

MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS ATRAVÉS DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS: COLISEU DE ROMA COMO ESTUDO DE CASO

Universidade Presbiteriana Mackenzie
Coordenadoria de Fomento à Pesquisa - Pró-reitoria de Pesquisa e
Pós-Graduação

Sophia de Barros Suzuki ¹

Apoio:*PIBIC Mackenzie*

Guilherme Antônio Michelin ²

Escola de Engenharia (EE) ¹

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo ²

<10417050@mackenzista.com.br>

<guilherme.michelin@mackenzie.br>

RESUMO

Conservar patrimônios históricos apresenta muitos desafios. Porém, com o avanço tecnológico, os ensaios não destrutivos (END) foram evoluindo, permitindo uma inspeção mais precisa dessas construções. O objetivo principal deste projeto foi analisar e comparar os métodos e END mais empregados atualmente em construções históricas, utilizando o Coliseu de Roma como estudo de caso. A motivação surgiu pela falta de formação específica sobre o assunto nos cursos de engenharia e arquitetura no Brasil. A abordagem utilizada incluiu referencial teórico, análise de normas técnicas, pesquisa de campo e experimentos laboratoriais, com assistência de profissionais especializados. Os resultados indicaram que técnicas como drones, termografia infravermelha, sensores de vibração e ultrassom são eficientes para monitorar construções antigas. No entanto, a utilização dessas técnicas ainda é restrita por conta do alto custo e por falta de profissionais qualificados. O estudo destaca o potencial dos ENDs na preservação do patrimônio e a importância de incorporar esses conhecimentos na educação acadêmica. Como continuidade, propõe-se aprofundar os estudos em edificações brasileiras e criar manuais para a aplicação das tecnologias.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, conservação, inspeção, patrimônio histórico, Coliseu.

ABSTRACT

Preserving historical heritage presents several challenges. However, with technological advancements, non-destructive testing (NDT) methods have evolved, allowing for more precise inspection of these constructions. The main objective of this project was to analyze and compare the most commonly employed non-destructive methods and equipment currently used in historical buildings, using the Colosseum in Rome as a case study. The motivation stemmed from the lack of specific training on this subject in engineering and architecture programs in Brazil. The approach included a theoretical framework, analysis of technical standards, field research, and laboratory experiments with the support of specialized professionals. The results indicated that techniques such as drones, infrared thermography, vibration sensors, and ultrasound are effective for monitoring ancient structures. However, the use of these techniques is still limited due to high costs and the lack of qualified professionals. The study highlights the potential of NDT in heritage preservation and the importance of incorporating this knowledge into academic education. As a continuation, it is proposed to deepen studies in Brazilian buildings and develop manuals for the application of these technologies.

Keywords: non-destructive testing, conservation, monitoring, historical heritage, Colosseum.

1. INTRODUÇÃO

Diversos são os métodos para a inspeção e o monitoramento de construções, podendo dividir basicamente em processos destrutivos e não destrutivos. Para a realização de inspeções em construções históricas deve-se sempre privilegiar os processos não destrutivos para minimizar riscos de danos. Com o avanço tecnológico, ampliaram-se as opções para realizar esses procedimentos, as quais apesar de já serem utilizadas na indústria da construção civil, ainda são pouco abordadas e ensinadas nas universidades. Esta pesquisa consiste em analisar os ensaios não destrutivos (END) que mais são utilizados na inspeção de construções históricas, utilizando como estudo de caso o Coliseu de Roma, uma estrutura de dois mil anos, inspecionada com alta frequência com diversas restrições a serem levadas em conta.

1.1 Problema de Pesquisa

A partir do avanço tecnológico dos últimos anos, diversos métodos e END foram criados, desenvolvidos ou adaptados para o uso na indústria da construção civil, ampliando as possibilidades e formas de se realizar inspeção e monitoramentos em construções históricas. A maioria dessas construções tem uma estrutura antiga, o que dificulta a coleta de informações e dados, tornando a própria construção o documento mais importante e mais fiel para a análise.

Por serem consideradas patrimônio cultural, deve-se evitar ao máximo qualquer intervenção desnecessária ou que coloque em risco seu conjunto, seja na sua estrutura, na parte externa ou interna. Dessa forma, com o avanço da tecnologia surgiram, e foram aprimorados, diversos END, que começaram a ser utilizados com mais frequência em inspeções e monitoramentos. Porém, a falta de incorporação desses conhecimentos de forma mais efetiva nos cursos de graduação impacta diretamente na falta de profissionais na área.

Portanto, a realização do monitoramento e da inspeção em construções históricas, apesar de ter um grande potencial, ainda encontra problemas e desafios devido à necessidade de conservar toda a estrutura e os materiais, à restrição de dados e à dificuldade de acesso a alguns locais. Em construções como o Coliseu, são utilizados alguns END já conhecidos, sempre com foco na preservação.

1.2 Justificativa

As inspeções e os monitoramentos detalhados são de extrema importância para a manutenção das construções históricas (CALDANA JUNIOR; ROLIM; MICHELIN, 2021). Com o avanço tecnológico nessa área, realizar um estudo sobre o potencial END para a análise

dos dados obtidos em construções históricas, como as que foram utilizadas no Coliseu, é de extrema importância para o aumento do conhecimento na área e capacitação de profissionais.

A dificuldade de realizar inspeções nesses tipos de estrutura também é enorme. Diversos fatores dificultam sua análise, como o valor cultural, sua sensibilidade e a falta de conhecimentos prévios. O Coliseu, mesmo tendo sido construído há cerca de dois mil anos, já ter passado por terremotos, destruições por ações antrópicas e tendo parte de sua estrutura original destruída, segue atraindo muitos turistas. São as inspeções frequentes e detalhadas que permitem que isso ocorra com segurança.

O Coliseu, sofreu uma de suas primeiras inspeções — na época não eram assim denominadas — no início do século XVIII. A partir dessa iniciativa outros monumentos passaram a contar com essa precaução (UNESCO, 1987). Com o passar dos anos e o descobrimento de novas formas de realizar essas inspeções, os métodos devem ser sempre reavaliados para serem aplicados de acordo com cada construção histórica.

