

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LARISSA LUCIANA DA SILVA

**CALÇOS ELÁSTICOS PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS A SECO**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025

LARISSA LUCIANA DA SILVA

**CALÇOS ELÁSTICOS PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS A SECO**

Elastic pads for noise attenuation in dry-type electrical transformers

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada
como requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador: Marco Antonio Ferreira Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Larissa Luciana da Silva

CALÇOS ELÁSTICOS PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO EM TRANSFORMADORES ELÉTRICOS A SECO

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:00hs do dia 22/08/2025 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Avaliadora composta pelos(as) professores(as) abaixo. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador(a))

Prof(a). Dr(a). Wagner Fontes Godoy - (Membro)

Prof(a). Esp. José Roberto Shimazaki - (Membro)

Dedico este trabalho aos meus pais, que são meu porto seguro, minha inspiração e o alicerce de todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, saúde e coragem nos momentos mais difíceis e por iluminar meu caminho durante toda essa jornada.

Aos meus pais, Jean e Luciana, minha eterna gratidão por estarem sempre ao meu lado e por serem meus maiores incentivadores. Foram a minha base, a minha fortaleza nos momentos mais desafiadores, me sustentando com amor, fé e apoio incondicional. Obrigada por presenciarem de perto cada conquista, cada noite sem dormir, cada desafio enfrentado e por vibrarem comigo em cada vitória. Nada disso seria possível sem vocês.

Aos professores, deixo minha sincera gratidão por compartilharem seus conhecimentos e por contribuírem de forma significativa para a minha formação acadêmica. Em especial, agradeço ao professor Marco Antonio Ferreira Finocchio, pela orientação atenciosa, pelos ensinamentos transmitidos e pela confiança depositada em mim.

Estendo também meu agradecimento aos demais professores que marcaram minha trajetória com suas aulas, conselhos e dedicação. Cada um teve um papel importante na construção do meu conhecimento e crescimento pessoal.

Agradeço ainda à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, por ter sido um espaço de aprendizado, amadurecimento e descoberta. Um ambiente acolhedor, que foi minha segunda casa durante todos esses anos. A cada colaborador, técnico, bibliotecário, equipe da limpeza, da segurança e da administração, deixo meu reconhecimento pelo trabalho essencial que garante o bom funcionamento da instituição e torna possível o nosso percurso universitário.

Aos amigos e colegas que estiveram ao meu lado ao longo dessa caminhada, meu carinho e gratidão por cada troca, cada aprendizado e cada momento vivido juntos.

E, por fim, agradeço a mim mesma.

Por não desistir.

Por persistir mesmo quando tudo parecia impossível.

Por cada passo dado, cada queda superada e cada recomeço com coragem.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha evolução, o meu mais sincero obrigada.

RESUMO

Os transformadores elétricos a seco são amplamente utilizados devido à sua eficiência e segurança, porém, um dos desafios associados ao seu funcionamento é a emissão de ruído gerado pelas vibrações mecânicas, que podem comprometer o conforto acústico e a integridade estrutural dos equipamentos. Essas vibrações resultam principalmente das forças eletromagnéticas que atuam no núcleo e nos enrolamentos, propagando-se pelas estruturas de fixação. Para mitigar esse problema, o uso de calços elásticos tem sido estudado como uma solução eficiente na atenuação das vibrações e consequentemente, na redução do ruído. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar a eficácia da utilização de calços elásticos na atenuação de vibrações e consequentemente, na redução do ruído emitido por transformadores a seco. A metodologia adotada envolveu revisão bibliográfica, análise técnica dos mecanismos de geração e transmissão de vibrações, estudo das propriedades dos materiais elastoméricos utilizados em calços e o dimensionamento físico-mecânico desses elementos com base nos parâmetros operacionais de um transformador trifásico de 150 kVA. O estudo incluiu também a modelagem tridimensional dos calços e sua integração à estrutura do transformador, além do desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva com diretrizes práticas para inspeção, substituição e monitoramento de desempenho dos calços elásticos ao longo do tempo. Os resultados demonstraram que os calços elásticos são eficazes na redução dos níveis de ruído em até 10 dB, dependendo do tipo de material utilizado e da qualidade da instalação. Essa redução é perceptível ao ouvido humano e representa um avanço significativo em termos de conforto acústico e preservação estrutural. Adicionalmente, o estudo evidenciou que a substituição programada dos calços, aliada ao monitoramento contínuo de vibrações e ruídos, é essencial para garantir a eficácia prolongada do sistema de amortecimento. Conclui-se que o uso de calços elásticos é uma solução técnica viável, de baixo custo e alta eficiência para a mitigação de ruídos em transformadores a seco, proporcionando benefícios tanto operacionais quanto ambientais. A adoção dessa tecnologia contribui para a sustentabilidade dos sistemas elétricos, reduzindo a necessidade de barreiras acústicas, melhorando o ambiente de trabalho e prolongando a vida útil dos transformadores. A implementação de práticas de manutenção preventiva, conforme proposto neste trabalho, assegura o desempenho contínuo desses elementos e fortalece a confiabilidade dos equipamentos em longo prazo.

Palavras-chave: calços elásticos; redução de ruído; transformador a seco; manutenção preventiva.

ABSTRACT

Dry-type electrical transformers are widely used due to their efficiency and safety; however, one of the challenges associated with their operation is the noise emission caused by mechanical vibrations, which can affect both acoustic comfort and the structural integrity of the equipment. These vibrations mainly result from electromagnetic forces acting on the core and windings, propagating through the mounting structures. To address this issue, the use of elastic pads has been studied as an effective solution for vibration attenuation and, consequently, noise reduction. Given this context, the main objective of this work is to analyze the effectiveness of using elastic pads in attenuating vibrations and thus reducing the noise emitted by dry-type transformers. The methodology adopted included a literature review, technical analysis of vibration generation and transmission mechanisms, a study of the properties of elastomeric materials used in pads, and the physical-mechanical sizing of these elements based on the operational parameters of a 150 kVA three-phase transformer. The study also included the three-dimensional modeling of the pads and their integration into the transformer's structure, as well as the development of a preventive maintenance plan with practical guidelines for the inspection, replacement, and performance monitoring of the elastic pads over time. The results showed that elastic pads are effective in reducing noise levels by up to 10 dB, depending on the type of material used and the quality of the installation. This reduction is perceptible to the human ear and represents a significant improvement in terms of acoustic comfort and structural preservation. Additionally, the study highlighted that scheduled replacement of the pads, combined with continuous monitoring of vibrations and noise, is essential to ensure the long-term effectiveness of the damping system. It is concluded that the use of elastic pads is a technically viable, cost-effective, and highly efficient solution for noise mitigation in dry-type transformers, providing both operational and environmental benefits. The adoption of this technology contributes to the sustainability of electrical systems by reducing the need for acoustic barriers, improving the work environment, and extending the service life of transformers. The implementation of preventive maintenance practices, as proposed in this study, ensures the continuous performance of these elements and strengthens the long-term reliability of the equipment.

Keywords: elastic pads; noise reduction; dry-type transformer; preventive maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização dos calços elásticos entre os enrolamentos e as estruturas de fixação superior e inferior do transformador	13
Figura 2 - Fontes de ruído em transformador	16
Figura 3 - Comparação da transmissão de vibrações com e sem calços elásticos	18
Figura 4 - Modelo tridimensional do transformador a seco, destacando os calços elásticos posicionados superior e inferiormente aos enrolamentos para atenuação de vibrações e ruído	31
Figura B.1 - Modelo 3D do calço elastomérico	42
Figura B.2 - Disposição 3D dos calços na estrutura do transformador	43
Figura B.3 - Fixação do calço à estrutura metálica do transformador	43
Figura B.4 - Conjunto padronizado de fixação com elementos de amortecimento	44
Figura B.5 - Disposição 3D dos calços na estrutura do transformador	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais elásticos utilizados em calços de transformadores a seco	19
Tabela 2 - Tipo de material e sua vida útil	20
Tabela 3 - Vida útil média recomendada para diferentes materiais de calço elástico	26
Tabela 4 - Cronograma de Manutenção	28
Tabela 5 - Valores típicos encontrados para cada material	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AU	Borracha de Poliuretano
CR	Borracha de Neoprene
EPDM	Etileno Propileno Dieno Monomero
EPI	Equipamentos De Proteção Individual
MQ	Silicone
NBR	Nitrile Butadiene Rubber (Borracha nitrílica)
Neoprene	Policloropreno
NR	Borracha Natural
NR-6	Norma Regulamentadora Nº 6
NR-10	Norma Regulamentadora Nº 10
NR-12	Norma Regulamentadora Nº 12
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

