

Avaliação de desempenho de aparelhos de apoio elastomérico em pontes e viadutos ferroviários utilizando dados de inspeção visual

Vinicius Ippolito¹, Flávio Alexandre dos Reis², Rafael Leite de Queiroz³, Diego Leonardo Rosa⁴, José Fernando Rodrigues⁵

¹MRS Logística S.A / Gerência de Engenharia de Infraestrutura / vinicius.ippolito@mrs.com.br

²MRS Logística S.A / Gerência de Engenharia de Infraestrutura / flavio.reis@mrs.com.br

³MRS Logística S.A / Gerência de Engenharia de Infraestrutura / rafael.queiroz@mrs.com.br

⁴MRS Logística S.A / Gerência de Engenharia de Infraestrutura / diego.rosa@mrs.com.br

⁵Procert Engenharia Ltda / fernando.rodrigues@procertengenharia.com.br

Resumo

Diante da recente necessidade de avaliação das pontes e viadutos existentes e com idade avançada, que vêm sendo solicitados por carregamentos cada vez maiores, é fundamental garantir o desempenho adequado dos aparelhos de apoios instalados nessas estruturas.

A relevância estrutural destes componentes está no fato de transmitirem os esforços oriundos da superestrutura para elementos da mesoestrutura ou infraestrutura, mantendo em grande parte suas características ao longo do tempo. Os aparelhos de apoio elastoméricos foram largamente empregados na construção de pontes e viadutos nacionais a partir da década de 70, principalmente em obras de concreto armado e protendido.

A inspeção dos aparelhos de apoio é parte integrante de programas de gestão de ativos ferroviários e contempla o levantamento da geometria na configuração deformada atual, além da identificação de danos. Diante da ausência de procedimentos nacionais explícitos para avaliação de desempenho destes componentes utilizando-se dados da inspeção, pretende-se nesse trabalho propor critérios operacionais para subsidiar decisões sobre a manutenção estrutural destes dispositivos. Além disso, busca-se identificar parâmetros de interesse para que possa ser implementada uma estratégia de manutenção. Para atingir os objetivos serão apresentados inicialmente aspectos sobre a mecânica destes aparelhos de apoio, indicando-se limites que vem sendo empregados por normalizações internacionais, como por exemplo o Eurocode 1337-3 e a AASHTO.

Palavras-chave

Aparelho de apoio; neoprene fretado; inspeção; manutenção.

Introdução

Pontes e viadutos são estruturas de grande importância e são frequentemente encontradas em ferrovias nacionais e internacionais, cujas estruturas necessitam de ações de inspeção e manutenção, que visam garantir seu desempenho dentro de um padrão desejado de qualidade durante determinado período. Com a recente demanda para aumento da capacidade de carga das composições ferroviárias, os componentes de pontes e viadutos, tais como aparelhos de apoio elastoméricos fretados (AAEF), necessitam de um acompanhamento cada vez mais eficiente para garantir o seu bom desempenho e segurança. Em comparação com alguns aparelhos de apoio metálicos convencionais utilizados em pontes (roletes, pêndulos, chapas etc.), os AAEF apresentam menor custo e eficiência adequada para transmissão de cargas, com necessidades de manutenção simplificadas (E.I. DuPont de Nemours and Company, 1959). O menor custo se deve a um processo de fabricação mais simples, com utilização de materiais mais baratos e adotando-se simplicidade geométrica, resultando em boa eficiência na transmissão de esforços por não possuir partes móveis. Consiste basicamente em uma almofada de borracha posicionada entre elementos de aço estruturais, que se adequa aos movimentos

da super e mesoestrutura. Caso ocorra deslocamentos horizontais relativos entre super e mesoestrutura, expansão ou contração de uma delas, o AAEF elastomérico deflete em cisalhamento. Além disso, esses aparelhos absorvem com maior facilidade as irregularidades das superfícies de contato e suas necessidades de manutenção são mais simplificadas em relação aos aparelhos metálicos por não exigirem ações de lubrificação, limpeza, corrosão entre elementos mecânicos (engrenagens, por exemplo) etc.

O elastômero é definido pelo *Eurocode* 1337-3 (BS EN 1337, 2005) como um material macromolecular com alta resiliência, retornado a sua posição inicial após substanciais carregamentos e deformações, além da boa capacidade de dissipação de energia. São formados por materiais sintéticos derivados de petróleo ou gás natural, geralmente o Cloroprene (CR), também conhecido como Neoprene. Os elastômeros possuem importantes características, entre elas, a dureza, que pode ser mensurada como a resistência a penetração de sua superfície por instrumentos de dimensões e carregamentos específicos. Para fins comerciais, é utilizada a escala Shore A. Em termos gerais, quanto maior o valor atingido na escala, maior a dureza do material (Alves, 2005). Além disso, a dureza é fundamental pois a partir dela é possível estimar o módulo de deformação transversal do elastômero, e, portanto, sua rigidez vertical, horizontal e a rotação. Caso não existam ensaios específicos com valores fornecidos pelo fabricante, pode-se recorrer aos valores orientados por normas nacionais e internacionais, tais como o *Eurocode* 1337-3, normas ISO ou a códigos rodoviários e ferroviários. São materiais quase incompressíveis com características de deformação que revelam mais a deformação de sua forma do que variação de volume, ou seja, a relação tensão-deformação é influenciada pelo seu fator de forma, definido pela relação entre a área tensionada e as áreas livres ou áreas laterais. As chapas de aço têm importância fundamental para absorver as tensões de compressão, bem como elevar a rigidez do aparelho de apoio, pois com o aço em tração, ocorre o confinamento das camadas de elastômero em razão da aderência obtida no processo de vulcanização. No *Eurocode* 1337-3:2005 recomenda-se utilizar chapas com espessura mínima de 2mm e características mecânicas similares ao aço S235. Existem ainda recomendações da AASHTO para se utilizar aço do tipo A570 grau 40 (Muscarella & Yura, 1995). A constituição de camadas de borracha e chapas de aço (posicionadas entre as camadas de borracha), aderidas por processo de vulcanização, conferem ao bloco uma excelente solução de engenharia para transmissão de esforços entre elementos estruturais, pois a borracha possui capacidade de transmitir tensões verticais e o aço aumenta a rigidez do componente (Figueiredo, 2007).

