ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Análise comparativa entre sensores para inspeção periódica de ativos urbanos

Comparative analysis between sensors for periodic inspection of urban assets

Giovanni Bruno Molitor Schiffini
Escola Politécnica da USP | São Paulo | Brasil | giovanni.schiffini@usp.br
Jonathan Chefaly Mochon Zappile
Escola Politécnica da USP | São Paulo | Brasil | jonathanzappile@gmail.com
Renan Pereira de Andrade
Escola Politécnica da USP | São Paulo | Brasil | renanandradep@outlook.com
Flavio Leal Maranhão
Escola Politécnica da USP | São Paulo | Brasil | flavio.maranhao@usp.br

Resumo

Nos grandes centros urbanos, a quantidade de ativos de infraestrutura é muito elevada e seu estado de conservação pode sofrer alterações significativas ao longo do tempo. Inspecionar periodicamente estes ativos é uma tarefa fundamental para evitar prejuízos financeiros e até mesmo acidentes envolvendo os munícipes. Contudo, com orçamentos e equipes de trabalho limitados, realizar o monitoramento adequado destes ativos é difícil e frequentemente a sociedade demonstra descontentamento com a zeladoria urbana. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é comparar as opções de sensores tipicamente empregados para automatizar este monitoramento através da engenharia eletrônica. Para tal, realizou-se uma revisão bibliográfica das principais técnicas atualmente utilizadas e suas respectivas limitações, tanto em custo quanto em frequência de aquisição de dados. Observou-se que a utilização de sensores embarcados, especialmente nas topologias que permitem o sensoriamento coletivo descentralizado, obtém melhor custo-benefício em relação as opções tradicionais, indicando um possível caminho para o monitoramento do ambiente urbano através de sensores de baixo custo.
Palavras-chave: Ativos urbanos. Monitoramento. Sensores embarcados. Internet das Coisas.

Abstract

In large urban centers, the number of infrastructure assets is very high and their state of conservation can undergo significant changes over time. Periodically inspecting these assets is a fundamental task to avoid financial losses and even accidents involving residents. However, with limited budgets and work teams, carrying out adequate monitoring of these assets is difficult and society often shows dissatisfaction with urban janitorial care. In this context, the objective of this work is to compare the sensor options typically used to automate this monitoring through electronic engineering. To this end, a bibliographical review was carried out of the main techniques currently used and their respective limitations, both in cost and

Como citar:
SCHIFFINI, G. B. M.; ZAPPILE, J. C. M.; ANDRADE, R. P.; MARANHÃO, F. L. Análise comparativa entre os tipos de sensores empregados na inspeção periódica de ativos urbanos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

frequency of data acquisition. It was observed that the use of embedded sensors, especially in topologies that allow decentralized collective sensing, obtains better cost-benefit compared to traditional options, indicating a possible way to monitor the urban environment through low-cost sensors.
Keywords: Urban assets. Monitoring. Embedded Sensors. Internet of Things.

INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

Nos grandes centros urbanos, a quantidade de ativos de infraestrutura é muito elevada. Inspecionar estes ativos é uma tarefa essencial, pois os ativos precisam ser inspecionados continuamente, tendo em vista que um defeito pode causar prejuízos financeiros, acidentes e forte descontentamento da municipalidade. Buracos no pavimento asfáltico, queda de árvores e vazamentos na tubulação de água são exemplos de problemas urbanos que causam grande impacto social.

Para a inspeção dos ativos arbóreos, por exemplo, as técnicas mais habituais incluem tomografia acústica, tomografia elétrica e teste de resistividade, além da análise visual [1]. Já para inspecionar os pavimentos, as técnicas consagradas incluem o Merlin, os perfilômetros a laser, os sensores responsivos e finalmente a inspeção visual [2]. A maioria destas técnicas faz necessário enviar equipes humanas, munidas de ferramentas específicas, para inspecionar pessoalmente o local, tornando o processo financeiramente custoso, a inspeção propensa a erros [3] e consequentemente, causando um maior tempo de resposta a esses problemas urbanos por parte do poder público.

Aplicar as recentes tecnologias como sensores conectados à internet e sistemas de informação geográfica (GIS) pode reduzir custos destas inspeções e tornar a gerência do ambiente urbano mais eficaz. Os resultados destas inspeções automáticas podem ser disponibilizados em bancos de dados e na forma de algoritmos de predição de problemas, tornando a tomada de decisão por parte do gestor público muito mais eficiente [4][5]. Contudo, esta nova era de digitalização das cidades apresenta desafios inéditos, como a cibersegurança necessária para impedir ataques maliciosos aos sistemas urbanos e seus respectivos bancos de dados e a rápida manutenção de um sensor que apresente problemas, pois a disponibilização das variáveis ao gestor público depende essencialmente da confiabilidade das leituras de campo [6].

