

Análise Numérica da Estabilidade de Aparelhos de Apoio Elastoméricos Para Pontes

Rodrigo G. Mamone¹, Gustavo H. Siqueira², Luiz C. M. Vieira Jr.³, Claudius S. Barbosa⁴

¹ Universidade Estadual de Campinas / Faculdade de Engenharia Civil/ rgmamone@gmail.com

^{2,3} Universidade Estadual de Campinas / Faculdade de Engenharia Civil/ {siqueira, vieira}@fec.unicamp.br

⁴ Universidade de São Paulo/ Escola Politécnica – Departamento de Estruturas e Geotécnica/ csb@usp.br

Resumo

Em regiões sujeitas a sismos, é comum a utilização de isoladores sísmicos em apoios de pontes para proteção da superestrutura. Dentre esses isoladores, os elastoméricos são um dos mais utilizados, sendo compostos por camadas vulcanizadas de borracha com chapas de aço entrepostas entre elas. Dessa forma, esses elementos possibilitam grandes deslocamentos laterais, devido à baixa rigidez transversal da borracha, com elevada resistência axial devido à presença das chapas de aço de reforço. Assim, esses isoladores são amplamente utilizados para desacoplar o movimento do tabuleiro e da infraestrutura, evitando assim, elevados níveis de dano em caso de eventos extremos, como os sismos.

A perda de estabilidade caracteriza o principal estado limite para os isoladores elastoméricos, portanto, a sua compreensão é essencial, de modo que as pesquisas realizadas buscaram, em geral, estimar os limites de estabilidade a partir de alguns parâmetros dos isoladores, dentre os quais destacam-se o fator de forma e a esbelteza. Este estudo visa analisar a capacidade de carga de isoladores elastoméricos quando submetidos à elevados níveis de deformação lateral, comparando-os com os limites existentes presentes na literatura. Para isso foi realizada a modelagem numérica dos isoladores em elementos finitos utilizando o software ABAQUS. A calibração do modelo numérico foi feita com base em resultados experimentais presentes na literatura. Dessa forma, são apresentados nesse trabalho os principais aspectos da modelagem realizada, a metodologia adotada para calibração do modelo, e alguns resultados de capacidade de carga para diferentes níveis de força axial e deformação em cisalhamento do isolador.

Palavras-chave

Isoladores sísmicos; estabilidade lateral; método dos elementos finitos

Introdução

Nos últimos anos, diversos estudos experimentais e numéricos foram realizados sobre aparelhos de apoio elastoméricos para pontes (Figura 1). Nesses estudos, foram observados dois principais estados limites para esses elementos: a) Estado limite de ruptura por cisalhamento e b) Estado limite de perda de estabilidade lateral.

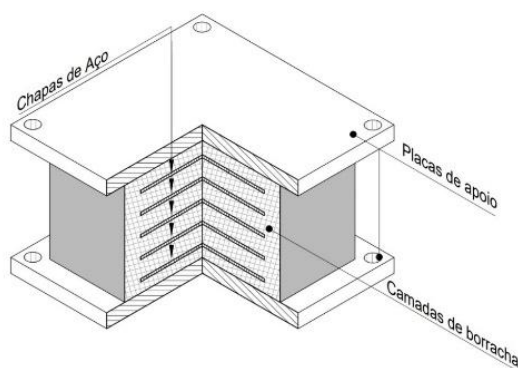


Figura 1 – Modelo de aparelho de apoio elastomérico.

O primeiro ocorre devido à ruptura por cisalhamento das camadas de borracha quando submetidas a elevados deslocamentos laterais e o segundo devido à perda da rigidez lateral dos apoios quando submetidos a uma combinação crítica de forças axiais e deslocamentos laterais. Desses estados limites, o mais estudado é o de perda de estabilidade lateral, visto que o seu estudo permite o dimensionamento de isoladores mais esbeltos e consequentemente mais viáveis economicamente. Assim, uma grande quantidade de estudos foi conduzida para análise de estabilidade desses isoladores. Esses estudos buscaram determinar em análises experimentais e numéricas os estados limites de perda de estabilidade de diferentes formas de isoladores sísmicos, buscando, com os resultados obtidos, estimar esses limites a partir de parâmetros dos elementos. Os principais parâmetros levados em conta nessas análises foram o fator de forma (S) e a esbeltez (λ) dos isoladores.