De maneira geral, os aparelhos de apoio devem garantir as condições de contorno consideradas na concepção estrutural de pontes. A conexão entre super e mesoestrutura em modelos estruturais normalmente é representada por um ponto, e pode permitir movimentos de translação e/ou rotação, ou ser rígido nas 3 direções. Se forem esperados em uma superestrutura deslocamentos horizontais significativos, como na maioria das pontes, conexões rígidas não são economicamente viáveis. Nesse caso, deve-se providenciar elementos entre a super e mesoestrutura que possibilitem ajustes entre deslocamentos, rotações ou translações, elementos esses denominados de aparelhos de apoio.

Em AAEF, as forças causadas pela deformação são proporcionais aos deslocamentos resultantes. Recomenda-se, portanto, que a deformação do aparelho de apoio seja integrada a deformação do elemento estrutural ao qual se conecta, como no caso de dispositivos instalados no topo de pilares de pontes ou viadutos. Quanto mais esbelto o pilar, maior a influência da rigidez do aparelho de apoio e, portanto, a não consideração da rigidez conjunta entre o AAEF-pilar poderá levar a erros consideráveis na análise estrutural da ponte.

Diante disso, conclui-se que os aparelhos de apoio assumem importantes funções dentro de todo o sistema estrutural, principalmente, permitindo movimentações estruturais e alívios de tensão. Quando ocorre falha num aparelho de apoio, existe a possibilidade de falha no sistema como um todo, independentemente do tipo de aparelho de apoio. Não existe no Brasil, procedimentos ou normas que orientem sobre a avaliação de desempenho e segurança de aparelhos de apoio elastoméricos. Em

razão da ausência de critérios no Brasil, os principais recursos utilizados são códigos de agências de transportes e normas dos Estados Unidos da América (EUA), Canadá e União Europeia (EU), tais como o código da agência de Transporte do Texas (Muscarella & Yura, 1995), o código de orientações para operação ferroviária *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA, 2006), o protocolo de inspeção de aparelhos de apoios de pontes do ministério de Florestas, Terras e Recursos Naturais da Columbia Britânica (Allnorth Consultants Limited, 2011) e o *Eurocode 1337:2005* em suas 11 divisões, para inspeções, especificamente a décima primeira seção – *Part 11*.

Modos de Falha

Os aparelhos de apoio elastoméricos devem ser verificados, principalmente, para efeitos de compressão, rotação, deslizamento e deformações por cisalhamento. Os principais esforços aplicados em pontes e viadutos são ações das cargas móveis, efeitos de fluência e retração.

Quando são aplicados esforços de compressão sobre os aparelhos de apoio, as forças de atrito entre o aparelho de apoio e a estrutura são acionadas, provocando um efeito de confinamento e, conseqüentemente, um estado tripo de tensões, máximo na região central e próximo a zero nas extremidades, quando os esforços atingem os limites das forças de atrito, as camadas de elastômero tendem a escoar pelas laterais em forma abaulada, iniciando as falhas por compressão, efeito conhecido como *bulging* (Maurer, 2023). O comportamento a rotação deve ser observado após a aplicação de carregamentos ou por falhas executivas como a inexistência de paralelismo entre as superfícies de contato com o elastômero, na borda que for comprimida, o elastômero tende a escoar pelas laterais e nas bordas tracionadas podem surgir rasgos ou fissuras no elastômero.

O comportamento ao cisalhamento resulta de ações horizontais (retração, fluência, frenagem etc.), ressaltando-se que a capacidade de deformação por distorção dos elastômeros é alta. As tensões se intensificam quando a rigidez da mesoestrutura é maior do que a rigidez do AAEF. Nessa situação, considera-se que os efeitos de cisalhamento são absorvidos pela soma da altura das camadas de elastômero, e as placas de frenagem não contribuem efetivamente para combate ao cisalhamento (Maurer, 2023).

No Japão e na China observou-se alguns modos de falhas em AAEF de pontes e viadutos após ações sísmicas de grande intensidade, ocorridas em 2008, 2011 e 2016. Foram observados danos significativos, principalmente na direção horizontal, tais como deslizamento (*sliding*), efeitos de rolamento (*rolling-over*), rupturas no corpo do aparelho de apoio, fraturas de dispositivos de conexão (parafusos etc.) e perda de contato entre o aparelho de apoio e a estrutura (Xiang, et al., 2021).

Além disso, pode-se observar que o comportamento de AAEF aderidos e não aderidos a estrutura foram diferentes. Durante o sismo ocorrido em 2018 na cidade de Wenchuan na China, ocorreu danos extensivos a aparelhos de apoio elastoméricos não aderidos, como início de efeitos *rolling-over*, deslizamento do aparelho de apoio e deslocamento da superestrutura – levando um dos vãos ao colapso, observado na Figura 1, (Xiang, et al., 2018).