dB	Nível de pressão sonora	decibel [dB]
S	Potência Aparente	volt-ampere [VA]
V	Tensão Elétrica	volt [V]
V_1	Tensão Primária	volt [V]
V_2	Tensão Secundária	volt [V]
f	Frequência	hertz [Hz]
I	Corrente Elétrica	ampere [A]
I_1	Corrente Primária	ampere [A]
I_2	Corrente Secundária	ampere [A]
f_{vib}	Frequência de vibração	hertz [Hz]
M	Massa total do Transformador	quilograma [kg]
f_n	Frequência Natural	hertz [Hz]
k	Rigidez do calço	newton por metro [N/m]
m	Massa por calço	quilograma [kg]
F_{est}	Força Estática	newton [N]
g	Aceleração da gravidade	metro por segundo quadrado [m/s ²]
δ	Deflexão Estática	milímetros [mm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivos Gerais	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	Justificativa	14
1.3	Organização do Texto.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Mecanismos de Transmissão de Vibrações	17
2.2	Eficácia dos Calços Elásticos	17
2.3	Materiais Elásticos dos Calços de Transformadores a Seco	18
2.4	Nível de Redução de Ruído	19
2.5	Durabilidade dos Calços Elásticos	20
3	MANUTENÇÃO E INSPEÇÃO CALÇOS ELÁSTICOS.....	21
3.1	Substituição dos Calços Elásticos em Transformadores a Seco	21
3.2	Procedimento de Substituição	22
3.3	Plano de Manutenção Preventiva para Vida Útil dos Calços Elásticos.....	23
3.3.1	Identificação dos Componentes e Materiais	23
3.3.2	Cronograma de Inspeções.....	23
3.3.3	Monitoramento Contínuo.....	24
3.3.4	Procedimentos de Substituição	25
3.3.5	Procedimentos de Manutenção	26
3.3.6	Documentação e Registro	27
3.3.7	Treinamento e Capacitação.....	28
4	DIMENSIONAMENTO DOS CALÇOS ELÁSTICOS	29
5	RESULTADOS	32
5.1	Nível de Ruído Atenuado por Calços Elásticos em Transformadores.....	33
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
	REFERÊNCIAS.....	37
	APÊNDICE A – Ficha de Manutenção Preventiva	39
	APÊNDICE B – Modelagem 3D do Calço e sua Aplicação Estrutural	41

1 INTRODUÇÃO

O ruído pode ser entendido como um som indesejado, desarmônico ou fora de contexto, cuja percepção varia conforme o ambiente e a situação. Transformadores a seco, embora ofereçam vantagens em segurança e manutenção, podem gerar níveis significativos de ruído devido às vibrações eletromecânicas internas durante seu funcionamento. Esse ruído pode provocar desconforto acústico para as pessoas no entorno e comprometer a segurança ocupacional, dificultando a comunicação e contribuindo para o aumento do estresse físico.

Apesar disso, a questão acústica ainda é pouco considerada nos projetos de transformadores, sendo frequentemente tratada como secundária. No caso dos transformadores a seco, essa negligência pode afetar diretamente sua vida útil, já que a vibração excessiva acelera o desgaste dos componentes internos. Além dos impactos sobre o desempenho e o bem-estar humano, o ruído também representa uma forma de poluição sonora, com efeitos negativos sobre o meio ambiente.

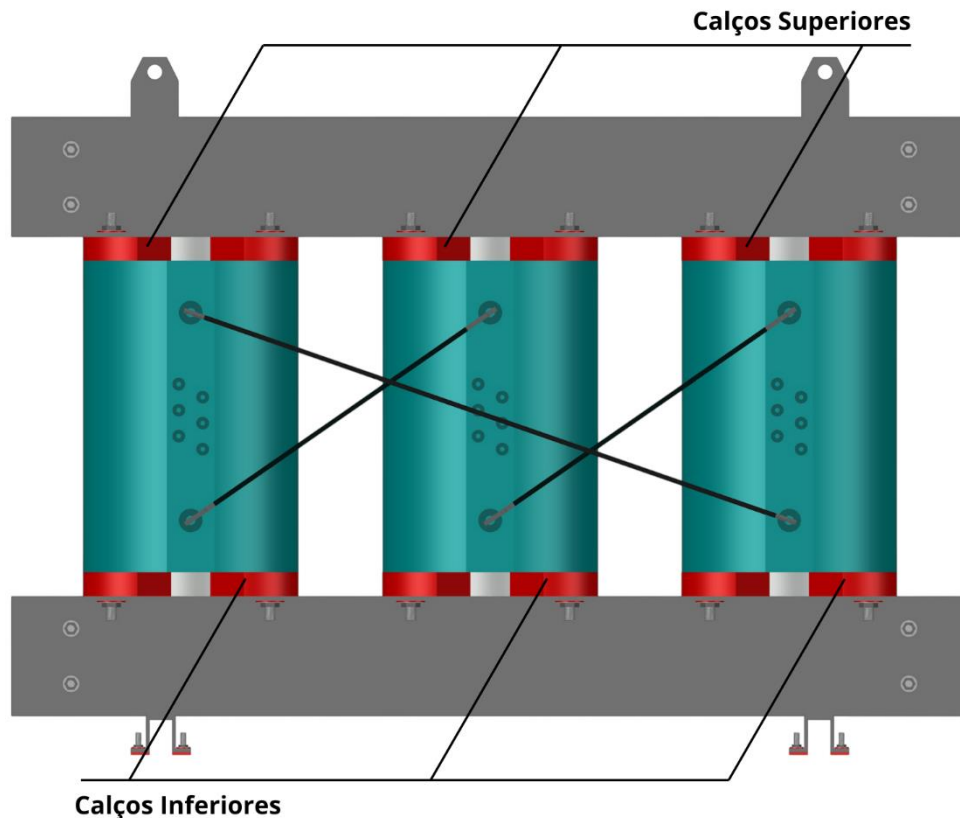
Os calços elásticos (blocos elásticos) são dispositivos eficazes na atenuação dos níveis de ruído emitidos por transformadores a seco, contribuindo para a melhoria do conforto acústico em áreas próximas e para a redução da poluição sonora. Sua principal função é absorver as vibrações mecânicas geradas durante o funcionamento do transformador, o que não apenas reduz o ruído, como também pode prolongar a vida útil de seus componentes. Esses calços são fabricados a partir de materiais elastoméricos diversos, como borracha natural, poliuretano, neoprene, EPDM, silicone e borracha nitrílica (NBR), os quais apresentam propriedades específicas adequadas a distintas condições operacionais e ambientais.

Em relação à manutenção, dois aspectos principais devem ser considerados. O primeiro é a seleção adequada do material, fundamental para garantir a eficácia e a durabilidade dos calços. Para isso, devem ser avaliados critérios como resistência ao desgaste, resistência a agentes químicos e capacidade de amortecimento. O segundo aspecto é a implementação de um plano de manutenção preventiva, que assegure o desempenho contínuo dos calços ao longo do tempo e evite falhas prematuras.

Os calços elásticos são instalados entre o núcleo ou a estrutura do transformador e a base de montagem, atuando como isoladores de vibração e dissipando a energia mecânica gerada durante a operação. A eficácia desses elementos está diretamente relacionada à qualidade do material, ao projeto do transformador e às características das vibrações, como frequência e amplitude. A Figura 1 apresenta a disposição dos calços elásticos instalados em

um transformador a seco, evidenciando sua posição estratégica entre a estrutura do equipamento e a base de apoio.

Figura 1 - Localização dos calços elásticos entre os enrolamentos e as estruturas de fixação superior e inferior do transformador



Fonte: Autoria própria (2025)

Além da mitigação do ruído, os calços elásticos contribuem significativamente para a durabilidade do transformador, ao reduzir o desgaste mecânico provocado pelas vibrações. No entanto, como os materiais elastoméricos podem degradar-se com o tempo, é fundamental monitorar periodicamente sua condição. Dessa forma, recomenda-se que o projetista considere a utilização desses componentes como uma estratégia eficiente para controle de ruído e aprimoramento do desempenho global do equipamento, desde que associada a um plano de manutenção adequado.

1.1 Objetivos

Buscando contribuir com soluções para a mitigação de vibrações e ruídos em transformadores a seco, foram definidos os seguintes objetivos:

1.1.1 Objetivos Gerais

Analisar a influência do uso de calços elásticos na atenuação de vibrações e na consequente redução do ruído em transformadores elétricos a seco.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar os mecanismos de geração de ruído em transformadores elétricos a seco;
- Estudar os materiais elastoméricos utilizados na fabricação de calços, com foco em suas propriedades de rigidez e amortecimento;
- Avaliar o potencial de diferentes calços elásticos na redução da transmissão de vibrações mecânicas;
- Identificar soluções viáveis para aplicação industrial com foco na melhoria do desempenho acústico dos transformadores.

1.2 Justificativa

A redução de ruído em instalações elétricas tem se tornado uma demanda crescente, especialmente diante da necessidade de garantir conforto acústico e atender às exigências de normativas ambientais e ocupacionais. Além do incômodo sonoro, as vibrações mecânicas constantes podem comprometer a integridade estrutural dos transformadores a seco, reduzindo sua vida útil e aumentando os custos de manutenção ao longo do tempo. Nesse contexto, a implementação de calços elásticos surge como uma solução técnica viável, de baixo custo, capaz de mitigar tanto os impactos acústicos quanto os estruturais. A escolha deste tema está alinhada com a busca por alternativas práticas, eficientes e sustentáveis para a melhoria do desempenho de equipamentos no setor elétrico.