A identificação de uma precariedade de conhecimentos na área está sendo abordada por diversos profissionais, como no projeto MackPesquisa “Desenvolvimento de metodologias para inspeção de obras civis utilizando tecnologias inovadoras”, de onde este trabalho de Iniciação Científica é derivado, tentando evoluir e aumentar os conhecimentos na área de estudo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Elencar e estudar os equipamentos mais adequados para monitoramento e inspeção de construções históricas atualmente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Elencar os métodos e equipamentos não destrutivos mais utilizados na inspeção e no monitoramento do Coliseu;
- Comparar os métodos e equipamentos mais utilizados antes e após o avanço tecnológico para inspecionar construções históricas;
- Elencar as normas brasileiras atualmente em vigor sobre o uso de métodos não destrutivos em edificações;
- Desenvolver pesquisas de campo ou experimentos laboratoriais para testar alguns dos equipamentos utilizados na inspeção do Coliseu;

1.4 Relevância e Contribuição

O objetivo deste estudo é aprimorar o entendimento e a disseminação do emprego de ensaios não destrutivos na avaliação de edificações históricas, enfatizando a demanda por especialização e progresso tecnológico nesse campo. Ao examinar o Coliseu como um caso de estudo, a pesquisa busca não apenas compreender as práticas atuais, mas também sobre sua adaptação e utilidade em cenários nacionais, em que a utilização de END ainda é restrita.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o referencial teórico, abordando os principais conceitos relacionados aos END aplicados as construções históricas e ao Coliseu e os END utilizados no mesmo. Após isso, são descritos os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa descrevendo os critérios utilizados em cada parte e como foi realizado. Em seguida, os resultados obtidos por meio da análise e experimentação. Na conclusão, as contribuições da pesquisa, limitações e sugestões para estudos futuros. E por fim as referências.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conservação e Restauração

A palavra restauração vem etimologicamente da palavra “restaurare” em latim, que significa estabelecer, colocar no local (ORIGEM DA PALAVRA, 2025). Com isso, é possível concluir pela sua definição que são tratamentos que modificam de forma significativa esteticamente uma determinada estrutura, como a reconstrução de formas ou o retoque de cores (VIÑAS, 2021). Já a palavra conservação vem do latim “conservare” que significa manter, guardar. (ORIGEM DA PALAVRA, 2025). Com base nessa etimologia é possível definir conservar como parte da restauração de um trabalho, sem que sejam produzidas alterações físicas perceptíveis (VIÑAS, 2021). Seguindo suas definições e etimologias é possível diferenciar os dois tratamentos apresentados. Porém na prática não é evidente dessa forma, pois frequentemente as preservações e as conservações se superpõem de maneira que não é possível distingui-las. Um exemplo, é o trabalho de conservação e restauração de uma pintura. Ao realizar a troca de um verniz, por exemplo, para proteger a pintura de ações nocivas, sendo considerado um trabalho de conservação, mas ao se aplicar esse verniz ele alterar a tonalidade e a vivacidade das cores da obra de arte, teremos então um trabalho de preservação, alterando seus aspectos físicos visivelmente (VIÑAS, 2021). Portanto, é possível demonstrar que, mesmo havendo conceitualmente uma distinção entre os termos, na prática um pode resultar no outro, além de muitas vezes ser difícil realizar sua distinção tão pontualmente como no exemplo.

2.2 Inspeções e monitoramento de condição

Todas as construções passam por danos e processos que podem causar manifestações patológicas. Portanto, para continuarem em bom estado estrutural e manterem sua funcionalidade, é necessário realizar a prevenção e o controle de seus aspectos. Para isso, a realização de inspeções e monitoramentos das construções com danos e manifestações patológicas são de extrema importância.

O termo “inspeção”, por sua vez, vem da palavra latina “inspectio”, que tem o significado de olhar, examinar ou verificar (INSPEÇÃO, 2025). Nas áreas da construção civil, engenharia e arquitetura, esse termo é um procedimento que visa avaliar a situação de uma construção, verificando sua segurança, conservação e funcionalidade, procurando assim identificar os problemas e irregularidades porventura existentes (SANTOS, 2024). A inspeção pode ser requerida por vários fatores: quando a última inspeção foi realizada a muito tempo, quando é necessária uma inspeção especial, quando algum dano ocorre na construção. Nas construções históricas, uma compreensão e análise bem detalhada da estrutura é de extrema importância, uma vez que possui uma maior deficiência em alguns quesitos, como tempo de estrutura, materiais, formas de uso inadequado e falta de dados (MIRALDES, 2020).

Já a denominação “monitoramento de condição” não é tão clara. Passou a ser mais utilizada com o avanço tecnológico, principalmente de sensores e sistemas de coleta de dados que permitem um controle mais preciso e em tempo real (QUELGARCIA, 2024). Portanto, o monitoramento de condição é uma manutenção preventiva, que, a partir dos dados coletados em tempo real, monitora o estado das construções (IBM, 2024). Pode ser realizada por sensores que enviam os dados para uma central de análise, ou por meio de inspeções rotineiras.

2.3 Ensaios Não Destrutivos (END)

Existem diversas maneiras para realizar uma inspeção, dentre elas o uso de métodos e ensaios destrutivos e não destrutivos. No entanto, para realizar inspeções em construções históricas, sujeitas a regulamentações mais rígidas em relação a suas estruturas, a quantidade de opções para realizar essas inspeções diminui significativamente, sendo preferível o uso de END, de modo a limitar ao mínimo as ações invasivas ou potencialmente destrutivas.