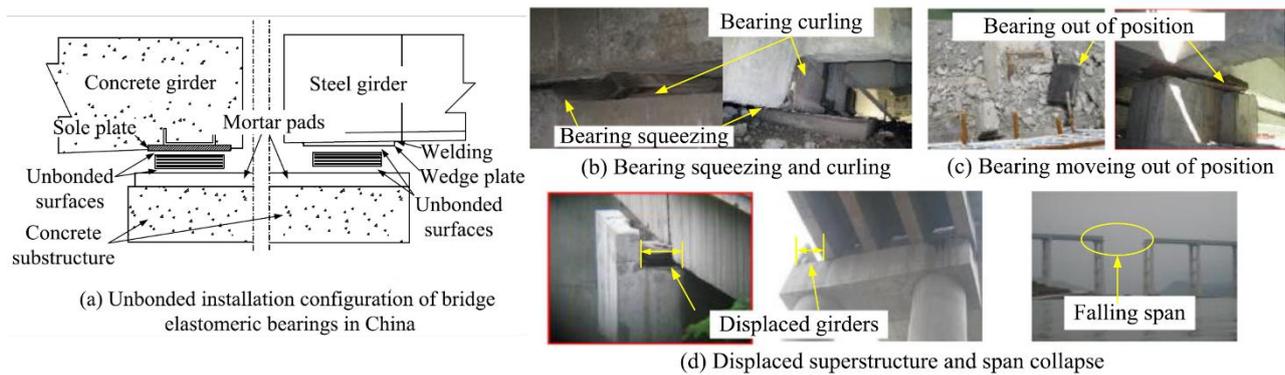


Figura 1: Modos de falha observados em aparelhos de apoio sem aderência a estrutura. Fonte: (Xiang, et al., 2021)

(Xiang, et al., 2021) notaram que o mecanismo de falha imposto a AAEF não aderidos por efeitos de cisalhamento apresenta 3 estágios notáveis, sendo que o estágio inicial apresenta pequenas perdas de contato do elastômero com a estrutura na borda tracionada (*Curling*) e por deformações na borda comprimida (*Squeezing*), este estágio caracteriza o início do efeito de rolamento (*rolling-over*), o próximo estágio é o agravando dos efeitos de rolamento e início de deslizamento (*sliding*), e no último estágio há deslocamento do aparelho de apoio da área de contato com os elementos estruturais, Figura 2.

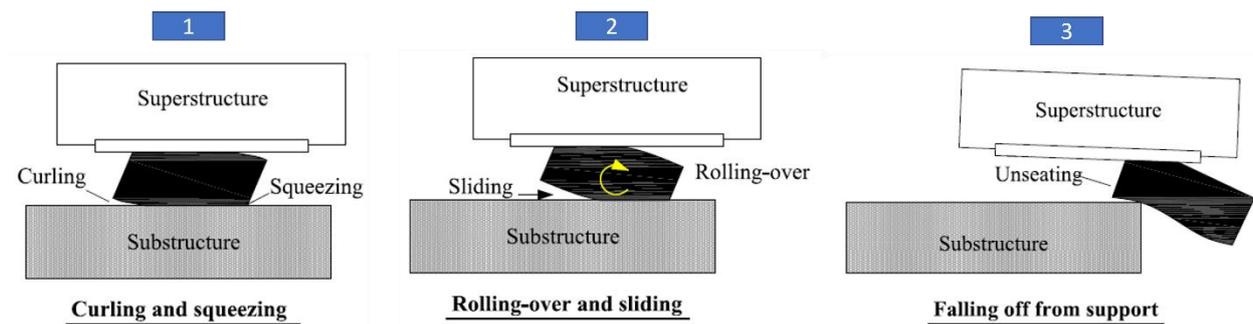


Figura 2: Modos de falha observados em aparelhos de apoio sem aderência a estrutura. Fonte: (Xiang, et al., 2021)

Ao contrário do usual na China, no Japão é comumente utilizada a prática de aderência dos aparelhos de apoio aos elementos estruturais, especificado pelo código normativo japonês (JRA, 2018), seja a fixação por parafusos, solda ou outro dispositivo. Observou-se que os principais modos de falha identificados em estruturas japonesas após o sismo ocorrido em 2011 e em 2016 são ruptura do corpo dos aparelhos de apoio, sejam por delaminações, rasgos da camada de elastômero e falhas dos dispositivos de fixação, observado na Figura 3, (Xiang, et al., 2018). É possível notar que em alguns pontos, as camadas de elastômero se separam totalmente, bem como o aparelho de apoio ficou totalmente deslocado da estrutura.



Figura 3: Modos de falha observados em aparelhos de apoio aderidos a estrutura. Fonte: (Xiang, et al., 2021)

(Xiang, et al., 2021) também observaram o comportamento de aparelhos de apoio fixados aos elementos estruturais, após sismos ocorridos no Japão e observaram dois mecanismos distintos, um deles por falha do corpo do aparelho de apoio (modo “A”) e outro por falha dos dispositivos de conexão (modo “B”), ambos os mecanismos apresentaram 4 estágios bem definidos. Para o mecanismo de falha do corpo do aparelho de apoio, nota-se: estágio inicial com deformação do aparelho de apoio, o estágio seguinte apresenta rasgos ou início de ruptura, após, notou-se a ruptura das camadas de elastômero (separando o aparelho de apoio em duas ou mais partes) associado com início de deslizamento e o último estágio se definiu pelo deslocamento da superestrutura. Já para o mecanismo de falha por ruptura do dispositivo de fixação, pode-se notar os seguintes estágios: deformação do aparelho de apoio, fraturas nos parafusos e início de ruptura, ruptura total dos parafusos associados ao deslizamento do aparelho de apoio e por fim, o deslocamento da superestrutura (Figura 4).