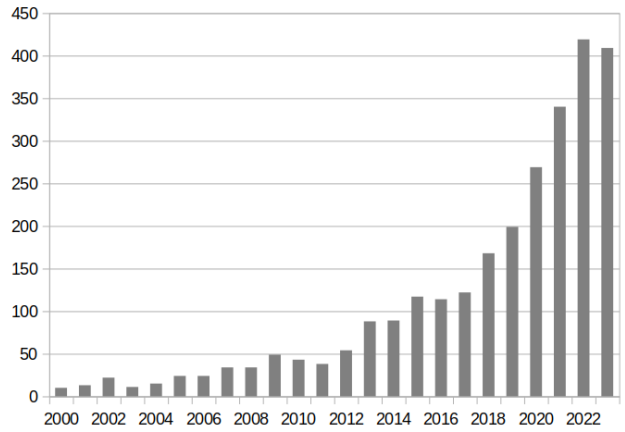
Outro aspecto fundamental é a frequência de aquisição dos dados para fins de monitoramento dos ativos urbanos. Itens como pontes, viadutos, taludes e corpos arbóreos podem ser inspecionados com frequência semestral ou anual, por exemplo. Porém, quando se trata de buracos no pavimento, vazamentos em redes de utilidades ou de pontos de iluminação pública danificados, a inspeção dos locais precisa ocorrer o mais rápido possível, de forma que a utilização de rotinas de inspeção sob demanda não atende satisfatoriamente esses ativos [7]. Portanto, há uma importante lacuna para a redução do intervalo de realização dos processos de inspeção dos ativos urbanos através das ferramentas tecnológicas recentes, como sensores móveis, IoT e colaboração coletiva (*crowdsourcing*). Assim sendo, o presente trabalho objetiva discutir de forma qualitativa as principais técnicas de sensores para inspeção de ativos urbanos.

MÉTODO

O método utilizado para o presente estudo baseia-se na revisão bibliográfica de publicações e artigos sobre os tipos de sensores empregados na inspeção periódica de ativos urbanos. Por meio da revisão, é realizado uma análise crítica sobre: (i) sensores fixos; (ii) imagens de satélite; (iii) sensores móveis; (iv) sensores acoplados a veículos aéreos não-tripulados; (v) sensores embarcados em automóveis; e (vi) sensoriamento coletivo (*crowdsourcing*). Ao término da análise crítica individual dos tipos de sensores, é conduzida uma análise conjunta dos sensores em função de: precisão, área de cobertura, custo, repetibilidade e limitações inerentes ao tipo de sensor.

Para a elaboração deste trabalho, foi efetuada uma revisão da literatura através da base de dados *ScienceDirect*, delimitando o tema a inspeção automática de ativos urbanos com auxílio de algoritmos. Conforme é possível visualizar na Figura 1, a quantidade de publicações nesta área do conhecimento ainda é reduzida, porém apresenta expressivo crescimento desde 2016, justamente quando sensores IoT e bancos de dados de larga escala (*big data*) tornaram-se acessíveis.

Figura 1: Publicações em monitoramento de ativos urbanos através de algoritmos



Fonte: Elsevier (2024).

Neste trabalho, optou-se por restringir as discussões acerca da revisão de literatura somente as técnicas de computação aplicadas ao monitoramento do pavimento urbano, pois este é um dos ativos urbanos mais críticos e de maior dificuldade de inspeção, devido a extensa malha viária de grandes cidades e ao constante deterioramento deste ativo por mera circulação contínua de veículos. Abaixo, são discutidas as principais técnicas de monitoramento do pavimento através de técnicas de sensoriamento modernas.

MAPEAMENTO E ANÁLISE CRÍTICA DE SENSORES PARA INSPEÇÃO DE PAVIMENTO URBANO

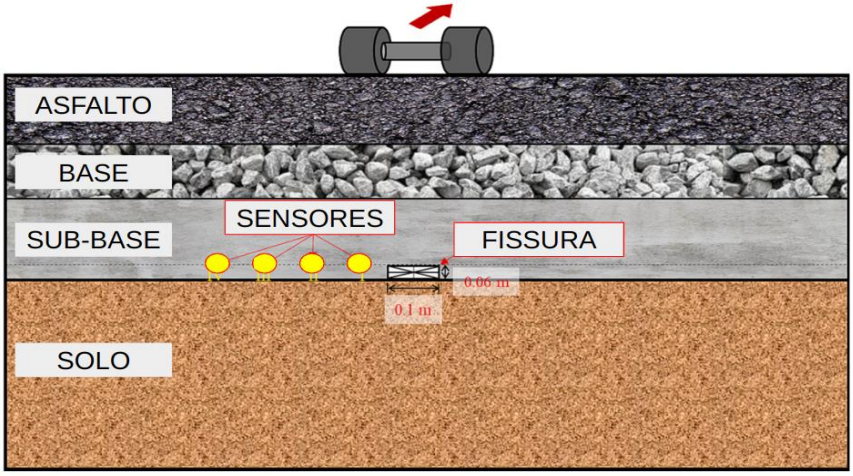
SENSORES FIXOS

A primeira técnica de engenharia eletrônica que permite a otimização da inspeção dos ativos em ambiente urbano consiste na utilização de sensores fixos. Estes sensores, como o nome pressupõe, estão instalados em um ponto geograficamente fixo, não

sendo capazes de oferecer medições de pontos distantes pertencentes ao mesmo sistema.

Para a inspeção da condição dos pavimentos, o monitoramento pode ser realizado através de sensores fixos de deformação localizados na camada de sub-base do pavimento, como demonstrado na Figura 2.