O termo Ensaios Não Destrutivos surgiu no início do século XX, época em que profissionais da engenharia desenvolviam técnicas e ferramentas que possibilitariam a análise de estruturas e materiais sem causar danos. Uma das primeiras técnicas foi a radiografia industrial, em 1920, utilizada principalmente em máquinas (METALCHECK, 2024). Os END

nesse caso, são caracterizados como métodos utilizados para a inspeção sem prejudicar suas propriedades físicas, mecânicas ou químicas e nem modificar as condições de uso (ABENDI, 2019). Alguns desses novos métodos são mencionados em livros como no Metal Handbook – Vol. 17 (GUIMARÃES, 2018) como o uso da termografia infravermelha, do ultrassom, de drones, da análise de vibrações, entre outros. A termografia infravermelha, por exemplo, utiliza uma câmera com sensores térmicos, coleta a radiação emitida pela superfície do local, e a transforma em imagem, com uma escala em cores, a distribuição da temperatura superficial (ANDRADE, 2020). Já o uso do ultrassom utiliza aparelhos especiais para identificar as reflexões oriundas do interior do que é observado, e a partir da análise dessas reflexões é possível verificar a localização e até identificar os problemas (GUIMARÃES, 2021). Os drones, por sua vez, utilizam câmeras para realizar inspeções com imagens detalhadas dos locais onde há problemas de difíceis acessos (FONTGALLAND, 2023), além de permitir a conexão de diferentes categorias de câmeras, como a de termografia infravermelha e o ultrassom, aumentando a eficiência na busca de manifestações patológicas. A análise de vibrações é realizada por instrumentos de medição eletrônica que captam até as ondas de vibração que não são perceptíveis aos ouvidos humanos, o que possibilita identificar anomalias devido à diferença no padrão apresentado no local (ABENDI, 2022). Como é um sensor que necessita captar os dados constantemente para verificar a diferença no padrão, pode ser usado para além da inspeção, para o monitoramento da construção histórica. Outro método que pode ser empregado é o scan 3D, que a partir da digitalização a laser compõe uma nuvem de pontos que fornece uma superfície do elemento, podendo ser utilizada para uma análise detalhada da construção através do entendimento de sua geometria (LIU et al., 2018).

O emprego desses novos métodos é pouco utilizado e, quando utilizado, muitas vezes ocorrem grandes falhas técnicas e analíticas, uma vez que há pouca abordagem e ensinamento dessa área em cursos de engenharia e tecnologia, mesmo havendo um interesse no assunto.

2.4 Ensaios Não Destrutivos em Patrimônios Históricos

A implementação do uso de END em construções históricas é de extrema importância para minimizar os danos que possam ser ocasionados em suas estruturas, inibindo assim, ações destrutivas, como a retirada de corpos de prova, para a análise. No entanto, nos patrimônios históricos, ainda existe um desafio maior, pois além do especialista no equipamento e com conhecimento sobre o método a ser aplicado, é imprescindível um profundo entendimento do que acontece no seu cotidiano. Por exemplo, se há uma grande movimentação de pessoas no espaço, se o local enfrenta muitas adversidades climáticas, entre outros fatores.

2.5 Coliseu

O Anfiteatro Flaviano, que desde o século VIII é conhecido como Coliseu, está localizado em Roma, capital da Itália. É considerado uma das sete maravilhas do mundo moderno, possuindo uma das estruturas mais famosas do mundo e um dos monumentos mais emblemáticos da Roma Antiga. Sua construção iniciou-se em 70–72 d.C., no

império de Flávio Vespasiano e foi concluída em 80 d.C. por seu filho Tito (BOMGARDNER, 2021). O motivo de sua construção teve propósito de restaurar a potência da Roma Antiga, trazendo novas construções pós-guerras civis. Para sua inauguração recebeu um espetáculo de gladiadores com duração de 100 dias, uma das maiores tradições de entretenimento. Porém não foi somente essas lutas que ocorreram no anfiteatro, houve também caçadas de animais, batalhas navais e execuções públicas. Sua estrutura não era somente importante na área cultural, mas também na arquitetura e na engenharia, por possuir uma estrutura que demonstra a habilidade construtiva dos romanos, que utilizavam diversos materiais: calcário, concreto, pedra vulcânica e pedra-pomes, e para estabilizar o edifício utilizaram fundações de seis metros de profundidade (CARTWRIGHT, 2018). Além de apresentar uma durabilidade alta, mesmo tendo sofrido diversos danos, tanto naturais – terremoto de 1231, que provocou um desabamento, como antrópicas – com diversos saques na sua estrutura, segue em bom estado.

São as inspeções frequentes e detalhadas que permitem que isso ocorra com segurança. O Coliseu é um dos mais importantes monumentos históricos da Itália a sofrer uma inspeção - na época não eram assim denominadas - no início do século XVIII. A partir dessa iniciativa outros monumentos passaram a contar com essa precaução (UNESCO, 1987).

2.6 Ensaios Não Destrutivos no Coliseu

Alguns dos END citados são usados para realizar inspeções e monitoramentos em construções históricas. O Coliseu, nosso caso principal, tem aproximadamente dois mil anos, o que dificulta a análise de sua estrutura. Algumas das limitações apresentadas são a impossibilidade de remover um corpo de prova do local para avaliar o estado de sua estrutura; a falta de conhecimentos prévios da estrutura, sendo a própria construção seu principal documento; o uso de equipamentos que requerem um grande isolamento do local, o que dificulta, uma vez que recebe grande número de turistas, dentre outros problemas.

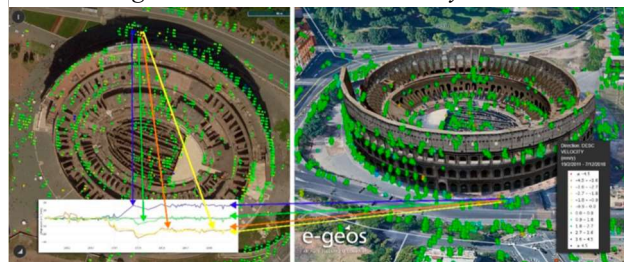
Figura 1 - Coliseu de Roma



Fonte: <<https://education.nationalgeographic.org/resource/colosseum/>>

Portanto, para a coleta de dados e tomadas de decisão de conservação e intervenção têm-se utilizado atualmente drones, termografia infravermelha e análise de microtremores. O uso de drones no monumento iniciou-se em 2014, sendo utilizado frequentemente para a inspeção visual do local. A partir de 2019 começou a ser utilizada uma plataforma

Figura 2 - Foto do Coliseu no SyPEAH



Fonte: <<https://www.mdpi.com/2076-3263/11/6/246>>

chamada SyPEAH (System for the Protection and Education of Archaeological Heritage) (Figura 2) para monitorar o Coliseu, a partir dos dados fornecidos por drones, satélites da Agência Especial Italiana (ASI) e sensoriamento de solos. Os equipamentos utilizados em construções como essas são de extrema importância, por facilitarem a inspeção de locais de difícil acesso, com dificuldades para chegar ao local, auxiliarem na identificação de danos e no constante monitoramento à distância (GIOVAMPAOLA, 2021). Além disso, pelo sistema SyPEAH utilizando os algoritmos desenvolvidos, avalia-se quanti-qualitativamente a vulnerabilidade do local. Com as informações climáticas, tectônicas e solo é possível prever e reduzir os efeitos ocasionados por um evento natural e planejar soluções para evitar problemas.