1.3 Organização do Texto

Com o intuito de garantir clareza e coerência, este trabalho foi estruturado em oito seções, descritas a seguir:

- Seção 1 – Introdução ao tema, com a apresentação dos objetivos gerais e específicos, além da justificativa que fundamenta a escolha do tema;
- Seção 2 – Fundamentação teórica, abordando os mecanismos de transmissão de vibrações em transformadores a seco, a eficácia dos calços elásticos, os materiais utilizados, o potencial de redução de ruído e a durabilidade desses componentes;

- Seção 3 – Manutenção e Inspeção, discute a manutenção e inspeção dos calços elásticos, incluindo os procedimentos de substituição, o plano de manutenção preventiva e aspectos relacionados à vida útil desses componentes;
- Seção 4 – Dimensionamento, detalhando os métodos utilizados para o dimensionamento dos calços elásticos aplicados aos transformadores;
- Seção 5 – Resultados, apresentando os resultados obtidos na pesquisa, com ênfase no nível de ruído atenuado pelos calços elásticos em transformadores a seco;
- Seção 6 – Considerações finais, reunindo as conclusões do estudo e as contribuições;
- Seção 7 – Referências, lista as fontes bibliográficas consultadas e citadas ao longo do trabalho;
- Seção 8 – Apêndices, contendo materiais complementares que auxiliam na compreensão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

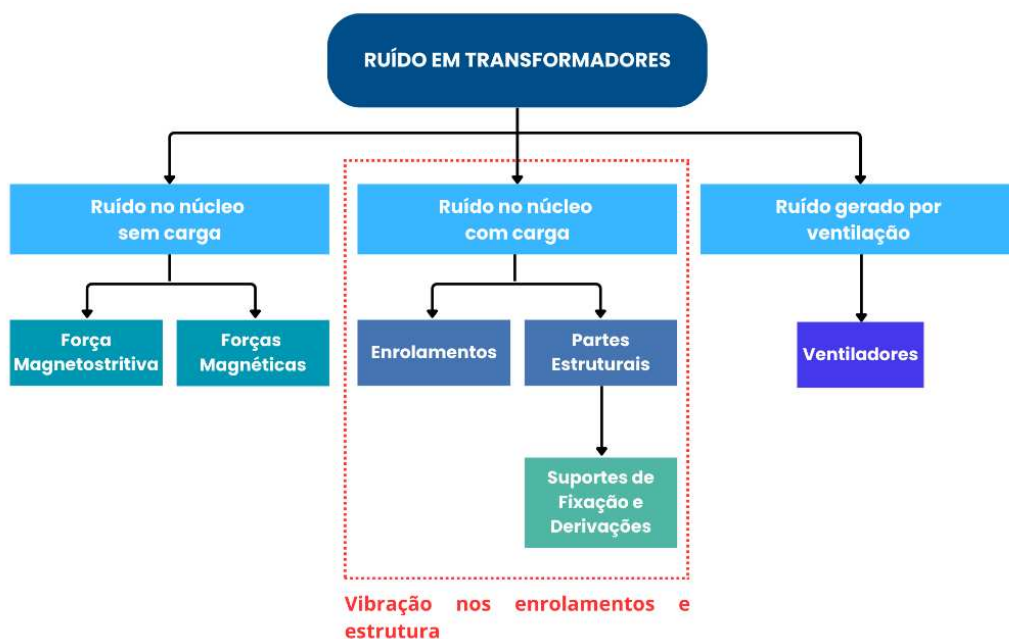
A redução de ruído em transformadores elétricos a seco é especialmente relevante em áreas urbanas e ambientes sensíveis ao som. Nesse contexto, calços elásticos (isoladores de vibração) desempenham papel fundamental ao atenuar vibrações. A base teórica envolve a análise das fontes de ruído, mecanismos de transmissão e a eficácia de materiais elastoméricos.

De acordo com a NBR 7277, transformadores a seco, que usam ar como meio de resfriamento, são mais propensos à propagação de ruído. As principais fontes de ruído incluem:

- Magnetostrição do núcleo: deformações no material ferromagnético do núcleo, ao ser magnetizado, geram vibrações mecânicas e ruído audível (Zhu et al., 2016);
- Forças eletromagnéticas: forças de atração e repulsão entre bobinas e núcleo causam vibrações transmitidas à estrutura e ao ambiente (Wang et al., 2018);
- Ressonância estrutural: ocorre quando a frequência de operação coincide com as frequências naturais das partes estruturais, amplificando o ruído (Bérubé et al., 2014).

Esses três fatores, a magnetostrição, as forças eletromagnéticas e a ressonância estrutural, constituem as principais fontes de ruído em transformadores a seco, conforme ilustrado na Figura 2 (Finocchio e Ferreira, 2018; Finocchio, Ferreira e Barbosa, 2021).

Figura 2 - Fontes de ruído em transformador



Fonte: Adaptado de Finocchio (2021)

2.1 Mecanismos de Transmissão de Vibrações

Segundo Jorge (2015), as vibrações geradas no interior do transformador podem ser transmitidas ao ambiente por três mecanismos principais: transmissão direta pelo ar, transmissão estrutural e transmissão acústica pelo ar circundante.

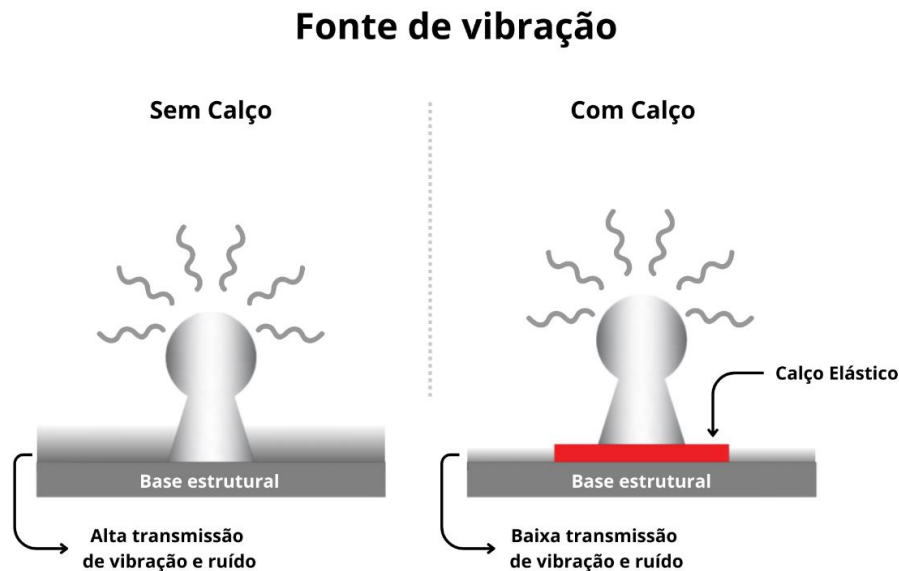
A transmissão direta pelo ar ocorre quando o som se propaga a partir do interior do transformador, resultando em ruído audível no ambiente externo (Gupta et al., 2015). Já a transmissão estrutural envolve a propagação de vibrações mecânicas através dos suportes, fundações e estruturas do edifício, o que pode amplificar o ruído percebido (Mead, 2000). Esse tipo de transmissão é considerado um fator crítico na propagação do ruído, devido à amplificação causada por estruturas rígidas.

2.2 Eficácia dos Calços Elásticos

Vibrações são movimentos oscilatórios presentes em equipamentos como transformadores a seco, podendo causar ruído, desgaste mecânico e fadiga estrutural. Embora o ideal seja minimizar essas vibrações já na fase de projeto, a fixação rígida dos equipamentos pode amplificar o ruído gerado. De acordo com Bistafa (2018), a escolha adequada dos isoladores é essencial, pois uma redução de 90% na transmissão das vibrações representa apenas 20 dB de atenuação sonora — valor muitas vezes insuficiente. Em aplicações mais exigentes, é necessário alcançar até 99% de isolamento, o que equivale a cerca de 40 dB de redução, garantindo maior conforto acústico e preservação dos componentes.

A Figura 3 ilustra a diferença no comportamento vibratório de um sistema com e sem isolamento adequada, evidenciando a eficácia dos materiais elastoméricos nesse processo.

Figura 3 - Comparação da transmissão de vibrações com e sem calços elásticos



Os calços elásticos, instalados entre o núcleo ou a estrutura do transformador e sua base de montagem, são feitos de materiais elastoméricos como borracha ou poliuretano, conhecidos por suas propriedades de absorção de vibração. Segundo Rao (2010), esses materiais são altamente eficazes na dissipação de energia mecânica. Mead (2000) reforça que o uso de calços elásticos pode resultar em significativa redução do ruído transmitido ao ambiente.

2.3 Materiais Elásticos dos Calços de Transformadores a Seco

Segundo Barbetti (2005), a escolha adequada dos calços elastoméricos é fundamental para a eficiência na isolação de vibrações, considerando propriedades como rigidez dinâmica, amortecimento e faixa de frequência das vibrações. Os materiais elastoméricos modernos passaram por melhorias significativas em geometria e desempenho, garantindo maior controle sobre movimentos e vibrações indesejadas. Comparados a soluções mais complexas e onerosas, como isoladores hidráulicos, os calços elastoméricos oferecem uma alternativa econômica e de fácil fabricação, aliando simplicidade e eficácia.

A eficácia dos calços elásticos está diretamente ligada às propriedades de amortecimento dos materiais elastoméricos. A capacidade de absorver e dissipar vibrações é essencial para reduzir o ruído e prolongar a vida útil dos componentes mecânicos (Rao, 2010).

