



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
CAMPUS TRINDADE
ENGENHARIA CIVIL

AFONSO FREITAS DA SILVA FILHO

**ANÁLISE NUMÉRICA DAS VIBRAÇÕES DO SINO VOX PATRIS POR MEIO DE
SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS E SUA PROPAGAÇÃO DE ONDA NO
NOVO SANTUÁRIO DO DIVINO PAI ETERNO EM TRINDADE – GO.**

Trindade
2025

AFONSO FREITAS DA SILVA FILHO

**ANÁLISE NUMÉRICA DAS VIBRAÇÕES DO SINO VOX PATRIX POR MEIO DE
SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS E SUA PROPAGAÇÃO DE ONDA NO
NOVO SANTUÁRIO DO DIVINO PAI ETERNO EM TRINDADE – GO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil
do Instituto Federal Goiano Campus Trindade,
como parte da exigência para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Dr. Pedro Filipe de Luna Cunha

Trindade
2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

F866a FILHO, AFONSO
 ANÁLISE NUMÉRICA DAS VIBRAÇÕES DO SINO VOX
 PATRIS POR MEIO DE SOFTWARE DE ELEMENTOS
 FINITOS E SUA PROPAGAÇÃO DE ONDA NO NOVO
 SANTUÁRIO DO DIVINO PAI ETERNO EM TRINDADE –
 GO. / AFONSO FILHO. Trindade 2025.

36f. il.

Orientador: Prof. Dr. PEDRO FILIPE DE LUNA CUNHA.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0820084 -
Bacharelado em Engenharia Civil - Trindade (Campus Trindade).
I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |
| <input checked="" type="checkbox"/> Produto técnico e educacional - Tipo: Trabalho de Conclusão de Curso | |

Nome completo do autor:

Afonso Freitas da Silva Filho

Matrícula:

2021108200840390

Título do trabalho:

ANÁLISE NUMÉRICA DAS VIBRAÇÕES DO SINO VOX PATRIS POR MEIO DE SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS E SUA PROPAGAÇÃO DE ONDA NO NOVO SANTUÁRIO DO DIVINO PAI ETERNO EM TRINDADE

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01 / 02 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Trindade - GO
Local

01 / 02 / 2026
Data

Afonso Freitas da Silva Filho

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Pedro Filipe de Luna Cunha

Assinatura do(a) orientador(a)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS TRINDADE



ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 27 dias do mês de novembro de 2025, às 17 horas e 00 minutos, na presença da Banca Examinadora presidida pelo Professor Pedro Filipe de Luna Cunha e composta pelos avaliadores:

1. Marcel Wilian Reis Sales e
2. Vinicius Otto Ritzman Marzall

o aluno **Afonso Freitas da Silva Filho** apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **Análise Numérica Das Vibrações Do Sino Vox Patris Por Meio De Software De Elementos Finitos E Sua Propagação De Onda No Novo Santuário Do Divino Pai Eterno Em Trindade – Go**, como requisito curricular indispensável para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pelo Instituto Federal Goiano Campus Trindade.

A Banca Examinadora deliberou e decidiu pela APROVAÇÃO (APROVAÇÃO/REPROVAÇÃO) do referido trabalho, divulgando o resultado formalmente ao aluno e demais presentes e eu, na qualidade de Presidente da Banca, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais examinadores e pelo aluno.

Trindade-GO, 27 de novembro de 2025.

Pedro Filipe de Luna Cunha
Presidente da Banca Examinadora

Marcel Wilian Reis Sales
Avaliador 01

Vinicius Otto Marzall
Avaliador 02

Afonso Freitas da Silva Filho
Aluno

RESUMO

O estudo da propagação sonora de fontes acústicas intensas, como sinos de grandes proporções, é fundamental para o planejamento urbano e a engenharia de edificações. O presente trabalho tem como objetivo principal determinar a distância máxima de audibilidade do sino *Vox Patris*, do Novo Santuário do Divino Pai Eterno em Trindade-GO, através de simulação numérica. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia no software de elementos finitos Abaqus, utilizando um modelo 2D axial-simétrico para representar um campo aberto ideal. Foi aplicada uma análise de estado estacionário (Steady-state dynamics) utilizando a frequência principal do sino (92,5 Hz), parâmetro este obtido em parecer técnico (Perlikowski, 2018). Por sua vez os dados de pressão acústica (POR) gerados pela simulação foram processados e convertidos para Nível de Pressão Sonora (dB). Já a análise dos resultados foi realizada plotando o Nível de Pressão Sonora (dB) pelo Logaritmo da Distância, o que permitiu a geração de uma linha de tendência linear de alta confiabilidade ($R^2 \approx 0,9495$), validando que o modelo simulou corretamente a atenuação física da onda. A extrapolação desta linha de tendência para o limiar da audição (0 dB) demonstrou que a distância máxima teórica de propagação do sino, em um cenário idealizado sem ruído de fundo, é de aproximadamente 7,64 quilômetros. O estudo conclui que considerando as condições de campo livre simuladas, os resultados indicam que este valor representa uma estimativa de alcance em cenário idealizado. Desta forma, o trabalho contribui estabelecendo um modelo numérico que poderá ser refinado em estudos futuros

Palavras-Chave: Acústica. Propagação Sonora. Método dos Elementos Finitos. Sinos. Abaqus.

ABSTRACT

The study of sound propagation from intense acoustic sources, such as large bells, is fundamental for urban planning and building engineering. The main objective of this work is to determine the maximum audibility distance of the Vox Patris bell at the New Sanctuary of the Divine Eternal Father in Trindade-GO, through numerical simulation. To this end, a methodology was developed using the Abaqus finite element software, employing a 2D axial-symmetric model to represent an ideal open field. A steady-state dynamics analysis was applied using the bell's principal frequency (92.5 Hz), a parameter obtained from a technical report (Perlikowski, 2018). The acoustic pressure (POR) data generated by the simulation were then processed and converted to Sound Pressure Level (dB). The analysis of the results was performed by plotting the Sound Pressure Level (dB) against the Logarithm of the Distance, which allowed the generation of a highly reliable linear trend line ($R^2 \approx 0,9495$), validating that the model correctly simulated the physical attenuation of the wave. Extrapolation of this trend line to the hearing threshold (0 dB) demonstrated that the maximum theoretical propagation distance of the bell, in an idealized scenario without background noise, is approximately 7.64 kilometers. The study concludes that, considering the simulated free-field conditions, the results indicate that this value represents an estimate of the range in an idealized scenario. Thus, the work contributes by establishing a numerical model that can be refined in future studies.

Keywords: Acoustics. Sound Propagation. Finite Element Method. Bells. Abaqus.

LISTA DE FIGURAS

Figuras

Figura 1 – Imagem representativa do Novo Santuário	16
Figura 2 – Sino Vox Patris	18
Figura 3 – Peça modelada	21
Figura 4 – Elemento quadrático	22
Figura 5 – Magnitude	24
Figura 6 – Linha Tendência	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BC	Condições de Contorno
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador
COORD	Coordenada
MEF	Método dos Elementos Finitos
POR	Pressão Acústica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral.....	12
2.2 Objetivo Específico	12
3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	12
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1 Método Dos Elementos Finitos Na Análise De Vibrações.....	13
4.2 Aplicações Em Edificações Religiosas e Patrimoniais.....	16
4.3 Materiais e Geometria Estrutural.....	17
4.4 Ferramentas Computacionais Para Simulação	18
4.5 Pressão Sonora.....	19
4.6 Impactos Ambientais.....	20
5 METODOLOGIA.....	22
5.1 Parâmetros Físicos e Geométricos	22
5.2 Procedimento de Modelagem Computacional (Abaqus/CAE).....	23
5.3 Pós-Processamento e Tratamento de Dados	24
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
6.1 Modelagem no Software Abaqus.....	25
6.2 Pós-Processamento e Extração de Dados	28
6.3 Tratamento e Análise dos Dados.....	30
6.4 Validação do Modelo e Análise de Atenuação	30
6.5 Determinação da Distância Máxima de Audibilidade.....	31
7 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	32
8 CONCLUSÃO.....	33

1 INTRODUÇÃO

O estudo de vibrações e ondas sonoras em edificações é um tema de fundamental interesse para a engenharia. Estas têm um impacto direto na engenharia de edificações, uma vez que a propagação dessas ondas influencia a qualidade e o conforto acústico dos ambientes construídos (Kinsler, 2000).