Além desses métodos também são utilizados equipamentos que registram os tremores próximos ao local e no local, a partir de equipamentos para medição de vibrações. Tendo em vista que está sendo construído um metrô próximo ao local, interferindo bastante na estabilidade do solo, e pelo histórico da região em que já houve alguns terremotos, tremores relativamente distantes podem ocasionar mudança da firmeza do solo (NAKAMURA, 2017). Em 2018, a partir do emprego desses equipamentos, o Coliseu foi fechado temporariamente para reparos.

Portanto, mesmo em locais com dificuldades de inspeção, esses métodos são possíveis de serem realizados com muita eficiência, evitando possíveis problemas que possam ocorrer.

2.7 Normas Brasileiras

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é uma entidade privada sem fins lucrativos, responsável pela padronização de técnicas de produção, pela edição de manuais e guias de produtos e métodos. A entidade tem como objetivo padronizar e organizar de forma metódica trabalhos científicos, acadêmicos e técnicos; normatizar técnicas e aplicações de métodos; e editar manuais e guias para padronizar e dar mais segurança para a prestação de serviços e aplicação de produtos. Para a criação das normas são realizados encontros com profissionais especialistas na área, que posteriormente são enviadas à associação que as

redireciona para que a aplicação seja feita pelos Comitês Brasileiros (ABNT/ CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE).

As normas da ABNT são de extrema importância por sistematizar um conhecimento em que são avaliados diversos fatores para a sua elaboração, como eficácia, qualidade e relevância para o assunto. Porém, para utilizá-las de forma adequada e mais especificada é recomendado procurar não somente uma norma ligada diretamente ao assunto tratado, mas tentar procurar outras normas relacionadas ao que se deseja, para melhor compreensão. No projeto em si, por exemplo, foram relacionadas diversas normas para compor um manual o qual se deve ser seguido para não danificar as estruturas e conseguir aplicar esses equipamentos e métodos nas construções civis, uma vez que não existe uma específica para a área.

2.7.1 Drones

ABNT 5674 - Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção; ABNT 14037 - Manual de Operação, uso e manutenção das edificações – Conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação; ABNT NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho; ABNT NBR 16280 - Sistema de gestão de reformas — Requisitos; DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) - regulam o uso do espaço aéreo brasileiro por drones; ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) - Define regras operacionais de voo, registro e segurança para drones.

2.7.2 Medição de vibrações

ABNT NBR 15928:2011 – Ensaios Não Destrutivos – Análise de vibrações – Terminologia

2.7.3 Termografia infravermelha:

ABNT NBR NM/ISSO 9712:2014 – Ensaios não Destrutivos – Qualificação e certificação de pessoal em END (ISSO 9712:2012, IDT); ABNT NBR 16818: 2020 – Ensaios não Destrutivos – Termografia Infravermelha – Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha; ABNT NBR 16969: 2021 – Ensaios não Destrutivos – Termografia Infravermelha – Princípios gerais; ABNT NBR 15424:2022 – Ensaios não Destrutivos – Termografia Infravermelha – Terminologia

2.7.4 Ultrassom

ABNT NBR NM 330:2011 – Ensaios Não Destrutivos – Ensaio por ultrassom – Princípios Gerais; ABNT NBR NM 335:2012 – Ensaios não destrutivos – Ultrassom –

Terminologia; ABNT NBR NM/ISSO 9712:2014 – Ensaios não Destrutivos – Qualificação e certificação de pessoal em END (ISSO 9712:2012, IDT); ABNT NBR 15824:2020 – Ensaios Não Destrutivos – Ultrassom – Procedimento para medição de espessura.

3. METODOLOGIA

Para compreender com maior profundidade os END, os métodos e os equipamentos empregados na inspeção e monitoramento de patrimônios históricos, este trabalho adotou o Coliseu de Roma como estudo de caso. A pesquisa foi realizada de forma quanti-qualitativa, com o objetivo de realizar análises de dados pragmáticos e interpretar de forma crítica as informações coletadas. A escolha desse método vem do intuito de realizar uma abordagem mais completa, utilizando elementos técnicos, normativos e práticos.

A metodologia teve início a partir de um referencial teórico, com levantamento de dados e informações, publicações científicas, normas técnicas, estudo de etimologias, significados e registros históricos do Coliseu, e dos métodos e ensaios tradicionais e contemporâneos com o avanço da tecnologia utilizados em patrimônios históricos.

Em seguida foram definidos e organizados tópicos específicos para análise, tais como: os métodos mais utilizados antigamente e atualmente para inspeções de construções, os END mais utilizados na inspeção e monitoramento do Coliseu e algumas pesquisas de campo e experimentos laboratoriais para testar alguns dos END. Os dados coletados foram analisados por meio de técnicas comparativas e interpretativas, buscando identificar quais métodos se mostraram mais eficazes entre os tradicionais e os contemporâneos. O detalhamento desses procedimentos visa garantir a coerência entre os objetivos traçados e os resultados obtidos.

