



## **Dimensionamento de Aparelho de Apoio para Recuperação Estrutural: Estudo de caso na Ponte do Educandos em Manaus/AM.**

**Gabriel Costa da Silva e Silva<sup>1</sup>, Maria do Socorro Martins Sampaio<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Amazonas / Escola Superior de Tecnologia / gabrielcss22@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Amazonas / Escola Superior de Tecnologia / msampaio@uea.edu.br

### **Resumo**

O aparelho de apoio de elastômero fretado é um elemento estrutural dispostos entre as peças de uma estrutura com a finalidade de transferir as reações da superestrutura à infraestrutura. Sua vinculação é semelhante a uma rótula em que não há transferência de momento fletor, ou seja, considera-se a liberdade absoluta de rotação e há transferência apenas de esforços normais e cortantes. O dimensionamento do aparelho de apoio de elastômero fretado pode ser feito com base em códigos normativos, metodologias propostas por diferentes autores e/ou por seus respectivos fabricantes. Inaugurada em 18 de outubro de 1975, com aproximadamente 342 m de extensão, 8,40 m de largura, 8 vãos e 6 pilares de alturas variáveis, a Ponte do Educandos está localizada sobre o igarapé de mesmo nome e liga o bairro homônimo ao centro da cidade de Manaus/AM. Recentemente, a ponte passou por um processo de recuperação estrutural para a substituição dos aparelhos de apoio desgastados e/ou com medidas originais alteradas. O presente estudo tem por objetivo descrever o procedimento adotado para a substituição dos aparelhos de apoio realizada na Ponte do Educandos e apresentar uma análise entre os modelos de dimensionamento presentes nas normas NBR 9062:2017 e EN 1337-3:2005.

### **Palavras-chave**

Aparelho de apoio fretado; Dimensionamento; Recuperação Estrutural; Pontes; Concreto Armado.

### **1. Introdução**

As pontes e viadutos no Brasil, em sua maioria, são constituídos de concreto armado ou protendido, e a partir dos anos 70, com o crescimento econômico, o país passou por grande desenvolvimento que proporcionou investimentos em obras de infraestrutura rodoviária, como pontes e viadutos. Esse crescimento gerou a necessidade de inovações e estudos na área de recuperação e manutenção dessas estruturas, porém, ao longo dos anos, muitas dessas estruturas não tiveram as manutenções periódicas preventivas realizadas, fazendo com que muitas apresentem hoje um estado bastante deteriorado.

Construída entre os anos de 1973 e 1975, a ponte Antônio Plácido de Souza, também conhecida como Ponte do Educandos, localiza-se sobre o igarapé de Educandos e liga o bairro homônimo ao centro de Manaus/AM. Originalmente, a ponte foi construída para o tráfego de veículos leves e, com o passar dos anos, teve que absorver também a passagem de veículos pesados, ocasionando desgaste excessivo em sua estrutura, além do longo período sem manutenção. A partir de maio de 2018, a ponte foi parcialmente interditada, com a restrição de tráfego para veículos pesados objetivando minimizar os esforços extras ocasionados pelo tráfego desses tipos de veículos e início dos estudos do projeto de manutenção e recuperação da estrutura. Em 25/10/2019 iniciou-se o processo de revitalização da ponte com a troca do pavimento, recuperação do tabuleiro na face superior e inferior, revitalização das vigas de borda e transversinas, impermeabilização dos blocos de fundação, construção de novo guarda-corpo, construção de guarda-rodas e troca dos 64 aparelhos de apoio de elastômero fretado. Para realizar a troca dos aparelhos de apoio, foram confeccionados consoles nos pilares que não os continham, e o procedimento adotado foi descrito por Silva e Sampaio (2023).

No presente estudo, comparam-se os métodos de dimensionamento de aparelho de apoio de elastômero fretado apresentados nas normas NBR 9062:2017 e EN 1337-3:2005 e descreve-se o procedimento adotado para substituí-los durante a revitalização da Ponte do Educandos.

## 2. Revisão da Literatura

Um elemento importante que compõe a estrutura de uma ponte de concreto é o Aparelho de Apoio (AA). Segundo Mendes, Puga e Alves (2010), os AAs são os elementos dispostos entre as peças estruturais com a finalidade de acomodar as condições limites e transferir as reações da superestrutura à infraestrutura, cumprindo os requisitos de projeto relativos às forças, deslocamentos e rotações.

As funções principais dos aparelhos de apoio, de acordo com Cordeiro (2014), são: i) Estabelecer a ligação da superestrutura com a mesoestrutura, acomodando a transferência das forças dinâmicas e vibrações que podem causar a instabilidade da ponte ou mesmo a sua destruição; ii) Permitir os movimentos de translação horizontais e de rotação; iii) Garantir que as deformações, que ocorrem na superestrutura da ponte, não gerem cargas elevadas e movimentos na mesoestrutura; iv) Permitir as rotações da superestrutura, motivadas pelas deflexões provocadas pela carga permanente e pela carga móvel e; v) AAs mais recentes protegem ainda contra ações sísmicas, dissipando a energia. Além disso, o AA deverá ainda acomodar as dilatações e contrações originadas por variações de temperatura e os efeitos originados pela ação do vento. De modo geral, estes efeitos dependem, em grande maioria, dos materiais de construção empregados e cabe ao projetista identificar e quantificar todas estas variáveis, de forma a selecionar o tipo de AA que satisfaça todos os requisitos de projeto.

Embora os AAs sejam apenas uma parte da estrutura, deve-se atentar aos possíveis problemas de sua não utilização, ou mesmo a falta de atenção em seu projeto e execução, pois este é o elemento que está entre a viga e o pilar, e qualquer problema nesta etapa da construção, elevará o custo total da obra. (MACHADO; SARTOTI, 2010).