Segundo Mead (2000), a escolha do material deve considerar as condições operacionais e ambientais para garantir a durabilidade e eficiência no isolamento de vibrações. Nos transformadores a seco, os calços são fabricados com materiais específicos que oferecem excelente amortecimento vibracional e isolamento acústico, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais elásticos utilizados em calços de transformadores a seco

MATERIAL	PROPRIEDADES	APLICAÇÃO
Borracha Natural (NR)	Excelente elasticidade, boa resistência à fadiga e ótima capacidade de amortecimento.	Frequentemente usado devido à sua capacidade de absorver e dissipar vibrações eficazmente
Borracha de Poliuretano (AU)	Alta resistência à abrasão, boa elasticidade e excelente resistência ao óleo e solventes.	Ideal para ambientes onde a resistência química é crucial, além de proporcionar um bom isolamento de vibração.
Borracha de Neoprene (CR)	Boa resistência ao envelhecimento, ao calor, ao óleo e aos raios UV.	Utilizado em aplicações onde a durabilidade e a resistência a condições ambientais severas são importantes.
Borracha de EPDM (Etileno Propileno Dieno Monômero)	Excelente resistência ao ozônio, às intempéries e ao calor, boa estabilidade química.	Usado em ambientes ao ar livre e onde a exposição a agentes climáticos é uma preocupação
Silicone (MQ)	Alta resistência ao calor, excelente elasticidade e boa resistência ao envelhecimento.	Ideal para aplicações em altas temperaturas e onde a longevidade é crucial.
Borracha Nitrílica (NBR)	Boa resistência a óleos e combustíveis, boa resistência à abrasão.	Utilizada em ambientes industriais onde há exposição a substâncias químicas agressivas.

Fonte: Catálogo de Elastômetros (2021)

2.4 Nível de Redução de Ruído

Os calços elásticos são inseridos entre o núcleo do transformador e sua base de montagem, com a função de reduzir a transmissão de vibrações e consequentemente, o ruído. São feitos de materiais elastoméricos, como borracha e poliuretano, que absorvem e dissipam a energia vibracional, melhorando o conforto acústico e aumentando a durabilidade dos componentes mecânicos (Rao, 2010). Mead (2000) ressalta que a instalação adequada desses calços é essencial para um isolamento eficaz do ruído.

A escolha do material deve considerar as condições operacionais e ambientais, já que diferentes elastômeros possuem propriedades específicas. Borracha natural, poliuretano, neoprene, EPDM, silicone e borracha nitrílica são os mais utilizados, com características que variam em termos de resistência a calor, agentes químicos e intempéries.

A redução de ruído proporcionada pelos calços pode variar entre 3 e 10 dB, sendo 10 dB percebidos como uma redução de metade do ruído pelo ouvido humano. Estudos mostram

que calços de borracha natural podem reduzir até 6 dB (Bérubé et al., 2014) e os de poliuretano, até 8 dB (Gupta et al., 2015), dependendo da instalação e das condições de operação. Fatores como frequência das vibrações, pontos de instalação e qualidade do material influenciam diretamente a eficácia do amortecimento. Assim, para uma redução máxima de ruído, é fundamental combinar a escolha adequada do material com uma instalação correta (Mead, 2000; Rao, 2010).

2.5 Durabilidade dos Calços Elásticos

A durabilidade dos calços elásticos em transformadores a seco depende de vários fatores, incluindo o tipo de material, as condições ambientais, a carga operacional e a qualidade da fabricação. Em geral, a vida útil desses calços pode variar, mas com a seleção adequada do material e manutenção regular, eles podem durar vários anos.

Na Tabela 2 observa-se a durabilidade do material em termos da sua vida útil.

Tabela 2 - Tipo de material e sua vida útil	
MATERIAL	VIDA ÚTIL [anos]
Borracha Natural (NR)	Geralmente tem uma boa durabilidade, mas pode ser suscetível à degradação por ozônio e exposição a luz UV. A vida útil típica pode variar de 5 a 10 anos, dependendo das condições operacionais.
Poliuretano (AU)	Conhecido por sua alta resistência ao desgaste e excelente durabilidade, especialmente em ambientes industriais. Pode durar de 10 a 15 anos.
Neoprene (CR)	Resistente ao envelhecimento, calor, óleo e raios UV, com uma vida útil que pode variar de 10 a 15 anos.
EPDM	Excelente resistência ao ozônio e intempéries, com uma vida útil de 10 a 20 anos.
Silicone (MQ)	Alta resistência ao calor e boa durabilidade, com uma vida útil de até 20 anos em condições ideais.
Nitrílica (NBR)	Boa resistência a óleos e produtos químicos, com uma vida útil que pode variar de 5 a 10 anos.

Fonte: Catálogo de Elastômetros (2021)

A durabilidade dos calços elásticos pode ser comprometida por condições ambientais como temperaturas extremas, radiação UV, ozônio, óleo, produtos químicos, alta umidade e agentes corrosivos. Além disso, fatores operacionais, como carga constante e vibrações intensas, aceleram o desgaste dos materiais. A qualidade da fabricação também é determinante, sendo que calços produzidos com materiais puros e processos controlados apresentam maior resistência ao envelhecimento (Ferreira, 2017). Estudos e práticas industriais confirmam que os calços elásticos são uma solução eficiente na redução de ruídos em transformadores a seco, promovendo conforto acústico e maior vida útil dos equipamentos.

3 MANUTENÇÃO E INSPEÇÃO CALÇOS ELÁSTICOS

De acordo com Fonseca (2014), a manutenção preventiva é fundamental para garantir a eficiência e a durabilidade dos componentes, prevenindo falhas e evitando paradas inesperadas. Para componentes elastoméricos, como os calços elásticos utilizados em transformadores a seco, é essencial para assegurar o desempenho contínuo e prolongar a vida útil do sistema. De acordo com Rao (2010), a substituição programada desses elementos contribui de forma significativa para a eficácia na atenuação de vibrações, prevenindo falhas estruturais e operacionais.

Além disso, conforme destacado por Mead (2000), a durabilidade dos calços depende diretamente da escolha adequada dos materiais, considerando as condições ambientais e operacionais às quais estarão submetidos.

Recomenda-se, portanto, a adoção das seguintes práticas:

- Inspeções visuais regulares, com o objetivo de identificar sinais de desgaste, rachaduras ou degradação;
- Substituição preventiva, baseada em um cronograma de manutenção, para evitar falhas inesperadas;
- Monitoramento das condições operacionais, com vistas à preservação das propriedades físicas dos materiais elastoméricos.

A aplicação dessas diretrizes permite que os calços elásticos mantenham sua função de forma eficaz, garantindo a redução dos níveis de ruído e a integridade estrutural dos transformadores ao longo do tempo.

3.1 Substituição dos Calços Elásticos em Transformadores a Seco

A substituição dos calços elásticos em transformadores a seco deve seguir um cronograma de manutenção preventiva, complementado por inspeções periódicas que avaliem a integridade física e o desempenho desses elementos. A inspeção visual e tátil periódica, realizada ao menos uma vez por ano, permite identificar sinais de desgaste, como rachaduras, endurecimento ou deformações, indicando a necessidade de substituição.

Além disso, a substituição pode ser baseada na vida útil estimada do material utilizado nos calços, a qual varia conforme sua composição. Materiais como borracha natural e nitrílica

possuem durabilidade média entre 5 e 10 anos, enquanto opções como poliuretano, neoprene e EPDM podem chegar a 15 ou até 20 anos de uso, dependendo das condições operacionais.

Transformadores sujeitos a altas vibrações, cargas elevadas ou ambientes adversos — como alta umidade ou presença de agentes químicos — exigem substituições mais frequentes, devido ao desgaste acelerado dos calços. Complementarmente, o monitoramento de vibração e de ruído pode auxiliar na identificação precoce de perda de desempenho, servindo como indicador da necessidade de intervenção.

3.2 Procedimento de Substituição

A substituição dos calços elásticos em transformadores a seco é uma etapa fundamental para a manutenção da eficiência na atenuação de vibrações e do desempenho estrutural do equipamento ao longo do tempo. De acordo com Rao (2010), a manutenção preventiva de componentes elastoméricos é essencial para garantir o bom funcionamento de sistemas mecânicos sujeitos a vibrações. Mead (2000) complementa que inspeções regulares são indispensáveis para identificar sinais de desgaste e deterioração, possibilitando a substituição oportuna antes que ocorram falhas que comprometam a integridade do sistema.

O processo de substituição deve ser planejado cuidadosamente. O ideal é que ele ocorra durante períodos de baixa demanda elétrica ou em ocasiões previamente programadas de manutenção, a fim de evitar interrupções imprevistas no fornecimento de energia. A preparação adequada inclui a verificação da disponibilidade das ferramentas e materiais necessários. Além disso, é fundamental cumprir rigorosamente todos os procedimentos de segurança, como o desligamento completo do transformador (Cigré, 2011).

Durante a substituição, os calços antigos devem ser removidos com cautela para evitar danos à estrutura do equipamento. Os novos calços devem ser instalados conforme as especificações técnicas recomendadas, garantindo o correto posicionamento e fixação, especialmente para evitar o surgimento de pontos de rigidez indesejados que comprometam a função isolante dos elementos elásticos.

