

Revisão Sistemática de Literatura Relativa à Medição de Fissuras em Silos de Concreto

Diogo Cavalcanti Oliveira

Mestre, UPE, Brasil.
dco@poli.br

Alberto Casado Lordsleem Jr

Professor Doutor, UPE, Brasil.
acasado@poli.br

Laura Nogueira Cordeiro

Mestranda, UPE, Brasil.
lrc@poli.br

Thais Cohen de Almeida Costa

Mestranda, UFPE, Brasil.
thais.cohencosta@ufrpe.br

Emanoel Silva de Amorim

Mestre, UPE, Brasil.
esa7@poli.br

Yêda Vieira Póvoas

Professora Doutora, UPE, Brasil.
yvp@poli.br

Submissão: 21/08/2024

Aceite: 06/11/2024

OLIVEIRA, Diogo Cavalcanti; LORDSLEEM JR, Alberto Casado; CORDEIRO, Laura Nogueira; COSTA, Thais Cohen de Almeida; AMORIM, Emanoel Silva de; PÓVOAS, Yêda Vieira. Revisão Sistemática de Literatura Relativa à Medição de Fissuras em Silos de Concreto. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [S. l.], v. 13, n. 88, 2025.

DOI: [10.17271/23188472138820255144](https://doi.org/10.17271/23188472138820255144). Disponível

em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/5144

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Revisão Sistemática de Literatura Relativa à Medição de Fissuras em Silos de Concreto

RESUMO

A pesquisa apresenta uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) sobre os principais métodos de identificação de fissuras em estruturas de concreto, com foco em suas aplicações e em silos, bem como vantagens e desvantagens. Este artigo tem como objetivo de realizar uma análise crítica das publicações científicas mais relevantes para a medição de fissuras em estruturas de concreto, com enfoque na comparação dos métodos do tema. Ao longo do presente trabalho é abordado as características e manifestações patológicas dos silos de concreto, além dos métodos tradicionais e avançados de identificação dessas fissuras. Utilizando o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), foram selecionados artigos publicados entre 2016 e 2023, das bases de dados Web of Science, Science Direct, SCOPUS e Engineering Village. Os resultados destacam uma tendência crescente no uso de tecnologias como VANT, Varredura a Laser e técnicas emergentes como machine learning e deep learning. Essas tecnologias são vistas como promissoras para melhorar a precisão e eficiência na detecção precoce de danos estruturais, com implicações práticas significativas para os setores industriais e de construção civil. A contribuição do estudo reside na análise das tendências mercadológicas, fornecendo uma visão crítica das tecnologias existentes que propõem soluções para os desafios enfrentados na inspeção de infraestruturas de concreto.

PALAVRAS-CHAVE: Silo de concreto. Fissuras. Recuperação estrutural.

Systematic Literature Review on Crack Measurement in Concrete Silos

ABSTRACT

This research presents a Systematic Literature Review (SLR) on the main methods for crack identification in concrete structures, focusing on their applications in silos, as well as their advantages and disadvantages. The aim of this article is to conduct a critical analysis of the most relevant scientific publications on crack measurement in concrete structures, emphasizing the comparison of different methods. Throughout this study, the characteristics and pathological manifestations of concrete silos are discussed, along with traditional and advanced methods for crack identification. Using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protocol, articles published between 2016 and 2023 were selected from the Web of Science, Science Direct, SCOPUS, and Engineering Village databases. The results highlight a growing trend in the use of technologies such as UAVs, Laser Scanning, and emerging techniques like machine learning and deep learning. These technologies are seen as promising for improving the accuracy and efficiency of early structural damage detection, with significant practical implications for industrial and civil construction sectors. The contribution of this study lies in the analysis of market trends, providing a critical perspective on existing technologies that propose solutions to the challenges faced in concrete infrastructure inspection.

KEYWORDS: Concrete silo. Cracks. Structural rehabilitation.

Revisión Sistemática de Literatura Relativa a la Medición de Fisuras en Silos de Concreto

RESUMEN

La investigación presenta una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) sobre los principales métodos de identificación de fisuras en estructuras de concreto, con enfoque en sus aplicaciones en silos, así como sus ventajas y desventajas. Este artículo tiene como objetivo realizar un análisis crítico de las publicaciones científicas más relevantes sobre la medición de fisuras en estructuras de concreto, con énfasis en la comparación de los métodos del tema. A lo largo de este trabajo se abordan las características y manifestaciones patológicas de los silos de concreto, además de los métodos tradicionales y avanzados de identificación de estas fisuras. Utilizando el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), se seleccionaron artículos publicados entre 2016 y 2023 en las bases de datos Web of Science, Science Direct, SCOPUS y Engineering Village. Los resultados destacan una tendencia creciente en el uso de tecnologías como UAV, Escaneo Láser y técnicas emergentes como machine learning y deep learning. Estas tecnologías se consideran prometedoras para mejorar la precisión y eficiencia en la detección temprana de daños estructurales, con implicaciones prácticas significativas para los sectores industriales y de la construcción. La contribución del estudio radica en el análisis de las tendencias del mercado, proporcionando una visión crítica de las tecnologías existentes que proponen soluciones a los desafíos enfrentados en la inspección de infraestructuras de concreto.

PALABRAS CLAVE: Silo de concreto. Fisuras. Rehabilitación estructural.

1. INTRODUÇÃO

A medição de fissuras em estruturas de concreto é um desafio instigante na engenharia civil. Com o aumento do interesse acadêmico e industrial no tema, novos métodos estão sendo desenvolvidos para otimizar os processos de inspeção e medição de fissuras (Khan et al., 2023). No entanto, questões como eficiência, custos operacionais, tempo, segurança e precisão ainda representam obstáculos consideráveis (Ali et al., 2021; Khan et al., 2023).

A ocorrência de fissuras está entre as manifestações patológicas mais comuns nas estruturas de concreto. As causas dessas fissuras são variadas e podem incluir retração plástica, falhas de projeto e execução, retração térmica, e assentamento plástico do concreto (Rocha; Póvoas, 2019).