Os AAs, porém, têm um período de vida útil inferior ao da própria ponte, tornando a sua substituição uma inevitabilidade (CORDEIRO, 2014). Por outro lado, realizando periodicamente inspeções e manutenções, é possível assegurar a durabilidade e a segurança da estrutura prolongando a sua vida útil.

Cordeiro (2014) afirma que se essas inspeções e/ou manutenções não forem realizadas dentro das datas previstas, as estruturas podem atingir um elevado patamar de degradação, além de não atenderem aos níveis mínimos aceitáveis de segurança. Esta situação é desfavorável, uma vez que a reparação não é possível e é necessário recorrer à sua substituição, resultando num elevado aumento do custo. Ainda segundo o autor, quando é necessário proceder à substituição destes AAs deve ser elaborado um plano de substituição pelo projetista da obra. Nele devem constar dados importantes, como por exemplo os locais para a colocação dos equipamentos de elevação (cilindros hidráulicos), as forças a aplicar, restrições de tráfego e os deslocamentos necessários. No que diz respeito à colocação dos cilindros hidráulicos, o local de posicionamento é muito importante pois, em caso de estruturas hiperestáticas, as forças de levantamento são superiores às reações existentes.

Vitório (2015) afirma que, constatando-se durante uma inspeção que os AAs não estão mais funcionando adequadamente, deverá ser providenciada a substituição dos aparelhos antigos por novos aparelhos, de modo que passem a transmitir os esforços conforme os estipulados no projeto da ponte. A substituição geralmente é feita por meio de uma operação denominada macaqueamento.

Gonçalves (2019) afirma que para o procedimento de elevação da superestrutura, o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER, 2010) instrui que a escolha dos equipamentos a serem utilizados a fim de macaquear a estrutura, deve ser criteriosa, levando em conta o projeto estrutural da Obra de Arte Especial (OAE). Ao definir os pontos de contato entre o cilindro e a estrutura da OAE, existem algumas possibilidades. Algumas OAEs de construção mais recentes preveem pontos de içamento, onde há reforço das armaduras para suportar as cargas de levantamento de um elevado. Segundo o autor, normalmente, esse ponto é sobre a travessa e comumente localizado na transversina, pois garante uniformidade no içamento de todo o estrado, minimizando as possibilidades de torção da peça. Em alguns casos, o projeto prevê a construção de consoles próximos às longarinas para que seja utilizado em algum tipo de manutenção que a OAE pode vir a sofrer.

Devido à grande variedade de aparelhos de apoio existentes no mercado atualmente, houve a necessidade de agrupá-los de acordo com as suas propriedades (CORDEIRO, 2024). É possível organizá-los em função do tipo de material constituinte ou em função dos movimentos permitidos conforme apresentado por Mendes, Puga e Alves (2010).

Os aparelhos de apoio elastoméricos podem ser simples, quando constituídos de uma única camada de elastômero, ou fretados, quando constituídos de camada de elastômero intercaladas com chapas metálicas solidarizadas por vulcanização ou colagem especial (ABNT NBR 9062:2017). No presente estudo, o interesse está nos aparelhos de apoio de elastômero fretados, que devem satisfazer as especificações da NBR 19783 (ABNT, 2015) quanto a todas as suas características de utilização e propriedades mecânicas.

Segundo Mendes, Puga e Alves (2010), os aparelhos de apoio de elastômero são os tipos mais simples. Na modalidade básica consistem meramente em um bloco de elastômero retangular ou circular. De acordo com os autores, este tipo de aparelho de apoio, devido à sua componente elástica, permite movimentos e rotações em todas as direções. Sob cargas verticais, o bloco elástico se flexiona conduzindo aos deslocamentos verticais. Uma solução para esse problema foi encontrada introduzindo no bloco elástico, placas de aço horizontais, vulcanizadas ao elastômero, conhecido como aparelho de apoio de elastômero fretado.

Conforme é descrito por Leonhardt (1979), a placa de elastômero não fretada cede elasticamente devido à deformação por cisalhamento ou à deformação transversal, ou seja, ela se comprime. Para pontes, isto só é admissível em casos restritos. Por isso impede-se a deformação por meio de chapas de aço vulcanizadas e pela limitação da espessura das camadas em 5 a 8 mm. As chapas de aço praticamente não alteram a mobilidade horizontal e a capacidade de rotação. Entretanto, enrijecem muito o aparelho de apoio na direção vertical, tornando-o quase incompressível. A Figura 1 mostra o comportamento de um elastômero fretado quando solicitado por esforço vertical, horizontal e momento, com parâmetros referentes à norma EN 1337-3:2005.

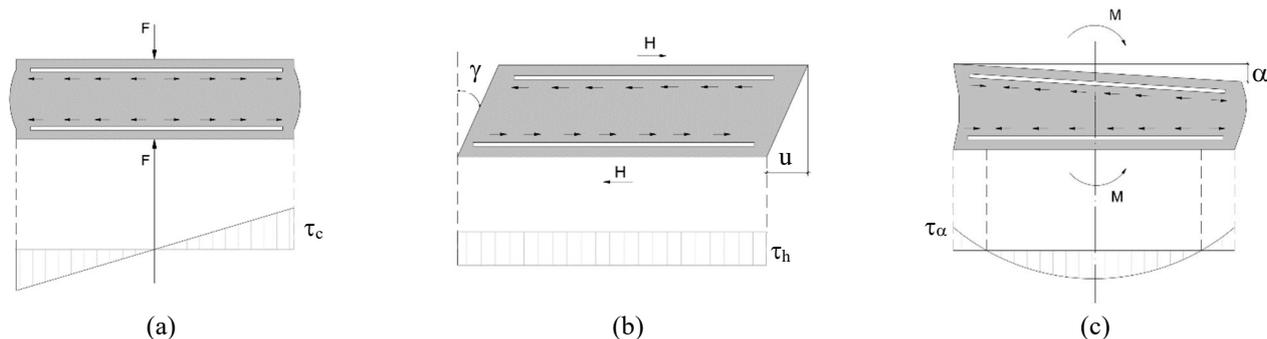


Figura 1 - Comportamento do aparelho de apoio: a) à compressão; b) ao cisalhamento; c) à rotação.

