

Estudo de fragilidade de uma ponte típica da região Nordeste do Brasil Parte I: Curvas de fragilidade

Fragility study of a typical Brazil's northeast bridge. Part I: Fragility curves

Gustavo H. F. Cavalcante¹; Lucas F. Da Ronch¹; Eduardo M. V. Pereira¹; Isabela D. Rodrigues¹;
Rodrigo B. Andrade¹; Gustavo H. Siqueira²

(1) Pós-Graduando(a) em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas

(2) Professor Doutor em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas

Resumo

As pontes são as componentes mais vulneráveis em um sistema de transporte rodoviário. Assim, é necessário que estas sejam dimensionadas considerando eventos excepcionais. Dentre esses eventos, os sismos não devem ser ignorados, já que nas últimas décadas eventos sísmicos representativos, de magnitude superiores a 5, aconteceram no Brasil e foram registrados pelo Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (USP). O Brasil possui uma norma específica para projetos de estruturas sísmo-resistentes, porém esta exclui sua utilização em estruturas especiais, como as pontes. Além disso, muitas destas estruturas não estão em condições ideais de utilização, o que as tornam mais suscetíveis. Posto isto, este trabalho tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade de uma ponte de geometria típica situada no Nordeste do Brasil, já que essa região possui um dos maiores riscos sísmicos do país. O sistema estrutural apresenta tabuleiro em seção "T" apoiado em encontros do tipo "U" e em pórticos compostos por dois pilares circulares através de aparelhos de apoio elastoméricos. A modelagem numérica é realizada no programa OpenSees e são processadas análises dinâmicas não-lineares. Os modelos de capacidade são obtidos a partir de análises do tipo Pushover. A demanda é definida por análises dinâmicas incrementais com emprego de registros recolhidos do Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), sendo estes compatíveis com espectros-alvo para a cidade Natal (RN). Por fim, o estudo de vulnerabilidade é conduzido por meio da construção de curvas de fragilidade, que fornecem a probabilidade da demanda exceder a capacidade estrutural para diferentes estados-limites da estrutura. Por fim, observa-se que a fragilidade do sistema é condicionada pelos aparelhos de apoio que tornam o escorregamento do tabuleiro a componente mais crítica, enquanto os pilares não sofrem danos consideráveis com o aumento da medida de intensidade dos eventos sísmicos.

Palavra-Chave: Pontes de concreto; Curvas de fragilidade; Vulnerabilidade.

Abstract

Bridges are the most vulnerable components in a road transport system. Thus, it is necessary that these structures are designed considering exceptional events. Among these events, earthquakes should not be ignored, since in the last decades representative seismic events, of magnitude greater than 5, happened in Brazil and were recorded by the Seismology Center of University of São Paulo (USP). Brazil has a specific standard for earthquake-resistant structures projects, but this excludes its use in special structures, such as bridges. In addition, many of these structures are not in ideal safety conditions, which makes them more vulnerable. This paper aims to assess the vulnerability of a typical bridge located in the Northeast of Brazil, since this region has one of the higher seismic risk in the country. The structural system presents a T-beam deck supported by non-integral "U" type abutments and by bents composed of two circular columns using elastomeric bearings. Numerical modeling is performed in OpenSees software and dynamic non-linear analyses are performed. Capacity models are obtained from Pushover analyses. Demand models are defined by incremental dynamic analyses using records collected from the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), which are compatible with target-spectrum for the city of Natal (RN). The vulnerability study is conducted through fragility curves, which provide the probability for different limit states of the structure. Finally, it is observed that the system fragility is conditioned by the elastomeric bearings that make the slide of the deck the most critical component, while columns do not suffer considerable damage with the increase in the intensity measure of seismic events

Keywords: Concrete bridges; Fragility Curves; Vulnerability.

1 Introdução

Os eventos sísmicos são definidos por vibrações de terra derivadas de deslizamentos de falhas geológicas (i.e. intraplaca) ou pelo choque de placas (i.e. interplaca) no interior da crosta terrestre. O Brasil está situado na região central da placa Sul-Americana, ou seja, está menos suscetível a ocorrência de sismos comparada a regiões de fronteira entre placas conforme Assumpção et al. (2016). No entanto não existe qualquer evidência que terremotos intraplacas são mais fracos que os interplaca. Para que se consiga fazer uma comparação, segundo Assumpção et. al. (2016), um sismo de magnitude 5 ocorre, em média, a cada cinco anos, ao passo que a região andina conta com sismos dessa magnitude em média duas vezes por semana.