De acordo com Kelly e Takhirov (2007), a aplicação e estudo dos isoladores compostos de aço e borracha data do começo da década de 1950, sendo os primeiros estudos acerca realizados por Haringx (1948, 1949a, 1949b), baseados na linearidade da borracha e em pequenos deslocamentos laterais. A utilização desses isoladores em pontes e edifícios passou a ser comum no começo da década de 1990, época em que passaram a ser realizados estudos em maior escala. Esses estudos focaram na ruptura por cisalhamento em elevadas deformações, chegando a 600%, como apresentado por Kelly (1991). A partir da década de 2000, os estudos passaram a focar na estabilidade lateral dos isoladores. Nesses estudos, como apresentado por Buckle et al. (2002), foram determinadas curvas de estabilidade, relacionando o máximo deslocamento lateral possível para diferentes valores de carga axial aplicadas sobre os isoladores.

Nos estudos realizados, foram determinadas diversas curvas de estabilidade variando-se o fator de forma (S) dos isoladores, observando-se o impacto da alteração desse parâmetro no comportamento dos apoios. Gauron et al. (2018) realizaram estudo similar, porém considerando também a influência da esbeltez (λ) dos isoladores, realizando um estudo paramétrico variando a esbeltez e o fator de forma de isoladores em escala real e escala reduzida. Nesse estudo foi observado que a esbeltez tem até maior influência do que o fator de forma no comportamento dos isoladores.

Quanto aos estudos numéricos, Toopchi-Nezhad et al (2008, 2011) realizaram a modelagem e a análise de isoladores reforçados com fibra submetidos à carga axial e a uma combinação de carga axial e carga lateral. Além disso, foram analisados nesses estudos casos de isoladores com e sem placas de topo, ou seja, fixados e não fixados. Kalfas et al (2017a, 2017b) realizaram a análise numérica de isoladores reforçados com aço quando submetidos à carga axial e lateral combinadas, nesse estudo foi observado, como esperado, que o aumento da carga axial de compressão leva a uma redução da rigidez transversal do apoio. Além disso, foi observado que, mesmo quando submetido apenas a compressão em conjunto com cargas laterais, os isoladores podem apresentar tensões de tração nos seus elementos. Como é possível observar, a compreensão e determinação dos limites de perda de estabilidade desses isoladores, é essencial, dessa forma, nesse trabalho serão apresentados os principais aspectos da modelagem numérica desses apoios no software ABAQUS, determinando-se seu comportamento quando submetido concomitantemente a cargas axiais e deslocamentos laterais. Dessa forma, foram elaboradas curvas de estabilidade de um isolador específico e os resultados foram comparados com resultados experimentais presentes na literatura.

Estabilidade de isoladores sísmicos

Assim como a perda de estabilidade observada em pilares quando submetidos à elevadas cargas de compressão, os isoladores sísmicos são igualmente suscetíveis a esse fenômeno, havendo, porém, elevada influência da baixa rigidez transversal destes apoios na sua análise. Dessa forma, quando submetidos concomitantemente a cargas verticais de compressão e deslocamentos laterais, os isoladores apresentam um ponto a partir do qual a força cortante atuante atinge um valor máximo e a rigidez transversal passa a apresentar valores negativos, este ponto é caracterizado como o ponto de perda de estabilidade do isolador, ou seja, quando este atinge a condição de equilíbrio instável.

Observa-se que devido à baixa rigidez transversal dos isoladores, estes apresentam elevados deslocamentos laterais, os quais influenciam diretamente na carga vertical que pode ser aplicada a um isolador até que seja atingido o seu limite de estabilidade lateral, essa carga é chamada de carga crítica (P_{cr}). Como a carga crítica de um isolador depende diretamente do deslocamento lateral atuante, não é possível determinar um valor crítico específico para cada isolador, mas sim uma série de valores que variam de acordo com o deslocamento lateral ao qual o isolador é submetido. Dessa forma, para avaliação da estabilidade dos isoladores são determinadas curvas de estabilidade, as quais relacionam deslocamentos laterais críticos (u_{cr}) com cargas de compressão críticas (P_{cr}). Na Figura 2 é apresentado um modelo dessa curva.

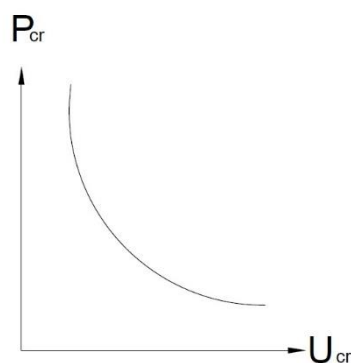


Figura 2 – Modelo de curva de estabilidade de isoladores sísmicos.