### 3. Modelos de Dimensionamento para Aparelhos de Apoio de Elastômero Fretados

Devido à grande reserva em relação à ruptura, aparelhos de apoio de elastômero fretado são calculados no estado-limite de utilização.

#### 3.1. Modelo de dimensionamento pela ABNT NBR 9062:2017

As verificações que compõem o dimensionamento dos apoios de elastômeros são: 1) Verificações de limites de tensão (compressão e cisalhamento); 2) Verificações de limites de deformação (deformação de compressão – afundamento e deformação por cisalhamento); 3) Verificações de descolamentos (segurança contra o deslizamento e segurança contra o levantamento da borda menos comprimida); 4) Outras verificações (condição de estabilidade e espessura da chapa de aço).

As camadas de elastômero fretados não podem possuir espessura superior a 25 mm nem inferior a 5 mm (ABNT NBR 9062:2017). As chapas de aço que constituem a fretagem podem estar em contato com a placa de elastômero em toda a sua superfície e ter espessura mínima de 2 mm. As chapas metálicas devem ser de aço inoxidável; quando a utilização dos apoios se der em ambiente protegido e não agressivo, recomenda-se a utilização de chapas de aço-carbono, desde que as faces laterais das chapas estejam revestidas com elastômero, com cobrimento mínimo de 4 mm e tolerância de 0 a + 2 mm, as demais com cobrimento mínimo de 2,5 mm e tolerância de 0 a + 1 mm (Figura 2).

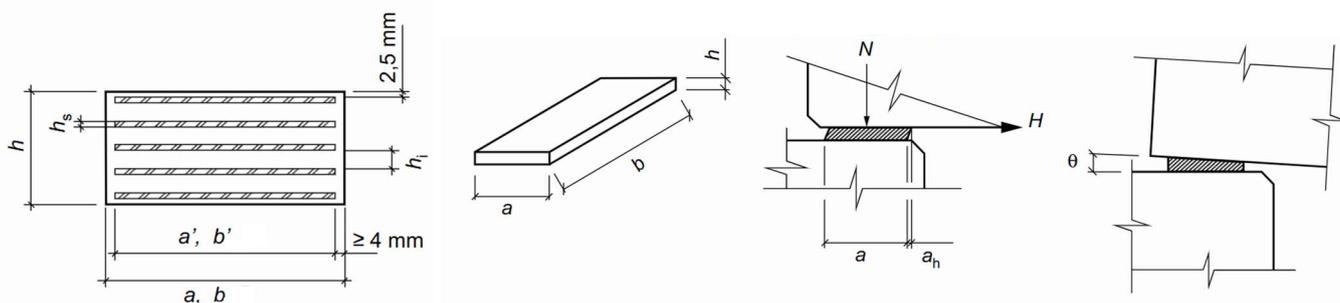


Figura 2 - Parâmetros referentes ao aparelho de apoio. Fonte: ABNT NBR 9062:2017.

### 3.1.1. Limite da tensão de compressão - item 7.2.1.6.19

Os limites recomendados para as tensões de contato nos aparelhos de apoio fretados são dados na Eq. (1).

$$\sigma_k = \frac{N_k}{(a-2c) \cdot (b-2c)}; \text{ para } \begin{cases} a \leq 15; & \sigma_k = 8,0 \text{ MPa}, \\ 15 < a \leq 20; & \sigma_k = 11,0 \text{ MPa}, \\ 20 < a \leq 30; & \sigma_k = 12,5 \text{ MPa}, \\ a > 30; & \sigma_k = 15,0 \text{ MPa}, \end{cases} \quad (1)$$

onde  $a$  é a menor dimensão em planta do aparelho de apoio, expressa em centímetros (cm). Para AAs fretados,  $a' = a - 2c_h$ ,  $b' = b - 2c_h$  (Figura 2).

### 3.1.2. Limite da tensão de cisalhamento - item 7.2.1.6.25

A tensão de cisalhamento no elastômero deve ser limitada ao indicado na Eq. (2), verificando-se também a condição de atuação somente da carga permanente, com todos os esforços sendo os característicos.

$$\tau = \tau_n + \tau_h + \tau_\theta \leq 5G, \quad (2)$$

$$\text{Ações totais: } \tau_n = \frac{1,5}{S_i} \cdot \frac{N_g + 1,5 \cdot N_q}{a \cdot b}; \quad \tau_h = \frac{G \cdot a_h}{\sum h_i} = \frac{H_g + 0,5 \cdot H_q}{a \cdot b}; \quad \tau_\theta = \frac{G \cdot a^2}{2 \cdot h_i \cdot \sum h_i} \cdot (tg\theta_g + 1,5 \cdot tg\theta_q), \quad (3)$$

$$\text{Ações de longa duração: } \tau_n = \frac{1,5N_g}{S \cdot A}; \quad \tau_h = \frac{Ga_{h,g}}{h} = \frac{H_g}{A}; \quad \tau_\theta = \frac{Ga^2}{2h^2} tg\theta_g, \quad (4)$$

onde  $S_i$  é o fator de forma definido como  $S_i = \frac{a'b'}{2h_i(a'+b')}$  e  $h_i$  é a espessura de cada camada de elastômero.