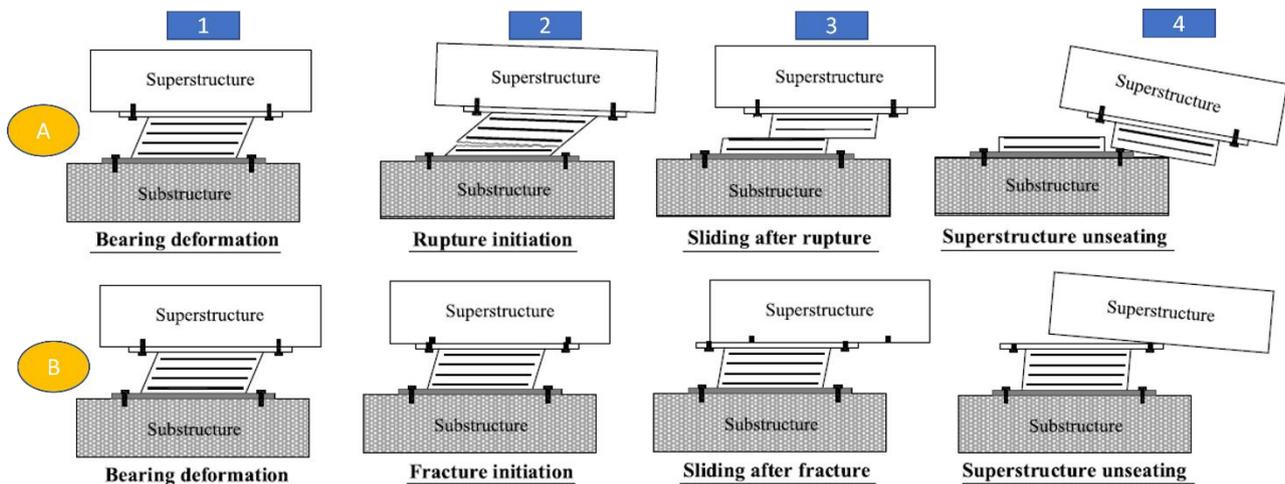


Figura 4: Modos de falha observados em aparelhos de apoio aderidos a estrutura. Fonte: (Xiang, et al., 2021)

No Brasil não há histórico de sismos terem ocasionado danos relevantes a pontes e viadutos, entretanto, em alguns arranjos estruturais, como no caso de balanços sucessivos, cujo apoios são monolíticos a superestrutura, os AAEF instalados nas extremidades dos balanços poderão apresentar modos de falha similares aos apontados na Figura 3 e na Figura 4, em razão de efeitos deletérios no concreto (fluência e retração).

Limites de deformação

Ensaio conduzido pela *Dupont* (E.I. DuPont de Nemours and Company, 1959) apontaram que a deflexão vertical ocorrida pela deformabilidade por compressão em AAEF não deveriam exceder 15% da altura total das camadas de elastômero, pois valores acima podem gerar esforços internos adicionais as camadas de borracha, estes valores foram inseridos no código norte americano para pontes rodoviárias (AASHTO, 1961). Estes valores permanecerem recomendados pela AASHTO por 25 anos e em 1983 uma nova publicação da *Dupont* (E.I. du Pont de Nemours and Company, 1983) recomendou valores de deformação mais conservadores, 10% da altura total das camadas de elastômeros, 5% mais restritivo do que a publicação anterior de 1959. Versões recentes da AASHTO (AASHTO LRFD, 2020) atribui o controle de deformabilidade através de equações e gráficos que relacionam as propriedades dos materiais (dureza e módulo de cisalhamento), fator de forma e níveis de tensão aplicáveis, estas mesmas diretrizes de controle para deformação do controle de deformabilidade por compressão pode ser encontrado em (Muscarella & Yura, 1995), (Roeder & Stanton, 1983) e em (Arditzoglou, et al., 1995). Entende-se que valores seguros para controlar a deflexão vertical em aparelhos de apoio elastoméricos devem estar entre 10 e 15% da altura total as camadas de elastômeros, seguindo valores de controle conforme Figura 5.