A carga crítica de um isolador sísmico para pequenos deslocamentos pode ser estimada analiticamente a partir da teoria de Haringx (1948, 1949a, 1949b), a qual foi posteriormente verificada por Gent (1964) e Koh & Kelly (1989) a partir de resultados experimentais. Segundo Haringx, a carga crítica de um isolador submetido a pequenos deslocamentos é dada por:

$$P_{cr0} = \frac{1}{2} (GA)_{ef} \left[\left(1 + \frac{4P_E}{(GA)_{ef}} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (1)$$

Em que:

- P_E é a carga crítica da coluna de Euler, calculada por:

$$P_E = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{h^2} \quad (2)$$



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

- $(GA)_{ef}$ é o módulo de rigidez ao cisalhamento efetivo, dado por:

$$(GA)_{ef} = GA \frac{h}{T_r} \quad (3)$$

- $(EI)_{ef}$ é o módulo de rigidez à flexão efetivo, dado por:

$$(EI)_{ef} = E_r I \frac{h}{T_r} \quad (4)$$

- G é a rigidez transversal efetiva;
- I é o momento de inércia ao redor do eixo de rotação da camada de borracha;
- A é a área de cisalhamento da camada de borracha;
- h é a altura total do isolados;
- T_r é a espessura total das camadas de borracha do isolador;
- E_r é o módulo de compressão, dado por:

$$E_r = E_0(1 + 0,742S^2) \quad (5)$$

- E_0 é o módulo de elasticidade da borracha, considerado geralmente como 3,3 a 4,0 vezes o valor de G ;
- S é o fator de forma, tomado como a razão entre a área carregada de uma cada de borracha e a área não carregada (perimetral) desta;

Uma expressão simplificada para determinação da carga crítica para pequenos deslocamentos foi proposta por Naeim e Kelly (1999) para isoladores quadrados com fator de forma superior a 5. Essa expressão foi adotada pela norma europeia EN 15129 (2010) e é dada por:

$$P_{cr0} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} GAS_1 S_2 \quad (6)$$

Em que:

- S_1 é o fator de forma S ;
- S_2 é dado por:

$$S_2 = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

- λ é a esbeltez do isolador dada pela razão entre a altura total das camadas de borracha (T_r) e a largura do isolador.

Para a determinação da carga crítica em isoladores submetidos a grandes deslocamentos, Buckle e Liu (1994) propuseram o método da área reduzida, no qual a carga crítica de um isolador submetido a um certo deslocamento lateral u é dada por:

$$P_{cr} = P_{cr0} \left(\frac{A_r}{A} \right) \quad (8)$$

Em que:

- A_r é a área reduzida do isolador, representada na Figura 3 e calculada por:

$$A_r = b(b - u) \quad (9)$$

- b é a medida lateral do isolador.

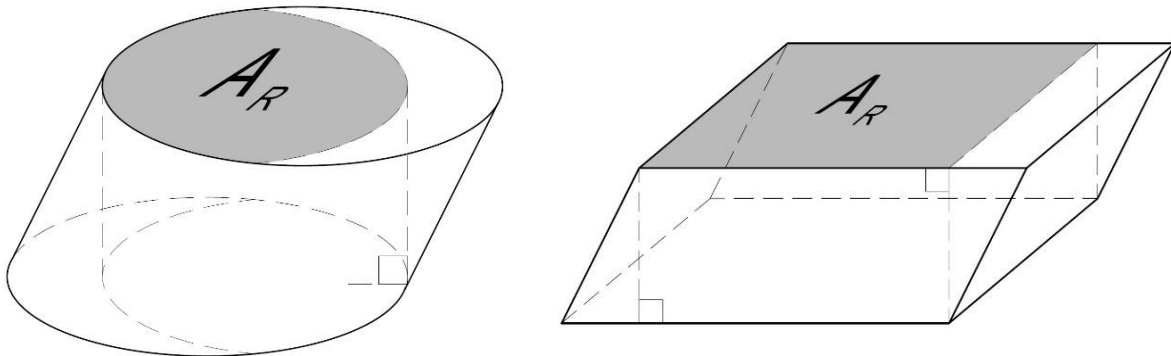


Figura 3 – Área reduzida dos isoladores.