### 3.1.3. Verificação da deformação de compressão (afundamento) - item 7.2.1.6.20

A deformação por compressão em serviço deve ser limitada a 15%, recomendando-se utilizar nessa verificação valores experimentais em função da dureza e do fator de forma ( $S$  ou  $S_i$ ), conforme item 7.2.1.6.24.

$$\Delta h \leq 0,15h \text{ com } \Delta h = \sum \Delta h_i = \sum \frac{(\sigma_g + \sigma_q)h_i}{k_1GS_i + k_2(\sigma_g + \sigma_q)}. \quad (5)$$

Na Eq. (5),  $\sigma_g = \frac{N_g}{A}$ ,  $\sigma_q = \frac{N_q}{A}$ ,  $k_1 = 4$  e  $k_2 = 3$ .

### 3.1.4. Verificação da deformação por cisalhamento - item 7.2.1.6.21

A verificação da deformação por cisalhamento consiste em limitar o ângulo de distorção do aparelho de apoio, que corresponde a limitar os deslocamentos horizontais ao indicado na Eq. (6).

$$a_{h,g} + a_{h,q} \leq 0,5h; \text{ com } a_{h,g} = \sum \frac{H_g}{G(a'b')} h_i \quad e \quad a_{h,q} = \sum \frac{H_q}{2G(a'b')} h_i. \quad (6)$$

A deformação por cisalhamento pode ser limitada ao valor da metade da altura total do elastômero. No cálculo da deformação resultante das cargas permanentes, pode-se adotar o valor do módulo de deformação transversal igual à metade daquele utilizado para as cargas acidentais de pequena duração.

### 3.1.5. Verificação da segurança contra o deslizamento - item 7.2.1.6.22

O deslizamento do aparelho de apoio pode ser impedido fixando-se os limites dados nas Eqs. (7)-(9), expressos em MPa.

$$H_k \leq \mu \cdot N_k, \quad \text{sendo } \mu = 0,1 + \frac{0,6}{\sigma_k}. \quad (7)$$

Na Eq. (7), adotam-se valores positivos para tensões de compressão. Recomenda-se que sejam verificados isoladamente os efeitos da carga permanente,  $N_g$ , e da carga total,  $N_g + N_q$ , adotando-se o maior valor para  $\sigma$ .

$$H_k = H_g \quad e \quad \sigma_k = \frac{N_g}{(a \cdot b)}; \quad H_k = H_g + H_q \quad e \quad \sigma_k = \frac{N_g + N_q}{(a \cdot b)}. \quad (8)$$

Para a tensão mínima em aparelhos de apoio elastoméricos fretados adota-se a Eq. (9).

$$(N_{\min,k}/A') > 2 \text{ MPa}, \quad \text{com} \quad A' = (a - a_h) \cdot b. \quad (\text{Ver Figura 2}). \quad (9)$$

### 3.1.6. Verificação da condição de não levantamento da borda menos comprimida - item 7.2.1.6.24

A condição de não levantamento da borda menos carregada do aparelho de apoio fretado deve ser verificada pelo atendimento da condição mais desfavorável, Eqs. (10)-(11), considerando as tangentes das rotações  $\theta_g$ , imposta pelas cargas permanentes, e  $\theta_q$ , imposta pelas cargas acidentais (todos os esforços característicos).

$$\text{Condição a:} \quad \text{tg}\theta_g < \frac{6 \cdot \sum h_{1i}}{a'} \quad \text{com} \quad h_{1i} = \frac{h_i \cdot \sigma_g}{4 \cdot G \cdot S_i^2 + 3 \cdot \sigma_g} \quad e \quad \sigma_g = \frac{N_g}{(a' - a'_h) \cdot b'}. \quad (10)$$

$$\text{Condição b:} \quad \text{tg}\theta_g + 1,5 \cdot \text{tg}\theta_q < \frac{6 \cdot \sum h_{2i}}{a'} \quad \text{com} \quad h_{2i} = \frac{h_i \cdot \sigma_{g+q}}{4 \cdot G \cdot S_i^2 + 3 \cdot \sigma_{g+q}} \quad e \quad \sigma_{g+q} = \frac{N_g + N_q}{(a' - a'_h) \cdot b'}. \quad (11)$$

### 3.1.7. Verificação da estabilidade do aparelho de apoio - item 7.2.1.6.26

Pode ser dispensada a verificação da estabilidade do aparelho de apoio, desde que satisfeita a Eq. (12).

$$\sum h_i < (a/5). \quad (12)$$

### 3.1.8. Verificação da espessura da chapa de aço

A NBR 9062:2017 não apresenta uma expressão para a verificação da espessura da chapa de aço do AA fretado, sendo necessário recorrer a outros códigos normativos, como por exemplo o PCI (2014) para fazer esta verificação. A Eq. (13) mostra a expressão do PCI (2014) para a verificação da espessura da chapa.

$$h_s \geq \frac{3 \cdot h_{i,\max} \cdot \sigma}{f_{yk}}. \quad (13)$$

## 3.2. Modelo de dimensionamento pela Norma EN 1337-3:2005

### 3.2.1. Limitação da tensão de compressão sob ação da carga máxima

Os limites recomendados para as tensões de contato nos aparelhos de apoio fretados pela EN 1337-3:2005 são os mesmos da NBR 9062:2017, dados na Eq. (1).