3.1 Métodos mais utilizados antigamente e atualmente para inspeções de construções

O projeto realizou pesquisas para comparar os métodos que eram mais utilizados antigamente, com os mais atuais. Foi realizada uma comparação tabelada seguindo os critérios: ano de criação do método, se pode causar algum dano a edificação, se é necessário um curso para atuar com esse método, e, se sim, quantos anos para se especializar e qual o valor dos equipamentos utilizados. Foi utilizado como critério para essa escolha entre os métodos mais atuais a serem analisados aqueles mais abordados em artigos, e os mais antigos que possuem um objetivo de análise similar ao estudado. Com os dados coletados, foi realizada uma comparação entre os métodos, ensaios e equipamentos que mais se assemelham com seus objetivos e finalidades, a fim de identificar se os novos métodos são tão eficazes como os antigos e, se o custo, consequentemente superior com as novas tecnologias, vale a pena.

3.2 ENDs mais utilizados na inspeção e monitoramento do Coliseu

O projeto tabelou com base nas pesquisas realizadas durante todo o processo, os ensaios, métodos e equipamentos mais utilizados no Coliseu, com enfoque em como foram realizados, desde quando são utilizados, quais suas vantagens e quem patrocina, ajuda ou realiza esses procedimentos. Esses dados utilizados na pesquisa são derivados de sites oficiais da Prefeitura da Cidade de Roma, na Itália, e de trabalhos confiáveis que analisam certos métodos e END ligado ao Coliseu de Roma. Assim foi possível comparar as diferentes formas de análise e identificar de forma mais sucinta como utilizá-los e quais suas vantagens.

3.3 Pesquisas de campo e experimentos laboratoriais utilizados para testar alguns END

Após toda a realização da pesquisa bibliográfica foram realizadas pesquisas de campo e experimentos laboratoriais para testar alguns dos END estudados. Para a realização dessas pesquisas de campo o projeto utilizaria os equipamentos fornecidos pelo Canteiro Experimental da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, do Laboratório de Geotecnologias da Escola de Engenharia e do Laboratório de Materiais de Construção, todos da Universidade Presbiteriana Mackenzie, juntamente com profissionais especializados em cada um dos equipamentos necessários para a realização dos END. Essa parte prática enfoca na dificuldade de utilização desses equipamentos e a necessidade de profissionais especializados. Com os dados recolhidos durante as pesquisas de campo e os conhecimentos adquiridos pelos profissionais que acompanharam a pesquisa, foi realizada uma análise sobre sua utilização.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Com a estratégia implementada, os dados reunidos possibilitaram uma análise crítica das práticas de inspeção e monitoramento que podem ser utilizadas em patrimônios históricos, como o Coliseu de Roma. Neste segmento, são exibidos os resultados mais significativos obtidos através da revisão de literatura, da pesquisa de campo e dos experimentos em laboratório, com foco na identificação e análise dos ensaios não destrutivos que se mostraram mais eficazes e apropriados para esse tipo de edificação.

Os resultados foram estruturados conforme os temas que foram definidos previamente na abordagem, possibilitando uma discussão clara sobre a evolução histórica das técnicas de inspeção, sobre END mais comumente empregados atualmente para a supervisão do Coliseu e sobre a avaliação dos testes práticos realizados. Além de apresentar os resultados, este trabalho busca refletir sobre seu significado: o que funcionou de forma satisfatória, o que precisa ser melhorado e quais métodos realmente influenciam na conservação de patrimônios históricos.

Dessa forma, a discussão conecta os resultados da pesquisa com os objetivos propostos, auxiliando na ampliação do entendimento sobre a aplicação dos END em contextos semelhantes ao do Coliseu.

4.1 Métodos mais utilizados antigamente e atualmente para inspeções de construções

Ao utilizar tabelas para comparar os ensaios e métodos não destrutivos atuais e antigos, é possível analisar as diferenças e vantagens entre si. De forma breve é possível identificar que a simplicidade de aplicação e o baixo custo são as principais vantagens dos métodos tradicionais. Entretanto, eles apresentam algumas desvantagens, como a limitação na análise, a subjetividade dos resultados e a maior dependência da experiência do profissional. Por outro lado, métodos contemporâneos, oferecem benefícios como maior precisão no diagnóstico, coleta de dados em áreas de difícil acesso e possibilidade de monitoramento contínuo. No entanto, há desafios como os altos custos e a necessidade de operadores altamente qualificados.

Tabela 1-Comparação entre Inspeção por Percussão (Martelinho) e Ultrassom

	Inspeção por Percussão (Martelinho)	Ultrassom
Ano de criação do método	Práticas utilizadas desde a antiguidade, com evolução ao longo dos séculos.	Década de 1940
Pode causar algum dano a edificação	Baixa	Baixa
É necessário um curso (quantos anos)	Não é obrigatório, mas experiência e conhecimento técnico são valiosos. *Porém dependendo do local a ser analisado é necessário um curso de alpinismo	Não; porém cursos especializados são recomendados para operação mais (1 a 2 anos)
Custo médio dos equipamentos	Baixo; martelo de borracha ou madeira.	Equipamentos eletrônicos especializados variam entre R\$ 20.000 e R\$ 100.000.

Tabela 2-Comparação entre Levantamento Manual e Escaneamento 3D

	Levantamento Manual	Escaneamento 3D
Ano de criação do método	Práticas utilizadas desde a antiguidade, com evolução ao longo dos séculos.	Década de 1990
Pode causar algum dano a edificação	Baixa	Baixa
É necessário um curso (quantos anos)	Não é obrigatório, mas experiência e conhecimento técnico são valiosos.	Sim; exige conhecimento em modelagem 3D, software específico e interpretação de dados. (entre 1 e 2 anos, e conhecimento da graduação de engenharia civil ou arquitetura)
Custo médio dos equipamentos	Ferramentas manuais com custo total abaixo de R\$ 5.000	Equipamentos entre R\$ 100.000 e R\$ 500.000, dependendo da precisão e funcionalidades.