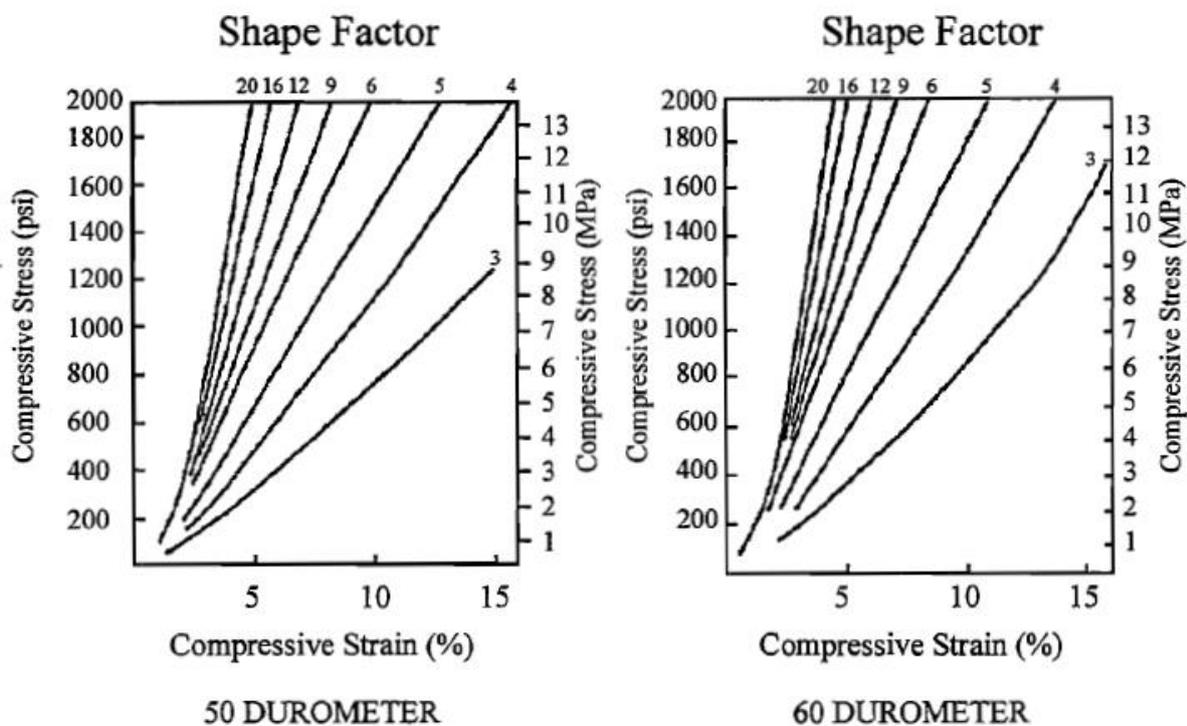


Figura 5: Curvas tensão-deformação para AAEF com dureza *shore* de 50 e 60. Fonte: (Arditzoglou, et al., 1995)

O código norte-americano para obras ferroviárias AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* - orienta que a máxima deformação por compressão não deve exceder 7% da altura total das camadas de elastômero, seguindo diretrizes da norma ASTM D575, além disso, recomenda limitar as tensões de compressão em 8MPa (AREMA, 2010).

Em sua publicação original, de 1959, a *Dupont* recomendou que a distorção por cisalhamento não deveria exceder 50% da altura total das camadas de borracha. Todavia, apontava que não havia dados técnicos para embasar esta recomendação, uma vez que alguns pesquisadores deformaram AAEF em 100% e não observaram danos, contudo, no mesmo documento, é recomendado a prudência de não extrapolar a deformação em 100%, valores de controle entre 50 e 70% são considerados seguros. Porém, a recomendação final é limitar a deformação em 50% da altura total das camadas de elastômero (E.I. DuPont de Nemours and Company, 1959). O valor de 50% de deformação por cisalhamento foi tomado como limite de controle pelos códigos da AASHTO e AREMA para estados

limites de serviço (ELS). (Muscarella & Yura, 1995) realizaram ensaios com ciclos de carregamento representando 55 anos de serviço para AAEF a uma distorção de 50% e constaram danos aos aparelhos de apoio ocasionados por fadiga. O Eurocode 1337-3 orienta para o dimensionamento de AAEF e para projeto limita a deformação por cisalhamento pela razão entre a resultante das forças horizontais ($V_{xy,d}$) pela altura total das camadas de elastômero (T_q), essa razão não deve exceder o valor de 1 para ELS (equação Eq.1).

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{V_{xy,d}}{T_q} \leq 1,00 \quad (Eq. 1)$$

Recomendações baseadas na experiência de inspeção em pontes ferroviárias.

Durante a inspeção de pontes existentes, podem ser identificadas distorções importantes. Para avaliar essas distorções é necessário entender o comportamento estrutural desses dispositivos quando submetidos a impactos (cargas aplicadas de maneira súbita), variações térmicas e efeitos intrínsecos aos materiais estruturais como por exemplo os efeitos de relaxação e fluência.

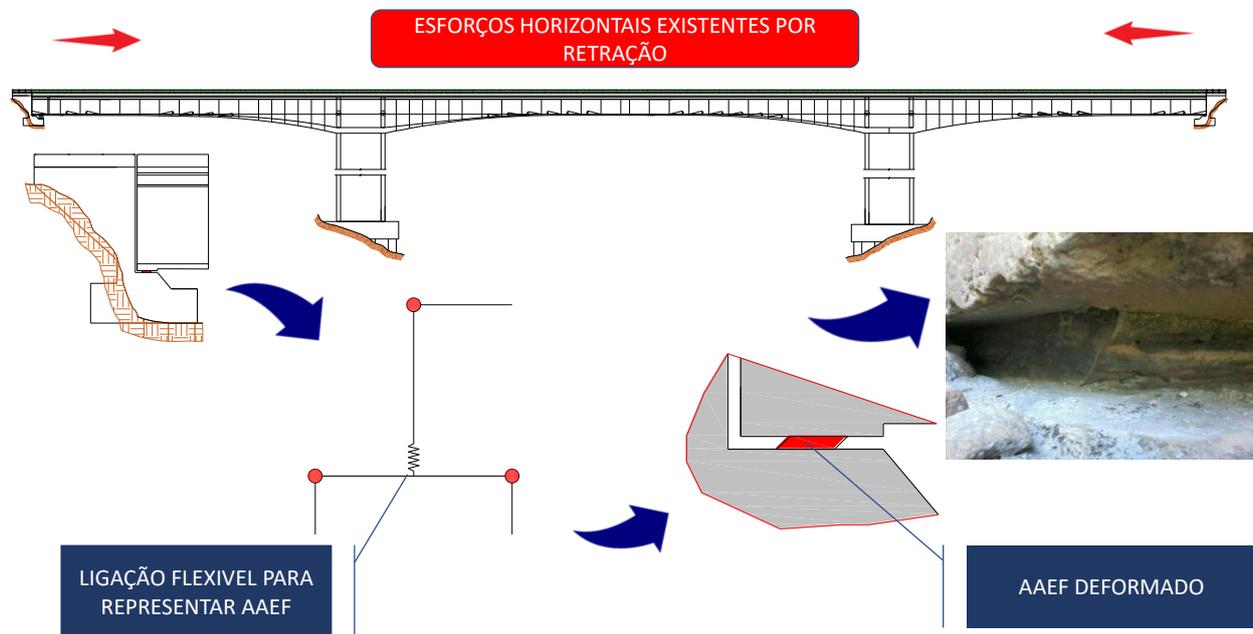


Figura 6: Comportamento de AAEF frente a ações horizontais predominantes de fluência.

