavimentação, buracos ou panelas. **Instituição Anhanguera Educacional**. Campinas, 2018.

Outay, F., Mengash, H. A., Adnan M., Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic, and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Volume 141, 2020, Pages 116-129, ISSN 0965-8564, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018>.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: s.pinto, 2002.

QUARITSCH, M.; STOJANOVSKI, E.; BETTSTETTER, C.; FRIEDRICH, G.; HELLWAGNER, H.; RINNER, B. Collaborative microdrones: Applications and Research Challenges. Turim, Itália, 2008.

RIBEIRO, T. P. Estudo Descritivo das Principais Patologias em Pavimento Flexível. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ed. 04, ano 02, v. 01. pp 733-754, julho de 2017. ISSN:2448-0959 Disponível em: < <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/pavimento-flexivel> >.

ROCHA, R.S.; Costa, E.A.L. Patologias de Pavimentos Asfálticos e Suas Recuperações. Estudo de Caso da Av. Pinto de Aguiar. **Universidade Católica de Salvador**. BA. 2009.

Samsuri, S., Surbakti, M., Tarigan, A. P., & Anas, R. (2019). A Study on the Road Conditions Assessment Obtained from International Roughness Index (IRI): Roughometer Vs Hawkeye. **Simetrikal: Journal of Engineering and Technology**, 1(2), 103-113. <https://doi.org/10.32734/jet.v1i2.756>

SEGRE, S.P. Pavimentos flexíveis: análise dos defeitos em função da sua origem e suas consequências na vida útil. Unicamp, Campinas 2019.

SILVA, P. F. A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2011. 128 p. CASTRO. Defeito dos pavimentos asfálticos e suas causas. Rio Grande do Sul, 2018.

SILVA, P. F. A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 4. ed. São Paulo: Pini, 2018. 128 p. CASTRO. Defeito dos pavimentos asfálticos e suas causas. Rio Grande do Sul, 2018.

VIEIRA, J. C. S. Plataforma Móvel Aérea QuadRotor, Monografia, **Universidade do Minho**, 2011

APÊNDICE A

Tabela A1 - Inventario de modelo a 20m

INVENTARIO PARA CÁLCULO DE IGG										OPERADOR: Lucas																	FOLHA:	
TRECHO: km 0,00 ao km 0,060										DATA: 03/2024													ESTACAS 0 a 3		Desnível pista/acostamento	Obs.		
ESTACAS	ESTAÇÃO	Sentido	Pista	OK	FC-1						FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	ALC (4)	ATC (4)	O (5)	P (5)	E (5)	Ex (6)	D (7)	R (8)			FLECHAS (mm)	
					F1 (1)	TTC (1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)	J (2)	TB (2)	JE (3)	TBE (3)													TRI	TRE
0	1	Faixa 01	Dupla						x		x														0	0	0 cm	
0	2	Faixa 02	Dupla							x	x														0	0	0 cm	
1	3	Faixa 01	Dupla						x		x								x						0	0	0 cm	OAE
1	4	Faixa 02	Dupla				x																		0	0	0 cm	OAE
2	5	Faixa 01	Dupla						x		x			x										x	0	0	0 cm	OAE
2	6	Faixa 02	Dupla		x																			x	0	0	0 cm	OAE
3	7	Faixa 01	Dupla						x		x														0	0	0 cm	
3	8	Faixa 02	Dupla				x																		0	0	0 cm	

Fonte: Autor (2024)

Tabela A2 - Inventario de modelo a 15m.

INVENTARIO PARA CÁLCULO DE IGG										OPERADOR: Lucas														FOLHA:				
TRECHO: km 0,00 ao km 0,060										DATA: 03/2024												ESTACAS 0 a 3		Desnível pista/acostamento	Obs.			
ESTACAS	ESTAÇÃO	Sentido	Pista	OK	FC-1						FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	ALC (4)	ATC (4)	O (5)	P (5)	E (5)	Ex (6)	D (7)			R (8)	FLECHAS (mm)	
					F1 (1)	TTC(1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)	J (2)	TB (2)	JE (3)	TBE (3)													TRI	TRE
0	1	Faixa 01	Dupla						x		x														0	0	0 cm	
0	2	Faixa 02	Dupla							x	x														0	0	0 cm	
1	3	Faixa 01	Dupla						x		x								x						0	0	0 cm	OAE
1	4	Faixa 02	Dupla				x																		0	0	0 cm	OAE
2	5	Faixa 01	Dupla						x		x													x	0	0	0 cm	OAE
2	6	Faixa 02	Dupla		x									x										x	0	0	0 cm	OAE
3	7	Faixa 01	Dupla					x			x														0	0	0 cm	
3	8	Faixa 02	Dupla				x																		0	0	0 cm	

Fonte: Autor (2024)

Tabela A3 - Inventario de levantamento real

ANALISE A REAL										OPERADOR:															FOLHA:			
										Lucas															ESTACAS		Desnível pista/acostamento	Obs.
TRECHO: km 0,00 ao km 0,060										DATA: 03/2024															0 a 3			
ESTACAS	ESTAÇÃO	Sentido	Pista	OK	FC-1						FC-2		FC-3		ALP (4)	ATP (4)	ALC (4)	ATC (4)	O (5)	P (5)	E (5)	Ex (6)	D (7)	R (8)	FLECHAS (mm)			
					F1 (1)	TTC(1)	TTL (1)	TLC (1)	TLL (1)	TRR (1)	J (2)	TB (2)	JE (3)	TBE (3)											TRI	TRE		
0	1	Faixa 01	Dupla						x		x													0	0	0 cm		
0	2	Faixa 02	Dupla							x	x													0	0	0 cm		
1	3	Faixa 01	Dupla						x		x								x					0	0	0 cm	OAE	
1	4	Faixa 02	Dupla						x															0	0	0 cm	OAE	
2	5	Faixa 01	Dupla						x		x			x								x	0	0	0 cm	OAE		
2	6	Faixa 02	Dupla				x							x								x	0	0	0 cm	OAE		
3	7	Faixa 01	Dupla						x		x												0	0	0 cm			
3	8	Faixa 02	Dupla				x																0	0	0 cm			

Fonte: Autor (2024)