Segundo Maj (2017), Khalil et al. (2022) e Bilčík et al. (2021), o surgimento de fissuras horizontais e verticais em silos pode ser atribuído a várias causas comuns. Entre elas, estão erros durante o projeto de construção e de manutenção das paredes. Além disso, fatores externos como temperatura, pressão do material armazenado, esforços de vento, umidade e a influência das juntas de construção, desempenham papéis significativos. Esses problemas potenciais podem comprometer a confiabilidade estrutural do silo, e reduzir sua capacidade de carga, impactando diretamente sua funcionalidade e segurança operacional.

Maj (2017) destaca que as fissuras podem provocar corrosão das armaduras de aço, diminuição da rigidez, maior deflexão e aumento da carbonatação da camada de concreto. Além disso, enfatiza a importância de recuperar estruturas de concreto fissuradas em silos, visando garantir a durabilidade e evitar futuras falhas estruturais, assegurando que a resistência e a rigidez da estrutura sejam mantidas em todas as áreas, permitindo a distribuição uniforme das cargas.

De modo geral, a resolução das manifestações patológicas segue um processo padrão que inclui várias etapas, como inspeção, anamnese, exames, diagnóstico, prognóstico e intervenção. A realização da inspeção envolve uma avaliação para verificar o desempenho e determinar as medidas preventivas e corretivas requeridas. A inspeção vai influenciar todas as demais etapas constituintes da resolução das manifestações patológicas. Ao se tratar dos silos de concreto, o desafio da inspeção é em virtude da complexidade dessas construções, em relação à sua altura, dificuldades de acesso e condições de exposição. (Ballesteros; Lordsleem Junior, 2021).

1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SILOS

Os silos são estruturas projetadas especificamente para o armazenamento de uma variedade de materiais granulares, como grãos e cimento. Essas construções se caracterizam por suas dimensões laterais desproporcionais em relação à sua altura, tornando-os particularmente adequados para a armazenagem em larga escala. Comumente encontrados em contextos industriais como moinhos de cimento e grandes projetos de construção (Kumar, 2023).

Estas instalações são projetadas com sistemas de carregamento e, idealmente, permitem o esvaziamento por meio da gravidade, embora possam também utilizar dispositivos mecânicos ou pneumáticos para essa finalidade (Yu et al., 2017; Zhang et al., 2018).

Apesar dos progressos significativos em estudos recentes, persistem diversas dúvidas sobre o comportamento dos materiais estocados e os efeitos observados durante o processo de esvaziamento. Durante essa fase, as pressões exercidas sobre as paredes dos silos pelos materiais armazenados atingem seus níveis máximos (Gallego, 2015).

Os silos estão sujeitos a uma variedade de falhas e colapsos, originados por diversos mecanismos. Como abordado em Khalil et al. (2022) e Prusiel (2020), as falhas de projeto estão frequentemente presentes nos relatos de colapsos de silos. Estas falhas são observadas em múltiplas fases da análise de silos de concreto, começando pela inadequação da fundação para suportar sobrecargas inesperadas, até erros no dimensionamento que não consideram as variações térmicas, as quais podem induzir tensões significativas na estrutura.

Conforme discutido por Maraveas (2020) e Yuan (2011), as falhas de projeto em silos podem ter consequências graves, frequentemente necessitando de intervenções complexas e onerosas para a recuperação estrutural. Tais falhas podem afetar negativamente a funcionalidade dos silos. A detecção precoce de sinais de deterioração é importante, pois permite a implementação de soluções mais simples e eficazes, evitando problemas mais sérios no futuro e, conseqüentemente, estendendo a vida útil das estruturas.

Conforme Bilčík et al. (2021), Carson (2003) e Carson (2001), é possível identificar que além das falhas de projeto, outros fatores comuns de colapso incluem corrosão, falhas de execução, uso inadequado resultando em tensões não previstas, negligência na manutenção, explosões e sismos. Este conjunto de causas destaca a necessidade de uma abordagem rigorosa no projeto, na execução e na manutenção de silos, visando a segurança e a durabilidade dessas estruturas críticas.

As manifestações patológicas atingem construções civis em ambientes agressivos distintos. Portanto, são necessárias inspeções técnicas e intervenções conforme métodos que reduzam subjetividades e assegurem soluções adequadas quanto à durabilidade. Mesmo com o avanço tecnológico que os materiais de construção e os processos construtivos vem alcançando ao longo dos anos, ainda existem diversos registros de falhas e anomalias nas edificações. Essas falhas ocasionam danos ao desempenho das edificações, e conseqüentemente geram as manifestações patológicas, as quais podem se manifestar em qualquer etapa do ciclo de vida de uma edificação, ou seja, durante o projeto, a construção ou anos após a fase de funcionamento e operação (Medeiros, 2020).

Dessa forma, verifica-se que a fissura é uma das principais manifestações patológicas em silos de concreto. E por isso serão estudadas nesse trabalho. Conforme Santos (2023), as causas de fissuras em silos de concreto são decorrentes de erros na montagem do silo, falha de projetos, falta de especialização para operar equipamentos, recalque na estrutura e falta de manutenção.

Os danos estruturais em edificações reduzem sua vida útil e representam riscos à segurança dos ocupantes. Inspeções regulares são importantes para identificar e avaliar a gravidade e o tipo de danos, estabelecendo uma base sólida para reparos necessários e assegurando operações seguras. Em particular, a fissuração do concreto é um dos danos mais críticos, afetando a durabilidade, a segurança e a manutenção do edifício, além de diminuir sua capacidade de carga. A detecção e correção precoce dessas fissuras podem resultar em

economias substanciais em manutenção e evitar perdas maiores de propriedade e riscos à vida (Wang et al., 2024).

Assim como outras construções, unidades de armazenamento também apresentam problemas patológicos, que podem comprometer a estrutura, reduzindo o desempenho esperado e o tempo de vida útil do equipamento. Erros na construção de uma estrutura ou montagem de silo pode resultar danos irreversíveis, incluindo perdas ou contaminação dos grãos, deterioração na estrutura de concreto e/ou metálica, custos para substituições, problemas ambientais e responsabilidade legal com terceiros (Santos, 2023).