Como ondas mecânicas, as ondas sonoras se propagam através de meios materiais, como o ar e os diversos materiais de construção, gerando vibrações que afetam a funcionalidade das edificações. No âmbito da engenharia, é crucial compreender a interação entre a propagação do som e a geometria dos ambientes. Fenômenos como a reflexão, refração e difração das ondas devem ser rigorosamente considerados, pois sua negligência pode levar ao aumento de ruídos indesejados, à formação de interferências (ondas estacionárias) ou a um isolamento acústico ineficaz (Minéia, 2005).

Além disso, as ondas sonoras, ao interagirem com edificações, podem gerar vibrações mecânicas que afetam a estabilidade estrutural, especialmente em fontes sonoras intensas e contínuas (Costa *et al.* 2013). A propagação das ondas acústicas depende de fatores como a frequência da fonte sonora, a geometria da edificação e as propriedades dos materiais envolvidos. Portanto, compreender os efeitos dessas vibrações torna-se importante para o projeto de estruturas em ambientes como indústrias, templos religiosos e espaços de grande circulação.

Contudo, nem todas as vibrações produzem a sensação de audição. O som só é percebido quando a amplitude e a frequência das vibrações estão dentro de faixas de valores específicas, existindo um limiar mínimo de audibilidade. Isso levanta um problema prático central para o planejamento urbano e de edificações: saber qual a distância máxima que a onda sonora de uma fonte, como um sino, pode percorrer antes de se tornar inaudível. Com base nestes aspectos, este estudo tem como objetivo principal investigar, por meio de software numérico, a propagação sonora de um sino para determinar sua máxima distância de audibilidade em campo aberto.

2 OBJETIVOS

Serão apresentados a seguir os objetivos gerais e específicos desse estudo.

2.1 Objetivo Geral

- Analisar os efeitos das ondas sonoras geradas por meio do sino Vox Patris com auxílio de *software* numérico, expondo assim a distância de sua onda de propagação.

2.2 Objetivo Específico

- Realizar uma modelagem com auxílio do *software* numérico, a fim de comprovar a sua propagação.

3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A justificativa para este estudo reside no impacto ambiental e social gerado por fontes sonoras de alta energia e baixa frequência em meios urbanos. Um paralelo contemporâneo relevante pode ser estabelecido com os parques eólicos: embora essenciais para a matriz energética, diversos estudos apontam que o ruído de baixa frequência gerado por grandes turbinas possui alta capacidade de propagação e penetração em edificações, causando incômodo significativo e potenciais danos à saúde das populações vizinhas. Conforme apontam Brito, Soares e Nazari (2013), a vibração gerada por fontes antropogênicas no meio urbano não é apenas um desconforto acústico, mas um agente físico capaz de causar danos às edificações e impactar a qualidade de vida. O sino Vox Patris, com sua massa de 55 toneladas e frequência fundamental de 92,5 Hz, atua como uma fonte pontual de magnitude comparável a equipamentos industriais pesados, justificando a necessidade imperativa de prever seu raio de influência antes de sua instalação definitiva.

A aplicação do presente estudo nesse tipo de edificação permite, uma abordagem preventiva baseada em simulação. Ao contrastar o modelo de campo aberto (o "quarto de círculo"), torna-se possível avaliar não apenas a propagação sonora ideal, mas quantificar o impacto da geometria arquitetônica na distribuição da pressão sonora. Essa análise é fundamental para projetos de restauração, instalação de novos sinos ou modernização dos sistemas de acionamento, como defendido por (Rapp, 2014), que relata casos em que sistemas antigos causaram danos visíveis a estruturas religiosas. A simulação da propagação sonora serve como subsídio técnico para decisões como a alteração da frequência de badaladas, o reposicionamento de sinos ou a instalação de barreiras acústicas discretas, posicionadas estrategicamente nos pontos de maior amplificação identificados pelo modelo.

Dessa forma, este estudo assume papel relevante na manutenção da autenticidade e da durabilidade desses bens culturais, fornecendo ferramentas tanto para a sua conservação interna quanto para a sua convivência com o entorno urbano.

A relevância, portanto, deste trabalho preenche uma lacuna técnica específica apontada no parecer internacional sobre o próprio objeto de estudo. Segundo Perlikowski (2018), devido à não linearidade do sistema e à massa sem precedentes do conjunto sino-carga, é impossível utilizar escalas lineares ou dados de sinos menores para prever o comportamento do *Vox Patris*. Portanto, a simulação numérica via Método dos Elementos Finitos não é apenas uma ferramenta auxiliar, mas o único meio seguro de validar os parâmetros de propagação e garantir que a operação do maior sino do mundo não comprometa o bem-estar da comunidade de Trindade-GO.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise numérica de vibrações estruturais e propagação de ondas acústicas em edificações complexas, como templos religiosos, envolve abordagens multidisciplinares que combinam engenharia estrutural, dinâmica de sistemas, acústica e simulação computacional. A utilização de sinos de grande porte, como o *Vox Patris*, requer estudos específicos para compreender o impacto vibratório gerado em componentes sensíveis das estruturas. Essa revisão apresenta os principais fundamentos científicos e aplicações metodológicas que dão suporte a esse tipo de investigação.

4.1 Método Dos Elementos Finitos Na Análise De Vibrações

O Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma das principais ferramentas computacionais utilizadas na engenharia para resolver problemas físicos complexos, especialmente aqueles relacionados à dinâmica estrutural, propagação de ondas e vibrações. Sua aplicação é particularmente relevante quando se trata da simulação do comportamento de estruturas sujeitas a excitações mecânicas e acústicas, como ocorre com sistemas que envolvem sinos e meios fluido-acústicos. Gonçalves *et al.* (2024) demonstram a eficácia do MEF na análise de estruturas históricas, permitindo a identificação precisa dos modos próprios de vibração e das frequências naturais, dados fundamentais para diagnósticos estruturais e para a prevenção de danos por ressonância. A confiabilidade dos resultados depende da correta representação das condições de contorno, da geometria e dos materiais, sendo recomendada a calibração com medições experimentais para maior precisão.

Girardi, *et al.* (2018) propõem avanços metodológicos importantes dentro da lógica do MEF, como a atualização de modelos (*model updating*) baseada em dados reais de campo. Essa técnica consiste em ajustar parâmetros do modelo numérico, como rigidez, densidade e módulo de elasticidade, até que os resultados simulados coincidam com os dados empíricos obtidos por meio de ensaios vibracionais. Esse processo é especialmente útil em estruturas patrimoniais, onde informações precisas sobre os materiais nem sempre estão disponíveis. Assim, a utilização do MEF vai além da análise preditiva e assume também um papel de ferramenta investigativa e de ajuste fino.

Segundo (Gonzalez, *et al.* 2022) o princípio fundamental do MEF é a discretização do domínio físico em pequenas sub-regiões, os elementos finitos. Essa fragmentação permite resolver numericamente equações diferenciais complexas, como aquelas que regem a propagação de ondas. No caso de simulações acústicas em meio fluido, como as propostas neste estudo, o MEF é aplicado para resolver a Equação de Helmholtz, que representa a equação da onda acústica no domínio da frequência. O procedimento de análise específico utilizado é o de Dinâmica de Estado Estacionário (*Steady-state dynamics, Direct*), que calcula a resposta forçada do sistema a uma excitação harmônica contínua. Segundo (KIT, 2006) esta abordagem, implementada pelo MEF, permite modelar condições de contorno não reflexivas (impedância acústica) para simular o campo aberto, viabilizando a análise de como a energia sonora se dispersa no ar a partir de uma fonte pontual.