Após a instalação, é fundamental realizar testes que confirmem o bom funcionamento do sistema. O monitoramento dos níveis de vibração e de ruído serve como um indicativo da eficácia dos novos calços. Uma redução significativa desses parâmetros pode confirmar a restauração do desempenho mecânico ideal do transformador.

3.3 Plano de Manutenção Preventiva para Vida Útil dos Calços Elásticos

O desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva para calços elásticos em transformadores elétricos a seco é essencial para garantir sua durabilidade, reduzir níveis de ruído e vibração, mantendo o desempenho confiável do sistema ao longo do tempo. Segundo Rao (2010), a manutenção regular e a substituição programada de elementos elastoméricos são fundamentais para a eficácia no controle de vibrações. Mead (2000) reforça que o monitoramento contínuo e inspeções sistemáticas são indispensáveis para a detecção precoce de falhas.

Esse plano deve abranger a identificação dos materiais utilizados e suas respectivas durabilidades, considerando as condições ambientais e operacionais. Inspeções visuais semestrais e táteis anuais devem ser realizadas para verificar sinais de desgaste ou rigidez excessiva nos calços. Além disso, recomenda-se o monitoramento contínuo dos níveis de vibração e ruído por meio de sensores específicos, que auxiliam na detecção de perda de desempenho dos elementos amortecedores. A seguir, apresenta-se um plano de manutenção preventiva estruturado em sete pontos.

3.3.1 Identificação dos Componentes e Materiais

Nesta etapa, é essencial reconhecer os principais elementos utilizados no sistema de amortecimento de vibrações de transformadores a seco, bem como as características dos materiais empregados nos calços elásticos.

- **Componentes:** Calços elásticos localizados nos pontos de apoio e fixação dos transformadores;
- **Materiais Utilizados:** Borracha natural, poliuretano, neoprene, EPDM, silicone e borracha nitrílica (NBR), cada um com propriedades específicas de amortecimento, resistência térmica e durabilidade.

3.3.2 Cronograma de Inspeções

A inspeção periódica dos calços elásticos é fundamental para garantir sua integridade mecânica e funcionalidade ao longo do tempo. Um cronograma bem definido permite identificar desgastes precoces e prevenir falhas estruturais nos suportes dos transformadores.

→ **Inspeção Visual (Semestral)**

Consiste na análise visual dos calços, realizada a cada seis meses. Deve-se observar sinais de desgaste como:

- Rachaduras superficiais ou profundas;
- Deformações visíveis;
- Endurecimento do material;
- Deslocamentos ou falhas na fixação.

Essas condições indicam possível degradação do material, comprometendo sua capacidade de amortecimento.

→ **Inspeção Tátil – Anual**

Realizada uma vez por ano, complementa a inspeção visual por meio da avaliação manual das propriedades físicas dos calços. Deve-se verificar:

- Elasticidade e flexibilidade;
- Alterações na textura (ressecamento, pegajosidade ou endurecimento);
- Presença de áreas frágeis ou fragmentadas.

Essa inspeção permite identificar mudanças internas no material que ainda não se manifestam visualmente, aumentando a precisão na tomada de decisões para substituição ou monitoramento reforçado.

3.3.3 Monitoramento Contínuo

O monitoramento contínuo é uma estratégia eficaz para acompanhar em tempo real o desempenho dos calços elásticos e detectar variações anormais nos níveis de vibração e ruído, que podem indicar degradação progressiva do material.

→ **Monitoramento de Vibrações**

A instalação de sensores de vibração nas estruturas do transformador permite a coleta contínua de dados sobre as oscilações mecânicas durante o funcionamento. Variações fora dos padrões estabelecidos podem indicar:

- Afrouxamento ou falha de fixação dos calços;
- Perda de elasticidade ou colapso estrutural do material;
- Propagação de vibrações excessivas para a estrutura de apoio.

A análise dessas informações, preferencialmente com suporte de softwares de manutenção preditiva, permite uma resposta rápida antes que ocorram falhas significativas.

→ **Monitoramento de Nível de Ruído**

O acompanhamento do nível sonoro emitido pelo transformador é igualmente importante. Um aumento gradual ou repentino no ruído pode sinalizar:

- Diminuição da eficiência de amortecimento dos calços;
- Deformações que favorecem a ressonância estrutural;
- Fadiga do material por envelhecimento térmico ou mecânico.

Para maior eficácia, recomenda-se registrar os dados em histórico, estabelecer limites de alarme e integrar os sistemas de monitoramento aos planos de manutenção preventiva e preditiva.

3.3.4 Procedimentos de Substituição

A substituição dos calços elásticos deve ser conduzida de forma planejada e baseada tanto no tempo de vida útil estimado dos materiais quanto nas condições observadas durante inspeções e monitoramentos. Existem dois tipos de abordagem para substituição: preventiva programada e condicional.

→ **Substituição Preventiva Programada**

Este procedimento considera a vida útil média dos materiais, mesmo que não apresentem sinais aparentes de falha. A substituição em intervalos regulares previne perdas de desempenho, falhas inesperadas e garante o funcionamento silencioso e estável do transformador.

Os intervalos recomendados para substituição estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Vida útil média recomendada para diferentes materiais de calço elástico

MATERIAL	INTERVALO RECOMENDADO
Borracha Natural	5 e 7 anos
Poliuretano	10 e 12 anos
Neoprene	10 e 12 anos
EPDM	12 e 15 anos
Silicone	15 e 20 anos
Borracha Nitrílica (NBR)	5 e 7 anos

Fonte: Autoria própria (2025)

Esses intervalos podem variar conforme as condições ambientais, carga térmica e regime operacional do transformador. Portanto, recomenda-se associar o cronograma à análise histórica de desempenho dos equipamentos.

→ **Substituição Condicional**

A substituição condicional deve ser realizada sempre que forem detectadas alterações significativas nos calços durante inspeções visuais ou táteis, bem como variações anormais nos níveis de vibração ou ruído identificadas por meio de monitoramento contínuo. Sinais como endurecimento, rachaduras, deformações, perda de elasticidade ou falhas de fixação são indicativos de degradação funcional e exigem substituição imediata.

3.3.5 Procedimentos de Manutenção

Segundo Fonseca (2014), os procedimentos de manutenção devem seguir uma sequência lógica e segura. A substituição dos calços deve ser realizada em etapas:

- **Etapla 1: Desligamento do Equipamento**

Conforme estabelece a NR-10, toda intervenção em instalações elétricas deve ser realizada com o equipamento desenergizado e com a adoção de medidas de proteção coletiva e individual (Brasil, 2004). Segundo a NR-12, é fundamental garantir a segurança física dos trabalhadores durante manutenções, com foco na eliminação de riscos mecânicos, elétricos e térmicos associados às máquinas e equipamentos (Brasil, 2010).

- **Etapla 2: Preparação de Ferramentas e Equipamentos**

Organizar previamente todos os dispositivos necessários para a remoção dos calços antigos e instalação dos novos, incluindo Equipamentos de Proteção Individual (EPIs),

conforme determina a NR-6, que regulamenta o uso obrigatório desses equipamentos de segurança no ambiente de trabalho, além de ferramentas manuais e instrumentos de medição (Brasil, 2022).

- **Etapa 3: Remoção dos Calços Antigos**

Realizar a retirada dos calços com cautela, inspecionando simultaneamente as bases de apoio, suportes metálicos e pontos de fixação quanto a sinais de corrosão, folgas ou trincas.

- **Etapa 4: Instalação dos Novos Calços**

Posicionar e fixar os novos calços de acordo com as especificações técnicas do fabricante, observando o alinhamento, distribuição da carga e o torque de aperto recomendado.

- **Etapa 5: Testes Pós-Instalação**

Após a substituição, realizar testes operacionais para verificar os níveis de vibração e ruído. Os valores devem ser comparados com os parâmetros de referência, assegurando a eficácia da instalação.

3.3.6 Documentação e Registro

A rastreabilidade das atividades de manutenção é essencial para a gestão eficiente dos ativos (IEEE, 2019). Todo o histórico de inspeções e substituições deve ser devidamente registrado.

- **Registro de Atividades**

Deve-se documentar todas as inspeções, manutenções e substituições realizadas, incluindo data, nome do técnico responsável, tipo de atividade, materiais utilizados e observações relevantes.

- **Relatório Anual de Manutenção**

Documento consolidado ao final de cada ano, reunindo os registros operacionais, análises de falhas, desempenho dos calços e propondo ações corretivas e preventivas para o ciclo seguinte.

Um modelo prático de ficha de manutenção preventiva foi incluído no Apêndice A, com campos para inspeção, registro de substituições e monitoramento. Essa ficha pode ser usada em campo por técnicos de manutenção como apoio às rotinas descritas neste plano.

3.3.7 Treinamento e Capacitação

A qualificação da equipe de manutenção é um fator crítico para a confiabilidade dos procedimentos descritos neste plano. A capacitação deve abranger tanto aspectos técnicos quanto operacionais.

→ Capacitação Técnica

Os profissionais envolvidos devem ser treinados para identificar sinais de desgaste, executar substituições conforme normas técnicas e operar os instrumentos de monitoramento com precisão.

→ Atualizações Periódicas

Sempre que novos materiais, tecnologias ou metodologias forem incorporados ao sistema de amortecimento, os treinamentos devem ser atualizados para manter a equipe alinhada às melhores práticas de manutenção preditiva e preventiva.