Tabela 3 - Comparação entre Monitoramento Manual de Vibrações (por estetoscópio) e análise de vibrações com sensores avançados

	Monitoramento Manual de Vibrações (Estetoscópio)	Análise de Vibrações com Sensores Avançados
Ano de criação do método	Práticas utilizadas desde a antiguidade, com evolução ao longo dos séculos.	Década de 1980
Pode causar algum dano a edificação	Baixa	Baixa
É necessário um curso (quantos anos)	Não é obrigatório, mas treinamento básico pode melhorar a eficácia da inspeção.	Sim; requer formação em técnicas de medição, análise de sinais e interpretação de dados (1 a 2 anos).
Custo médio dos equipamentos	Estetoscópio básico custa entre R\$ 50 e R\$ 2000	Sensores e equipamentos entre R\$ 20.000 e R\$ 100.000.

Tabela 4 - Comparação entre Inspeção Tradicional com Andaimes ou Alpinismo Industrial e Drones

	Inspeção Tradicional com Andaimes ou Alpinismo Industrial	Drones
Ano de criação do método	Práticas utilizadas desde a antiguidade, com evolução ao longo dos séculos.	Década de 1990
Pode causar algum dano a edificação	Baixa	Baixa
É necessário um curso (quantos anos)	São necessários cursos de alpinismo industrial (poucos dias)	Sim; exige conhecimento em operação com drones e interpretação (meses)
Custo médio dos equipamentos	Equipamentos de segurança e montagem de andaimes podem variar entre R\$ 10.000 e R\$ 50.000.	Drones profissionais variam de R\$ 2.000 à R\$ 100.000, dependendo da tecnologia e do que é acoplado.

Tabela 5 - Comparação entre Inspeção Visual Tradicional e Termografia Infravermelha

	Inspeção Visual Tradicional	Termografia Infravermelha
Ano de criação do método	Práticas utilizadas desde a antiguidade, com evolução ao longo dos séculos.	Década de 1950
Pode causar algum dano a edificação	Baixa	Baixa
É necessário um curso (quantos anos)	Não. Conhecimento básico pode ser adquirido em curto período.	Sim. Necessário formação especializada para interpretação de imagens térmicas (de 1 a 3 anos).
Custo médio dos equipamentos	Investimento baixo; ferramentas manuais com custo total abaixo de R\$ 5.000.	Varia entre R\$ 30.000 e R\$ 200.000, dependendo da resolução e funcionalidades.

4.2 ENDS mais utilizados na inspeção e monitoramento do Coliseu

Analisando a tabela comparativa dos END, os drones, começaram em 2014 e permitiram inspeções visuais e térmicas em locais de difícil acesso, com rapidez e segurança, especialmente após a introdução do sistema SyPEAH, que combina dados climáticos e estruturais para evitar perigos. O uso de satélites contribui para a previsão de prejuízos causados por fenômenos

naturais, complementando um sistema de monitoramento constante. Por sua vez, a termografia infravermelha se sobressaiu por sua habilidade de detectar infiltrações e fissuras, porém, sua eficácia depende da qualidade do equipamento, do ambiente e da experiência do operador. O ultrassom mostrou-se preciso na identificação de falhas internas, porém sua utilização também exige um conhecimento técnico avançado. Os sensores de vibração são essenciais para identificar microtremores, especialmente em função das obras de infraestrutura nas proximidades do Coliseu. Apesar da alta eficiência desses métodos, os desafios envolvem custo elevado, complexidade técnica e falta de profissionais capacitados.

Tabela 7- ENDs mais utilizados na inspeção e monitoramento do Coliseu

Equipamentos END	Como são realizados	Desde quando utilizam	Quais suas vantagens	Quem patrocina/ ajuda
Drones	Equipados com câmeras de alta resolução e sensores que ajudam no plano de voo, os drones capturam imagens que facilitam na identificação de áreas que necessitam de uma intervenção.	2014	Segurança aprimorada; Redução de custos; Rapidez e eficiência; Acesso a áreas de difícil alcance; Coleta de dados de alta qualidade.	Agência Especial Italiana (ASI)
Monitoramento por satélites	Fornecer informações climáticas, tectônicas e do solo, sendo possível prever e planejar quando um evento natural pode causar alterações na estrutura do Coliseu.	2019	Acompanhamento em tempo real de vários aspectos naturais que possam causar problemas à estrutura	Agência especial italiana (ASI)
Termografia infravermelha	A partir de câmeras infravermelhas é analisada a radiação térmica emitida pelos objetos, sendo possível diagnosticar problemas como infiltrações de água, falhas no isolamento térmico e outras anomalias estruturais.	2007	Deteção de anomalias térmicas; Inspeção não destrutiva; Monitoramento contínuo; Análise de eficiência energética; Segurança aprimorada.	—
Medição de vibrações	Instala os sensores em pontos estratégicos da construção; Coleta dados; Envia para uma central onde realizam a análise dos dados.	??	Monitoramento contínuo; Deteção precoce de problemas; Sensibilidade alta a micro vibrações.	—
Ultrassom	O equipamento mede o tempo de propagação da onda ultrassônica analisando que em tempos mais longos ou sinais muito fracos indicam possíveis falhas internas.	??	Alta precisão na detecção de falhas internas em diversos materiais; equipamentos portáteis e de fácil uso em campo	—

4.3 Pesquisas de campo e experimentos laboratoriais utilizados para testar alguns END

Para validar e compreender melhor a aplicação dos END, foram realizados testes práticos tanto em ambiente de campo quanto em laboratório, sempre com o acompanhamento de profissionais especializados. Esses ensaios permitiram identificar falhas estruturais visíveis e ocultas, reforçando a importância dos END na preservação de patrimônios históricos.

4.3.1 Ultrassom

Para a realização dos ensaios com o equipamento de ultrassom, foi utilizado o Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia (EE) do Mackenzie. Acompanhada de uma professora que realiza ultrassom para análise de estruturas e suas manifestações patológicas foi realizado um experimento para conhecimento do equipamento, como realizar a leitura de dados e

Figura 3 - utilização do equipamento de ultrassom



Fonte: experimento com MackPesquisa

como analisá-los (Figura 3). A partir desse método foi possível identificar manifestações patológicas relevantes, que poderiam passar despercebidas em uma análise visual convencional. No entanto, ficou evidente que a interpretação correta dos dados gerados pelo equipamento exige um conhecimento técnico bastante aprofundado. A leitura das ondas e a identificação dos sinais relacionados a falhas estruturais não são intuitivas, sendo necessário entender bem o comportamento dos materiais e o funcionamento da técnica.