O módulo de cisalhamento (G_o) dos elastômeros é normalmente o valor de referência para avaliar o comportamento de AAEF, sendo também obtido em ensaios com arranjos estruturais relativamente simples. Ressalta-se que essa propriedade depende da velocidade de aplicação do carregamento, sendo que até a velocidade de $5t_{gY}/min$ os valores não se alteram de maneira significativa. Para cargas que induzem maiores impactos, ou seja, aplicadas em tempos mais curtos, foram determinados módulos entre $1,5 G_o$ e $2,0 G_o$, sendo G_o o módulo de cisalhamento estático (EGGERT & KAUSCHE, 2002). Isso é particularmente importante na avaliação do comportamento estrutural de pontes ferroviárias onde são utilizados modelos numéricos calibrados com características dinâmicas determinadas em ensaios de monitoração. Efeitos de distorção em AAEF instalados em estruturas ferroviárias ocorrem na entrada da composição e num curto intervalo de tempo, portanto, a consideração do módulo de cisalhamento dinâmico é em geral necessária para a calibração dos modelos numéricos, que em projeto normalmente consideram o módulo de cisalhamento estático (Figura 7).

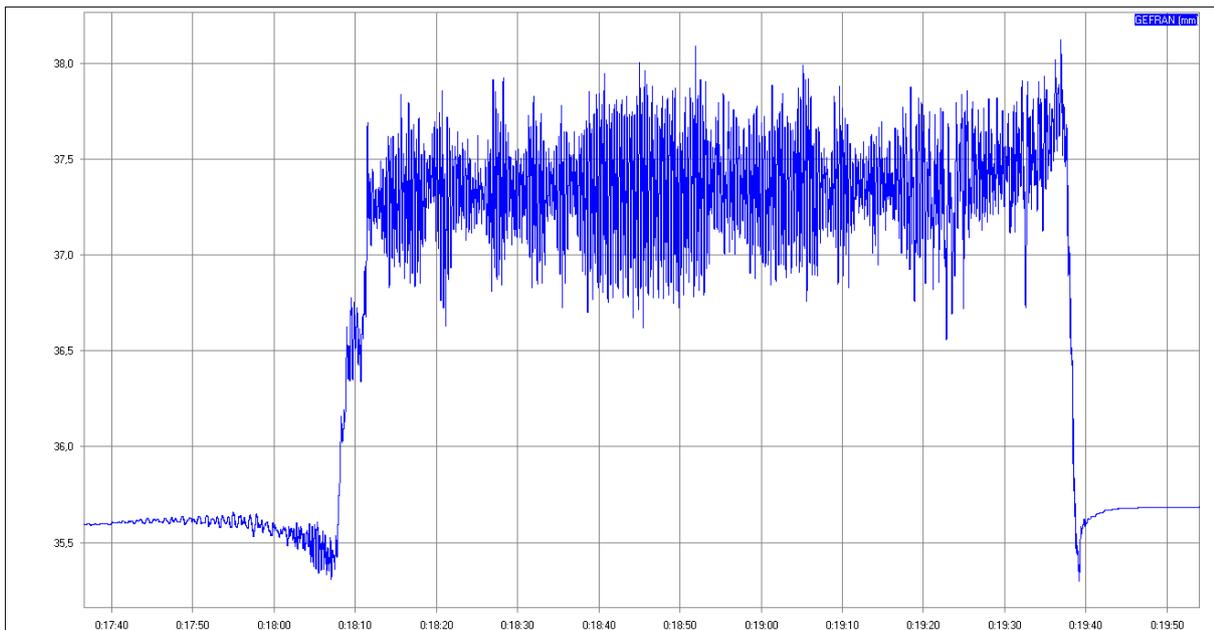


Figura 7: Séries temporais de deslocamentos relativos medidos em AAEF durante passagem de um trem carregado a 59 km/h. Fonte: Autores.

Em relação a temperatura, variações na faixa entre 100°C e 300°C acarretam diferenças entre $0,9G_o$ e $1,1G_o$, sendo que G_o é o módulo de cisalhamento na temperatura de 200°C. É importante ressaltar que em dias mais frios (entre 0 e 100°C) pode ocorrer a “cristalização” do elastômero, tornando esse material mais rígido (EGGERT & KAUSCHE, 2002).

Além da variação das propriedades do elastômero, recomenda-se durante as inspeções uma análise da deformada global da ponte sob efeitos de temperatura. Para a avaliação dos efeitos dessas variações térmicas, recomenda-se também durante as inspeções verificar o valor das distorções em pelo menos dois instantes com temperaturas diferentes, preferencialmente uma medida após o resfriamento noturno, que pode ser entre 5hs e 6hs da manhã e outro a tarde quando a temperatura atingir seu pico, normalmente entre 14hs e 15hs.

Em relação aos efeitos de relaxação e fluência das estruturas, também ocorre fluência no elastômero e que esse efeito deve ser considerado na avaliação das distorções medidas durante a inspeção. Verifica-se que, mantido sob carga constante de $0,8 MPa$, a distorção em AAEF, após 10 anos de carregamento, é da ordem de 25% superior a distorção observada logo após a aplicação do carregamento, podendo chegar a 30% superior após 100 anos (EGGERT & KAUSCHE, 2002).