A Tabela 4 apresenta uma proposta de cronograma de manutenção preventiva, com a frequência recomendada das atividades e os respectivos responsáveis, contribuindo para a sistematização do plano e a confiabilidade operacional do sistema.

Tabela 4 - Cronograma de Manutenção			
ATIVIDADE	FREQUÊNCIA	RESPONSÁVEL	OBSERVAÇÕES
Inspeção Visual	Semestral	Técnico de Manutenção	Procurar por sinais de desgaste e deformação
Inspeção Tátil	Anual	Técnico de Manutenção	Verificar elasticidade e integridade dos calços
Monitoramento de Vibrações	Contínuo	Engenheiro de Manutenção	Usar sensores de vibração para monitoramento contínuo
Monitoramento de Nível de Ruído	Contínuo	Engenheiro de Manutenção	Monitorar e registrar níveis de ruído regularmente
Substituição Preventiva	Conforme Material	Técnico de Manutenção	Seguir períodos específicos para cada material
Relatório Anual de Manutenção	Anual	Supervisor de Manutenção	Compilar e revisar todas as atividades de manutenção

Fonte: Autoria própria (2025)

Por fim, a capacitação contínua da equipe responsável garante a correta execução das atividades, promovendo a longevidade dos calços elásticos e a eficiência global do transformador.

4 DIMENSIONAMENTO DOS CALÇOS ELÁSTICOS

Segundo a Romagnole (2024), transformadores a seco encapsulados em resina epóxi são amplamente utilizados em instalações elétricas devido à sua robustez, segurança e baixa manutenção. Nesta etapa, realiza-se o dimensionamento dos calços elásticos para o transformador trifásico de 150 kVA. Esses componentes são fundamentais para a atenuação de vibrações e ruídos, gerados principalmente pela magnetostrição do núcleo e pelas forças eletromagnéticas. A análise considera critérios de rigidez, frequência natural e deflexão estática, assegurando a estabilidade e o desempenho do conjunto em operação.

1. Dados do Transformador

- Potência nominal (S): 150 kVA;
- Tensão primária (V_1): 13,8 kV;
- Tensão secundária (V_2): 220 V;
- Frequência (f): 60 Hz.

2. Cálculo das Correntes Nominais

Para dar continuidade ao dimensionamento dos calços elásticos, é necessário conhecer as correntes que circulam no primário e no secundário do transformador. A determinação dessas correntes baseia-se na potência aparente e nas tensões do sistema trifásico.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * V}$$

onde:

I é a Corrente em amperes (A);

S é a potência aparente em volt-ampere (VA);

V é a tensão de linha em volts (V).

Aplicando para o primário:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} * V_1} = \frac{150 * 10^3}{\sqrt{3} * 13\,800} \approx 6,28 \text{ A}$$

Aplicando para o secundário:

$$I_2 = \frac{150 * 10^3}{\sqrt{3} * 220} \approx 393,65 \text{ A}$$

3. Frequência de Vibração

A principal fonte de vibração em transformadores é a magnetostricção do núcleo, que gera vibrações com frequência igual ao dobro da frequência da rede:

$$f_{vib} = 2 \times f = 120 \text{ Hz}$$

A magnetostricção ocorre devido à variação do fluxo magnético alternado no núcleo de aço, que provoca expansão e contração rítmica do material.

4. Forças Vibratórias e Atenuação

A massa do transformador (M) é estimada em 300 Kg. Para que o sistema de calços elásticos atenuie eficientemente as vibrações, sua frequência natural deve ser bem inferior à frequência de excitação (120 Hz).

A frequência natural de um sistema massa-mola é dada por:

$$f_n = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \times \sqrt{\frac{k}{m}}$$

onde:

f_n é a frequência natural (Hz);

k é a rigidez do calço (N/m);

m é a massa suportada por cada calço (kg).

Para 4 calços,

$$m = 300 / 4 = 75 \text{ kg}$$

Considerando $f_n = 20 \text{ Hz}$:

$$k = (2\pi \times f_n)^2 \times m = (2\pi \times 20)^2 \times 75 \approx 1.18 \times 10^6 \text{ N/m (por calço)}$$

5. Seleção do Material dos Calços

O material sugerido para os calços é borracha natural ou silicone, com dureza entre Shore A 50 e 60. A espessura mínima recomendada é 20 mm, garantindo resistência e flexibilidade adequadas.

6. Verificação da Carga Estática

Peso por calço:

$$F_{est} = \frac{M * g}{4} = \frac{300 * 9,81}{4} \approx 736 \text{ N}$$

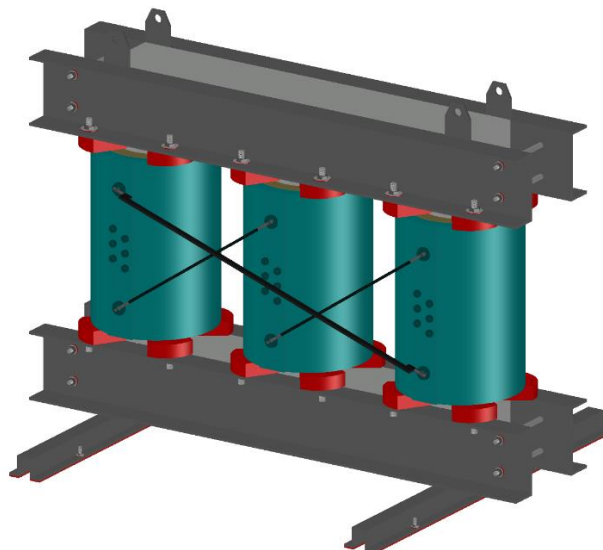
A deflexão estática:

$$\delta = \frac{F_{est}}{4} = \frac{736}{1,18 * 10^6} \approx 0,62 \text{ mm}$$

Essa deflexão é aceitável e garante que o sistema tenha boa performance de amortecimento.

O esboço da Figura 4 ilustra a disposição típica dos calços elásticos em um transformador trifásico a seco. Os calços (em vermelho) são posicionados nos quatro cantos inferiores e superiores da base do transformador, entre sua estrutura e a fundação, com o objetivo de isolar mecanicamente o equipamento e reduzir a transmissão de vibrações. O núcleo magnético, composto por chapas de aço silício, encontra-se centralizado e fixado por braçadeiras não magnéticas. Os enrolamentos primário e secundário, encapsulados em resina epóxi, estão dispostos de forma concêntrica ao redor do núcleo. A fixação é feita com parafusos e arruelas de neoprene, evitando pontos de rigidez que comprometam a eficácia do isolamento vibratório.

Figura 4 – Modelo tridimensional do transformador a seco, destacando os calços elásticos posicionados superior e inferiormente aos enrolamentos para atenuação de vibrações e ruído.



Fonte: Autoria própria (2025)

5 RESULTADOS

A análise sobre o uso de calços elásticos para a redução do ruído em transformadores elétricos a seco revelou conclusões importantes que reforçam a eficácia dos materiais elastoméricos, os benefícios da manutenção preventiva e o impacto positivo na operação e sustentabilidade desses equipamentos.

Os calços elásticos demonstram ser altamente eficazes na redução do ruído gerado por transformadores a seco. Estudos e práticas industriais indicam uma redução típica no nível de ruído entre 3 e 10 dB, dependendo do material empregado e das condições de instalação. Essa redução é significativa, considerando que uma diminuição de 10 dB é percebida pelo ouvido humano como uma redução aproximada de metade do nível sonoro.

Diferentes materiais elastoméricos oferecem propriedades variadas que influenciam a eficácia e a durabilidade dos calços elásticos:

- Borracha Natural: Boa elasticidade e amortecimento, vida útil de 5 a 10 anos;
- Poliuretano: Alta resistência ao desgaste, vida útil de 10 a 15 anos;
- Neoprene: Resistente ao envelhecimento e intempéries, vida útil de 10 a 15 anos;
- EPDM: Excelente resistência ao ozônio e intempéries, vida útil de 10 a 20 anos;
- Silicone: Alta resistência ao calor, vida útil de até 20 anos;
- Nitrílica (NBR): Boa resistência a óleos e produtos químicos, vida útil de 5 a 10 anos.

Para assegurar a eficácia contínua dos calços elásticos e prolongar sua vida útil, a manutenção preventiva é indispensável. Recomenda-se:

- Inspeções visuais e táteis regulares, semestrais e anuais, respectivamente para identificar desgaste e deterioração;
- Monitoramento contínuo por meio de sensores de vibração e acompanhamento dos níveis de ruído, permitindo a detecção precoce de falhas;
- Substituição preventiva programada conforme a vida útil dos materiais e condições específicas de operação.

A adoção desses procedimentos promove diversos benefícios operacionais e ambientais, tais como:

- Redução do ruído, melhorando o conforto acústico no entorno;
- Atenuação das vibrações, prolongando a vida útil dos transformadores e equipamentos associados, reduzindo reparos e substituições;
- Aumento da eficiência operacional, diminuindo a necessidade de barreiras acústicas adicionais e permitindo maior flexibilidade na instalação.