Modelagem numérica

A modelagem numérica dos isoladores sísmicos foi realizada com o intuito de se calibrar o modelo, comparando os resultados obtidos com resultados experimentais presentes na literatura, optando-se por utilizar valores do trabalho de Gauron et al (2018). Para o modelo foram utilizados elementos sólidos hexaédricos do tipo C3D8H. Observa-se que foi necessário utilizar uma formulação híbrida, visto que materiais hiperelásticos, caso da borracha, requerem a utilização dessa formulação. A geometria do modelo foi a utilizada no modelo B1 do trabalho de Gauron et al (2018) e apresenta as seguintes características:

- Dimensões: 300 mm x 300 mm;
- Espessura das camadas de borracha: 12 mm;
- Número de camadas de borracha: 15;
- Espessura das chapas de aço: 3 mm;
- Número de chapas de aço: 14;
- Dimensões das placas de apoio: 300 mm x 300 mm;
- Espessura das placas de apoio: 20 mm.

Na Figura 4 é apresentado o modelo elaborado no software ABAQUS. O tamanho da malha utilizada foi de 10mm.

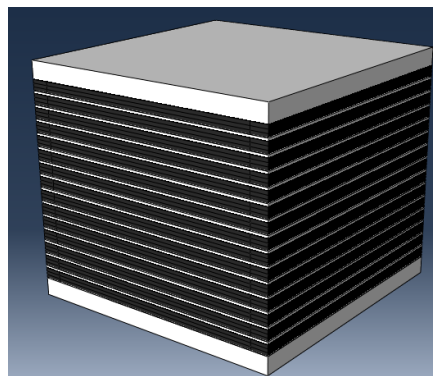


Figura 4 – Modelo elaborado.

Como condição de contorno foi aplicado um engaste na placa de apoio inferior e foi restrito o giro na placa superior, de forma a garantir o paralelismo entre as placas, condição usualmente empregada nos ensaios. O modelo contendo as condições de contorno é apresentado na Figura 9.

O comportamento mecânico da borracha pode ser adequadamente caracterizado a partir de um modelo hiperelástico. Dentro dos modelos hiperelásticos, os mais conhecidos são o modelo Neo-Hookiano, o modelo de Mooney-Rivlin e o modelo de Ogden, como apresentado por Kim et al (2012). Os modelos hiperelásticos são baseados no cálculo da energia de deformação, levando em conta a não linearidade do material e a sua compressibilidade. Dentre os modelos citados, segundo os mesmos autores, o de Ogden é o que atinge resultados satisfatórios para os maiores valores de deformação em cisalhamento, chegando a apresentar valores compatíveis para deformações de ordem de 700%, enquanto esses valores são de 200% e 100% para os modelos de Mooney-Rivlin e Neo-Hookiano, respectivamente. A energia de deformação no modelo de Ogden, é dada por:

$$U = \sum_{n=1}^3 \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + D_1 (J - 1)^2 \quad (10)$$

Em que:

- μ_n , α_n e D_1 são parâmetros do material;
- λ_i são os valores nas direções principais do tensor direito de deformação;
- J é a variação volumétrica do elemento.

As propriedades do material utilizadas no modelo, foram obtidas de Gauron et al. (2014) e são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da borracha para o modelo hiperelástico de Ogden.

$\mu_1 (MPa)$	α_1	$\mu_2 (MPa)$	α_2	$\mu_3 (MPa)$	α_3	$D_1 (MPa^{-1})$
0,3796	3,150	0,004996	4,898	-0,005413	-2,000	0,001

Observa-se que esse modelo constitutivo leva em consideração a compressibilidade do material, sendo esta considerada na determinação do parâmetro D_1 . Para o aço foi considerado um modelo constitutivo elastoplástico perfeito, apresentando comportamento elástico linear para tensões abaixo da tensão de escoamento (f_y) e comportamento perfeitamente plástico após esse valor. No trabalho de referência para dados experimentais de Gauron et al (2018), o aço utilizado foi o 300W, dessa forma, tem-se as seguintes propriedades mecânicas:

- $E_s = 200 \text{ GPa}$;
- $f_y = 300 \text{ MPa}$;

Parâmetros de calibração do modelo

Seguindo o adotado no trabalho de referência para dados experimentais de Gauron et al. (2018), o carregamento aplicado consistiu em aplicar concomitantemente uma carga axial de compressão e um deslocamento lateral. Para os resultados experimentais, foram utilizados o método direto de ensaio e o método dos deslocamentos constantes (ou CDM – *constant displacement method*). No primeiro, o isolador é carregado axialmente com uma carga predeterminada, e então é aplicado um deslocamento lateral que vai sendo aumentado até que seja atingido o limite de estabilidade do isolador (ponto em que a rigidez transversal se torna nula). O método direto, embora seja mais prático para análise dos dados, pode, entretanto, danificar o isolador, de forma que o CDM têm sido uma alternativa para evitar danos ao isolador. O CDM consiste em se



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

aplicar um deslocamento horizontal em pequenos passos, e então para cada uma dessas fases o carregamento axial é aumentado até que a força lateral aplicada se torne nula. O resultado desse processo é apresentado na Figura 5. A partir desse ensaio é possível se determinar indiretamente a curva de resposta obtida no método direto.