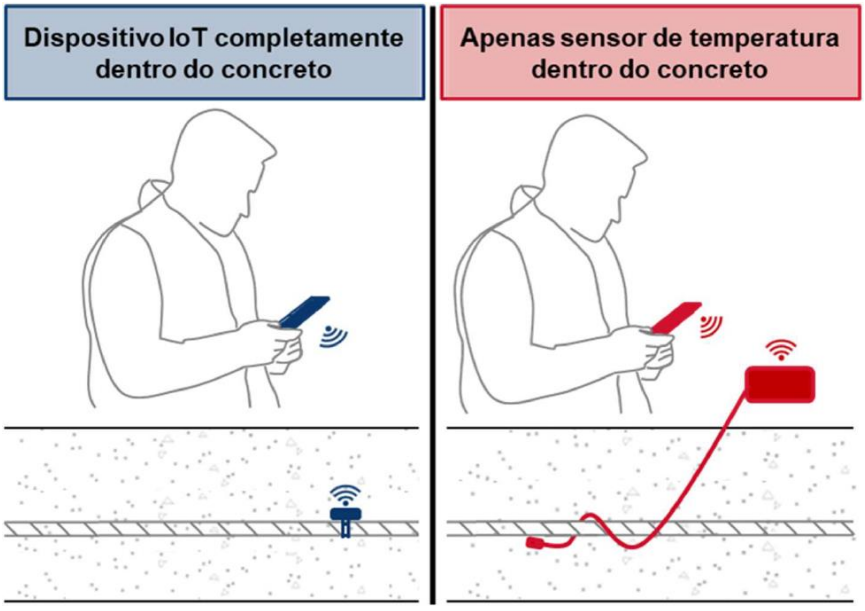
Figura 2: Diagrama esquemático de instalação de sensores fixos no pavimento



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2022, p. 5).

Outra opção de sensores fixos são os sensores de temperatura que efetuam medidas da maturidade do concreto [8], que podem ter seus dados transmitidos por tecnologias sem fio [9][10] ou por conexões cabeadas [11] (Figura 3). Também podem ser utilizados sensores que detectam pequenas alterações na passagem de luz por através de uma fibra óptica instalada sob o pavimento [12].

Figura 3: Formas de instalação de sensores fixos em elementos de concreto



Fonte: Zappile et al. (2022).

A utilização de sensores fixos para o monitoramento de ativos tem como vantagem a precisão satisfatória das medições, pois os sensores encontram-se em posição ideal para a leitura dos dados. Trata-se de uma técnica consagrada e amplamente validada.

Uma desvantagem envolvendo a utilização de sensores fixos está na transmissão de dados. Utilizar sensores cabeados, embora seja mais barato, faz necessária uma quantidade muito grande de cabos, o que torna a aplicação em larga escala inviável. Tecnologias mais recentes para a transmissão de dados sem fio incluem ZigBee e Bluetooth, com alcance de poucos metros e instabilidade de sinal, e o protocolo de rádio frequência de longo alcance LoRa. A transmissão de dados por LoRa atinge distâncias de 2km até 5km em ambiente urbano [13] e apresenta segurança de conexão muito superior [14], sendo uma boa alternativa para coleta de dados de monitoramento de ativos.

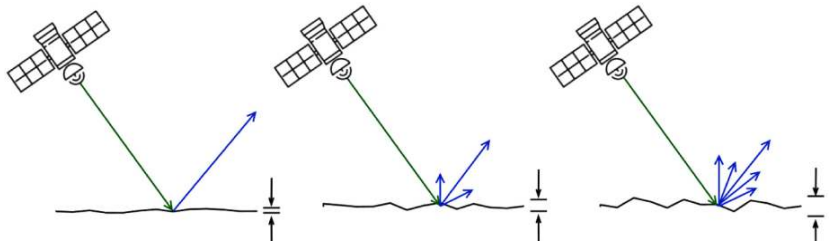
Além disso, seriam necessários centenas de milhares de sensores fixos para monitorar a contento as vias públicas de uma cidade de grande porte, incluindo também a manutenção e substituição periódica destes sensores, implicando em um custo possivelmente proibitivo para adotar um sistema como esse em uma metrópole.

IMAGENS DE SATÉLITE

No século passado, as imagens aéreas eram obtidas através de aerofotogrametria. O processo era custoso, pois envolvia todos os encargos de um voo de aeronave, e as câmeras fotográficas ofereciam resoluções baixas, impedindo um detalhamento adequado das imagens. Nas últimas décadas, com o advento das câmeras de alta definição equipadas em satélites, foi possível aplicar esta tecnologia em diversas áreas. As imagens provenientes de satélite são de grande valia para os gestores públicos no monitoramento urbano. Um exemplo de aplicação para esta tecnologia é a delimitação de lotes urbanos e o acompanhamento da modificação de edificações ao longo do tempo [15] para fins legais e tributários. Esta técnica também pode ser utilizada para mapear a degradação ambiental e as ocupações de áreas de risco em ambientes urbanos [16].

No que tange ao monitoramento contínuo de pavimentos, a utilização somente de imagens provenientes de satélite apresenta menor eficiência, pois a detecção de fissuras ou pequenos buracos é muito difícil em imagens desse tipo, mesmo quando a resolução é excelente. Por este motivo, se faz necessário utilizar outros tipos de sensores para o monitoramento de pavimentos via satélite, por exemplo os radares de abertura sintética (SAR), que mapeiam de forma tridimensional o ambiente com ondas de rádio [17]. No trabalho conduzido por Bashar et al. [18] utilizou-se imagens provenientes de radares do tipo SAR, demonstradas na Figura 4, que foram posteriormente comparadas com imagens de satélite e corrigidas conforme a elevação do terreno, compondo um banco de dados de imagens filtradas. Um algoritmo foi treinado com base nesse banco de dados e apresentou acurácia de 81% para a determinação do IRI, o índice de rugosidade do pavimento no local.