Para este estudo o mais crucial é a amplitude da onda, que representa a magnitude máxima da perturbação de pressão (POR). Esta amplitude é o que percebemos fisicamente como "volume" ou intensidade sonora. Em um campo aberto, a propagação é tipicamente esférica, e a amplitude da onda atenua (diminui) à medida que se afasta da fonte. Segundo (Kinsler, 2000), esta atenuação ocorre devido à dispersão geométrica da energia por uma área cada vez maior, além da absorção pelo próprio ar. O objetivo central deste trabalho é, simular e extrapolar essa atenuação para determinar a distância na qual a amplitude da pressão sonora cai abaixo do limiar de audibilidade humana (0 dB).

Em ambientes complexos ou edificações, essa propagação ideal é rompida, logo, ela não consegue viajar sem nenhum obstáculo. A onda sonora sofre reflexões, difrações e interferências, criando regiões de intensificação (interferência construtiva) e zonas de sombra (interferência destrutiva), onde a pressão sonora é significativamente alterada. Já a ressonância pode ocorrer se a frequência da onda coincidir com uma frequência natural de um componente

físico, amplificando as vibrações locais. Pesquisas desenvolvidas pelo Karlsruher Institut für Technologie (KIT, 2006) evidenciam que fontes sonoras de alta intensidade são capazes de induzir vibrações em estruturas exclusivamente através do ar. Isso demonstra que a transferência de energia ocorre mesmo na ausência de contato mecânico direto entre a fonte e a edificação.

Para focar na propagação em meio fluido, a análise utiliza o Método dos Elementos Finitos para resolver numericamente a equação da onda acústica (Equação de Helmholtz, Equação 1) no domínio da frequência.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

p não é mais a pressão instantânea no tempo, mas sim a amplitude da pressão complexa (também conhecida como fasor).

∇^2 é o operador Laplaciano, que descreve a variação espacial da pressão (como ela se curva no espaço).

k é o número de onda ($k = \frac{\omega}{c} = 2\pi f/c$) que relaciona a frequência da onda (f , no nosso caso 92,5 Hz) e a velocidade do som no meio (c).

Esta abordagem, através de uma análise de estado estacionário, permite calcular a resposta de amplitude complexa (Real e Imaginária) em cada ponto do domínio para a frequência específica do sino. Isso possibilita o mapeamento da distribuição de pressão acústica e a previsão da intensidade sonora em Decibéis, permitindo entender como o som do sino se espalha e quais regiões são afetadas, mesmo sem a interação com elementos sólidos. O entendimento dessas ondas, como discutem Brito, Soares e Nazari (2013), está diretamente ligado à avaliação do conforto acústico e da poluição sonora em áreas urbanas, justificando a correta simulação de suas distâncias de propagação para o planejamento arquitetônico e urbanístico.

4.2 Aplicações Em Edificações Religiosas e Patrimoniais

Em edificações históricas e culturais (Figura 1), a aplicação da análise acústica torna-se ainda mais crítica. A presença de componentes arquitetônicos ornamentais, como vitrais, rebocos artísticos, elementos cerâmicos e madeira entalhada, torna essas estruturas especialmente sensíveis à ação prolongada de vibrações. Como demonstram (Fabbrocino et al. 2023), sinos de médio e grande porte podem gerar ondas acústicas que, ao se propagarem pelo ambiente confinado e refletirem nas superfícies internas das torres, provocam amplificações localizadas de pressão sonora. Essas regiões de maior intensidade, criadas por interferência construtiva, podem atuar como focos de deterioração, acelerando o processo de microfissuração em materiais frágeis.

Figura 1 – Imagem representativa do Novo Santuário



Fonte: Pai Eterno, disponível em: <https://www.paieterno.com.br/2025/10/06/doacoes-constroem-a-nova-casa-do-pai/>, acessado em novembro de 2025.

Além da preservação física, a análise contribui para a conservação do valor cultural e simbólico das edificações religiosas, muitas das quais representam marcos históricos para as comunidades. Por sua vez a abordagem acústica permite avaliar o impacto ambiental do uso do sino, equilibrando tradição e sustentabilidade urbana. Já a determinação da distância máxima de propagação em campo aberto fornece dados quantitativos sobre a "poluição sonora", um ponto levantado por (Brito, Soares e Nazari, 2013), que destacam os efeitos do som urbano sobre o bem-estar da população.

4.3 Materiais e Geometria Estrutural

As propriedades dos materiais desempenham um papel fundamental na forma como as ondas mecânicas e acústicas se propagam. Materiais com baixo módulo de amortecimento, como o vidro comum ou rebocos finos, tendem a absorver menos energia vibratória, tornando-se mais suscetíveis à ocorrência de ressonância e à fadiga estrutural ao longo do tempo (Silva e Martins, 2020). Da mesma forma que as propriedades dos sólidos (como vidro ou madeira) ditam a vibração estrutural, as propriedades do meio fluido neste caso, o ar, definido por sua densidade (ρ) e módulo de compressibilidade (K) foram os parâmetros fundamentais que determinaram a velocidade de propagação do som e a correta impedância acústica não reflexiva na fronteira do modelo.

A geometria da estrutura e do domínio simulado também influencia de forma decisiva o comportamento acústico. Enquanto elementos arquitetônicos curvos ou cavos, como abóbadas, podem atuar como guias de onda, concentrando e amplificando a energia em determinadas regiões (Kit, 2006), a própria geometria do domínio de propagação é crítica.

Figura 2 – Sino Vox Patris



Fonte: O autor, 2025

4.4 Ferramentas Computacionais Para Simulação

No cenário da engenharia moderna, a modelagem numérica tornou-se um pré-requisito fundamental para a análise de problemas físicos onde soluções analíticas exatas são inviáveis devido à complexidade geométrica ou às condições de contorno envolvidas. Diversos softwares comerciais baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), como ANSYS, COMSOL Multiphysics e Abaqus, são amplamente utilizados para discretizar domínios contínuos e resolver equações diferenciais parciais (GONZALEZ, *et al.* 2022). A literatura técnica estabelece que a confiabilidade dessas plataformas reside na sua capacidade de processar grandes matrizes de rigidez e massa, permitindo a simulação de fenômenos acoplados, como a interação entre fluidos e estruturas, com precisão validada em diversas aplicações da engenharia civil e mecânica.

Dentre as ferramentas disponíveis, o software Abaqus, desenvolvido pela Dassault Systèmes, consolidou-se como uma plataforma robusta para análises de dinâmica e acústica. Segundo a documentação técnica da ferramenta, sua arquitetura permite a realização de análises lineares e não lineares, abrangendo tanto o domínio do tempo (transiente) quanto o da frequência (estado estacionário) (DASSAULT SYSTÈMES, 2020). Essa versatilidade é essencial para a engenharia acústica, pois o software oferece algoritmos específicos para resolver a equação de Helmholtz, permitindo a modelagem de meios fluidos compressíveis (como o ar) e a aplicação de impedâncias complexas nas fronteiras do modelo, simulando o comportamento de absorção sonora de materiais ou a propagação em campo aberto.

A aplicação dessas ferramentas em acústica arquitetônica e ambiental preenche lacunas críticas na previsão de impactos sonoros. Estudos conduzidos pelo *Karlsruher Institut für Technologie* (KIT, 2006) demonstram que a simulação numérica via MEF é capaz de prever não apenas os níveis de pressão sonora, mas também a indução de vibrações em estruturas a partir de fontes acústicas intensas, mesmo sem contato mecânico direto. Kinsler *et al.* (2000) reforçam que, para frequências baixas, onde o comportamento ondulatório é predominante, os métodos numéricos superam as abordagens estatísticas ou geométricas simples, oferecendo uma visualização detalhada dos campos de pressão e das zonas de interferência construtiva e destrutiva.