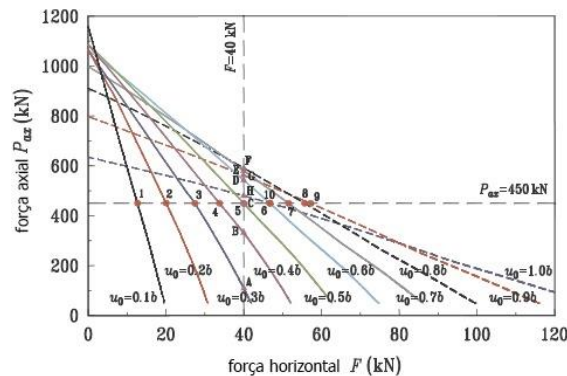


Figura 5 – Resultado obtido do CDM.

Como no modelo numérico, diferentemente dos ensaios experimentais, não há problemas com relação a danos nos isoladores, optou-se por utilizar o método mais simples na modelagem, dessa forma foi utilizado um processo semelhante ao método direto. Assim, inicialmente foi aplicada uma carga axial predeterminada em uma primeira etapa do modelo e em seguida foi aplicado um deslocamento lateral, o qual foi variado até atingir o deslocamento crítico (μ_{cr}) para aquela carga axial, de forma que repetindo esse processo para diferentes níveis de cargas axiais, é possível se determinar a curva de estabilidade do isolador, como apresentada na Figura 2. Os resultados experimentais obtidos por Gauron et al. (2018) para o isolador estudado são apresentados na Figura 6 e na Figura 7.

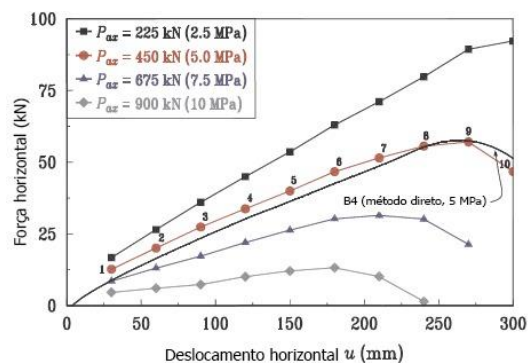


Figura 6 – Comportamento ao cisalhamento com compressão do isolador analisado.

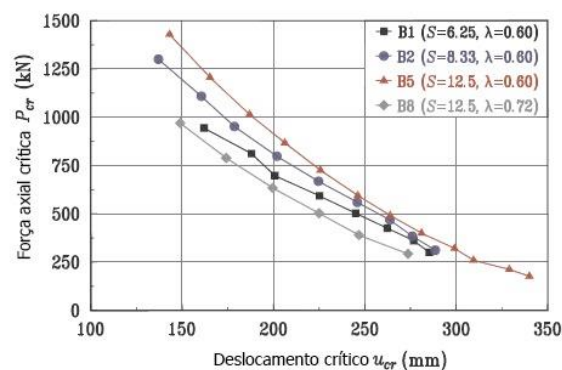


Figura 7 – Curva de estabilidade do isolador.

Resultados

Após elaboração do modelo numérico, de acordo com o apresentado na metodologia do trabalho, foi realizado o seu processamento.

Durante esta etapa verificou-se a dificuldade da convergência do modelo, principalmente nas bordas do modelo, devido à alta deformabilidade da borracha. O comportamento citado pode ser observado na Figura 8 durante ensaio experimental realizado por Gauron et al (2018). Devido à essa dificuldade de convergência do modelo foi necessário refinar a malha das camadas de borracha na região das extremidades, assim nas extremidades as dimensões laterais dos elementos foram tomadas como um terço das dimensões dos elementos centrais, os quais não foram reduzidos devido ao elevado tempo de processamento requerido para isso. Na Figura 9 é apresentada a malha final utilizada nas camadas de borracha do modelo.