1.3 TÉCNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA DIAGNÓSTICO DE FISSURAS

1.3.1 VANT

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), ou Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS), ou como são mais conhecidos, "drones", podem fornecer conjuntos de dados de resolução espacial em áreas locais ou em larga escala (Woodget, 2017; Koutalakis, 2019). Como definido por Watts (2012), o VANT é um componente de um sistema aéreo/aeronave não tripulada, que inclui a ferramenta, o piloto e o sistema de comunicação.

Em especial, os VANTs estão se tornando cada vez mais relevantes como uma nova abordagem para obter dados e realizar inspeções visuais, destacando-se pela redução do tempo de execução e melhoria na identificação de riscos (Rocha; Póvoas, 2019; Ballesteros; Lordsleem Jr, 2021; Lima; Costa, 2023).

Os VANTs têm se destacado no uso em infraestruturas civis, graças aos seus custos de manutenção reduzidos, facilidade de operação, habilidade de permanecer estáticos no ar e notável mobilidade. De acordo com Sivakumar (2021), os VANTs são capazes de capturar fotografias de maneira mais rápida e precisa quando comparada com as imagens de satélite, o que facilita uma avaliação mais ágil das condições estruturais. A inspeção e manutenção de edificações verticais precisam ser realizadas periodicamente, e a detecção de fissuras é um ponto relevante do processo de inspeção. Além disso, como citado por Bhowmick et al. (2020), todo o processo é propenso a erros humanos e, devido à sua dimensão e extensão, algumas regiões das estruturas civis são de difícil acesso para inspeção manual.

A detecção de fissuras é de importância significativa para a inspeção estrutural de concreto. Existem vários sistemas de detecção de fissuras baseados em VANTs, mas quantificar as fissuras continua a ser um desafio (Ding et al., 2023).

1.3.2 LASER SCANNER

Nos últimos anos, houve uma ampla expansão no uso do Laser Scanner Terrestre (LST) para documentação gráfica e métrica de objetos, principalmente por ser uma técnica não-destrutiva e não-invasiva, eliminando a necessidade de contato direto. Equipamentos de Sensoriamento Remoto como os lasers scanners permitem a captura de uma grande quantidade de dados de pontos distribuídos na superfície examinada, com alta precisão e uma taxa de aquisição rápida (milhares a milhões de pontos por segundo) (Pavi et al., 2014).

1.3.3 INSPEÇÕES PERÍODICAS

As inspeções periódicas tornam-se um procedimento essencial para o acompanhamento e evolução de cada etapa das atividades que estão sendo desenvolvidas em uma obra, devendo seguir as recomendações da NBR 16747 (ABNT, 2020) que apresenta diretrizes, conceitos e método para a execução de inspeções prediais, com objetivo de fomentar elementos que auxiliem no diagnóstico de eventuais falhas, anomalias ou manifestações patológicas.

Para Amorim et al. (2023), a classificação da inspeção predial é feita conforme o nível de qualificação do inspetor e da finalidade, sendo:

- Nível 1: inspeção realizada por profissional habilitado, visando identificar as anomalias aparentes através de uma vistoria visual.
- Nível 2: inspeção para detectar anomalias aparentes com o auxílio de equipamentos, realizada por especialistas de diferentes áreas, e que incluem orientações técnicas relevantes.
- Nível 3: inspeção para identificar anomalias aparentes, e das ocultas detectáveis com o uso de equipamentos, incluindo testes e ensaios específicos em campo ou laboratório, elaborada por profissionais de diferentes áreas e com orientações técnicas relevantes. Esse nível geralmente se aplica a imóveis que apresentam suspeitas de defeitos ocultos significativos.

Entretanto, é comum que a avaliação seja realizada utilizando apenas inspeção visual (Nível 1), uma avaliação subjetiva será atribuída aos componentes da ponte pelo inspetor responsável. A inspeção visual fornece informações úteis sobre os defeitos visíveis que começam a aparecer nos elementos estruturais. A detecção de fissuras é um exemplo, que pode oferecer informações úteis, porém frequentemente torna-se visível tardiamente devido à deterioração da estrutura. Muitos danos no interior da estrutura são difíceis de identificar e visualizar (Choquepuma, 2011)

A inspeção visual não substitui de forma alguma, outros tipos de ensaio não destrutivos, mas pode auxiliar no andamento da atividade e na escolha de um possível ensaio que possa ser realizado na sequência.

2. MÉTODOS

Essa pesquisa é de caráter quantitativo, pois trata-se de uma Revisão Sistemática da Literatura de artigos. E tem sua natureza como aplicada, ao tratar de métodos utilizáveis no setor industrial. A pesquisa é exploratória-descritiva, por abordar a temática de uma maneira panorâmica, mas também se aprofundar no tema, compõe uma grande base de dados e busca estudos transversais.

A estratégia de pesquisa, para esta revisão sistemática, foi embasada nas diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esta abordagem estruturada assegurou uma análise abrangente e metódica das literaturas pertinentes ao tema (Liberati; Altman; Tetzlaff, 2009). Este protocolo orientou a seleção e

análise de artigos científicos recentes e relevantes que delineiam os métodos de medição de fissuras em concreto.

A pesquisa foi realizada em outubro de 2023, contemplando os artigos publicados de 2016 até 2023 e por meio das opções de pesquisa fornecidas pelo Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pesquisando no “assunto” e no “título” do artigo. No processo de construção da coleta de artigos, foram utilizadas concatenações de palavras-chaves específicas, adaptadas conforme as limitações de cada base de dados.

Para a base de dados Engineering Village e SCOPUS, foi utilizada a sequência: "Fissuras" OR "Detecção de fissuras" OR "Crack detection" OR "Crack" OR "Damage" OR "durability" OR "failure" AND "Concreto" OR "Concrete" OR "Reinforced concrete" AND "Quantificação" OR "Mensuração" OR "Medir" OR "Mensurar" OR "Detectar" OR "Quantification" OR "Measurement" OR "Detection" OR "Detect" OR "Inspeção" OR "Inspector" OR "Inspection" AND "Silo" OR "Tank". Enquanto para a Web of Science, foi utilizada a sequência: "Fissuras" OR "Detecção de fissuras" OR "Crack detection" OR "Crack" AND "Concreto" OR "Concrete" OR "Reinforced concrete" AND "Quantificação" OR "Mensuração" OR "Medir" OR "Mensurar" OR "Detectar" OR "Quantification" OR "Measurement" OR "Detection" OR "Detect" OR "Inspeção" OR "Inspector" OR "Inspection" AND "Silo" OR "Tank". E para a ScienceDirect, foi pesquisado: "Crack" OR "Damage" OR "failure" AND "Concrete" OR "Reinforced concrete" AND "Detection" OR "Inspection" AND "Silo" OR "Tank".