A utilização de softwares de elementos finitos é particularmente crítica na análise de estruturas submetidas a cargas dinâmicas severas. Perlikowski (2018) aponta que o cálculo de

forças de reação e propagação de ondas em sistemas de grande massa envolve não-linearidades que escapam aos métodos de dimensionamento estático tradicionais. Corroborando essa visão, Fabbrocino, *et al.* (2023) destacam em suas pesquisas sobre torres históricas que a modelagem computacional detalhada é a metodologia mais indicada para avaliar a integridade estrutural sob excitação acústica, permitindo antecipar cenários de fadiga e propagação de ondas que poderiam comprometer a segurança de edificações e o conforto das áreas adjacentes.

4.5 Pressão Sonora

Para quantificar o "volume" de um som, a métrica padrão utilizada na engenharia acústica é o Nível de Pressão Sonora, expresso em Decibéis (dB). Esta escolha se deve ao fato de que a percepção auditiva humana não é linear, mas sim logarítmica (Gerges, 2000). A escala de Decibéis é uma medida relativa que compara a pressão acústica (P) de uma onda sonora com uma pressão de referência (P_{ref}). Para a audição humana no ar, esta referência é padronizada internacionalmente como o limiar da audição, estabelecido em $P_{ref} = 20 \mu Pa$ (ou $2 \times 10^{-5} Pa$), que corresponde a 0 dB (Bies e Hansen, 2009).

O cálculo para converter a pressão sonora, como o resultado POR (Magnitude da pressão) obtido em nossa simulação no Abaqus, para o Nível de Pressão Sonora (L_p) em decibéis, segue a fórmula.

$$L_p(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad \text{Eq. (2)}$$

No contexto da modelagem computacional acústica, a pressão acústica, identificada pela variável POR, é definida como a grandeza de saída fundamental em análises de estado estacionário. Segundo a documentação técnica da Dassault Systèmes (2020), é a partir dessa variável primária (calculada em Pascals) que se fundamentam os cálculos de níveis sonoros, permitindo a correlação direta entre os resultados numéricos brutos e a escala logarítmica de percepção auditiva humana.

Sob a ótica da propagação física, a teoria acústica prevê que, em um cenário de campo livre (sem obstáculos ou reflexões), a pressão sonora de uma fonte pontual atenua linearmente com o inverso da distância ($1/r$). Autores clássicos como Kinsler *et al.* (2000) demonstram que,

quando esta lei física é traduzida para a escala logarítmica, ela resulta em uma taxa de atenuação constante de -20 dB por década de distância.

Por outro lado, em ambientes fechados ou com geometrias específicas, como igrejas, esta atenuação ideal é interrompida por superfícies reflexivas (paredes, vitrais), que modificam o campo sonoro e podem concentrar a energia em certas regiões, gerando desconforto auditivo ou, com o tempo, causando microdanos estruturais. A legislação de conforto acústico e saúde ocupacional baseia-se inteiramente em limites medidos em decibéis. Já a exposição contínua a níveis elevados é regulamentada, pois pode colocar a saúde em risco (Gerges, 2000). Portanto, a capacidade de simular, calcular e extrapolar os níveis de decibéis, como feito neste estudo, é uma ferramenta essencial para o planejamento urbano e a engenharia de edificações.

4.6 Impactos Ambientais

A caracterização do ruído como um dos principais agentes poluidores do meio urbano é um consenso consolidado tanto na comunidade científica quanto na jurisprudência internacional. A Organização Mundial da Saúde (OMS) classifica a poluição sonora como o segundo maior problema ambiental causador de doenças, atrás apenas da poluição do ar. No ordenamento jurídico brasileiro, o meio ambiente ecologicamente equilibrado é um direito fundamental garantido pelo Art. 225 da Constituição Federal de 1988. Neste contexto, a emissão de ruídos excessivos não configura apenas um incômodo passageiro, mas uma violação ao direito ao sossego e à saúde pública. Segundo a Lei nº 6.938/1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, a poluição é definida como qualquer degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população, enquadrando perfeitamente as grandes fontes sonoras não mitigadas.

No âmbito regulatório, o controle da emissão de ruídos no Brasil é regido pela Resolução CONAMA nº 01/1990, que estabelece que a emissão de ruídos prejudiciais à saúde e ao sossego público é ilegal. Esta resolução apoia-se tecnicamente na norma ABNT NBR 10.151:2019 (Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas), que define os limites aceitáveis de decibéis para diferentes zoneamentos urbanos e horários. A instalação de um dispositivo de potência singular como o sino *Vox Patris* deve, obrigatoriamente, atender a esses critérios normativos. Caso a propagação das ondas sonoras ultrapasse os limites estabelecidos para as zonas residenciais circunvizinhas ao Santuário, o empreendimento estaria

sujeito às sanções da Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998), cujo Artigo 54 criminaliza a poluição de qualquer natureza que resulte em danos à saúde humana.

Do ponto de vista fisiológico, os impactos ambientais da exposição ao ruído intenso transcendem a perda auditiva. Gerges (2000) e Bistafa (2018) elucidam que a exposição contínua a Níveis de Pressão Sonora (NPS) elevados desencadeia efeitos extra-auditivos severos, conhecidos como PAIR (Perda Auditiva Induzida por Ruído) e reações sistêmicas de estresse. O corpo humano reage ao ruído como um sinal de alerta, liberando hormônios como cortisol e adrenalina, o que pode levar a hipertensão, distúrbios do sono e redução da capacidade cognitiva. Em um cenário urbano, onde o ruído de tráfego já eleva o nível de fundo (*background noise*), a introdução de uma fonte impulsiva de alta energia, como o toque de um sino gigante, pode atuar como um "gatilho" estressor para a comunidade, alterando significativamente a qualidade de vida local.

Além da saúde humana, o impacto ambiental abrange a integridade física do entorno construído, caracterizando a chamada "poluição vibroacústica". O sino *Vox Patris* opera em uma frequência fundamental de 92,5 Hz, situada na região dos graves. Conforme a física ondulatória descrita por Kinsler *et al.* (2000), ondas de baixa frequência possuem grandes comprimentos de onda e sofrem pouca atenuação atmosférica, tendo alta capacidade de difração (contornar obstáculos) e transmissão através de paredes e janelas. Brito, *et al.* (2013) alertam que essa energia acústica pode acoplar-se às frequências naturais de elementos construtivos leves (vidros, forros, esquadrias), gerando ressonância. Portanto, o impacto ambiental não se restringe ao ar, mas converte-se em vibração mecânica nas edificações vizinhas, podendo causar fissuras em rebocos e fadiga em estruturas históricas ou precárias.

Desta forma, a utilização de ferramentas de simulação computacional, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), torna-se uma exigência não apenas técnica, mas legal e ética. Bies e Hansen (2009) defendem que a avaliação de impacto ambiental acústico deve ser preventiva. A modelagem numérica permite antecipar a "mancha de ruído" (*noise footprint*) sobre a malha urbana de Trindade, verificando teoricamente a conformidade com a NBR 10.151 antes da operação efetiva do sino. Essa abordagem preditiva é essencial para o licenciamento ambiental do empreendimento, garantindo que o símbolo de fé se integre à paisagem sonora da cidade sem ferir os preceitos constitucionais de proteção à saúde e ao meio ambiente.

5 METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma abordagem quantitativa baseada em simulação numérica, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). O estudo foi conduzido no software Abaqus/CAE 2020 (Dassault Systèmes) como mostrado na Figura 3. A escolha desta ferramenta justifica-se pela sua robustez na resolução de problemas e pela capacidade de simular condições de contorno de impedância complexas.