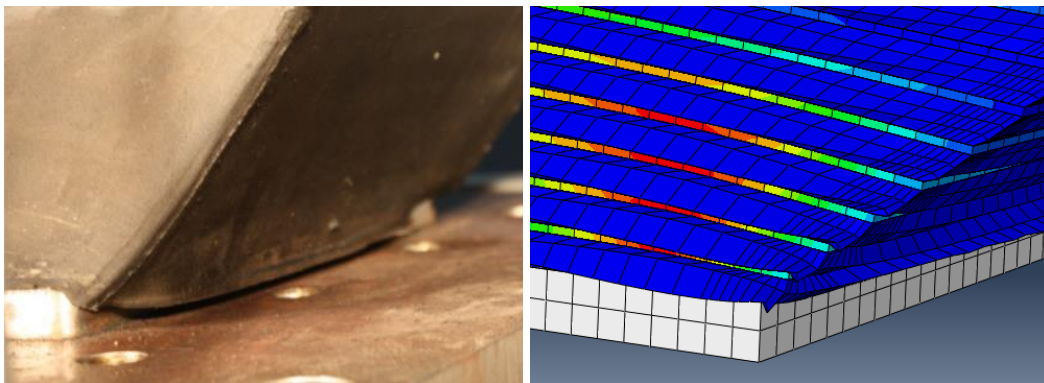


Figura 8 – Comportamento da borracha na borda do isolador.

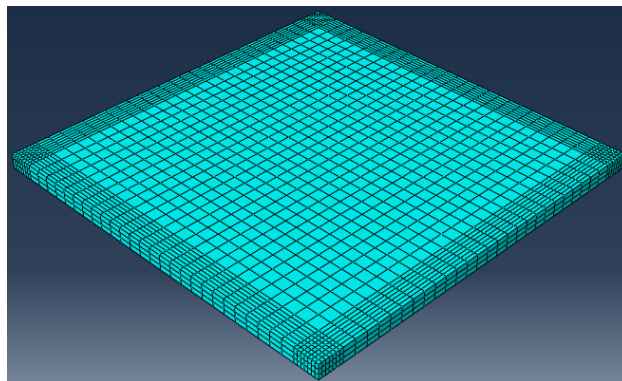


Figura 9 – Malha de elementos finitos para as camadas de borracha.

Utilizando-se então a malha adotada foi possível garantir a convergência do modelo. Na Figura 8 é apresentado o comportamento do modelo na região de borda mostrada na Figura 9, sendo possível verificar como este se assemelha com o observado no ensaio experimental. Além disso, são apresentados na Figura 10 o comportamento do isolador deformado nos ensaios experimentais e no modelo numérico. Dessa figura observa-se o comportamento semelhante de ambos.

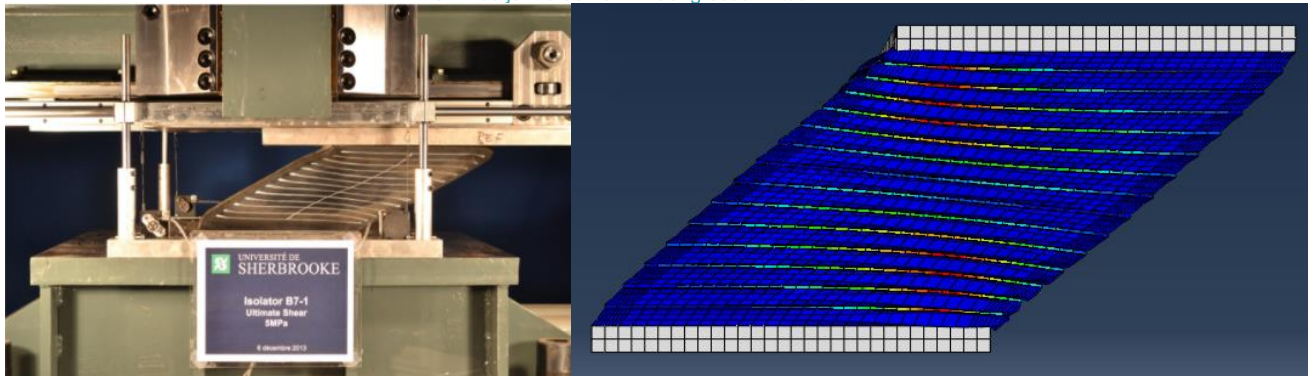


Figura 10 – Comparação do comportamento do isolador no ensaio e no modelo numérico.