Essas sequências lógicas de palavras foram formuladas para abranger termos relevantes associados à medição e detecção de fissuras em estruturas de concreto, com foco específico em silos. A utilização dessas sequências assegurou uma busca abrangente e eficaz nas bases de dados, possibilitando a identificação de estudos significativos para a revisão sistemática da literatura.

Para seleção dos artigos, foram aplicados vários critérios de seleção: (a) Artigos acessíveis no portal de periódicos CAPES para download gratuito; (b) Por idioma (trabalhos em português e inglês); (c) Por tópico (artigos relacionados à engenharia civil, arquitetura e construção); (d) Por duplicatas (trabalhos científicos não duplicados); (e) Por título (excluiu-se os artigos que não consideram concreto); (f) Por resumo (excluiu-se os artigos que não contêm os parâmetros de interesse analisados na revisão). Também foram utilizados critérios de sintetização dos seguintes dados: autoria; ano de publicação; metodologia do estudo; tecnologias utilizadas, elementos de concreto estudados, objetivos dos estudos, vantagens e desvantagens dos métodos, comparação com a inspeção tradicional, resultados e conclusões. Foram excluídos artigos cujo não estão em inglês ou português, por duplicidade, estudos de revisão sistemática, meta-análises, sem o texto completo disponível e com resumo não disponível. No quadro 1, são apresentados os critérios de inclusão (C1) e critérios de exclusão (C2).

Quadro 1 - Critérios de Inclusão (CI) e Critérios de Exclusão (CE)

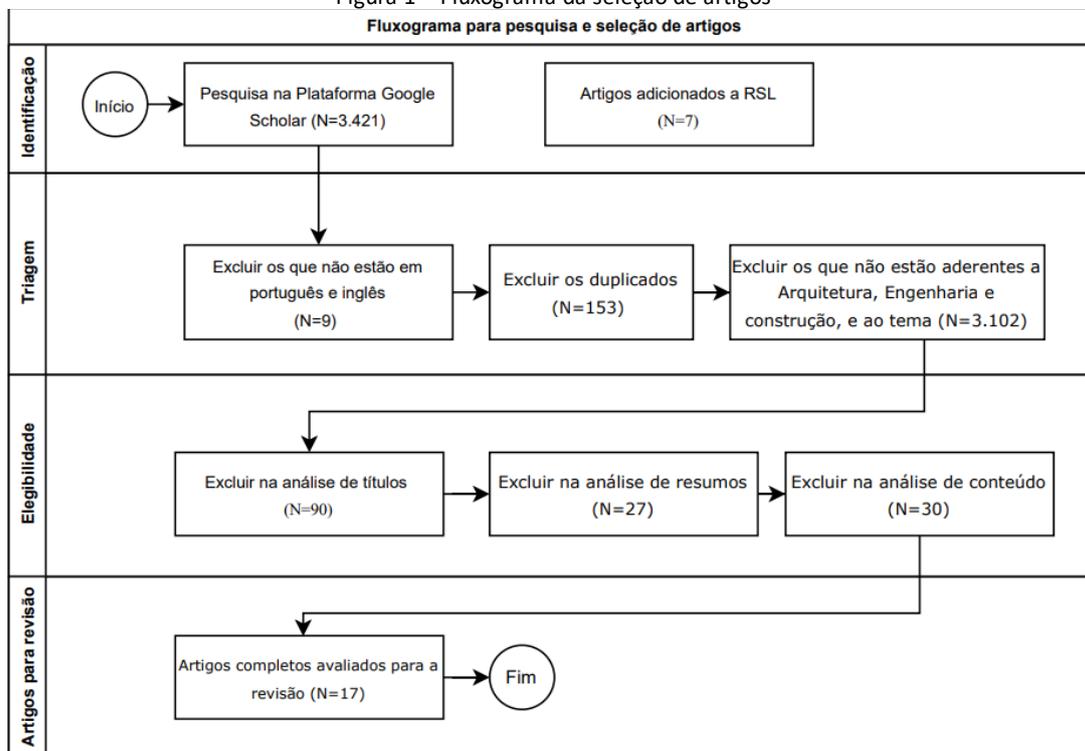
Critérios	Descrição
Critérios de inclusão	(CI1) Artigos de periódicos
Critérios de exclusão	(CE1) Por idioma, não consta em inglês ou português
	(CE2) Duplicados
	(CE3) Não estão aderentes a Arquitetura, Engenharia e construção, e ao tema
	(CE4) Artigos que não possuem palavras-chave da pesquisa no título, resumo e conteúdo

Fonte: Autoria Própria (2024).

Desse modo, a metodologia da pesquisa consiste em uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de realizar uma análise crítica das publicações científicas mais relevantes do tema, com enfoque na comparação dos métodos para medição de fissuras em estruturas de concreto. É abordada a complexidade dos métodos utilizados e das tecnologias empregadas para uma avaliação mais robusta dos procedimentos.

A identificação dos estudos relevantes nas bases de dados resultou em 17 artigos nesta RSL. Detalhando as aplicações dos filtros, tem-se: a) etapa de identificação – foram selecionados 3.421 artigos na base de dados; b) etapa de triagem – conforme a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão dos estudos, foram excluídos, 9 por idioma, 153 por duplicidade, 3.102 por não ser aderente ao tema; c) etapa de elegibilidade: 90 por título, 27 pelo resumo e 30 por conteúdo. Todo esse processo de seleção e aplicação dos critérios de elegibilidade pode ser observado através do fluxograma da seleção dos artigos na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da seleção de artigos



Fonte: Autoria Própria (2024).