Esse ponto reforça uma das questões já abordadas na revisão teórica deste trabalho: a falta de formação sólida do assunto nos cursos de graduação. Muitos profissionais saem da universidade sem contato prático e muito menos são incentivados a buscar especialização na área. Essa lacuna compromete o uso mais amplo e eficaz de técnicas como o ultrassom, especialmente em contextos que exigem precisão e cuidado, como é o caso da inspeção e monitoramento de patrimônios históricos. Portanto, apesar de o ultrassom se mostrar uma ferramenta potente na detecção de anomalias, sua aplicabilidade na prática está condicionada à presença de profissionais qualificados, o que ainda é um desafio no cenário brasileiro atual.

4.3.2 Termografia Infravermelha

Para a realização dos ensaios com termografia infravermelha, os testes foram realizados em campo, em locais previamente selecionados e com condições controladas. Acompanhada de profissionais especializados na técnica, foi possível compreender o funcionamento do equipamento, a forma correta de captar as imagens térmicas e os principais critérios de análise dos resultados obtidos. A partir desse método, em determinadas áreas, as manifestações patológicas podiam ser observadas a olho nu; em outras, apenas a leitura térmica revelou alterações internas nos materiais, como infiltrações, umidade e fissuras.

Durante a realização das pesquisas de campo foram utilizadas três câmeras termográficas distintas: a FLIR E5, a FLIR TG167 e a acoplada ao drone DJI Mavic3 Enterprise Thermal. Durante os experimentos em campo, observou-se que as diferentes câmeras apresentavam resoluções térmicas bastante distintas, o que impactou diretamente na precisão da análise. Enquanto alguns equipamentos forneciam imagens mais detalhadas e facilitavam uma interpretação mais exata dos pontos de anomalia, outros exigiam maior dedução e experiência técnica, já que os resultados obtidos permitiam apenas uma interpretação aproximada com base em possíveis padrões térmicos (Figura 4). Outro fator a ser considerado é o aspecto climático do local a ser estudado e analisado. Uma vez que, assim que os profissionais chegaram ao local foi identificado a olho nu uma fissura na lateral de um prédio (Figura 5). No entanto, essa mesma fissura não foi imediatamente detectada na primeira imagem obtida pela câmera termográfica (Figura 6). Somente após a aplicação de um estímulo térmico foi possível evidenciá-la com maior clareza (Figura 7). Esse resultado demonstra que fatores climáticos e ambientais, como temperatura, umidade e incidência solar, influenciam diretamente na eficácia da termografia, tornando a interpretação altamente dependente da experiência e sensibilidade de profissionais capacitados.



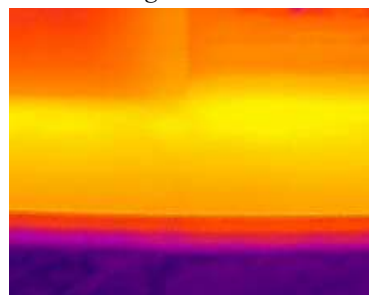
Fonte: experimento com MackPesquisa

Figura 5 - Fissura identificada a olho nú



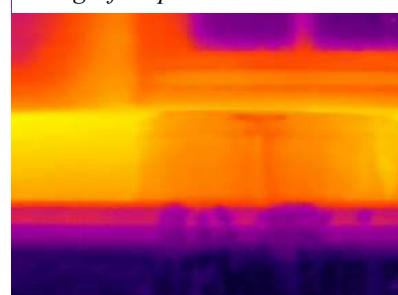
Fonte: pesquisa de campo com MackPesquisa

Figura 6 - Imagem termográfica da mesma Figura 5



Fonte: pesquisa de campo com MackPesquisa

Figura 7 - Fissura identificada na termografia após o estímulo térmico



Fonte: pesquisa de campo com MackPesquisa

4.3.3 Drone

Para a realização dos ensaios com drone, os experimentos também foram realizados em campo, em ambientes controlados e com apoio de profissionais capacitados em inspeções aéreas. A escolha dessa tecnologia visou explorar sua eficiência na captação de imagens de áreas de difícil acesso e identificação de manifestações patológicas superficiais em estruturas. O equipamento utilizado é o drone DJI Mavic3 Enterprise Thermal que, além de possuir uma câmera de alta definição acoplada, possui uma câmera termográfica de alta resolução.

Com o drone foi possível mapear extensas áreas sem a necessidade de contato direto com a edificação, aumentando a segurança da inspeção e otimizando o tempo de análise. Em determinados trechos as imagens aéreas captaram manifestações patológicas. Em outros, os registros serviram somente como base para uma futura inspeção mais aprofundada. Porém, como fatores negativos, as condições climáticas, como na termografia, podem dificultar o manuseio, além das quantidades de autorizações necessárias para utilizá-los, uma vez que existem muitas legislações que impedem o voo com drone em certos locais.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como proposta central investigar quais são os métodos e equipamentos mais adequados para o monitoramento e a inspeção de construções históricas, com foco no uso de ensaios não destrutivos. O projeto evidenciou sua importância na inspeção e monitoramento de construções históricas, demonstrando que tais métodos oferecem alternativas eficazes e seguras para sua conservação. Com o estudo de caso do Coliseu de Roma foi possível observar que tecnologias como drones, termografia infravermelha, sensores de vibração e ultrassom contribuem significativamente para diagnósticos mais precisos, mesmo em estruturas com altas restrições de acesso e manipulação. A realização de experimentos práticos em laboratório e em campo reforçou a relevância da capacitação técnica para o uso adequado dessas tecnologias. A complexidade de interpretação dos dados, dependência de condições ambientais e custos elevados dos equipamentos apontam uma necessidade de maior investimento em formação profissional e inclusão desses temas nos currículos acadêmicos.