Após análise dos aspectos qualitativos do modelo relacionados ao seu comportamento mecânico foram realizadas as verificações quantitativas, realizando-se comparações com os resultados experimentais obtidos por Gauron et al (2018). Na Figura 11 e na Figura 12 são apresentados os resultados das curvas de comportamento ao cisalhamento do isolador analisado para tensões de compressão de 5,0 MPa e 7,5 MPa, respectivamente.

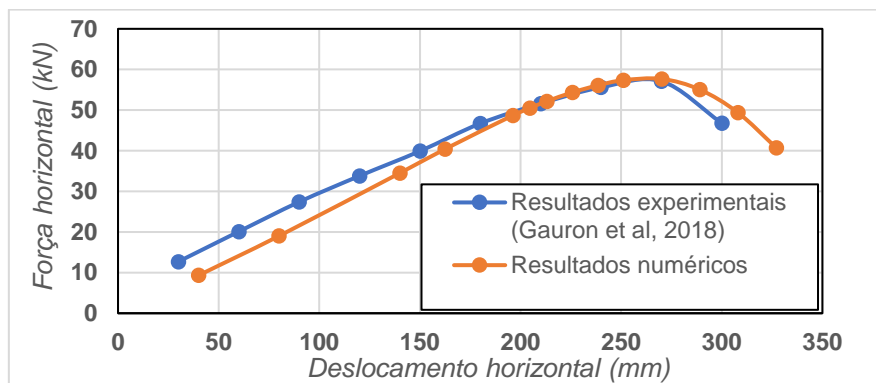


Figura 11 – Comportamento ao cisalhamento para compressão de 5,0 MPa.

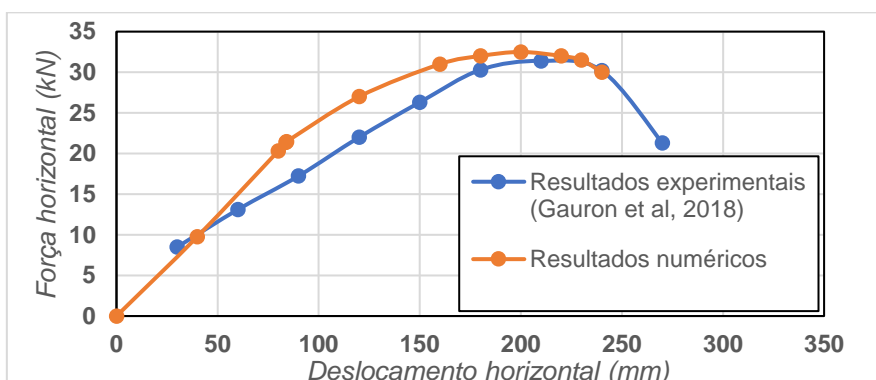


Figura 12 – Comportamento ao cisalhamento para compressão de 7,5 MPa.

A partir dos dados da Figura 11 e da Figura 12 e acrescentando dados dos resultados numéricos obtidos para tensões de compressão de 2,5 MPa, foi elaborada a curva de estabilidade do modelo numérico para o isolador analisado. A curva de estabilidade obtida numericamente é apresentada na Figura 13 em conjunto com a determinada experimentalmente por Gauron et al (2018).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS

7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

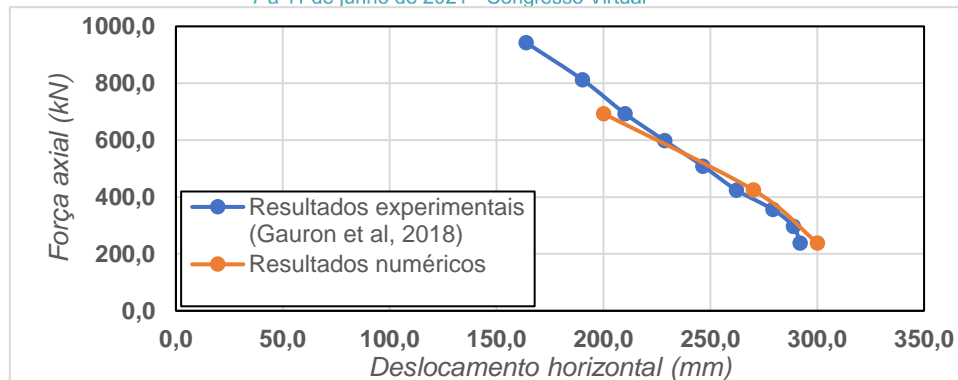


Figura 13 – Curvas de estabilidade do isolador.