Nas últimas décadas eventos sísmicos representativos, de magnitude superiores a 5, aconteceram no Brasil e foram registrados pelo Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (USP). A região Nordeste do Brasil quando comparada ao resto do território nacional apresenta considerável risco sísmico, uma vez que é a terceira região com maior densidade demográfica e possui uma das maiores ameaças sísmicas de acordo com a Assumpção et. al. (2016) e Petersen et. al. (2018).

Levando em consideração os danos causados por abalos sísmicos, faz-se necessário a consideração dessas solicitações no dimensionamento das estruturas. O Brasil, apenas em 2006, lançou uma norma específica para projeto de estruturas sismo-resistentes, a NBR 15421 (2006), sendo que esta exclui sua aplicação em pontes. Além disso, diferente das normas estrangeiras, como a *National Building Code of Canada* (NBCC) de 2005 que utiliza um mapa sísmico com uma probabilidade de 2% de serem ultrapassadas em 50 anos, equivalente a um tempo de retorno de 2475 anos, a norma brasileira utiliza somente a probabilidade de 10% de serem excedidas no mesmo período, ou seja, um tempo de retorno de 475 anos.

Assumpção et al (2016) e Petersen et al. (2018) elaboraram novos mapas de ameaças sísmicas em função da aceleração de pico no solo (PGA) e da aceleração espectral (S_a) em 0,2 e 1 segundo, respectivamente, para probabilidades de 10% e 2% de serem excedidas em 50 anos. Os mapas de acelerações espectrais elaborados por Petersen et al. (2018) para um período de retorno em 475 anos estão ilustrados na Figura 1.

Sendo assim, a norma brasileira para projetos de estruturas sismo-resistentes apresenta valores de acelerações inferiores aos propostos recentemente por Assumpção et al. (2016) e Petersen et. al. (2018). Portanto, parte das estruturas construídas podem estar inseguras quanto à probabilidade aceitável de se atingir os estados de dano, como abertura de fissuras, rupturas locais ou globais etc. Portanto, torna-se necessário estudos referentes à vulnerabilidade sísmica, conforme realizados em diversos países.

Considerando que o risco sísmico é composto pela ameaça, exposição e vulnerabilidade, faz-se necessário a consideração dessas solicitações no dimensionamento estrutural, principalmente em obras de infraestruturas como, por exemplo, as pontes. Segundo Dukes, DesRoches e Padgett (2012), as pontes são essenciais no sistema de transporte, durante e depois dos eventos sísmicos, providenciando rotas de emergência e de

evacuação. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é o órgão responsável por supervisionar os projetos, as construções, as operações, as manutenções, os reparos, as reabilitações e as substituições de mais de 5000 pontes situadas em rodovias federais conforme Oliveira et al. (2019).