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS

De acordo com a busca de dados, temos na tabela 1 a quantidade de artigos por etapa, resultando os 17 artigos aderentes a pesquisa.

Tabela 1 – Quantidade de artigos por etapa

Descrição	Quantidade
Artigos selecionados	3428
Excluídos por idioma	9
Artigos duplicados	153
Não aderentes a pesquisa	3102
Excluídos na análise do título	90
Excluídos na análise do resumo	27
Excluídos na análise do conteúdo	30

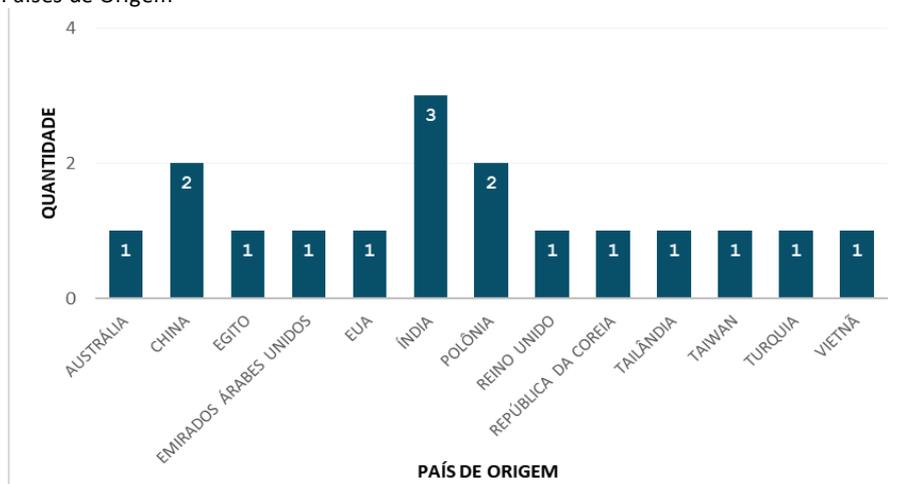
Fonte: Autoria Própria (2024).

Na análise dos dados coletados, destacam-se alguns pontos relevantes para o estudo em questão. Um deles é a investigação dos anos de publicação dos artigos, conforme apresentado na Figura 2. Além disso, foram obtidas informações sobre os países onde as pesquisas foram realizadas, como evidenciado na Figura 3. Notavelmente, percebe-se uma diversidade de países que têm utilizado medição de fissuras em estruturas de concreto. Observa-se que a maioria das pesquisas estão concentradas nos últimos anos, havendo um pico no ano de 2023, com 10 artigos publicados (Figura 2), demonstrando a importância e o atual contexto do tema.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 3 – Países de Origem



Fonte: Autoria Própria (2024).

3.2 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS

No Quadro 2, encontram-se os 17 estudos selecionados na pesquisa, representados de forma sintetizada.

Quadro 2 – Artigos selecionados para a revisão sistemática da literatura

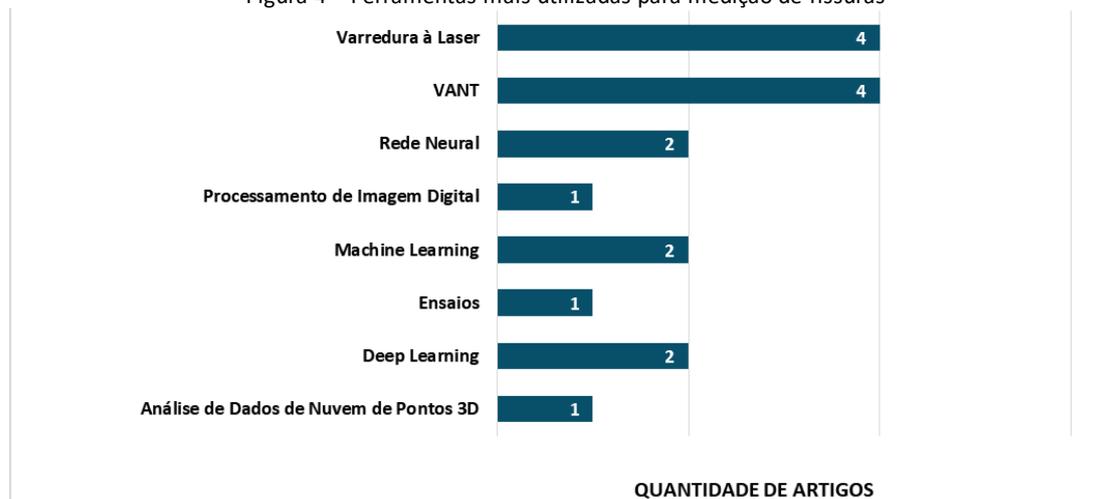
No	Referências	Ferramentas utilizadas
1	Ding et al. ,2023	VANT
2	Howiacki et al. ,2023	Ensaio
3	Woo H.-J et al. ,2023	VANT
4	Fawzy et al. ,2023	Varredura à Laser
5	Prieto et al. ,2023	VANT
6	Sztubecki et al. ,2022	Varredura à Laser
7	Chaiyasarn et al. ,2022	Deep Learning
8	Mohammadi et al. ,2019	Análise de Dados de Nuvem de Pontos 3D
9	Pitchaiah et al. ,2020	Rede Neural
10	Dinh et al. ,2023	Machine Learning
11	Philip et al. ,2023	Rede Neural
12	Ozkaya et al. ,2023	Machine Learning
13	Li; Zhao ,2020	Deep Learning
14	Nyathi et al. ,2023	Varredura à Laser
15	Giri et al. ,2016	Varredura à Laser
16	Li et al. ,2023	VANT
17	Barkavi et al. ,2019	Processamento de Imagem Digital

Fonte: Autoria Própria (2024).

A análise qualitativa foi estruturada nos seguintes tópicos, visando reunir as publicações recentes de diversos autores, sobre os métodos relacionados a medições de fissuras em silos de concreto.