Portanto, é fundamental implementar uma abordagem sistemática e bem estruturada para a manutenção e substituição dos componentes elastoméricos, garantindo inspeções periódicas e monitoramento constante para evitar falhas significativas e assegurar a longevidade e o desempenho dos transformadores

5.1 Nível de Ruído Atenuado por Calços Elásticos em Transformadores

Os calços elásticos apresentam um papel fundamental na atenuação do ruído emitido por transformadores elétricos a seco, proporcionando reduções sonoras que variam conforme o tipo de material, a instalação e as condições de operação. Geralmente, a diminuição do nível de ruído está entre 3 e 10 decibéis (dB), valor que representa uma diferença perceptível e importante no conforto acústico.

A eficácia dos calços depende principalmente de três fatores:

- **Material Utilizado:** Diferentes elastômeros possuem capacidades variadas de amortecimento, por exemplo, poliuretano e borracha natural são frequentemente destacados pela boa performance na redução do ruído;
- **Qualidade da Instalação:** Uma instalação adequada e o cuidado na manutenção são essenciais para garantir o desempenho esperado;
- **Características do Transformador:** O tamanho e potência do equipamento influenciam diretamente o nível das vibrações e ruído gerados, impactando o grau de atenuação possível.

A Tabela 5 apresenta a faixa típica de redução sonora para os principais materiais usados na fabricação dos calços elásticos:

Tabela 5 - Valores típicos encontrados para cada material	
MATERIAL	ATENUAÇÃO DO RUÍDO [dB]
Borracha Natural	4 a 7 dB
Poliuretano	5 a 8 dB
Neoprene	4 a 7 dB
EPDM	4 a 8 dB
Silicone	5 a 10 dB
Nitrílica (NBR)	3 a 6 dB
Fonte: Autoria própria (2025)	

Essa redução contribui não apenas para a melhoria do ambiente ao redor dos transformadores, mas também para a preservação dos próprios equipamentos, ao diminuir o desgaste causado pelas vibrações.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação eficaz de calços elásticos em transformadores elétricos a seco requer uma abordagem holística que considera a seleção adequada de materiais, um plano de manutenção preventiva estruturado, com monitoramento contínuo das condições operacionais. Os benefícios dessa abordagem são muitos, incluindo a redução significativa do ruído, aumento da vida útil dos equipamentos e melhoria na eficiência e sustentabilidade das operações.

Os calços elásticos desempenham um papel vital na mitigação do ruído e na redução das vibrações geradas pelos transformadores a seco. Esses componentes, fabricados a partir de materiais elastoméricos como borracha natural, poliuretano, neoprene, EPDM, silicone e nitrílica (NBR), são projetados para absorver e dissipar a energia vibracional, minimizando a transmissão de vibrações para a estrutura e consequentemente, reduzindo o ruído.

A seleção do material adequado para os calços elásticos é fundamental para garantir a eficácia na redução do ruído e a durabilidade dos componentes. Cada material possui propriedades específicas que o tornam mais adequado para determinadas condições operacionais e ambientais. Por exemplo, a borracha natural é conhecida por sua excelente elasticidade e capacidade de amortecimento, enquanto o poliuretano oferece alta resistência ao desgaste e durabilidade em ambientes industriais.

Estudos e práticas industriais mostram que os calços elásticos podem proporcionar uma redução significativa nos níveis de ruído, variando de 3 a 10dB, dependendo do material e da aplicação específica. Além disso, a durabilidade dos calços pode variar de 5 a 20 anos, com base no tipo de material, condições operacionais e ambientais. A manutenção regular e a substituição preventiva são cruciais para garantir que os calços permaneçam eficazes ao longo do tempo.

A elaboração de um plano de manutenção preventiva detalhado é essencial para maximizar a vida útil dos calços elásticos e garantir o desempenho contínuo dos transformadores. Este plano deve incluir inspeções visuais e táteis regulares, monitoramento contínuo de vibrações e níveis de ruído e substituições programadas com base na vida útil esperada dos materiais. A documentação e o registro de todas as atividades de manutenção são importantes para manter um histórico detalhado para tomada de decisões futuras.

A redução do ruído em transformadores a seco não só melhora o ambiente de trabalho e a qualidade de vida nas proximidades, mas também contribui para a sustentabilidade e eficiência operacional. Menores níveis de ruído podem reduzir a necessidade de barreiras acústicas adicionais e permitir uma maior flexibilidade na localização dos transformadores.

Além disso, a redução de vibrações pode prolongar a vida útil do transformador e dos equipamentos associados, resultando em menos necessidade de reparos e substituições frequentes.

Para reforçar a aplicabilidade prática das soluções propostas, os apêndices deste trabalho apresentam recursos complementares que ampliam a compreensão da abordagem adotada. O Apêndice A disponibiliza uma ficha de manutenção preventiva estruturada, servindo como modelo para inspeções periódicas e monitoramento contínuo dos calços elásticos, conforme as boas práticas de manutenção industrial. O Apêndice B, por sua vez, traz uma modelagem tridimensional do calço e sua aplicação na estrutura do transformador, elaborada no software AutoCAD. Essa representação técnica detalha pontos de fixação, geometria e integração mecânica, permitindo visualizar com clareza a função dos calços na atenuação de vibrações e na redução de ruído estrutural.

REFERÊNCIAS

- BARBETTI, M. R. S. **Estudo comparativo entre coxim hidráulico e coxim elastomérico, aplicados ao sistema de apoio do motor automotivo**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BÉRUBÉ, S.; LAFONTAINE, J. F.; SAAD, M. **Investigation of noise and vibration in power transformers**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 29, n. 3, p. 1507-1515, 2014.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018. E-book. pág.345. ISBN 9788521212843.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma regulamentadora nº 10: segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2004.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma regulamentadora nº 12: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2010.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma regulamentadora nº 6: equipamento de proteção individual – EPI**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022.
- CIGRÉ – CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES. **Guide for transformer maintenance**. Technical Brochure no. 445. Working Group A2.34. Paris, 2011. ISBN 978-2-85873-134-3.
- FERREIRA, R. **Processos especiais de transformação de elastômeros**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense. 2017. Apostila.
- FINOCCHIO, M. A. F.; FERREIRA, J. G. **Comportamento do ruído acústico em transformadores de distribuição a óleo**. Revista Sinergia, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 43-47, jan./jun. 2018.
- FINOCCHIO, M. A. F.; FERREIRA, J. G.; BARBOSA, L. Y. **Comportamento do ruído de transformadores a seco encapsulados de 300kVA da classe 15kVA**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E AGRONOMIA – CONTECC 2021, Semana Oficial da Engenharia e da Agronomia – SOEA Connect 2021, 2021, Brasília. Anais [...]. Brasília: CONFEA, 2021.
- FONSECA, J. F. **Elementos de manutenção em transformadores de potência**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2014.
- GUPTA, S.; NAGARKAR, P.; DESHMUKH, S. **Noise and vibration analysis in power transformers**. Journal of Electrical Systems, v. 11, n. 1, p. 10-18, 2015.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE Std C57.93-2019 – IEEE **Guide for installation and maintenance of liquid-immersed power transformers**. New York: IEEE, 2019. Approved by IEEE-SA Standards Board, March 21, 2019.
- JORGE, P. M. B. S. **Estudo sobre o ruído originado pela magnetostricção em transformadores de potência**. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.

MEAD, D. J. **Passive vibration control**. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7277: Transformadores e reatores – determinação do nível de ruído**. Rio de Janeiro, 2013.

RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. Upper Saddle River: Pearson Education, 2010.

ROMAGNOLE. **Transformadores a seco: eficiência, segurança e sustentabilidade para ambientes urbanos**. Romagnole, 23 out. 2024.

SP SUPRIMENTOS INDUSTRIAIS. **Catálogo de elastômeros**. 1. ed. Guarulhos, SP: SP Suprimentos Industriais, jan. 2021.

WANG, L.; WANG, M.; TANG, J. **Electromagnetic forces and vibrations in electrical machines**. Cham: Springer, 2018.

ZHU, Y.; MA, X.; ZHANG, X. **Magnetostriction in electrical steel sheets and its contribution to transformer noise**. IEEE Transactions on Magnetics, v. 52, n. 3, p. 1-4, 2016.