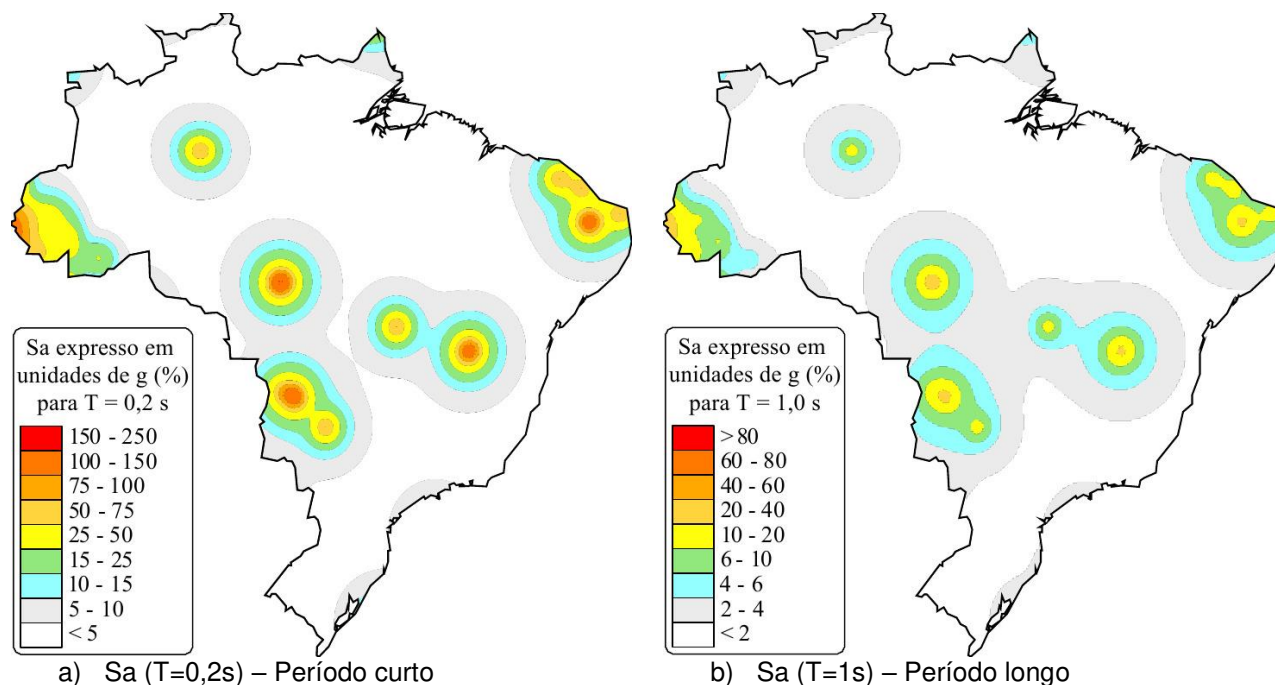


Figura 1 – Mapa de ameaça sísmica para o Brasil em função da aceleração espectral para um período de retorno de 475 anos (Petersen et al., 2018)

De acordo com estudo desenvolvido por Cavalcante (2020), dentre as pontes do nordeste brasileiro, existem três tipologias predominantes. A tipologia mais usual é aquela que apresenta um sistema estrutural simples, ou seja, um sistema composto por um único vão sem pilares onde o tabuleiro é conectado aos encontros por aparelhos de apoios. A segunda tipologia mais usual possui um sistema estrutural composto por múltiplos vãos sem encontros onde a ligação dos pórticos intermediários com o tabuleiro é realizada por aparelhos de apoio. A terceira tipologia mais predominante é a que apresenta o sistema estrutural mais complexo e a que apresenta encontros e pórticos intermediários conectados por aparelhos de apoio elastoméricos.

Modelos probabilísticos têm sido utilizados para avaliar a vulnerabilidade das estruturas situadas em locais com atividades sísmicas através das curvas de fragilidade. Além disso, elas descrevem a probabilidade condicional que uma estrutura atinja ou ultrapasse um determinado nível de dano específico em função da intensidade sísmica (NIELSON, 2005). As curvas são construídas através da análise de demanda e da capacidade sísmica, sendo essas consideradas como variáveis aleatórias. Portanto, torna-se necessário gerar modelos que caracterizam uma estrutura base de interesse em função de variáveis aleatórias pré-definidas como geometria, propriedades dos materiais etc.

A demanda sísmica corresponde a resposta máxima de um componente estrutural quando solicitadas por atividade sísmica. A demanda pode ser obtida através de vários tipos de análises como a dinâmica incremental para cada combinação de estrutura e

terremoto, sendo essa análise aplicada durante este trabalho. Segundo Cornell et al. (2002), a relação das respostas máximas das componentes estruturais em função de uma medida de intensidade da atividade sísmica pode ser estabelecida a partir da seguinte equação:

$$\hat{D} = a(IM)^b \quad (\text{Equação 1})$$

Considerando que a demanda segue uma distribuição lognormal, através de uma regressão linear no espaço logarítmico, definida como Modelo Probabilístico de Demanda Sísmica (PSDM), pode-se obter a média da demanda, dada pela equação da reta (EQ. 2), e dispersão que é o erro em torno dessa reta.

$$\ln(\hat{D}) = \ln a + b \ln(IM) \quad (\text{Equação 2})$$

A capacidade sísmica das componentes é definida através dos estados limites dos elementos estruturais, que podem ser descritas como na FEMA (2003), que caracteriza os estados limites de maneira qualitativa. Ela caracteriza os estados limites em quatro classificações, danos leves (*slight*), danos moderados (*moderate*), danos extensos (*extensive*) e colapso (*complete*). De acordo com Cornell et al. (2002), admite-se que a capacidade possui uma distribuição lognormal. Os valores de média e dispersão para a capacidade dos componentes podem ser obtidos na literatura, como em Mangalathu et al. (2017). Outra maneira de obter esses valores é através de uma análise *Pushover*, que representa uma análise estática não-linear conduzida sob cargas gravitacionais constantes e a aplicação gradual de incrementos de cargas horizontais (CODE e PRINCE, 2005).

Como tanto a demanda quanto a capacidade são consideradas distribuições lognormais, cada componente pode ser avaliada com uma solução fechada lognormal como a seguinte equação de acordo com Nielson e DesRoches (2006):

$$P[LS|IM] = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{\mu_D}{\mu_C}\right)}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: $P[LS|IM]$ é a probabilidade de se atingir o estado limite LS dada uma intensidade da atividade sísmica IM ; Φ a função padrão de distribuição normal acumulada (CDF); μ_D é a mediana e β_D é a dispersão logarítmica da demanda; μ_C é a mediana e β_C é a dispersão logarítmica da capacidade.