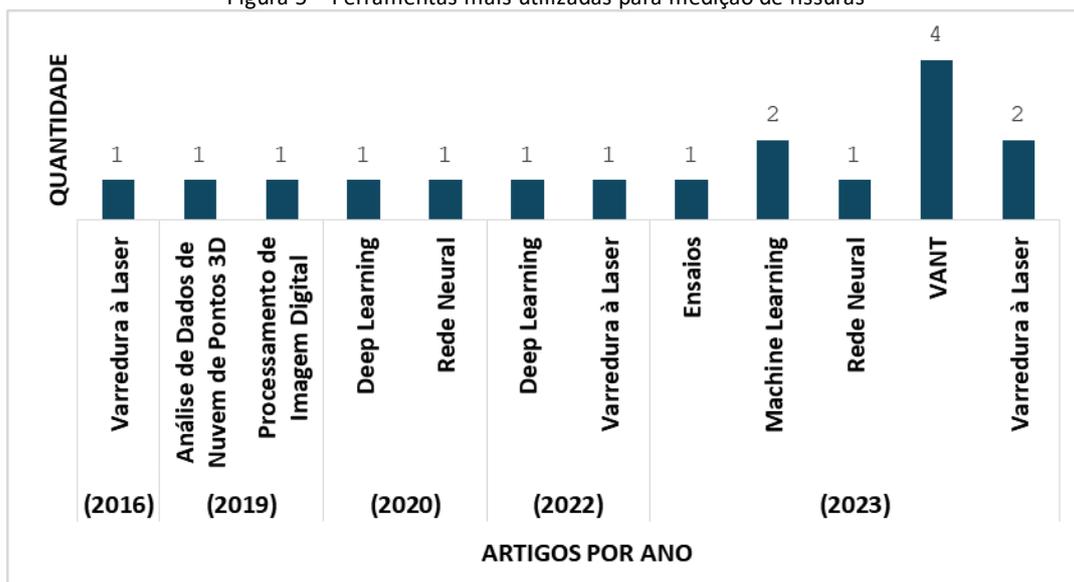
A Figura 4 apresenta as ferramentas utilizadas nas pesquisas resultantes da RSL, enquanto a Figura 5 indica as ferramentas utilizadas por ano, revelando assim, uma sequência cronológica no uso dessas ferramentas, a fim de apresentar tecnologias emergentes e tendências mercadológicas. É possível verificar a diversidade de métodos aplicados na medição de fissuras em estruturas de concreto, abrangendo várias tecnologias, aplicações e níveis de precisão. Os recursos de softwares especializados em reconhecimento de padrões emergem como soluções avançadas. Estas tecnologias possibilitam um progresso na precisão, eficiência e segurança das medições de fissuras, minimizando a necessidade de inspeção humana direta e possibilitando uma análise mais abrangente e detalhada das fissuras em concreto.

Figura 4 – Ferramentas mais utilizadas para medição de fissuras



Fonte: Omitida para avaliação cega (2014)

Figura 5 – Ferramentas mais utilizadas para medição de fissuras



Fonte: Omitida para avaliação cega (2014)

Em relação aos sistemas utilizados nos estudos analisados, vários autores empregaram mais de um método em suas pesquisas. Dentre eles, O VANT e a Varredura à laser se destacam como os mais utilizados, suas funcionalidades permitem mecanismos de obtenção de dados visuais, facilitando a tomada de decisões nos projetos de reforma dessas estruturas, otimizando a gestão de tempo e reduzindo a ocorrência de erros.

Segundo o conjunto de autores que utilizaram VANT para captação de imagens de fissuras, Ding et al. (2023), Woo H.-J et al. (2023), Ko et al. (2023) e Li et al. (2023), o VANT obteve sucesso na detecção e quantificação precisa de fissuras em concreto. Entretanto, há limitações identificadas sobre a dependência da qualidade da imagem, condições de iluminação e da precisão na calibração da câmera, que podem afetar a detecção de fissuras muito finas.

O uso da Varredura a Laser, citado pelos autores, Fawzy et al. (2023), Sztubecki et al. (2022), Nyathi et al. (2023), e Giri et al. (2016), destacou que o mapeamento com as imagens geradas com laser scan foi eficaz com precisão similar ao acompanhamento das fissuras com a utilização do método tradicional de inspeção visual. Porém, para estruturas de grande porte e altura, como silos de concreto, o acesso e a distância para locação dos equipamentos da varredura a laser pode ser um fator complicador.

Os autores Li e Zhao (2020) e Chaiyasarn et al. (2022), apresentam o método de Deep Learning e demonstram que é possível processar grandes volumes de dados de imagens de forma rápida e automatizada, permitindo uma detecção eficiente de fissuras em tempo real. No entanto, há a necessidade de conjuntos de dados extensos e bem rotulados para treinamento adequado, além da complexidade computacional e de implementação dos modelos, que exigem recursos significativos de hardware, além da expertise técnica.

Dinh et al. (2023) e Ozkaya et al. (2023) utilizaram o machine learning na identificação de fissuras em estruturas de concreto, destaca-se em processar eficientemente grandes volumes de dados de imagem, permitindo uma detecção automatizada e precisa de fissuras. Além disso, esses modelos podem aprender padrões complexos de fissuras nas imagens. No entanto, desafios como a necessidade de conjuntos de dados robustos e representativos para o treinamento adequado do método, assim como a dependência de parâmetros bem ajustados e da escolha correta do algoritmo, podem influenciar diretamente na eficácia do sistema.

Os estudos de Philip et al. (2023) e Pitchaiah e Srinivasa Rao (2020) destacam avanços significativos no uso de redes neurais para a detecção de fissuras em estruturas de concreto. Philip et al. (2023) utilizou transfer learning para adaptar modelos pré-treinados, melhorando a precisão da detecção, enquanto Pitchaiah & Srinivasa Rao exploraram uma abordagem otimizada para identificar fissuras em vigas espessas de concreto. Ambos os métodos apresentaram resultados eficazes na criação de modelos robustos, mas enfrentam desafios como a necessidade de dados extensos e complexidade computacional.

O estudo de Mohammadi et al (2019) propõe um método avançado de análise de nuvens de pontos não temporais para detectar fissuras e defeitos em superfícies de concreto. A pesquisa propõe uma detecção precisa e eficiente dos danos, sem depender de dados temporais contínuos, o que facilita sua implementação. Demonstra eficácia na detecção objetiva de fissuras em estruturas, utilizando uma abordagem baseada em descrições geométricas da superfície.