Figura 4: Utilização de satélites tipo SAR para determinação de irregularidades do pavimento



Fonte: Bashar et al. (2022, p. 2).

Empecilhos como a baixa taxa de atualização de imagens, a presença de obstáculos para a visualização do pavimento e a resolução de imagem insuficiente fazem com que os métodos por satélite ainda não apresentem maturidade suficiente para que se obtenha altos índices de acurácia com boa repetibilidade de leitura, tornando necessário associar as imagens de satélite a alguma outra fonte de dados e impedindo a aplicação exclusivamente destes métodos para o monitoramento periódico de ativos no ambiente urbano.

SENSORES MÓVEIS

Os sensores móveis despontam como uma alternativa para cobrir longas distâncias dispondo de uma quantidade de equipamentos mais racionalizada. Estes métodos consistem em utilizar sensores sem que estes estejam atrelados fisicamente a um ponto específico dentro do sistema monitorado. Os sensores podem ser transportados de um ponto para o outro, seja a pé, por veículos terrestres ou por veículos aéreos [19]. Devido a esta flexibilidade, podem ser embarcados em uma série de veículos, como será explorado a seguir.

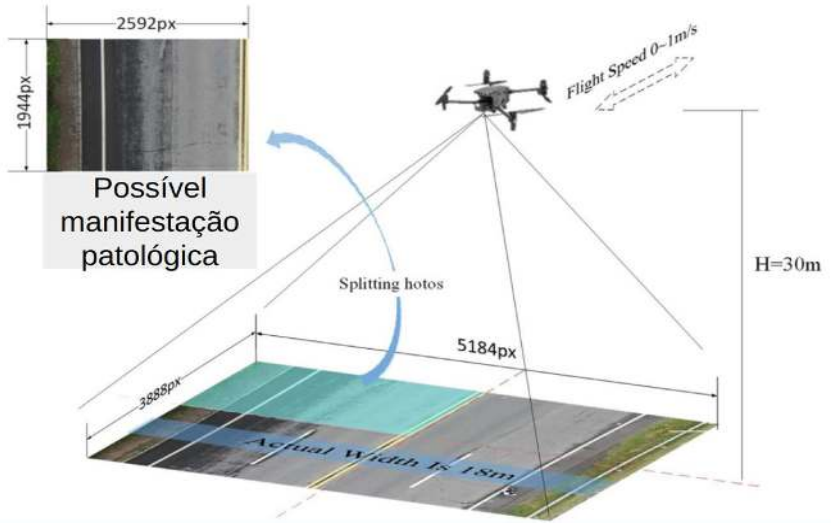
SENSORES ACOPLADOS A VEÍCULOS AÉREOS NÃO-TRIPULADOS

Um exemplo de aplicação de sensores móveis é a sua instalação em veículos aéreos não-tripulados (VANT), popularmente conhecidos como drones. Estes veículos possuem, tipicamente, um sistema de GPS já integrado ao *hardware* do drone e mesmo quando o GPS estiver sem alcance de sinal a localização do veículo pode ser estimada com o uso de algoritmos [20]. Desta forma, os veículos aéreos não-tripulados são uma opção de baixo custo e boa eficiência para acompanhamento e vistorias em campo.

Dentro da esfera de monitoramento de ativos urbanos, há diversas pesquisas com objetivo de acompanhar o estado do pavimento viário através de imagens obtidas por veículos aéreos não-tripulados, conforme exemplificado na Figura 5. Existem bancos de dados (*datasets*) de acesso público, elaborados a partir de imagens oriundas de drones, nos quais foram marcados objetos de interesse como fissuras, buracos, reparos asfálticos, poços de visita e paralelepípedos [21][22][23]. Devido à altura de voo do equipamento, as fotografias são obtidas a uma distância considerável do pavimento, podendo ultrapassar dezenas de metros. Por este motivo, torna-se necessário planejar cuidadosamente o roteiro de voo e a sobreposição entre as fotografias obtidas pelo VANT, além de utilizar câmeras com resolução altíssima, em alguns casos ultrapassando o padrão 8k [24]. Diversos tratamentos podem ser

aplicados às imagens obtidas pelo drone, de modo a auxiliar o algoritmo no processamento e classificação automática das imagens. Aumento de contraste, verificação de homogeneidade e entropia e regulações da escala de cinza das imagens estão entre os tratamentos aplicados [25]. Também é possível equipar os veículos aéreos não-tripulados com sensores de medição remotos de detecção e alcance de luz (LIDAR) e utilizar estes dados para detectar e catalogar buracos, fissuras e escorregamentos no pavimento [26].

Figura 5: Utilização de UAV equipados com câmeras para escaneamento do pavimento



Fonte: Adaptado de Yan et al. (2023, p. 6).

Os veículos aéreos não-tripulados podem ser aliados importantes na inspeção de ativos urbanos, sendo mais rápidos e mais baratos do que as inspeções manuais e oferecendo imagens com detalhamento superior àquelas obtidas por satélites, devido a distância de captura ser muito menor. Contudo, diversas barreiras ainda impedem a adesão dos VANT como principal método de inspeção de ativos urbanos: os voos não podem ser longos, devido a autonomia de bateria do equipamento, que tipicamente não ultrapassa uma hora. Além disso, ainda não há tecnologia suficiente para dispensar o operador humano do drone, exigindo, portanto, a presença de um profissional capacitado e habilitado presente *in loco* para as inspeções. Outros custos adicionais, como os seguros necessários e as licenças de voo também encarecem o processo e desestimulam a sua repetibilidade.