APÊNDICE A – Ficha de Manutenção Preventiva

FICHA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA – CALÇOS ELÁSTICOS DE TRANSFORMADORES A SECO

Transformador N.º:	Instalação / Setor:
Potência (kVA):	Data da Manutenção:

Tipo de Manutenção:	☐ Preventiva Regular	☐ Substituição Condicional	☐ Pós-falha
---------------------	---	---	------------------------------------

1. Inspeções Realizadas

Item	Tipo de Inspeção	OK	Observações
1.1	Inspeção Visual		
1.2	Inspeção Tátil		
1.3	Presença de Rachaduras		
1.4	Endurecimento / Ressecamento		
1.5	Deformação Física		
1.6	Fixação dos Calços		

2. Monitoramentos Técnicos

Parâmetro	Valor Atual	Valor de Referência	OK	Observações
Nível de Vibração (mm/s RMS)		≤ 4,5 mm/s RMS		
Nível de Ruído (dB)		≤ 65 dB (normal)		

Elasticidade (manual)	☐ Normal ☐ Rígido ☐ Amolecido	
-----------------------	--	--

3. Procedimentos Executados

Procedimento	Realizado	Observações
Desligamento e segurança elétrica		
Remoção dos calços antigos		
Inspeção dos pontos de montagem		
Instalação de novos calços		
Teste pós-instalação (Vibração/ruído)		

4. Dados do Componente Substituído (se aplicável)

Tipo de material	Vida útil	Data da última troca	Nova data Prevista
☐ Borracha Natural	5 - 7 anos		
☐ Poliuretano	10 - 12 anos		
☐ Neoprene	10 - 12 anos		
☐ EPDM	12 - 15 anos		
☐ Silicone	15 - 20 anos		
☐ Nitrílica (NBR)	5 - 7 anos		

5. Responsáveis e Validação

Técnico Responsável:	Assinatura: _____
----------------------	-------------------

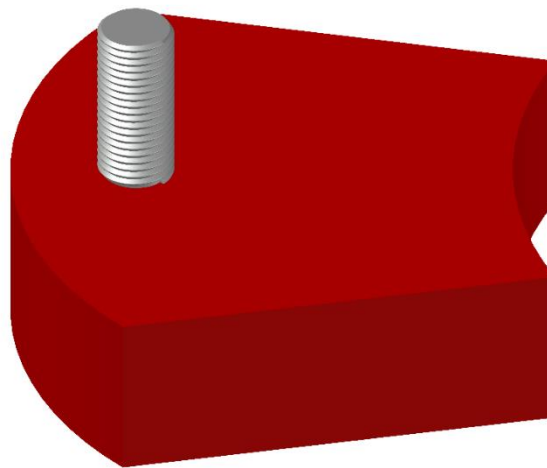
Eng. de Manutenção:	Assinatura: _____
---------------------	-------------------

APÊNDICE B – Modelagem 3D do Calço e sua Aplicação Estrutural

As figuras a seguir apresentam a modelagem tridimensional desenvolvida no software AutoCAD para representar o calço elastomérico utilizado na estrutura do transformador a seco.

A Figura B.1 mostra o modelo detalhado do calço, que possui geometria curva projetada para se ajustar ao contorno do núcleo e dos enrolamentos. Esse formato permite um encaixe eficiente, contribuindo para o isolamento mecânico. O componente é constituído por um parafuso sextavado moldado na estrutura de borracha, formando um conjunto semelhante a um coxim automotivo, com capacidade de absorver vibrações e reduzir a transmissão de ruído estrutural.

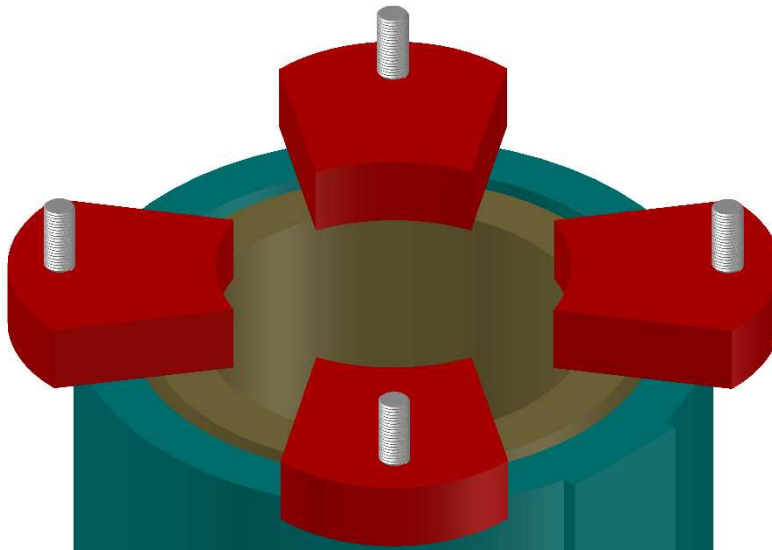
Figura B.1 - Modelo 3D do calço elastomérico



Fonte: Autoria própria (2025)

Já a Figura B.2 ilustra a aplicação dos calços na estrutura do transformador, posicionados acima e abaixo dos enrolamentos de alta e baixa tensão. A disposição estratégica desses elementos visa minimizar a transferência de vibrações geradas durante a operação, melhorando o desempenho acústico do equipamento. A modelagem em 3D permite visualizar com clareza o encaixe dos calços no conjunto, reforçando sua função de atenuação de vibrações.

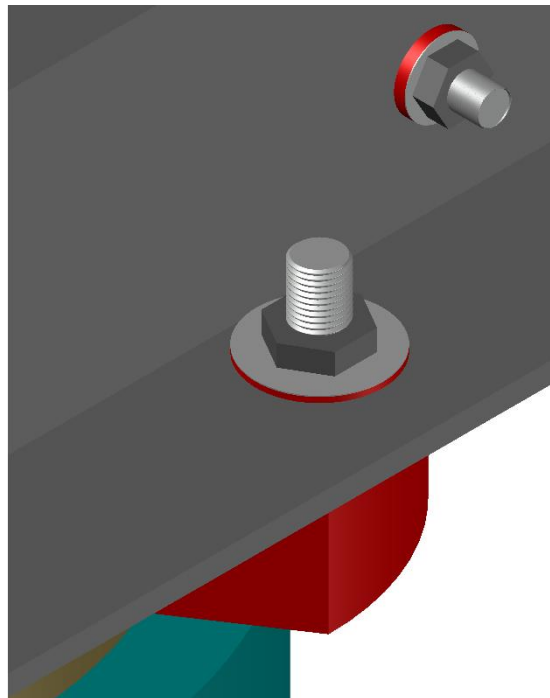
Figura B.2 - Disposição 3D dos calços na estrutura do transformador



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura B.3 mostra o calço sendo fixado diretamente à estrutura metálica do transformador. O parafuso sextavado atravessa a estrutura e é preso por um conjunto composto por uma arruela de borracha, que atua como elemento de amortecimento, uma arruela metálica que assegura o aperto uniforme e uma porca que realiza o travamento do sistema.

Figura B.3 - Fixação do calço à estrutura metálica do transformador

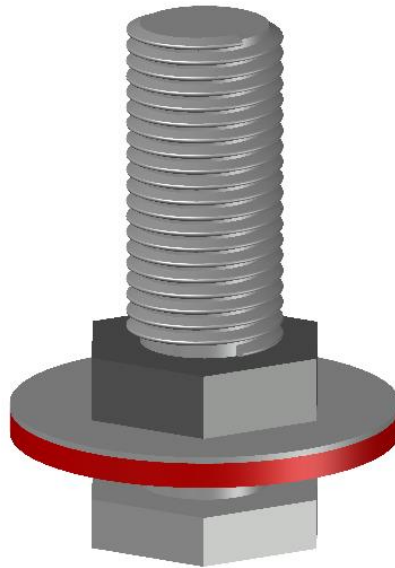


Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura B.4, observa-se a aplicação padronizada desse conjunto de fixação em todos os pontos estruturais do transformador. Essa padronização foi adotada com o objetivo de

garantir a estabilidade mecânica da estrutura e simultaneamente, proporcionar um nível consistente de amortecimento das vibrações transmitidas entre o núcleo e a carcaça metálica. A configuração padronizada facilita a montagem, manutenção e contribui para a redução da propagação de ruídos estruturais durante a operação do equipamento.

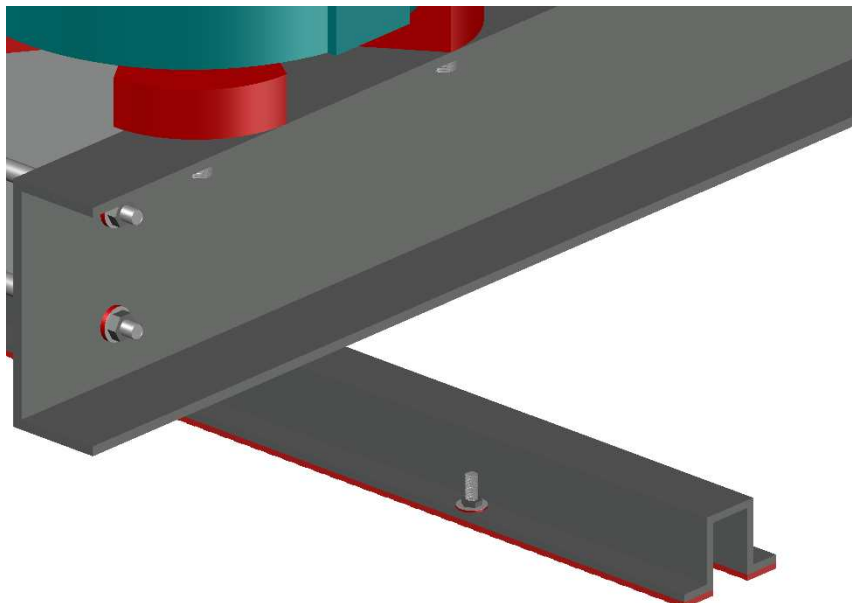
Figura B.4 - Conjunto padronizado de fixação com elementos de amortecimento



Fonte: Autoria própria (2025)

Por fim, a Figura B.5 ilustra a inclusão de um calço adicional sob as sapatas da estrutura do transformador, com o intuito de evitar que vibrações sejam transmitidas ao piso ou absorvidas do ambiente.

Figura B.5 - Disposição 3D dos calços na estrutura do transformador



Fonte: Autoria própria (2025)