Segundo Barkavi et al (2019), o método de processamento de imagens digitais possui uma alta precisão na medição das fissuras em concreto utilizando um algoritmo desenvolvido em MATLAB, capaz de medir tanto o comprimento quanto a largura da fissura. Entretanto, a necessidade de intervenção humana para capturar imagens e selecionar pontos de referência na fissura pode ser considerada um ponto frágil.

Howiacki et al. (2023) compararam diversas ferramentas de Optical Fiber Distributed Fiber Optic Sensors (DFOS) para monitoramento de fissuras em concreto, com foco no coeficiente de forma dessas fissuras. Por meio de comparações de resultados, é apresentado que a tipologia do cabo ou de sensor escolhidos deve ser consciente e precedida por uma análise detalhada das vantagens e possíveis limitações. A pesquisa apresentada mostra que a solução ideal depende da baixa rigidez axial e faixa máxima de deformação.

Comparando os métodos, é evidente uso do VANT traz como benefícios a possibilidade de acesso a áreas restritas e de risco à segurança, redução de tempo do projeto, baixo custo e precisão dos dados coletados. A abordagem supera as limitações do método de inspeção visual, oferecendo um processo mais seguro, mais consistente e não dependente de intervenção humana direta, além de não necessitar a interrupção da operação na estrutura.

4. CONCLUSÃO

A partir da revisão sistemática da literatura, foi possível confirmar a diversidade de metodologias aplicadas na medição de fissuras em estruturas de concreto, abrangendo várias tecnologias, aplicações e níveis de precisão. Esta investigação evidenciou uma evolução significativa das práticas convencionais, baseadas primordialmente na inspeção visual e na intervenção direta em locais comprometidos, avançando para a incorporação de técnicas inovadoras e autônomas.

A crescente utilização dessas abordagens nesses estudos sinaliza para uma transição paradigmática nos procedimentos das inspeções de fissuras em concreto, indicando uma tendência crescente para a adoção de métodos automatizados e não invasivos. Este avanço representa, não apenas um incremento na acurácia das avaliações, mas também contribui para a otimização no processo de reabilitação de estruturas, possibilitando a redução de custos e tempo.

A pesquisa também indica que o uso de VANTs na indústria civil, é associado a técnicas padronizadas para a captura de imagens, que potencializam a qualidade e características dos resultados na medição de fissuras, e conseqüentemente permitem uma análise técnica mais criteriosa. A viabilidade técnica do procedimento de inspeção de fissuras com VANT foi confirmada pelos resultados obtidos na revisão sistemática da literatura, sendo capazes de diferenciar elementos estruturais e não estruturais.

5. REFERÊNCIAS

ALI, Luqman et al. Performance evaluation of deep CNN-based crack detection and localization techniques for concrete structures. *Sensors*, v. 21, n. 5, p. 1688, 2021.

- BALLESTEROS, Ramiro Daniel; LORDSLEEM JUNIOR, Alberto Casado. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para inspeção de manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 119-137, 2020.
- BARKAVI, T.; CHIDAMBARATHANU, Natarajan. Processing digital image for measurement of crack dimensions in concrete. **Civil Engineering Infrastructures Journal**, v. 52, n. 1, p. 11-22, 2019.
- BILČÍK, Juraj et al. Causes of failures in circular concrete silo walls, particularly under environmental influences. **Slovak Journal of Civil Engineering**, v. 29, n. 4, p. 1-8, 2021.
- BHOWMICK, Sutanu; NAGARAJIAH, Satish; VEERARAGHAVAN, Ashok. Vision and deep learning-based algorithms to detect and quantify cracks on concrete surfaces from UAV videos. **Sensors**, v. 20, n. 21, p. 6299, 2020.
- CARSON, John W. Silo failures: case histories and lessons learned. **Handbook of Powder Technology**, v. 10, p. 153-166, 2001.
- CARSON, John W.; HOLMES, Tracy. Silo failures: why do they happen?. **TASK Quarterly**, v. 7, n. 4, p. 499-512, 2003.
- CHAIYASARN, Krisada et al. Integrated pixel-level CNN-FCN crack detection via photogrammetric 3D texture mapping of concrete structures. **Automation in Construction**, v. 140, p. 104388, 2022.
- CHOQUEPUMA SAHUINCO, Melquiades Hermógenes. **Utilização de métodos não destrutivos e semi destrutivos na avaliação de pontes de concreto**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- DING, Wei et al. Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer. **Automation in Construction**, v. 152, p. 104929, 2023.
- DINH, Tran Hiep et al. Toward vision-based concrete crack detection: automatic simulation of real-world cracks. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 1-15, 2023.
- FAWZY, Hossam El-Din; KANDEEL, Reham; FARHAN, Magda. Detection of deformations in reinforced concrete structures using modern surveying techniques. **Alexandria Engineering Journal**, v. 70, p. 191-218, 2023.
- GALLEGO, Eutiquio; RUIZ, Angel; AGUADO, Pedro J. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 281-289, 2015.
- GIRI, Paritosh; KHARKOVSKY, Sergey. Detection of surface crack in concrete using measurement technique with laser displacement sensor. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 65, n. 8, p. 1951-1953, 2016.
- HOWIACKI, Tomasz et al. Crack shape coefficient: comparison between different DFOS tools embedded for crack monitoring in concrete. **Sensors**, v. 23, n. 2, p. 566, 2023.
- KHALIL, Mohammad; RUGGIERI, Sergio; UVA, Giuseppina. Assessment of structural behavior, vulnerability, and risk of industrial silos: state-of-the-art and recent research trends. **Applied Sciences**, v. 12, n. 6, p. 3006, 2022.
- KO, Pi; PRIETO, Samuel A.; DE SOTO, Borja García. Developing a free and open-source semi-automated building exterior crack inspection software for construction and facility managers. **IEEE Access**, 2023.
- KOUTALAKIS, Paschalis; TZORAKI, Ourania; ZAIMES, George. UAVs for hydrologic scopes: application of a low-cost UAV to estimate surface water velocity by using three different image-based methods. **Drones**, v. 3, n. 1, p. 14, 2019.
- KUMAR, Dumma Umesh; REDDY, V. Mallikarjuna. Analysis and design of reinforced concrete silo by conventional method. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2023. p. 01200.
- LI, Shengyuan; ZHAO, Xuefeng. Automatic crack detection and measurement of concrete structure using convolutional encoder-decoder network. **IEEE Access**, v. 8, p. 134602-134618, 2020.
- LIBERATI, Alessandro et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **Annals of Internal Medicine**, v. 151, n. 4, p. W-65-W-94, 2009.
- MAJ, Marek. Some causes of reinforced concrete silos failure. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 685-691, 2017.
- MARAVEAS, Chrysanthos. Concrete silos: failures, design issues and repair/strengthening methods. **Applied Sciences**, v. 10, n. 11, p. 3938, 2020.
- KHAN, Md Al-Masrur et al. Image processing techniques for concrete crack detection: a scientometrics literature review. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2400, 2023.