SENSORES EMBARCADOS EM AUTOMÓVEIS

Embarcar sensores, câmeras e dispositivos em veículos apresenta grande vantagem competitiva em relação aos outros métodos apresentados acima, pois a área geográfica que pode ser coberta por um automóvel em um dia, com boa resolução e repetibilidade, é maior do que a área coberta por sensores fixos ou drones. Além disso, é consideravelmente mais fácil encontrar um motorista para o veículo do que um piloto para um drone. Contudo, é importante observar que embarcar os sensores em automóveis só auxilia no monitoramento de ativos que estejam localizados na via pública, pois o automóvel não acessa outros locais.

Uma opção para o monitoramento contínuo de pavimentos consiste em instalar sensores de vibração ou acelerômetros nos veículos para obter medições descentralizadas do índice de rugosidade superficial do pavimento, também conhecido como IRI. O *International Roughness Index*, apresentado em 1986, é uma das medidas mais utilizadas para a aferição da condição superficial do pavimento, apresentando inclusive o menor erro-padrão quando comparado a outras unidades de medida [27]. Para monitorar o índice de rugosidade ao longo da via, uma opção é utilizar *smartphones* fixados no interior da cabine do veículo. Os telefones celulares modernos possuem acelerômetros e sistemas de GPS, permitindo o cruzamento de uma medição de rugosidade com a sua respectiva coordenada de GPS, processadas através de um aplicativo Android [28]. Contudo, este método apresenta baixa repetibilidade, pois fatores como o local exato de fixação do smartphone, o modelo do veículo, o estado de conservação da suspensão e dos pneus, entre outros, causam diferenças significativas nas medições.

Outra opção para este monitoramento é a instalação de sensores acelerômetros embarcados diretamente em um eixo do automóvel, como pode ser visto na Figura 6 [29]. Um *smartphone* pode ser utilizado para coletar via *bluetooth* os dados do sensor embarcado e adicionar a cada medição a sua respectiva coordenada GPS [30]. A vantagem de instalar o sensor diretamente no eixo do veículo é a eliminação de variáveis como o modelo do veículo, o estado de conservação do seu sistema de amortecimento e a posição de instalação do celular. As medições do sensor acelerômetro podem ser tratadas matematicamente para que se obtenha, finalmente, o índice de rugosidade superficial. Estas medições oriundas do acelerômetro também podem ser utilizadas para alimentar algoritmos de inteligência artificial e determinar, automaticamente, se o pavimento é asfáltico, de concreto, de paralelepípedos ou leito natural [31].

Figura 6: Instalação de sensor acelerômetro embarcado em automóvel



Fonte: Adaptado de Paixão, M. (2021, p. 23).

Apesar destes benefícios, o método de inspeção do pavimento através da instalação de sensores inerciais no veículo apresenta uma importante limitação: para defeitos como buracos na via ou sarjetões danificados, o motorista do veículo tem a tendência natural de desacelerar muito ou desviar a rota do veículo para evitar danos a roda ou a suspensão. Desta forma, sensores inerciais não são boas alternativas para encontrar

defeitos pontuais na via, como buracos (panelas), sarjetões danificados, lombadas danificadas ou fissuras.

Para a detecção destes objetos, faz-se necessário a instalação de câmeras embarcadas no veículo com o auxílio de algoritmos de visão computacional. Uma possibilidade é o desenvolvimento de aplicações Android que utilizam a câmera e o sistema de GPS do *smartphone* e o auxílio de *softwares* abertos de visão computacional, como o OpenCV, para a detecção em tempo real de buracos e fissuras no pavimento [32]. Neste caso, o *smartphone* pode ser fixado internamente ao para-brisa, com o auxílio de um suporte comum com ventosa.

Câmeras embarcadas em automóveis também podem auxiliar no escaneamento tridimensional do pavimento, de forma a prover dados para o treinamento de algoritmos de inteligência artificial e posteriormente detectar de forma automática buracos, fissuras, recomposições asfálticas, entre outros defeitos [33]. As imagens provenientes de câmeras embarcadas também podem ser utilizadas como método para a medição estimada do Índice de Rugosidade Superficial (IRI), através de técnicas de transformação de perspectiva [34].

CROWDSOURCING

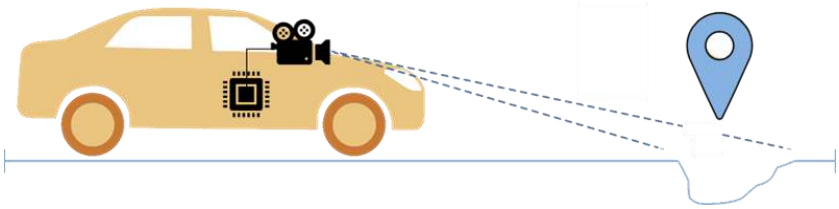
Estes sensores ou câmeras instalados em veículos, citados acima, podem coletar dados através de duas ideologias diferentes: utilizando uma frota dedicada, na qual veículos e motoristas estão empenhados especificamente para a função de coleta dos dados, ou através de coleta de dados comunitária, geralmente conhecida como *crowdsourcing*. No caso de uma frota dedicada, os custos com pessoal e combustível são elevados e a repetibilidade é baixa. Tomando como exemplo o município de São Paulo-SP, que possui 17.000km de vias urbanas, um mesmo veículo levaria muito tempo para repetir um local de inspeção, de tal forma que um buraco na via, por exemplo, poderia levar semanas ou meses para ser reportado. Esse processo de monitoramento e a abertura de ordens de serviço para reparos de defeitos podem ser muito otimizados através de sensoriamento coletivo.