Figura 3 – Software utilizado.



Fonte: O autor, 2025

A metodologia foi estruturada em três etapas principais: definição dos parâmetros físicos, procedimento de modelagem computacional e pós-processamento dos dados.

5.1 Parâmetros Físicos e Geométricos

O problema consiste na propagação de ondas sonoras em um meio fluido (ar) a partir de uma fonte pontual. Para otimizar o custo computacional, o domínio foi simplificado para um modelo 2D Axial-Simétrico (*Axisymmetric*). Esta simplificação é válida pois, em campo livre, a propagação sonora de uma fonte pontual é isotrópica (igual em todas as direções), permitindo representar uma esfera 3D através de um plano rotacionado em torno de um eixo de simetria (Eixo Y).

As propriedades do ar foram definidas conforme condições padrão (20°C):

- Densidade (P): 1,21 kg/m³;
- Módulo de Compressibilidade (K): 142 KPa;
- Frequência de Análise: 92,5 Hz.

5.2 Procedimento de Modelagem Computacional (Abaqus/CAE)

A construção do modelo numérico no ambiente CAE seguiu a sequência lógica de módulos do software, conforme detalhado abaixo:

a) Geometria (Module Part):

O domínio fluido foi desenhado como um corpo deformável (*Deformable*) do tipo axial-simétrico (*Axisymmetric*). A geometria consiste em um quarto de círculo com raio $R = 50$ metros, centrado na origem (0,0). O eixo vertical Y representa o eixo de revolução, enquanto o eixo X representa a direção radial.

b) Propriedades do Material (*Module Property*):

Foi criado um material acústico (*Acoustic Medium*) contendo as propriedades de densidade e módulo de compressibilidade (*Acoustic Medium > Bulk Modulus*). Uma seção sólida homogênea (*Solid, Homogeneous*) referenciando este material foi criada e atribuída a toda a geometria do modelo.

c) Montagem (*Module Assembly*):

Foi criada uma instância (*Instance*) da peça, posicionando-a no sistema de coordenadas global. Como o modelo é único, utilizou-se a opção *Dependent* (malha na peça).

d) Passo de Análise (*Module Step*):

Foi configurado um passo de análise do tipo *Linear Perturbation > Steady-state dynamics, Direct*.

- Frequência: O intervalo de frequência foi definido especificamente para o ponto de interesse: 92,5 Hz;
- Este método resolve a equação de Helmholtz para calcular a resposta harmônica do sistema em estado estacionário.

e) Interações e Condições de Contorno (*Module Interaction & Load*):

Esta etapa foi crítica para a simulação do campo livre.

Definição da Impedância: No módulo *Interaction*, criou-se uma propriedade de impedância acústica (*Acoustic Impedance*) do tipo *Non-reflecting*.

Condição de Borda: Aplicou-se esta interação na aresta curva externa do modelo (arco de 50m). A geometria da impedância foi configurada como esférica (*Spherical*), com raio de 50m. Isso instrui o solver a aplicar o amortecimento geométrico $1/r$ e absorver as ondas incidentes, simulando um domínio infinito.

Fonte Sonora: No módulo *Load*, aplicou-se uma condição de contorno de Pressão Acústica (*Acoustic Pressure*) no vértice da origem (0,0), com magnitude unitária (1+0i), simulando o sino como uma fonte monopolo.

f) Malha (*Module Mesh*):

A discretização utilizou elementos finitos acústicos lineares de 4 nós (ACAX4: *4-node linear acoustic axisymmetric quadrilateral*).

Critério de Refinamento: Para garantir a precisão, a malha deve ter pelo menos 6 elementos por comprimento de onda (λ)

- Cálculo: Com $c = 340$ m/s e $f = 92,5$ Hz, tem-se $\lambda \approx 3,67$ m;
- Aplicação: Foi aplicado um tamanho global de elemento (*Global Seeds*) de 0,5 m. Isso resultou em aproximadamente 7 elementos por comprimento de onda, garantindo alta fidelidade na captura dos gradientes de pressão.

5.3 Pós-Processamento e Tratamento de Dados

Após a submissão e conclusão do trabalho (*Job*), os resultados foram analisados no módulo *Visualization*. A variável de interesse primária foi a Pressão Acústica (POR).

Para a extração dos dados, criou-se um Caminho (*Path*) nodal ao longo da aresta radial (do centro à borda). Os valores de magnitude da pressão (P) foram exportados para planilha eletrônica, onde procedeu-se à conversão para Nível de Pressão Sonora (L_p) através da equação:

$$L_p(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad \text{Eq. (2)}$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados numéricos obtidos, detalhando o processo de construção do modelo no software Abaqus, o pós-processamento dos dados brutos e a análise física subsequente para a determinação da distância de propagação sonora.

6.1 Modelagem no Software Abaqus

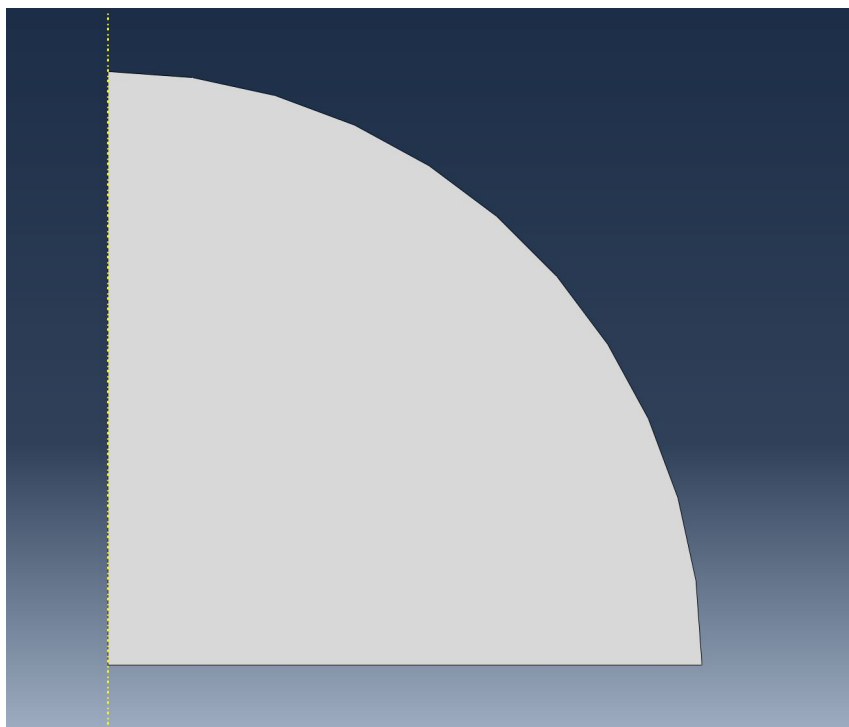
O primeiro resultado deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos robusto e computacionalmente eficiente.

Para isso, foi empregada uma modelagem Axial-Simétrica 2D no Abaqus/CAE. Esta escolha metodológica é crucial, pois permite que um problema tridimensional (uma fonte pontual irradiando em 360°) seja representado com precisão por um modelo 2D.

A construção do modelo seguiu os seguintes passos:

1. Módulo Part (Geometria): Foi criada uma peça 2D (Part) do tipo *Axisymmetric* (Axial-Simétrica) com uma geometria de quarto de círculo com 50 metros de raio, conforme Figura 4. O eixo vertical (Y) representa a linha de centro da simulação e o eixo horizontal (X) representa o "chão". Uma partição foi criada no vértice da origem (0,0) para isolar o nó onde a fonte sonora seria aplicada.