### 3.2.2. Limitação da deformação por cisalhamento no elastômero

A norma EN 1337-3:2005 define o valor 5 como o limite das deformações de cisalhamento no elastômero.

$$\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_h + \varepsilon_a = 5, \quad (14)$$

$$\varepsilon_c = 1,5 \cdot \frac{F_g + k \cdot F_q}{G \cdot A_r \cdot S}; \quad \varepsilon_h = \text{tg}\gamma = \frac{(u_g + u_q)}{T}; \quad \varepsilon_a = \frac{a^2 (a_{ag} + k \cdot a_{aq}) + b^2 (a_{bg} + k \cdot a_{bq})}{2 \cdot t_i \sum t_i}, \quad (15)$$

$$\tau_c = 1,5 \cdot \frac{F_g + k \cdot F_q}{A_r \cdot S}; \quad \tau_h = \frac{H}{A} = G \cdot \text{tg}\gamma = \frac{G \cdot u}{T}; \quad \tau_a = \frac{Ga^2 (\alpha_{ag} + k \cdot \alpha_{aq}) + Gb^2 (\alpha_{bg} + k \cdot \alpha_{bq})}{2 \cdot t_i \sum t_i}, \quad (16)$$

sendo a área reduzida definida como  $A_r = A \left( 1 - \frac{u_a}{a} - \frac{u_b}{b} \right)$ , S é o fator de forma e T é a altura total do elastômero identificada como  $H_{tot,elast}$  na Tabela 2.

### 3.2.3. Limitação do deslocamento horizontal

Os deslocamentos devido as cargas permanentes e acidentais podem ser calculados pelas expressões da Eq. (17). Na ausência de ensaios, permite-se considerar que o deslocamento para uma carga de curta duração é metade do valor do deslocamento para a mesma carga aplicada lentamente.

$$u_g = \frac{H_g \cdot T}{G \cdot A} \quad e \quad u_q = \frac{H_q \cdot T}{2 \cdot G \cdot A}. \quad (17)$$

Os limites do deslocamento horizontal para ações permanentes e totais são dados na Eq. (18).

$$tg\gamma_g \leq 0,5 \quad e \quad tg\gamma_{g+q} \leq 0,7. \quad (18)$$

### 3.2.4. Verificação da estabilidade à rotação

A estabilidade à rotação estará garantida quando a Eq. (19) for satisfeita.

$$\sum v \geq \frac{a' \cdot \alpha_a + b' \cdot \alpha_b}{3} \quad sendo \quad \sum v = \sum \frac{(F_g + F_q) \cdot t_i}{A_r} \left( \frac{1}{5 \cdot G \cdot S_i^2} + \frac{1}{E_b} \right) \quad com \quad E_b = 2000 \text{ MPa}. \quad (19)$$

### 3.2.5. Verificação da estabilidade ao deslizamento

A estabilidade ao deslizamento estará garantida quando a Eq. (20) for satisfeita, devendo ser verificada para ações totais e apenas com solicitações permanentes.

$$H \leq \mu_e \cdot F; \quad \mu_e = 0,1 + \frac{6}{\sigma_m}; \quad \sigma_m \geq 30 \text{ kgf/cm}^2, \quad (20)$$

sendo  $T \geq \frac{G \cdot A' (u_g + 2 \cdot u_q)}{6 \cdot A_r + 0,1 \cdot F}$  a altura mínima de elastômero que evita o deslizamento.

### 3.2.6. Verificação da estabilidade à flambagem

A estabilidade à flambagem estará garantida quando a Eq. (21) for satisfeita.

$$\frac{(F_g + F_q)}{A_r} < \frac{2 \cdot a' \cdot G \cdot S}{3 \cdot T_t}, \quad com \quad T_t = \sum t_i + 2,8 \cdot C_v. \quad (21)$$

### 3.2.7. Dimensionamento das chapas de aço

As tensões de cisalhamento no contato elastômero-chapa de aço, devidas principalmente às tensões de compressão no AA, induzem tensões de tração na chapa de aço, que tendem a ser máximas na região central do aparelho. Para resistir a essas tensões de tração, a espessura da chapa deve satisfazer a Eq. (22).

$$t_s = 1,3 \cdot \frac{(2 \cdot t_i)}{f_{yk}} \cdot \frac{(F_g + F_q)}{A_r} \geq t_{smin} = 3 \text{ mm}. \quad (22)$$

## 4. Metodologia

Para aplicar os métodos de dimensionamento de aparelhos de apoio previstos nas normas NBR 9062:2017 e EN 1337-3:2005 foram determinadas as cargas verticais e horizontais atuantes na estrutura, bem como as rotações nos aparelhos de apoio considerando as cargas permanentes e acidentais. Com o carregamento total, fez-se o pré-dimensionamento do aparelho de apoio e a partir deste, adotou-se as dimensões do aparelho de apoio a ser verificado pelas normas escolhidas.

#### 4.1. Estudo de Caso: Descrição da Estrutura da Ponte do Educandos

A superestrutura da ponte é composta por 8 vãos com lajes do estrado protendidas transversalmente, 4 vigas longarinas protendidas por vão e 5 vigas transversinas de concreto armado por vão. A mesoestrutura é composta por 6 pilares de concreto armado com alturas variáveis, 2 encontros em concreto armado e fundações compostas por bloco sobre estacas. A ponte conta com 8 juntas de dilatação e 64 aparelhos de apoio localizados entre os pilares e as longarinas.