- MEDEIROS, Alisson Gadelha de et al. Aplicação de metodologias de inspeção em ponte de concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 687-702, 2020.
- MOHAMMADI, Mohammad Ebrahim; WOOD, Richard L.; WITTICH, Christine E. Non-temporal point cloud analysis for surface damage in civil structures. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 12, p. 527, 2019.
- NYATHI, Mthabisi Adriano; BAI, Jiping; WILSON, Ian David. Concrete crack width measurement using a laser beam and image processing algorithms. **Applied Sciences**, v. 13, n. 8, p. 4981, 2023.
- OZKAYA, Suat Gokhan; BAYGIN, Mehmet. A new concrete crack detection based on deep feature extraction. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, v. 6, n. 6, p. 98-105, 2023.
- PAVI, Suelen; BORDIN, Fabiane; VERONÉZ, Maurício Roberto. O potencial do uso do laser scanner terrestre para a identificação de manifestações patológicas em obras de arte especiais: uma revisão bibliográfica. In: **X Congresso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras – CINPAR**, Santiago de Chile, Anais..., 2014. p. 1-15.
- PHILIP, Remya Elizabeth et al. A comparative study on crack detection in concrete walls using transfer learning techniques. **Journal of Composites Science**, v. 7, n. 4, p. 169, 2023.
- PITCHAIAH, Dasaripalle; SRINIVASA RAO, Putti. Optimized deep learning with opposition-based ant lion approach for crack identification of thick beams. **Surface Review and Letters**, v. 27, n. 08, p. 1950194, 2020.
- PRUSIEL, Jolanta Anna. Cracking state analysis of reinforced concrete grain silos structures. **Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo**, p. 156-161, 2020.
- ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; PÓVOAS, Yêda Vieira. Detecção de corrosão em concreto armado com termografia infravermelha e ultrassom. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 53-68, 2019.
- SANTOS, Giovanni Pereira dos et al. **O uso do concreto e do aço em obras da alvenaria estrutural: uma análise do processo produtivo e da cadeia de suprimentos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.
- SIVAKUMAR, Mithra; TYJ, Naga Malleswari. A literature survey of unmanned aerial vehicle usage for civil applications. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 13, p. e4021, 2021.
- SZTUBECKI, Jacek et al. Experimental research of the structure condition using geodetic methods and crackmeter. **Applied Sciences**, v. 12, n. 13, p. 6754, 2022.
- TRONCO, Adriano Antonio et al. **Sistema de varredura a laser terrestre (SVLT): um estado da arte e possibilidades no meio urbano**. 2019.
- WANG, Jiehui et al. Automatic detection of building surface cracks using UAV and deep learning-combined approach. **Structural Concrete**, 2024.
- WOO, Hyun-Jung et al. Defining structural cracks in exterior walls of concrete buildings using an unmanned aerial vehicle. **Drones**, v. 7, n. 3, p. 149, 2023.
- YU, Xie et al. Behavior of a large steel field silo structure subject to grain loading. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 31, n. 5, p. 04017038, 2017.
- YUAN, Guang Lin; TIAN, Lu Dan. Analysis and design recommendations for the collapse of a concrete silo. **Advanced Materials Research**, v. 250, p. 2877-2880, 2011.
- ZHANG, Yaxiong et al. DEM study in the critical height of flow mechanism transition in a conical silo. **Powder Technology**, v. 331, p. 98-106, 2018.
- WATTS, Adam C.; AMBROSIA, Vincent G.; HINKLEY, Everett A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1671-1692, 2012.
- WOODGET, Amy S. et al. Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 4, n. 4, p. e1222, 2017.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

- **Concepção e Design do Estudo:** Diogo Cavalcanti Oliveira e Alberto Casaldo Lordsleem Jr.
 - **Curadoria de Dados:** Diogo Cavalcanti Oliveira e Laura Nogueira Cordeiro
 - **Análise Formal:** Diogo Cavalcanti Oliveira
 - **Aquisição de Financiamento:** Yêda Vieira Póvoas
 - **Investigação:** Diogo Cavalcanti Oliveira e Alberto Casaldo Lordsleem Jr.
 - **Metodologia:** Diogo Cavalcanti Oliveira
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Diogo Cavalcanti Oliveira
 - **Redação - Revisão Crítica:** Laura Nogueira Cordeiro, Alberto Casaldo Lordsleem Jr., Thais Cohen de Almeida Costa, Emanuel Silva de Amorim e Yêda Vieira Póvoas.
 - **Revisão e Edição Final:** Diogo Cavalcanti Oliveira, Laura Nogueira Cordeiro, Alberto Casaldo Lordsleem Jr., Thais Cohen de Almeida Costa, Emanuel Silva de Amorim e Yêda Vieira Póvoas.
 - **Supervisão:** Diogo Cavalcanti Oliveira e Laura Nogueira Cordeiro.
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, [Diogo Cavalcanti Oliveira, Laura Nogueira Cordeiro, Alberto Casaldo Lordsleem Jr., Thais Cohen de Almeida Costa, Emanuel Silva de Amorim e Yêda Vieira Póvoas], declaramos que o manuscrito intitulado "Revisão Sistemática de Literatura Relativa à Medição de Fissuras em Silos de Concreto":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
 2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-