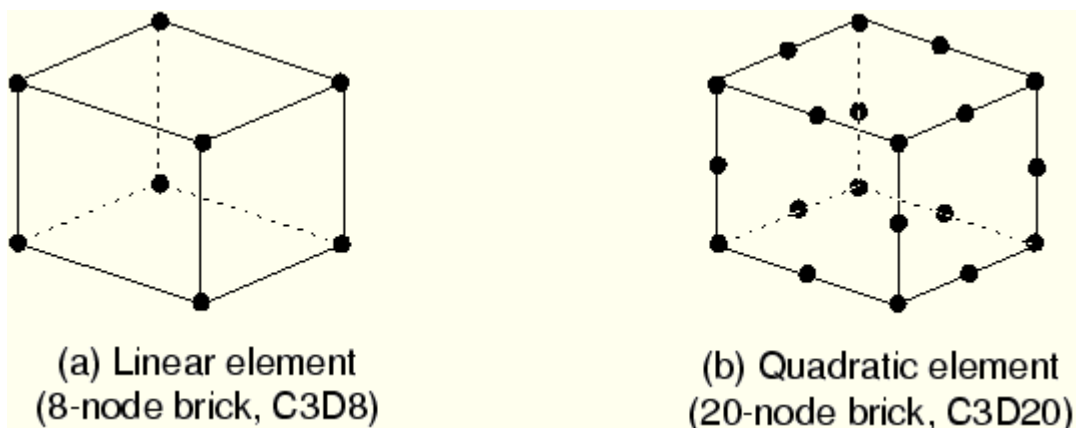
Figura 4 – Peça modelada



Fonte: O autor, 2025

2. *Módulo Property* (Material): Foi definido um material *Ar_Acustico*, caracterizado como um *Acoustic Medium*. Os parâmetros fundamentais inseridos foram a Densidade do Ar ($\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$) e o Módulo de Compressibilidade Volumétrica ($K = 1.42 \times 10^5 \text{ Pa}$).
3. *Módulo Step* (Análise): Foi criado um *step* de análise do tipo *Linear Perturbation* -> *Steady-state dynamics*, Direct. Esta é uma análise harmônica no domínio da frequência, que calcula a resposta do sistema a uma excitação contínua. A frequência da fonte do sino foi definida como $f = 92.5 \text{ Hz}$, conforme Perlikowski (2018).
4. *Módulo Mesh* (Malha): O domínio foi discretizado com elementos acústicos quadráticos ACAX8 (elemento axial-simétrico de 8 nós), conforme Figura 5. A escolha de elementos quadráticos é essencial em análises acústicas para evitar a "dispersão" numérica e capturar corretamente o comprimento de onda.

Figura 5 – Elemento quadrático



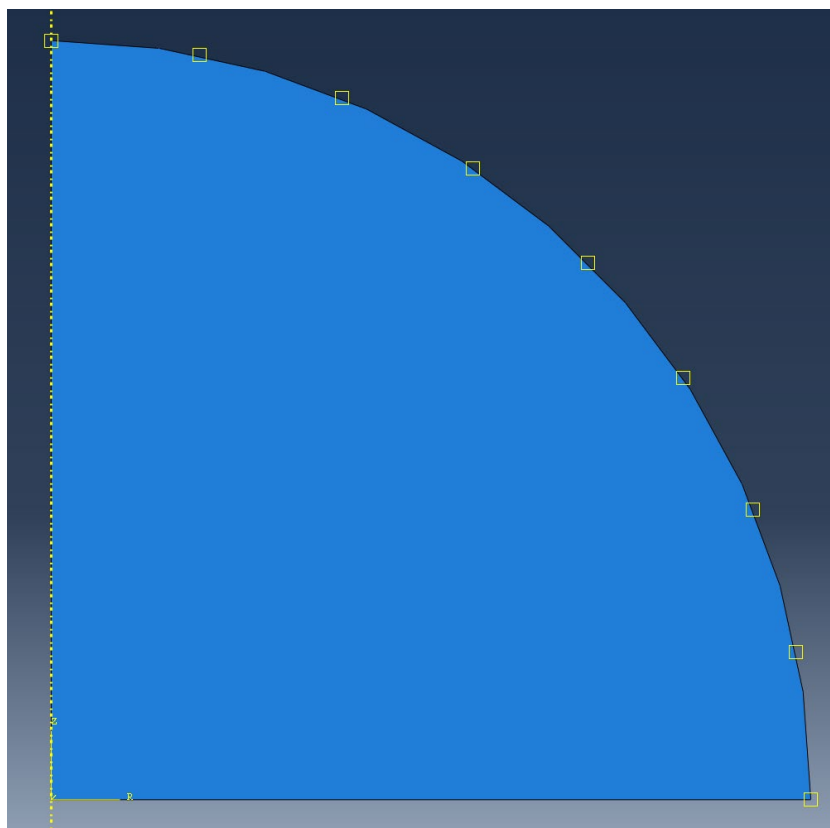
Fonte: Classes Engineering, disponível em:

<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gss/default.htm?startat=ch03s01.html>, acessado em novembro de 2025.

5. Condições de Contorno (BC) e Interações: Duas condições de contorno foram aplicadas:

- Fonte Sonora: Uma *Acoustic Pressure* (Pressão Acústica) com magnitude normalizada de 1,0 Pa (Real = 1, Imaginário = 0) foi aplicada ao nó particionado na origem (0,0).
- Campo Aberto (Não-Reflexão): Para simular a propagação infinita e evitar que a onda sonora refletisse na borda do modelo, uma *Acoustic Impedance* (Impedância Acústica) foi aplicada em toda a fronteira curva externa do quarto de círculo como mostrado na Figura 6. A impedância foi definida como "esférica" para corresponder à natureza da fonte pontual.

Figura 6 – Interação no Software Abaqus 2020.

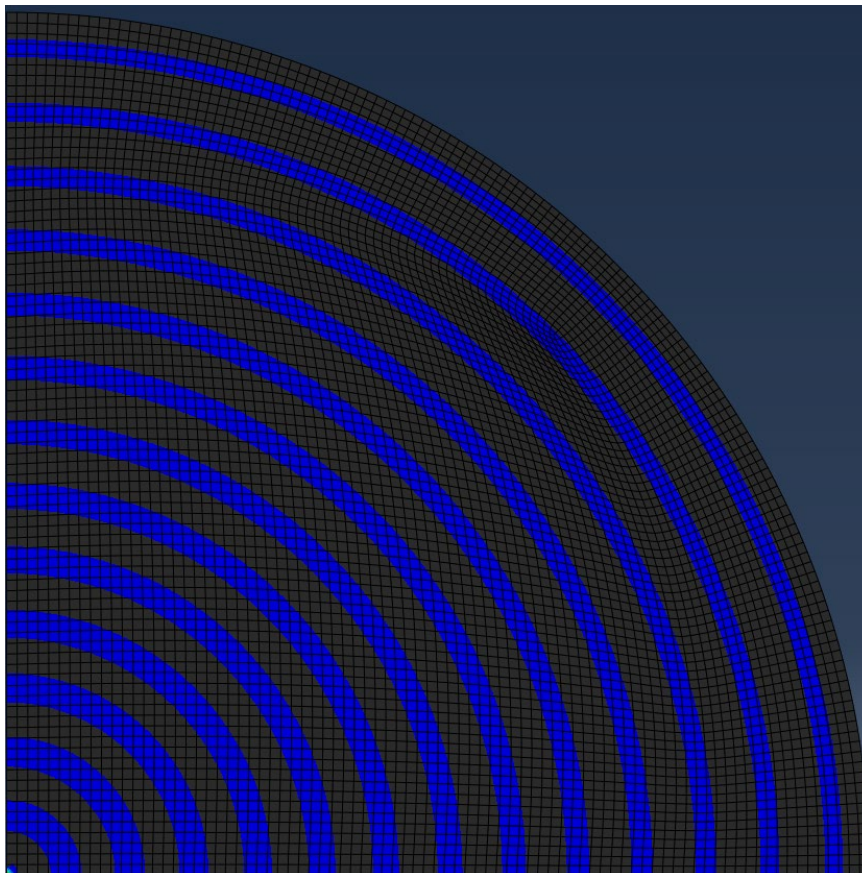


Fonte: O autor, 2025

6.2 Pós-Processamento e Extração de Dados

A etapa de pós-processamento permitiu, uma análise qualitativa do comportamento físico do sistema. Através do módulo de visualização (*Visualization*), observou-se a evolução da frente de onda propagando-se ao longo do domínio computacional, conforme ilustrado na Figura 7. Esta verificação gráfica corrobora a consistência da simulação, evidenciando a efetiva transmissão da pressão acústica a partir da fonte.