Um exemplo de sensoriamento coletivo são os aplicativos de mobilidade urbana: a partir dos dados de sensores de GPS, direção e velocidade de dezenas de milhares de *smartphones*, as plataformas como o Google Maps ou o Waze concatenam esses dados, agrupam-nos geograficamente e efetuam cálculos matemáticos para determinar qual a melhor rota e qual será o tempo de viagem de cada motorista. É importante observar que cada motorista, individualmente, conhece apenas o seu trajeto e os seus dados disponibilizados, contudo o sistema só pode funcionar se houver milhares de contribuições. Os sistemas de *crowdsourcing* apresentam como característica o baixo custo, pois tipicamente o responsável pelo envio dos dados não estava empregado especificamente na tarefa de coletá-los ou de reportar algum problema [35].

A utilização de sensoriamento coletivo para a coleta de dados no ambiente urbano possui aplicações em monitoramento de ativos e seus respectivos defeitos. Sensores ou câmeras embarcadas podem ser instalados em táxis, carros de transporte por

aplicativo, ônibus e caminhões com a finalidade de coletar os dados de forma descentralizada e aleatória, como pode ser visto na Figura 7. Neste caso, cada veículo efetuará suas viagens normalmente, sem se dirigir especificamente a um local do município no qual alguma inspeção deve ser realizada. Em cada logradouro que cada veículo percorrer, serão efetuadas leituras para alimentar bancos de dados de larga escala (*big data*). Sistemas de medição da qualidade do pavimento [36][37] podem ser alimentados por dados oriundos de veículos ou *smartphones* de civis, em um processo também conhecido como *citizen-sensed*.

Figura 7: Diagrama esquemático de instalação de câmera em veículo não-dedicado. Com a utilização de processamento embarcado, é possível detectar em tempo real a presença de manifestações patológicas no pavimento, independentemente da ação do condutor do veículo.



Fonte: Autor (2024).

ANÁLISE COMPARATIVA DOS SENSORES

O Quadro 1 resume as principais características dos sensores avaliados no presente trabalho, segmentando-os em vantagens e desvantagens.

Quadro 1: Análise comparativa de sensores para monitoramento de ativos urbanos

Tipo de monitoramento	**Precisão**	**Área de cobertura**	**Custo**	**Repetibilidade**	**Limitações**
Sensores fixos	Alta	Baixa	Razoável	Alta	Bateria e necessidade de profissional para instalação *in loco*
Imagens de satélite	Baixa	Alta	Alto	Alta	Baixa taxa de atualização e resolução das imagens
Sensores em VANT	Baixa	Alta	Razoável	Alta	Baixa autonomia no percurso devido a bateria
Sensores em automóveis dedicados (frota própria)	Razoável	Alta	Alto	Baixa	Limitado a vias urbanas e ao orçamento para contratação de veículos.
Sensores em automóveis com *crowdsourcing*	Razoável	Razoável	Razoável	Alta	Limitado a vias urbanas e ao sinal de internet para transferência de dados

Fonte: o autor (2024).

Dentre as opções para monitoramento de ativos urbanos com o auxílio da engenharia eletrônica, a utilização de sensores fixos traz como vantagem para o gestor público a alta precisão e a alta repetibilidade da coleta de dados. Contudo, aplicações como o pavimento viário e os ativos arbóreos exigem uma quantidade muito elevada de sensores fixos, tornando sua utilização para estes fins inviável.

A obtenção aérea de imagens, por satélite ou VANT, proporciona uma boa base de dados de imagens para o município. Contudo, a taxa de atualização destes sensores não atende o monitoramento de ativos que exigem resposta rápida, como pavimento, vazamentos de água ou semáforos quebrados.

Para estas aplicações destaca-se a utilização de sensores móveis acoplados a automóveis, que apesar da menor precisão, possuem grande área de cobertura a um custo racionalizado. O sensoriamento coletivo (*crowdsourcing*) é uma alternativa ainda melhor, pois permite que os próprios cidadãos coletem, armazenem e transmitam dados relevantes, utilizando seus aparelhos de celular ou pequenos *hardwares* dedicados, com custo reduzido.

Esta é uma área do conhecimento que ainda é incipiente, portanto, novas técnicas e tipos de sensores surgem a cada ano e abrem um leque de possibilidades cada vez maior para o monitoramento contínuo, barato e eficiente de ativos urbanos.

CONCLUSÃO

Com os recentes avanços na engenharia eletrônica, novas técnicas de sensoriamento foram introduzidas, possibilitando ganhos significativos na qualidade e no custo das inspeções de ativos urbanos. Com o advento da internet das coisas (IoT) e dos algoritmos de aprendizado de máquina, tornou-se possível coletar, processar e analisar um volume imenso de dados quase em tempo real.

O presente artigo abordou os diversos tipos de sensores disponíveis no mercado hoje para inspeção de ativos em meios urbanos. Foram apresentadas as principais características, vantagens e desvantagens de cada tipo de sensor disponível. Em uma visão geral, o trabalho pode trazer subsídios para tomada de decisão quanto a seleção do tipo de sensor em função do objetivo de estudo.