Os comprimentos dos tramos no sentido de Educandos para o centro são, respectivamente: 15,68 m, 35,53 m, 37,26 m, 37,49 m, 37,49 m, 36,74 m, 36,14 m, 36,05 m, 36,97 m, 12,18 m, totalizando 321,53 m (Figura 3).

As dimensões nas seções dos vãos são: largura total de 11,40 m, largura da faixa de veículos de 7,60 m, largura da faixa de pedestres de 1,50 m (Figura 4a). A espessura do pavimento é  $e_{pav} = 0,07$  m.

As propriedades físicas dos materiais e outras propriedades geométricas são apresentadas na Tabela 1.

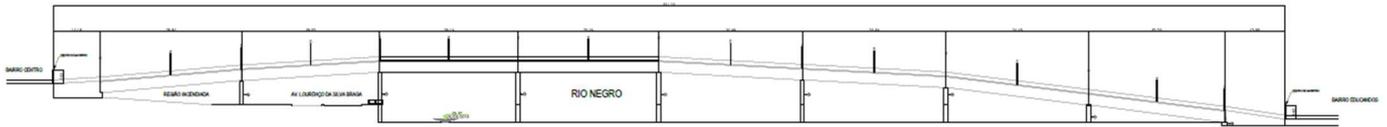


Figura 3 – Vista da Ponte do Educandos. Fonte: Prefeitura Municipal de Manaus, 2019.

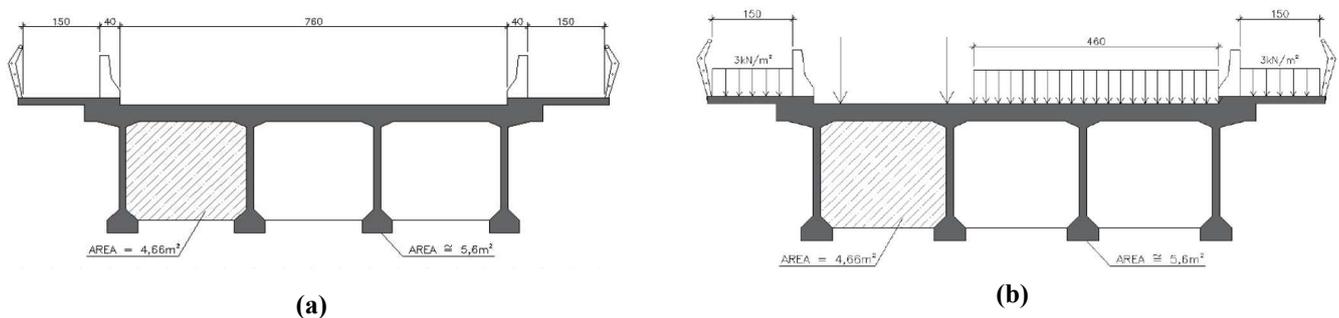


Figura 4 – a) Seção transversal típica da ponte; b) Posicionamento da carga distribuída + TB450.

Tabela 1. Propriedades físicas e geométricas do problema.

$\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{pav}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\alpha_c$ (°C <sup>-1</sup> )	$f_{ck}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$e_{pav}$ (m)
25	24	$1 \times 10^{-5}$	25	28	0,07
$A_{seção}$ (m <sup>2</sup> )	$h_{centroide}$ (m)	$I_x$ (m <sup>4</sup> )	$I_y$ (m <sup>4</sup> )	$i_x$ (m)	$i_y$ (m)
5,616	1,884	4,4489	49,6703	0,89	2,974

#### 4.3. Determinação das Solicitações Verticais e Horizontais

Para determinar a carga vertical aplicada no AA, determinou-se o peso próprio da estrutura para o vão de 37,5 m e o peso próprio da transversina. Considerando que a reação resultante será dividida entre as 4 longarinas, chega-se a força aplicada em cada AA de, aproximadamente  $F_g = 699$  kN e ao ângulo de rotação do AA de  $\alpha_g = 3,062 \times 10^{-3}$  rad.

A carga móvel rodoviária padrão TB-450 é definida para um veículo tipo de 450 kN, com seis rodas, com  $P = 75$  kN, circundada por uma carga uniformemente distribuída constante de  $q = 5$  kN/m<sup>2</sup> (ABNT NBR 7188:2024). No passeio de pedestres, a carga uniformemente distribuída de  $q = 3$  kN/m<sup>2</sup> na posição mais desfavorável foi considerada concomitantemente à carga móvel rodoviária (Figura 4b). Para essas condições, chega-se à reação máxima devido à carga acidental de  $F_q = 303,1$  kN e ao ângulo de rotação do AA de  $\alpha_q = 1,121 \times 10^{-3}$  rad.

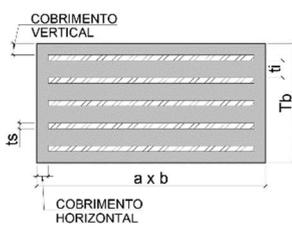
As rotações máximas admissíveis devido às cargas permanentes e acidentais são dadas, respectivamente, por  $\alpha_{g,máx} = 2,949$  rad e  $\alpha_{q,máx} = 0,118$  rad.

Para determinar as forças horizontais considerou-se os efeitos devido à variação de temperatura para  $\Delta t = 35^\circ C$  e os efeitos de frenagem ou aceleração (ABNT NBR 7188:2024). Para os efeitos de temperatura, chegou-se a  $\Delta l = 1,31$  cm. Para os efeitos de frenagem ou aceleração, chegou-se a  $F_{h,dist} = 35,625$  kN considerando 5% do carregamento distribuído e a  $F_{h,dist} = 67,5$  kN considerando 30% do peso do veículo tipo.