Figura 5 – Pressão acústica na placa através do *software*.



Fonte: O autor, 2025

Além disso, a extração dos dados da simulação apresentou desafios relacionados às limitações da licença de software. A ferramenta de pós-processamento padrão (XY Data -> Path) mostrou-se incapaz de processar os dados complexos (Reais e Imaginários) para calcular a Magnitude.

A solução foi utilizar a ferramenta de relatório manual do Abaqus (*Report -> Field Output*). Este método permitiu a criação de um Node Set (NOS_DO_CHAO) contendo apenas os nós localizados no eixo X ($Y = 0$). A ferramenta Report foi então instruída a exportar, para um arquivo de texto (.txt), duas variáveis de saída específicas para este conjunto de nós: as Coordenadas (COORD) e a Pressão Acústica (POR).

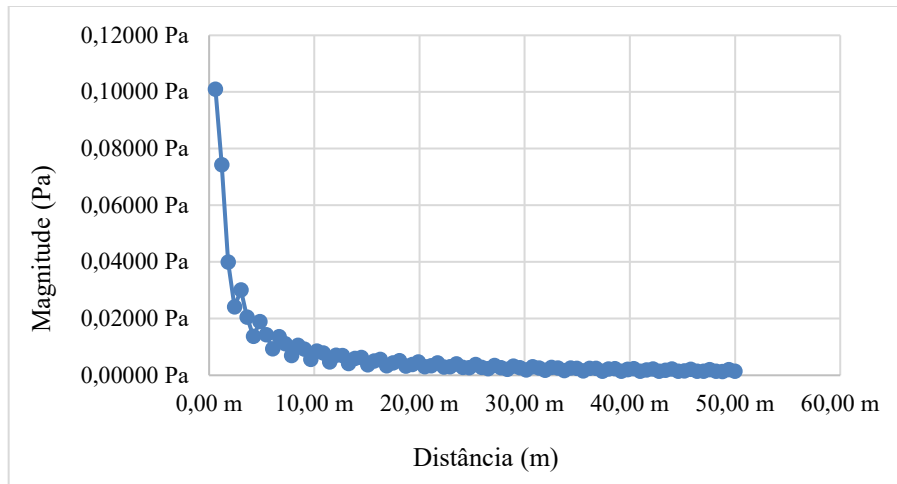
Este processo resultou em um arquivo de dados limpo, ordenado por distância, contendo as saídas POR (Real) e POR (Imag) para cada nó ao longo do chão.

6.3 Tratamento e Análise dos Dados

Os dados brutos de saída (POR) representam a resposta de pressão como um número complexo. Para obter a amplitude física da onda sonora em cada ponto, foi necessário calcular a Magnitude da pressão (Figura 5), que combina as duas partes através da seguinte relação, apresentada na equação (3):

$$Magnitude(P) = \sqrt{(P_{Real})^2 + (P_{Imag})^2} \quad \text{Eq. (3)}$$

Figura 5 – Magnitude x Distância

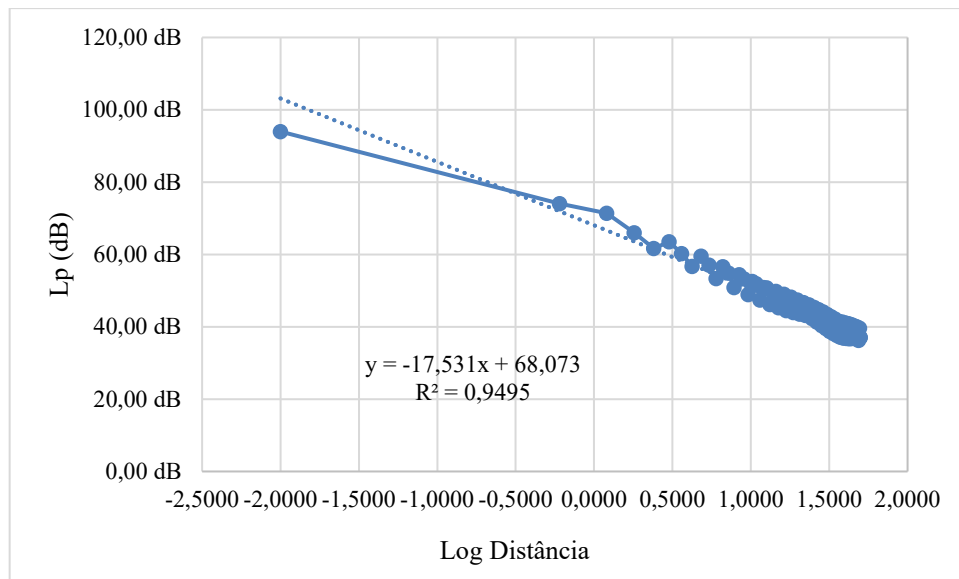


A magnitude resultante (em Pascals, Pa) foi então convertida para a escala de Nível de Pressão Sonora (L_p), medida em Decibéis (dB). Esta conversão utiliza o limiar da audição como referência, $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ (0 dB). A fórmula de conversão utilizada foi dada pela equação (2):

6.4 Validação do Modelo e Análise de Atenuação

Com os dados processados em Decibéis, foi gerado um gráfico, apresentado na Figura 6, para analisar a atenuação sonora, plotando o Nível de Pressão Sonora (L_p) no eixo Y contra o Logaritmo (base 10) da Distância no eixo X. O ponto da fonte (Distância = 0) foi removido da análise por ser uma singularidade.

Figura 6 – Linha Tendência



Como previsto pela teoria acústica para uma fonte pontual em campo aberto (KINSLER, 2000), os pontos de dados formaram uma linha reta quase perfeita. A aplicação de uma linha de tendência linear aos dados resultou na seguinte equação (4):

$$y = -17,531x + 68,073 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde y é o Nível de Pressão Sonora (dB) e x é o Log_Distância.

A qualidade deste ajuste é evidenciada pelo Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,9495. Estatisticamente, este valor indica que 94,95% da variabilidade dos dados de pressão sonora simulados é explicada pela equação da linha de tendência adotada.

6.5 Determinação da Distância Máxima de Audibilidade

O intuito central do trabalho é determinar a distância máxima em que o sino pode ser ouvido. Isso corresponde ao ponto em que o Nível de Pressão Sonora (y) atinge o limiar da audição humana, ou seja, 0 dB.