Observa-se em histórico de inspeções em pontes e viadutos ferroviários danos característicos a AAEF, os danos frequentemente observados são apresentados na Figura 8.

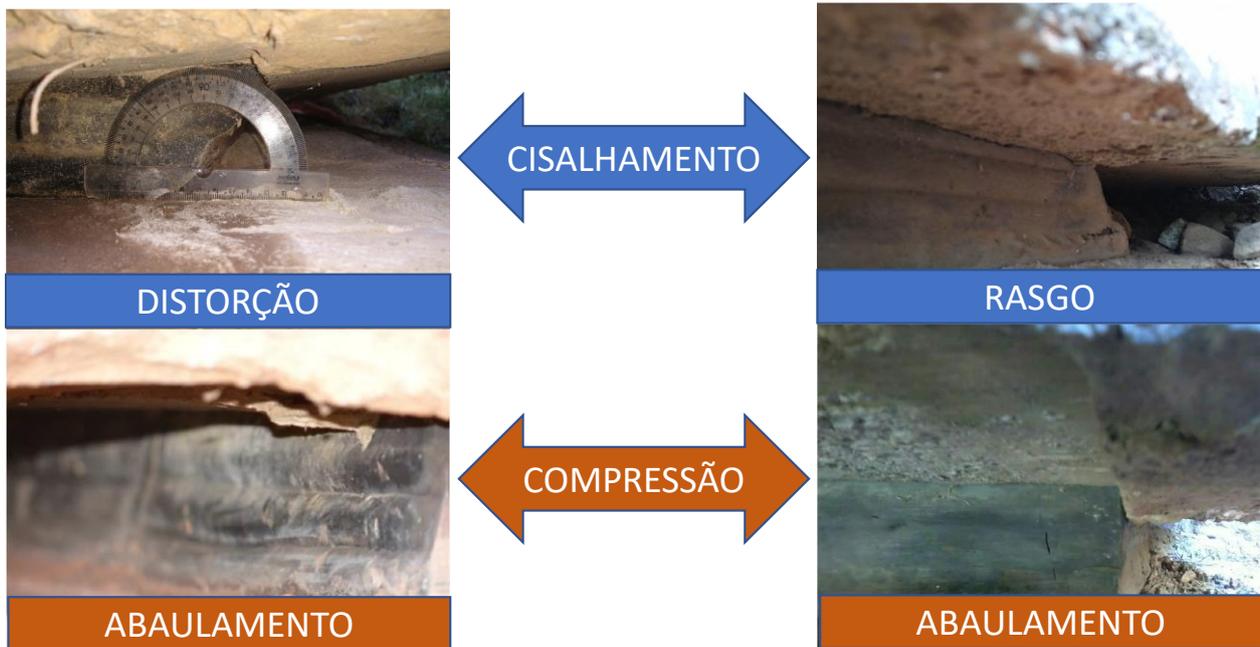


Figura 8: Danos frequentes observados em AAEF relacionados ao seu respectivo modo de falha. Fonte: Autores.

Outros danos frequentes que se pode destacar é a respeito da falta de contato, delaminações e ressecamento da camada de proteção dos AAEF.

Considerações Finais.

Entende-se que os limites de deformação apresentados para os modos de falha por cisalhamento ou compressão são filtros de controle para garantir segurança estrutural a um determinado AAEF. Após revisão da normalização corrente, recomenda-se que limites de 7% da altura total das camadas de elastômero para deformabilidade por compressão e 50% da altura total das camadas de elastômero para deformabilidade por cisalhamento sejam utilizados como valores de referência para inspeções rotineiras ou especiais dentro de um programa de manutenção para pontes e viadutos ferroviários, seguindo as recomendações da AREMA. Além dos valores de deformação que devem ser medidos durante as inspeções, é importante que uma matriz de prioridades inclua parâmetros que levem em consideração o arranjo estrutural e danos nos aparelhos de apoio que indiquem modos de falha nesses dispositivos, como por exemplo : rasgos, relaminações, efeitos de *rolling-over*, além da existência de danos nas regiões de contato do AAEF com elementos estruturais, tais como deslocamentos e fissuras. No que se refere ao controle de qualidade desses dispositivos, os AAEF são submetidos a ensaios para avaliar se o dispositivo está dentro dos critérios mínimos estabelecidos pela NBR 19783: 2015, tais como ensaios de compressão e cisalhamento. Observa-se em termos gerais que a referida norma estabelece que os limites de deformação por cisalhamento podem atingir valores maiores, na ordem de 100% da altura total das camadas de elastômero, desde que não apresentem descolamento entre as chapas de aço e as camadas de borracha, o que caracteriza falha no processo de vulcanização, a amostra é aprovada, todavia esse valores de distorção são utilizados para determinação do módulo de cisalhamento G e não devem ser tomados como valores diretos para aceitação em inspeções (ABNT NBR 19783, 2015), pois, deve-se considerar que as especificações foram direcionadas para dispositivos novos, montados na época da execução da obra, e essas características não estão mantidas em AAEF que se encontram em operação por décadas, onde ocorrem os danos inerentes à fadiga, além da deterioração em razão de estarem expostos às intempéries locais.

Danos existentes, valores de deformação, identificação de modos de falha, tempo em operação, carregamentos e esforços aplicados e efeitos de fadiga são parâmetros de interesse que devem ser considerados em matrizes de prioridades que possam embasar programa de manutenção focados no desempenho e vida útil destes dispositivos. Assim, as atividades de inspeção podem seguir um fluxo para tomadas de decisão conforme sugerido na Figura 9.