Desta forma, tem-se que  $F_{máx} = F_g + F_q = 1002,1$  kN. Para esta carga, chega-se a uma área de  $A = 801,6$  cm<sup>2</sup>

e à dimensão mínima do AA de  $a=0,283\text{ m}$  e a  $\sigma_{adm}=12,5\text{ MPa}$ . Com base nas cargas obtidas e no pré-dimensionamento, os dados do AA que foi verificado pelas normas NBR 9062:2017 e EN 1337-3:2005 são dados na Tabela 2.

**Tabela 2. Propriedades geométricas do aparelho de apoio – parâmetros referentes a EN 1337-3:2005.**

	a (mm)	b (mm)	t <sub>i</sub> (mm)	t <sub>s</sub> (mm)	T <sub>b</sub> (mm)	C <sub>h</sub> (mm)	C <sub>v</sub> (mm)
	N <sub>chapa</sub>	N <sub>camada</sub>	H <sub>t,elast</sub> (mm)	H <sub>t,chapa</sub> (mm)	k	G (MPa)	f <sub>yk</sub> (MPa)
	350	300	8	3	41	4	2,5
	4	3	29	12	1,5	1	210

## 5. Dimensionamento do Aparelho de Apoio e Análise dos Resultados

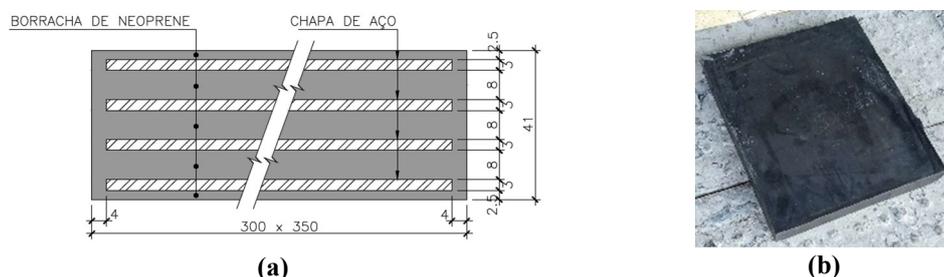
### 5.1. Resultados do dimensionamento pela ABNT NBR 9062:2017

1) Limite da tensão de compressão:  $\sigma_c = 10,03\text{ MPa} \leq \sigma_{adm} = 12,5\text{ MPa}$ . 2) Limite da tensão de cisalhamento:  $\tau_n + \tau_h + \tau_\theta = 3,195\text{ MPa} \leq 5\text{ MPa}$ . 3) Verificação da deformação de compressão:  $\sum \Delta h_i = 4,188\text{ mm} < 4,35\text{ mm}$ . 4) Verificação da deformação por cisalhamento:  $a_{h,g} + a_{h,q} = 9,84\text{ mm} \leq 14,5\text{ mm}$ . 5) Verificação da segurança contra o deslizamento:  $(N_{\min,k}/A') = 10,26\text{ MPa} > 2\text{ MPa}$ . 6) Verificação da condição de não levantamento da borda menos comprimida:  $\text{tg}\theta_g < \frac{6 \cdot \sum h_i}{a'} \rightarrow 0,00306 < 0,00890$  e  $\text{tg}\theta_g + 1,5 \cdot \text{tg}\theta_q < \frac{6 \cdot \sum h_{2i}}{a'} \rightarrow 0,00474 < 0,01248$ . 7) Verificação da estabilidade do AA:  $h = 41\text{ mm} < 58,4\text{ mm}$ . 8) Verificação da espessura da chapa de aço:  $h_s = 3\text{ mm} \geq 1,146\text{ mm}$ . Portanto, o aparelho está verificado segundo critérios da NBR 9062:2017.

### 5.2. Resultados do dimensionamento pela Norma EN 1337-3:2005

O deslocamento longitudinal em função de  $\Delta t$  é  $u_g = \Delta l / 2 = 6,56\text{ mm}$ . A força horizontal é dada por  $H_q = 67,5\text{ kN}$ . O deslocamento accidental é  $u_q = 9,321\text{ mm}$ . O deslocamento total é  $u_{\text{long}} = u_g + u_q = 15,884\text{ mm}$ . A área reduzida é  $A_r = 952,2359\text{ cm}^2$ . 1) Limitação da tensão de compressão sob ação da carga máxima: A tensão de compressão é  $\sigma_c = 10,231\text{ MPa} \leq \sigma_{adm} = 12,5\text{ MPa}$ . 2) Limitação da deformação por cisalhamento no elastômero: Das Eqs. (15) chega-se que as deformações são dadas, respectivamente, por  $\varepsilon_c = 1,8$ ,  $\varepsilon_h = 0,548$  e  $\varepsilon_\alpha = 1,513$ . Logo,  $\varepsilon_c + \varepsilon_h + \varepsilon_\alpha = 3,861 \leq 5$ , verificando a condição dada na Eq. (14). 3) Limitação do deslocamento horizontal: para cargas permanentes:  $\text{tg}\gamma_g = u_g / H_{\text{tot,elast}} = 0,2263 \leq 0,5$ ; para cargas totais:  $\text{tg}\gamma_{g+q} = u_{g+q} / H_{\text{tot,elast}} = 0,5477 \leq 0,7$ . 4) Verificação da estabilidade à rotação:  $\sum v = 1,288\text{ m} > 0,648\text{ m}$ . 5) Verificação da estabilidade ao deslizamento: altura mínima do elastômero sob cargas totais:  $T = 2,641\text{ cm} \leq H_{\text{tot,elast}} = 2,9\text{ cm}$ ; altura mínima do elastômero sob cargas permanentes:  $T = 1\text{ cm} \leq H_{\text{tot,elast}} = 2,9\text{ cm}$ ;  $\sigma_{c,\max} = 7,136\text{ MPa} > 3\text{ MPa}$ . 6) Verificação da estabilidade à flambagem: Da Eq. (21), tem-se que  $10,52\text{ MPa} < 89,47\text{ MPa}$ , verificando a condição. 7) Dimensionamento da chapa de aço:  $t_s = 0,52\text{ mm} < 3\text{ mm}$ . Portanto, o aparelho está verificado segundo critérios da EN 1337-3:2005.