Resolvendo a Equação 1 para $y = 0$:

$$0 = -17,531x + 68,073 \quad \text{Eq. (5)}$$

$$17,531x = 68,073 \quad \text{Eq. (6)}$$

$$x = \frac{68,073}{17,531} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$x = 3,883 \quad \text{Eq. (8)}$$

Este valor x é o Logaritmo (base 10) da Distância. Para encontrar a distância real em metros, aplicamos o antilogaritmo (potência de 10):

$$\text{Distância} = 10^x \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\text{Distância} = 10^{3,883} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$\text{Distância} = 7.638 \text{ metros} \quad \text{Eq. (11)}$$

7 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É fundamental reconhecer que os resultados obtidos neste trabalho, embora validados teoricamente, representam um cenário físico idealizado. A principal limitação deste estudo é a simulação de um "campo aberto" (*free-field*), que, embora essencial para validar o modelo de atenuação, propositalmente ignora a presença da complexa estrutura do Novo Santuário. Portanto, o modelo atual não avalia os fenômenos de interferência, reflexão e difração das ondas acústicas que seriam causados pela geometria da edificação. Adicionalmente, a extrapolação da distância de audibilidade para 0 dB (o limiar teórico) não considera o ruído de fundo (ou ruído ambiente) da cidade de Trindade-GO. Em um cenário real, o som do sino seria "mascarado" pelo ruído de tráfego e outras fontes muito antes de atingir 0 dB, tornando a distância de percepção *efetiva* significativamente menor. Por fim, a simulação também desconsidera fatores atmosféricos, como vento, umidade e gradientes de temperatura, que sabidamente refratam as ondas sonoras e podem alterar seu alcance.

Com base nas limitações identificadas, a sugestão mais direta para a continuação deste estudo é a modelagem vibroacústica da própria edificação. Uma próxima etapa crucial consistiria em criar um modelo de elementos finitos da torre do sino para simular a interação fluido-estrutura (o ar interagindo com a torre). Tal análise permitiria mapear os campos de pressão sonora dentro e ao redor da torre, identificando regiões críticas de amplificação (ondas estacionárias) que poderiam impactar elementos frágeis, como os vitrais, conforme sugerido por Fabbrocino *et al.* (2023). Sugere-se também a realização de medições experimentais (*in loco*) do ruído de fundo em Trindade. Estes dados permitiriam o cálculo da distância de audibilidade efetiva, definida como o ponto em que o nível sonoro do sino se iguala ao nível do ruído ambiente, fornecendo um dado de impacto urbano mais realista e prático.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal determinar, através de simulação numérica, a distância máxima de propagação sonora do sino *Vox Patris* em um cenário de campo aberto. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia robusta utilizando o software Abaqus, baseada no Método dos Elementos Finitos. A revisão bibliográfica fundamentou a complexidade da acústica de sinos (Rapp, 2014; Fabbrocino *et al.* 2023) e os princípios da propagação de ondas (Kinsler, 2000).

O desafio metodológico inicial foi desenvolver um modelo computacional que representasse fielmente um campo aberto, evitando a contaminação dos resultados por reflexões de fronteira. A solução foi a implementação de um modelo axial-simétrico 2D em formato de quarto de círculo, com uma fronteira não reflexiva (Impedância Acústica) aplicada em sua borda curva. Esta abordagem se mostrou computacionalmente eficiente e fisicamente precisa.

A simulação foi realizada utilizando uma análise de estado estacionário (*Steady-state dynamics*) com a frequência principal do sino, 92,5 Hz, identificada no parecer técnico da Universidade de Lodz (Perlikowski, 2018). O pós-processamento dos dados de pressão acústica complexa (POR) revelou-se um passo crítico, exigindo a extração manual dos dados (Real e Imaginário) via Report para o cálculo da Magnitude da pressão e sua subsequente conversão para Nível de Pressão Sonora (Decibéis).

O principal resultado do estudo foi a validação do modelo numérico frente à teoria acústica. Ao plotar o Nível de Pressão Sonora (dB) pelo Logaritmo da Distância, obteve-se uma linha de tendência linear com coeficiente angular de -17,531, um valor quase idêntico ao valor teórico

de -20 dB/década para uma fonte pontual. Esta validação conferiu alta confiabilidade à extrapolação dos dados. Resolvendo a equação de tendência ($y = -17,531x + 68,073$) para o limiar da audição humana (0 dB), determinou-se que a distância máxima de propagação sonora do sino, em um cenário idealizado de campo aberto e sem ruído de fundo, é de aproximadamente 7,64 quilômetros.

Este trabalho cumpre seu objetivo ao quantificar o alcance máximo teórico da fonte sonora, fornecendo um dado técnico essencial para estudos de impacto ambiental e planejamento urbano no entorno do Novo Santuário. Além disso, a metodologia de simulação validada serve como um alicerce fundamental para estudos futuros, que poderão agora incluir a geometria complexa da torre para analisar os efeitos de interferência, reflexão e amplificação acústica no interior da edificação, contribuindo para a conservação de seus elementos estruturais e patrimoniais.

REFERÊNCIAS

- BRITO, Luiz Antonio; SOARES, Álvaro Monoel de Souza; NAZARI, Bianca. Vibração: fonte de incômodo à população e de danos as edificações no meio urbano. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 129-141, 2013.
- COSTA, R. G., Fernandes, A. D. P. L., Lima, B. R., Goncalves, C. M. M., de Paula, E. M., dos Santos Gonçalves, G. A., & Alves, Í. C. *Vibrações Mecânicas*, 2013.
- DOAÇÕES constroem a Nova Casa do Pai. **Pai Eterno**, 6 out. 2025. Disponível em: <https://www.paieterno.com.br/2025/10/06/doacoes-constroem-a-nova-casa-do-pai/>. Acesso em: nov. 2025.
- DONOSO, J. P. **Som e Acústica - 1**. São Carlos: Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- FABBROCINO, Giovanni; DE LUCA, A.; TREMATERRA, A. Historical church bell tower structural behavior induced by bells: acoustic wave propagation. **ResearchGate**, 2023.
- GERGES, Samir N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2. ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.
- GETTING Started with ABAQUS/Standard: Keywords Version (v6.5-1). [S. l.: s. n.], 2009. Disponível em: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gss/default.htm?startat=ch03s01.html>. Acesso em: nov. 2025.
- GIRARDI, M. et al. Model updating of an existing reinforced concrete bridge based on ambient vibration tests. **Engineering Structures**, v. 175, p. 838-850, 2018.
- GONÇALVES, Marcelo A.; SOUZA, R. L.; FERREIRA, J. P. Finite element analysis of vibration response in historical structures. **Applied Sciences**, Basel, v. 15, n. 8, p. 4377, 2024.
- GONZALEZ, Ana P.; COSTA, V. H.; LIMA, F. A. Modelagem computacional e simulações dinâmicas em estruturas com elementos finitos. Em: Congresso Nacional de Engenharia Estrutural, 2022, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 2022.
- KINSLER, Lawrence E. et al. *Fundamentals of Acoustics*. 4. ed. New York: Wiley, 2000.

KIT – Karlsruher Institut für Technologie. **Acoustic simulation of architectural structures with finite elements**. Karlsruhe: IFM Publications, 2006.

MINÉIA, Elvira. **Manual de acústica arquitetônica**. 2. ed. São Paulo: Editora Senac, 2005.

PERLIKOWSKI, Przemyslaw. **Opinião sobre o cálculo das forças de reação dinâmica que surgem durante o balanço do sino Vox Patris**. Lodz, Polônia: Universidade de Tecnologia de Lodz, Divisão de Dinâmica, 2018. Parecer técnico.

RAPP, Piotr. Zabytkowe dzwony – zagadnienia mechaniki i napędu. **Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation**, n. 40, p. 41–57, 2014. ISSN 0860-2395.

SCHERER, Minéia Johann et al. **Estudo do isolamento sonoro de vidros de diferentes tipos e espessuras, em vitragem simples e dupla**. 2005.

SILVA, Renan M.; MARTINS, Cíntia R. Análise estrutural e resposta vibracional de vidros em fachadas sob excitação acústica. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 45-56, 2020.

UOL EDUCAÇÃO. Ondas sonoras: Timbre, altura e intensidade. 2024. Disponível em: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/ondas-sonoras--a-timbre-altura-e-intensidade.htm>. Acesso em: nov. 2025.

VERNIER, A. M. B.; DUTRA, C. M.; SILVA, É. J. dos S. Estudo da percepção da intensidade sonora no ensino de ciências. **Revista Signos**, v. 41, n. 1, p. 164-179, 2020.