A partir das Figura 13 é possível observar que os resultados obtidos numericamente são muito próximos aos obtidos experimentalmente. Além disso, da Figura 8 a Figura 10 também se verifica que o comportamento mecânico no modelo numérico está de acordo com o observado experimentalmente

Conclusões

Neste trabalho, foram apresentados os principais conceitos relacionados à estabilidade de isoladores sísmicos de pontes. Além disso, foi elaborado um modelo numérico dos isoladores no software ABAQUS. No modelo numérico foi utilizado um modelo de material hiperelástico para simulação da borracha, optando-se por utilizar o modelo de Ogden para esse tipo de material. Os parâmetros do material utilizados foram os apresentados por Gauron et al (2014), os quais foram determinados experimentalmente. Durante processamento do modelo observou-se dificuldade na convergência devido às altas deformações da borracha nas bordas do modelo, dessa forma, foi necessário um refinamento da malha na região das bordas, assim garantindo-se a convergência. Após processamento do modelo foi realizada a calibração do modelo. Inicialmente foi realizada uma análise qualitativa dos resultados, observando-se que o comportamento mecânico do isolador apresentou grande semelhança com o comportamento dos ensaios experimentais realizados por Gauron et al (2018). Em seguida foi realizada uma análise quantitativa do comportamento do modelo, comparando-se as curvas de comportamento ao cisalhamento para diferentes níveis de compressão axial e a curva de estabilidade do isolador modelado com os resultados experimentais de Gauron et al (2018), observando-se também comportamento muito similar entre ambos. Dessa forma, foi possível apresentar nesse trabalho os principais aspectos da modelagem de isoladores sísmicos a serem utilizados para determinação de suas curvas de estabilidade com resultados satisfatórios quando comparados aos obtidos experimentalmente.

Referências

- Buckle I, Nagarajaiah S, Ferrell K. Stability of elastomeric isolation bearings: experimental study. *ASCE J Struct Eng* 2002;128(1):3–11.
- Buckle I, Liu H. Stability of elastomeric seismic isolation systems. Proc., seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and control, ATC-17-1. CA: Applied Technology Council; 1993. p. 293–305.
- Gauron Olivier, Saidoua Adamou, Bussona Arnaud, Siqueira Gustavo Henrique, Paultre Patrick. Experimental determination of the lateral stability and shearfailure limit states of bridge rubber bearings. *Eng Struct* 2018;174:39–48.
- Gent, A. N. et Lindley, P. B. (1959). The compression of bonded rubber blocks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, volume 173(3), p. 111 122.
- Haringx J. On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings. I. *Philips Res Rep* 1948;3:401–49.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

- Haringx J. On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings. II. Philips Res Rep 1949;4:49–80.
- Haringx J. On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings. III. Philips Res Rep 1949;4:206–20.
- Kalfas Konstantinos N, Mitoulis Stergios A, Katakalos Konstantinos. Numerical study on the response of steel-laminated elastomeric bearings subjected to variable axial loads and development of local tensile stresses. Eng Struct 2017;134:346–57.
- Kalfas Konstantinos N, Mitoulis Stergios A. Performance of steel-laminated rubber bearings subjected to combinations of axial loads and shear strains. Procedia Eng 2017;199:2979–84.
- Kelly J. Dynamic and failure characteristics of Bridgestone bearings. Tech rep UCB/ EERC-91/04. Berkeley (CA): Earthquake Engineering Research Center, University of California; 1991.
- Kelly JM, Takhirov SM. Tension buckling in multilayer elastomeric isolation bearings. J Mech Mater Struct 2007;2(8):1591–605.
- Koh CG, Kelly JM. Viscoelastic stability model for elastomeric isolation bearings. ASCE J Struct Eng 1989;115(2):285–302.
- Kim Beomkeun, Lee Seong Beom, Lee Jayone, Cho Sehyun, Park Hyungmin, Yeom Sanghoon, et al. A comparison among Neo-Hookean Model Mooney-Rivlin Model, and Ogden model for chloroprene rubber. Int J Precis Eng Manuf 2012;13(5):759–64.
- Naeim F, Kelly J. Design of seismic isolated structures - from theory to practice. New York (NY): John Wiley & Sons, Inc.; 1999.
- Toopchi-Nezhad Hamid, Tait Michael J, Drysdale Robert G. Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators. Struct. Control Health Monit 2008;15:876–900.
- Toopchi-Nezhad Hamid, Tait Michael J, Drysdale Robert G. Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: Finite element analysis. Compos Struct 2011;93:850–9.