Finalmente, como todas as condições foram satisfeitas, a Figura 5a mostra o detalhamento do AA verificado, que coincide com o aparelho utilizado pela empresa na substituição, mostrado na Figura 5b.



**Figura 5 – a) Detalhamento; b) Aparelho de apoio utilizado.**

## 6. Procedimento para troca dos Aparelhos de Apoio

Os aparelhos de apoio antigos eram de Neoprene fretado com uma chapa de aço em seu interior, e alguns apresentavam deslocamentos lineares/angulares. Para substituí-los foi necessário confeccionar consoles nos pilares que não os continham e este procedimento foi descrito por Silva e Sampaio (2023).



a) Plataforma para acesso aos consoles.



b) Cilindros hidráulicos posicionados.



c) Elevação do tabuleiro.



d) Medição das deformações.



e) Retirada do aparelho de apoio.



f) Aparelho de apoio existente.



g) Aparelho de apoio atual.



h) Aparelho antigo x Aparelho atual.



i) Posição final do aparelho de apoio.



j) Retorno da superestrutura à posição inicial.

Figura 6 – Procedimento de substituição dos aparelhos de apoio.

Plataformas para acesso aos consoles dos pilares intermediários foram construídas (Figura 6a). Para remover os AAs existentes, a estrutura foi aliviada. Cilindros hidráulicos de 120 t de capacidade foram posicionados sobre os consoles e os vãos da superestrutura com 620 t cada, foram cuidadosamente elevados, controlando-se as deformações impostas (Figura 6b-6d). Após a elevação da superestrutura, os aparelhos existentes foram retirados (Figura 6e). As Figuras 5f-5h mostram, respectivamente, um dos aparelhos retirados, o novo aparelho instalado e a comparação entre os dois.

Os novos aparelhos de elastômero fretado foram posicionados no local de instalação (Figura 5i) observando a orientação e alinhamento corretos, conforme as especificações do projeto. Uma vez posicionados os novos aparelhos, retornou-se a estrutura para a posição inicial (Figura 6j).

Ao todo foram substituídos 64 aparelhos de apoio por aparelhos de apoio em elastômero fretado de 350 x 300 x 41 mm, totalizando 275,52 dm<sup>3</sup>. Após a conclusão das obras de recuperação, a ponte foi inaugurada em novembro de 2020 e hoje está em plena operação.

## Conclusões

A substituição de aparelhos de apoio é uma tarefa complexa e exige cuidados técnicos para garantir a segurança estrutural da ponte, bem como a manutenção de sua funcionalidade a longo prazo. O correto dimensionamento dos aparelhos de apoio é essencial para garantir que as pontes possam suportar adequadamente as cargas dinâmicas e estáticas que recebem, sem comprometer sua estabilidade e pode ser feito por meio de diferentes abordagens. No presente estudo, o aparelho de apoio foi dimensionado pelas normas NBR 9062:2017 e EN 1337-3:2005 e as etapas de substituição dos AAs foi descrita. Os dados do aparelho verificado coincidem com o adotado pela empresa e atualmente a ponte está em plena operação.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a PROCEC Engenharia S.A. pela disponibilização dos dados que permitiram o desenvolvimento do trabalho.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 19783: Aparelhos de apoio de elastômero fretado – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Ações devido ao tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas. Rio de Janeiro, 2024. Versão corrigida: 2024.
- CORDEIRO, J.G.P. Aparelhos de Apoio em Pontes Vida Útil e Procedimentos de Substituição. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2014.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES, DNIT. Manual de Recuperação de Ponte e Viadutos, Rio de Janeiro, 2010.
- EUROPEAN STANDARD. EN 1337-3: Bearings – Part 3: Elastomeric bearings. 1. Ed. Bruxelas: CEN, 2005.
- GONÇALVES, F.R. Manifestações patológicas de aparelhos de apoio em obras de arte especiais – Estudo prático. Projeto de graduação. Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.
- LEONHARDT, F. Construções de concreto, volume 6: Princípios básicos da construção de pontes de concreto. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1979.
- MACHADO, R.N.; SARTORTI, A.L. Pontes: Patologias dos Aparelhos de Apoio. Córdoba: VI Congresso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. 2010.
- MENDES, L.C.; PUGA, M.; ALVES, V.A. Importância dos Aparelhos de Apoio na reabilitação de Estruturas de Pontes. Córdoba, Argentina: CINPAN, 2010.
- PCI - PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. Bridge Design Manual. 3rd Edition, 2nd Release, August 2014. Chicago. 1620p.
- SILVA, G.C.S.; SAMPAIO, M.S.M. Dimensionamento de Consoles em Concreto Armado: Estudo de caso na Ponte do Educandos em Manaus/AM. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2023, Rio de Janeiro, *Anais* [...]. Rio de Janeiro: [s. n.], 2023.
- VITÓRIO, J.A.P. Pontes e Viadutos rodoviários: Conceituação, conservação, segurança e reforço estrutural. Curso de especialização em inspeção, manutenção e recuperação de estruturas. Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2015.