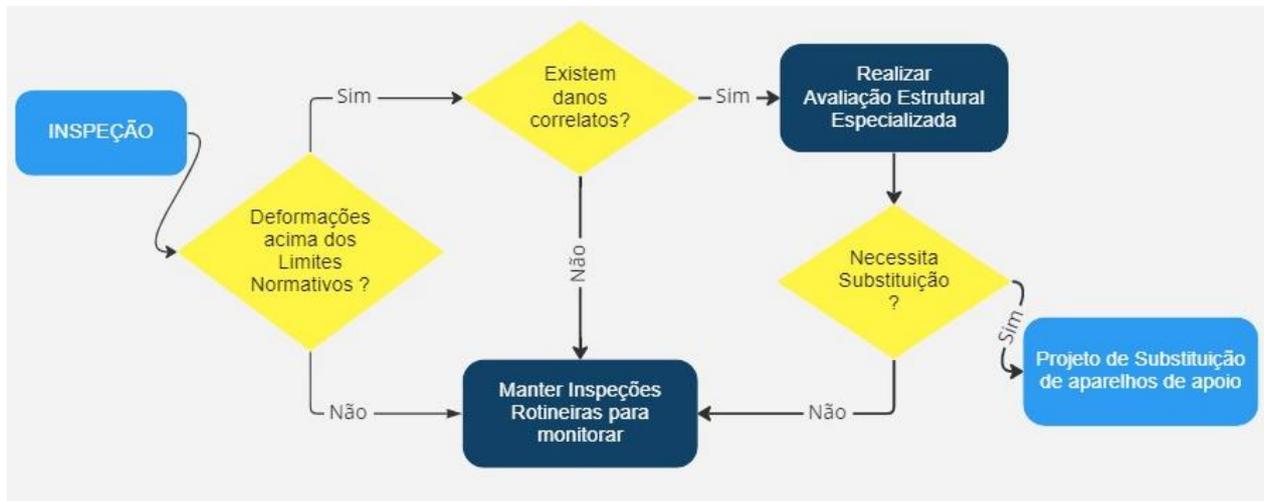


Figura 9: Fluxograma sugerido para programa de manutenção em AAEF. Fonte: Autores

É possível manter o controle de segurança operacional de AAEF utilizando-se de critérios normativos, em etapa de projeto e durante sua vida útil, é importante ressaltar que as decisões para manutenção devem ser baseadas nos parâmetros de interesse apresentados e não deve-se atribuir a decisão de substituição de um dispositivo somente com os valores normativos, mas sim considerando-se informações adicionais como por exemplo o estado de conservação do componente, bem como sua função dentro do arranjo estrutural da ponte, o que possibilitará compreender o comportamento de um AAEF e subsidiar tomadas de decisão para o programa de gestão de integridade estrutural.

Referências

AASHTO LRFD, 2020. *Bridge Design Specifications 9th edition*. American Association of State Highway and Transportation officials -. Washington, D.C: s.n.

AASHTO, 1961. *Standard Specification fo Highway Bridges, 7th Edition*. Washington, DC: s.n.

ABNT NBR 19783, 2015. *Associação Brasileira de Normas Técnicas - Aparelhos de apoio elastômero fretado - Especificação e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: s.n.

Allnorth Consultants Limited, 2011. *PROTOCOL FOR THE INSPECTION OF BRIDGE*, Vancouver: Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations.

Alves, C. J., 2005. *Desenvolvimento de metodologia de ensaios para avaliação comparativa do envelhecimento de borrachas nitrílicas expostas a diversas condições de temperatura e ambiente*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Ardizoglou, Y. J., Yura, J. A. & Haines, A. H., 1995. TEST METHODS FOR ELASTOMERIC BEARINGS ON BRIDGES. *Research Report 1304-2*. TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.

- AREMA, 2006. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, v.1.
- AREMA, 2010. American Railway and Maintenance of Way Association. *Manual for Railway Engineering*.
- BS EN 1337, 2005. *The European Standard. Eurocode Structural Bearings. Part 1 - 11.* s.l.:s.n.
- E.I du Pont de Nemours and Company, 1983. *Engineering Properties of Neoprene Bridge Pont*. Wilmington, Delaware: s.n.
- E.I. DuPont de Nemours and Company, 1959. *Design oof Neoprene Bridge Bearing Pads*. Wilmington: s.n.
- EGGERT, H. & KAUSCHE, W., 2002. *Structural Bearings*. Berlim: Ernst & Sohn A Wiley Company.
- Figueiredo, F. R., 2007. *Isolamento Sísmico de Base - Dimensionamento de Sistemas de Isolamento de Base em Edifícios*. Lisboa: IST - Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação de Mestrado.
- JRA, 2018. *Guidelines of road bridge bearings. Japan Road Association*. Tokyo: s.n.
- Maurer, 2023. *Catálogo Técnico Maurer Neoprex*. Guarulhos: s.n.
- Muscarella, J. V. & Yura, J. A., 1995. *An Experimental Study of Elastomeric Bridge Bearings With Design Recommendations*, Austin, Texas: Bridge Inspection and Maintenance System - Research Report 1304-3.
- Roeder, W. C. & Stanton, F. J., 1983. Design of Laminated Elastomeric Bridge Bearings. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*.
- Xiang, N., Alam, M. S. & Li, J., 2018. Shake table studies of a highway bridge model by allowing the sliding of laminated-rubber bearings with and without restraining devices. *Engineering Structures*, pp. 583-601.
- Xiang, N., Goto, Y., Alam, M. S. & Li, J., 2021. Effect of bonding or unbonding on seismic behavior of bridge elastomeric bearings: lessons learned from past earthquakes in China and Japan and inspirations for future design. *Advances in Bridge Engineering*, p. 17.