O correto dimensionamento dos sensores pode trazer diversos benefícios para o usuário e respectivos *stakeholders.* Assim, como sugestão para trabalhos futuros aconselha-se que sejam aprofundados os estudos na área de sensoriamento e a elaboração de uma metodologia para sugestão do tipo de sensores a partir de características específicas do ativo urbano a ser estudado como: precisão, área de cobertura, custo, repetibilidade e limitações inerentes ao tipo de sensor.

REFERÊNCIAS

[1] PAPANDREA, S. F.; CATALDO, M. F.; ZIMBALATTI, G.; PROTO, A. R. Comparative evaluation of inspection techniques for decay detection in urban trees. **Sensors and Actuators** A: Physical, v. 340, 2022, 113544. ISSN 0924-4247. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113544.

[2] TOMIYAMA, K., et al. A mobile profilometer for road surface monitoring by use of accelerometers. **7th Symposium on Pavement Surface Characteristics: SURF** 2012. p. 1–10, 2012.

[3] STUBBINGS, P.; PESKETT, J.; ROWE, F.; ARRIBAS-BEL, D. A Hierarchical Urban Forest Index Using Street-Level Imagery and Deep Learning. **Remote Sens**., 2019, 11, 1395. doi:10.3390/rs11121395.

[4] TRILLES, S.; CALIA, A.; BELMONTE, Ó.; TORRES-SOSPEDRA, J.; MONTOLIU, R.; HUERTA, J. Deployment of an open sensorized platform in a smart city context. **Future Generation Computer Systems**, v. 76, 2017, p. 221-233. ISSN 0167-739X. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.future.2016.11.005.

[5] ADAM, M. S.; ANISI, M. H.; ALI, I. Object tracking sensor networks in smart cities: Taxonomy, architecture, applications, research challenges and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 107, 2020, p. 909-923. ISSN 0167-739X. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.future.2017.12.011.

[6] ASHRAF, S. A proactive role of IoT devices in building smart cities. **Internet of Things and Cyber-Physical Systems**, v. 1, 2021, p. 8-13. ISSN 2667-3452. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2021.08.001.

[7] GU, Y.; LIU, Y.; LIU, D.; HAN, L. D.; JIA, X. Spatiotemporal kernel density clustering for wide area near Real-Time pothole detection. **Advanced Engineering Informatics**, v. 60, 2024, 102351. ISSN 1474-0346. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102351.

[8] GIATEC. **Giatec Scientific Home**. 2023. Disponível em: https://www.giatecscientific.com/. Acesso em: 24 dez. 2023.

[9] WANG, N.; HAN, T.; CHENG, H.; LI, T.; FU, J.; MA, T.; FU, Y.; CHEN, F.; ZHANG, Y. Monitoring structural health status of asphalt pavement using intelligent sensing technology. **Construction and Building Materials**, v. 352, 2022. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129025.

[10] ZAPPILE, J. C. M. **Desenvolvimento de sensor baseado em IoT para monitoramento contínuo das propriedades do concreto moldado in loco "brita eletrônica"**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

[11] HAN, D.; LIU, G.; XI, Y.; XIA, X.; ZHAO, Y. Real-time monitoring of strain and modulus of asphalt pavement using built-in strain sensor cluster. **Construction and Building Materials**, v. 384, 2023, 131413. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131413.

[12] BAO, M.; TIAN, Y.; LIU, S.; LING, J.; XIANG, P.; ZHAO, X.; LIU, L.; WU, J. A data-driven approach to the strength evaluation of airfield rigid pavement using in situ instrumentation data. **Construction and Building Materials**, v. 409, 2023, 133824. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133824.

[13] PRADE, L.; MORAES, J.; DE ALBUQUERQUE, E.; ROSÁRIO, D.; BOTH, C. B. Multi-radio and multi-hop LoRa communication architecture for large scale IoT deployment. **Computers and Electrical Engineering**, v. 102, 2022. ISSN 0045-7906. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108242

[14] ELDEFRAWY, M.; BUTUN, I.; PEREIRA, N.; GIDLUND, M. Formal security analysis of LoRaWAN. **Computer Networks**, v. 148, 2019, p. 328-339. ISSN 1389-1286. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.11.017.

[15] JIANG, H.; PENG, M.; ZHONG, Y.; XIE, H.; HAO, Z.; LIN, J.; MA, X.; HU, X. A Survey on Deep Learning-Based Change Detection from High-Resolution Remote Sensing Images. **Remote Sens**., 2022, 14, 1552. https://doi.org/10.3390/rs14071552.

[16] METZLER, A. B.; NATHVANI, R.; SHARMANSKA, V.; BAI, W.; MULLER, E.; MOULDS, S.; AGYEI-ASABERE, C.; ADJEI-BOADI, D.; KYERE-GYEABOUR, E.; DOKU TETTEH, J.; OWUSU, G.; AGYEI-MENSAH, S.; BAUMGARTNER, J.; ROBINSON, B. E.; ARKU, R. E.; EZZATI, M. Phenotyping urban built and natural environments with high-resolution satellite images and unsupervised deep learning. **Science of The Total Environment**, Volume 893, 2023. ISSN 0048-9697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164794.