Portanto, conclui-se que, embora os END estejam em processo de expansão e desenvolvimento, ainda há desafios a serem superados quanto à sua implementação em larga escala no Brasil. A formação de profissionais especializados, o incentivo à pesquisa e o fortalecimento das normas técnicas são pontos-chaves para garantir a eficácia e segurança das intervenções em edificações históricas. Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação dos testes em edificações históricas nacionais, a análise de impacto da aplicação contínua dos END a longo prazo e o desenvolvimento de protocolos específicos em contextos urbanos com restrições de acesso. Além disso, futuras pesquisas podem explorar o uso integrado de diferentes tecnologias, como sensores remotos, para gerar diagnósticos mais completos.

6. REFERÊNCIAS

Análise de Vibrações (AV). Abendi. Disponível em: <<https://www1.abendi.org.br/certificacao/analise-de-vibracoes-av/>>. Acesso em: 07 fev. 2024.

ANDRADE, Renan Pereira. **Uso da termografia infravermelha embarcada em drone como ferramenta para a inspeção de patologias em revestimentos aderidos de fachada.**

Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3153/tde-18112020-102555/publico/RenanPereiradeAndradeCORR20.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2024.

BOMGARDNER, D. **The story of the Roman amphitheatre.** 2. ed. Londres, England:

Routledge. <https://www.perlego.com/book/1882175/the-story-of-the-roman-amphitheatre-pdf?utm_source=google&utm_medium=cpc&campaignid=15913701111&adgroupid=131883345069&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwz42xBhB9EiwA48pT7_4BZ56qWhB3Xsz_Y6d9jgl8c9n8yOm_uF2Bxm4Swrv87gmtrmAO-hoCB1YQAvD_BwE> Acesso em: 20 abr. 2024.

CALDANA JUNIOR, V. L.; ROLIM, M. DE S.; MICHELIN, G. A. **Tecnologias para levantamento e ensaios não destrutivos: ações de cooperação técnica e políticas públicas como perspectivas para a preservação do patrimônio.** *Gestão & Tecnologia de Projetos*, v. 16, n. 3, 2021. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/download/175163/171771/490337>> Acesso em: 19 abr. 2024.

CARTWRIGHT, M. **Colosseum.** *World History Encyclopedia*, 2018. Disponível em: <<https://www.worldhistory.org/Colosseum/>>. Acesso em: 3 fev. 2025.

Ensaios não destrutivos e inspeção. Abendi. Disponível em: <<https://www.abendi.org.br/abendi-area-restrita/default.aspx?mn=630&c=17&s=>>>. Acesso em: 13 fev. 2024.

FONTGALLAND, I. L. **Cidades Inteligentes e novos modelos industriais sustentáveis.**

Disponível em: <<https://ampllaeditora.com.br/books/2022/07/CidadesInteligentes.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

GIOVAMPAOLA, I. D. **SyPEAH: The WebAPP system for protection and education to archaeological heritage in the Parco Archeologico del Colosseo.** Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3263/11/6/246>> Acesso em: 13 fev. 2024.

GUIMARÃES, O. S. (ED.). **Engenharia no Século XXI – Volume 23.** [s.l.] Editora Poisson, 2021. Disponível em: <<https://poisson.com.br/2018/produto/engenharia-no-seculo-xxi-volume-23/>> Acesso: 08 fev. 2024.

IBM; **Version 8.4 and later, and SaaS.** Disponível em: <<https://www.ibm.com/docs/pt-br/mas-cd/maximo-manage/continuous-delivery?topic=module-condition-monitoring>>. Acesso em: 28 abr. 2024.

Inspeção. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/inspecao/>>. Acesso em: 3 fev. 2025.

LIU, C.; WU, J.; FURUKAWA, Y. **FloorNet: A unified framework for floorplan reconstruction from 3D scans**. 2018. Disponível em: <https://openaccess.thecvf.com/content_ECCV_2018/papers/Chen_Liu_FloorNet_A_Unified_ECCV_2018_paper.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2024.

METALCHEK. **Ensaaios Não Destrutivos: História, Evolução e Aplicações - Metal Chek. Metal Chek - Fabricante de partículas magnéticas e líquidos penetrantes para ensaios não destrutivos METAL-CHEK DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA**, 18 nov. 2024. Disponível em: <<https://metalchek.com.br/ensaaios-nao-destrutivos-historia-evolucao-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 3 fev. 2025

MIRALDES, P. **Inspeção Técnica de Construções com Recurso a Drones**. Disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/10985/1/7829_17284.pdf> Acesso: 8 abr. 2024.

NAKAMURA, Y. et al. **Attempts to estimate the physical property of surrounding ground and foundation concrete of Colosseum using microtremor**. Disponível em: <https://www.sdr.co.jp/papers/diss_papers/diss15_foundation_colosseum_sdr.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2024.

QUELGARCIA. **O que é Monitoramento na Construção Civil?** asope, 15 out. 2024. Disponível em: <<https://www.asope.com.br/single-post/o-que-e-monitoramento-na-construcao-civil>>. Acesso em: 3 fev. 2025.

SANTOS, H.L.C. **Inspeção Predial em Repartições Públicas: Segurança, Sustentabilidade e Eficiência Operacional**. Disponível em: <https://www.gov.br/incra/pt-br/centrais-de-contudos/publicacoes/Especializacao_Hugo_Luiz_Costa_Santos.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

SGS, O. Q. **ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**. Disponível em: <<https://www.sgs.com/-/media/sgscorp/documents/corporate/brochures/sgs-ind-non-destructive-testing-pt-brazil.cdn.pt-BR.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2024.

Sobre a ABNT - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em: <<https://abnt.org.br/institucional/sobre-abnt-2/>>. Acesso em: 3 fev. 2025.

The Colosseum. National Geographic. Disponível em: <<https://education.nationalgeographic.org/resource/colosseum/>>. Acesso em: 26 abr. 2024.

UNESCO. **Our architectural heritage: From consciousness to conservation. Paris, France: United Nations Educational Scientific and Cultural**, 1987. Disponível em: <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000071433>>. Acesso em: 19 abr. 2024.

VIÑAS, S. **Teoria contemporânea da restauração**. Minas Gerais: EditoraUFMG, 2021. 27p.