[17] OZDENA, A.; FAGHRIA, A.; LIA, M.; TABRIZIB, K. Evaluation of Synthetic Aperture Radar Satellite Remote Sensing for Pavement and Infrastructure Monitoring. **Procedia Engineering** 145, 2016, p 752 – 759. doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.098.

[18] BASHAR, M. Z.; TORRES-MACHI, C. Deep learning for estimating pavement roughness using synthetic aperture radar data. **Automation in Construction**, Volume 142, 2022. ISSN 0926-5805. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104504.

[19] WU, H.; YAO, L.; XU, Z.; LI, Y.; AO, X.; CHEN, Q.; LI, Z.; MENG, B. Road pothole extraction and safety evaluation by integration of point cloud and images derived from mobile mapping sensors. **Advanced Engineering Informatics**, v. 42, 2019. ISSN 1474-0346. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100936.

[20] NASSAR, A.; AMER, K.; ELHAKIM, R.; ELHELW, M. A Deep CNN-Based Framework For Enhanced Aerial Imagery Registration with Applications to UAV Geolocalization. **Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops**. 2160-7516/18, 2018, IEEE. DOI 10.1109/CVPRW.2018.00201.

[21] YAN, H.; ZHANG, J. UAV-PDD2023: A benchmark dataset for pavement distress detection based on UAV images. **Data in Brief**, Volume 51, 2023. ISSN 2352-3409. https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109692.

[22] ATENCIO, E.; PLAZA-MUÑOZ, F.; MUÑOZ-LA RIVERA, F.; LOZANO-GALANT, J. A. Calibration of UAV flight parameters for pavement pothole detection using orthogonal arrays. **Automation in Construction**, Volume 143, 2022. ISSN 0926-5805. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104545.

[23] GARILLI, E.; BRUNO, N.; AUTELITANO, F.; RONCELLA, R.; GIULIANI, F. Automatic detection of stone pavement's pattern based on UAV photogrammetry. **Automation in Construction**, Volume 122, 2021. ISSN 0926-5805. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103477.

[24] ZHU, J.; ZHONG, J.; MA, T.; HUANG, X.; ZHANG, W.; ZHOU, Y. Pavement distress detection using convolutional neural networks with images captured via UAV. **Automation in Construction**, v. 133, 2022. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103991.

[25] HE, J.; SHAO, L.; LI, Y.; WANG, K.; LIU, W. Pavement damage identification and evaluation in UAV-captured images using gray level co-occurrence matrix and cloud model. **Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences**, Volume 35, Issue 9, 2023. ISSN 1319-1578. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101762.

[26] VAN DER HORST, B. B.; LINDENBERGH, R. C.; PUISTER, S. W. J. Mobile laser scan data for road surface damage detection. Int. Arch. Photogramm. **Remote Sens. Spatial Inf. Sci**., XLII-2/W13, 1141–1148, 2019. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1141-2019.

[27] SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, C. A. V. The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements. **Transportation Research Record**. 1986.

[28] LIMA, L. C.; AMORIM, V. J. P.; PEREIRA, I. M.; RIBEIRO, F. N.; OLIVEIRA, R. A. R. Using Crowdsourcing Techniques and Mobile Devices for Asphaltic Pavement Quality Recognition. **VI Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering**. 978-1-5090-2653-1/16. 2016 IEEE. DOI 10.1109/SBESC.2016.26.

[29] DU, Y.; LIU, C.; WU, D.; JIANG, S. Measurement of International Roughness Index by Using Z-Axis Accelerometers and GPS. **Mathematical Problems in Engineering**, Volume 2014, Article ID 928980. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1155/2014/928980.

[30] PAIXÃO, M. J. S. **Determinação da irregularidade superficial do pavimento por meio dos dados de sensores de aceleração vertical obtidos por medição descentralizada**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

[31] LIMA, G. de S. **Detecção de anomalias em pavimentos utilizando sensores inerciais**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2023.

[32] TEDESCHI, A.; BENEDETTO, F. A real-time automatic pavement crack and pothole recognition system for mobile Android-based devices. **Advanced Engineering Informatics**, Volume 32, 2017, Pages 11-25. ISSN 1474-0346. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.12.004.

[33] LI, P.; ZHOU, B.; WANG, C.; HU, G.; YAN, Y.; GUO, R.; XIA, H. CNN-based pavement defects detection using grey and depth images. **Automation in Construction**, Volume 158, 2024, 105192. ISSN 0926-5805. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105192.

[34] ZENG, J.; GÜL, M.; MEI, Q. A computer vision-based method to identify the international roughness index of highway pavements. **Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience**, Volume 1, Issue 1, 2022. ISSN 2772-9915. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.iintel.2022.100004.

[35] MISRA, A.; GOOZE, A.; WATKINS, K.; ASAD, M.; LE DANTEC, C. A. Crowdsourcing and Its Application to Transportation Data Collection and Management. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, No. 2414, D.C., 2014, pp. 1–8. DOI: 10.3141/2414-01.

[36] STANIEK, M. Road pavement condition diagnostics using smartphone-based data crowdsourcing in smart cities. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** (English Edition), Volume 8, Issue 4, 2021, Pages 554-567. ISSN 2095-7564. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.09.004.

[37] LI, T.; SURVE, T.; THOMPSON, E.; TAO, C.; BIAN, Y. Towards Human-Centered Pavement Quality Annotation with Crowdsourcing. **Procedia Computer Science**, Volume 224, 2023, Pages 266-273. ISSN 1877-0509. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.09.036.