As características dos terremotos devem ser definidas como variáveis aleatórias, sendo empregado um conjunto de sinais. As fontes dessas incertezas são caracterizadas como aleatórias ou epistêmicas. De acordo com Nielson e DesRoches (2007) e Padgett e DesRoches (2007), a variabilidade de alguns parâmetros na modelagem e nas acelerações dos terremotos na geração das curvas de fragilidade são importantes, sendo necessário uma escolha criteriosa das variáveis aleatórias e de suas respectivas distribuições estatísticas.

2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação da vulnerabilidade sísmica de uma ponte típica situada na região Nordeste, conforme descrito em Cavalcante (2020). Os objetivos específicos estão listados a seguir:

- A) Modelar a estrutura da ponte a partir de modelos não lineares e aplicação de análises dinâmicas;
- B) Realizar análises *Pushover* dos pilares das pontes para gerar os modelos de capacidade desses componentes;
- C) Realizar a análise dinâmica incrementais com sinais de terremotos compatíveis com o espectro de resposta da região de estudo;
- D) Desenvolver modelos de demanda através do *Probabilistic Seismic Demand Models* (PSMD) para a ponte em questão;
- E) Obter a curva de fragilidade das componentes através dos modelos de capacidade e demanda da estrutura.

3 Metodologia

3.1 Modelagem da Estrutura

A metodologia deste trabalho é iniciada com a caracterização da ponte. Esta é composta por múltiplos vãos com tabuleiro em seção “T”, apoiado em encontros do tipo “U” e em pórticos compostos por dois pilares circulares através de aparelhos de apoio elastoméricos. Conforme Cavalcante (2020), os valores médios da geometria, são:

- A) Espessura da laje do tabuleiro e largura das vigas travessas = 40 centímetros;
- B) Altura das longarinas = 140 centímetros;
- C) Comprimento dos vãos = 15 metros;
- D) Altura dos pilares = 5 metros;
- E) Distância entre eixos dos pilares = 5 metros;
- F) Diâmetro dos pilares = 80 centímetros;
- G) Altura dos encontros = 7 metros;
- H) Número de vãos = 2;
- I) Largura do tabuleiro e do encontro = 10 metros.

As variáveis aleatórias, indicadas na Tabela 1, como resistência de compressão do concreto (f_c), tensão de escoamento do aço (f_y), módulo de resistência longitudinal do aço (E_s), taxa de amortecimento da estrutura (ξ), o comprimento das juntas (Gaps) e o módulo de elasticidade transversal do aparelho de apoio elastoméricos (G) foram retirados da literatura.

Os valores de resistência do concreto à compressão adotados são referentes a classe C20, devido a 86% das pontes terem sido construídas há mais de 40 anos conforme Cavalcante (2020). A taxa de armadura dos pilares utilizada neste trabalho foi baseada no estudo de Padgett e DesRoches (2009), onde uma taxa de armadura de 1% foi utilizada

para os pilares em pontes que não apresentaram dimensionamento específico para eventos sísmicos.

Tabela 1 – Variáveis aleatórias empregadas pela literatura

| Variável | Distribuição | Parâmetros (m) | Referências |
|-------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------|
| f_c (MPa) | Normal | $\mu = 26,2$ e $\sigma = 4,3$ | SANTIAGO E BECK (2017) |
| f_y (MPa) | Normal | $\mu = 576$ e $\sigma = 63,36$ | NOGUEIRA (2010) |
| E_s (GPa) | Normal | $\mu = 200$ e $\sigma = 6,6$ | MIRZA E MACGREGOR (1979) |
| ξ (%) | Lognormal | $\mu = 1,956$ e $\sigma = 0,176$ | SIQUEIRA et. al. (2014a) |
| Gaps (mm) | Normal | $\mu = 24,5$ e $\sigma = 5$ | TAVARES et. al. (2012) |
| G (MPa) | Lognormal | $\mu = -0,203$ e $\sigma = 0,141$ | SIQUEIRA et. al. (2014a) |

Os parâmetros relacionados a interação solo-estrutura foram adotadas a partir das características do solo, que de acordo com o estudo de Cavalcante (2020) é designada como classe D, da região nordeste do Brasil, sendo eles: coeficiente de Poisson igual a 0,3, densidade do solo igual a 1800 kg/m³ e a velocidade de propagação de onda igual a 275 m/s. Para a fundação do pórtico foi adotado 4 estacas, por bloco, com diâmetro de 40 cm e 10 m de comprimento, viga travessa de 100 cm de altura e 40 cm de largura, viga baldrame de 30 x 30 cm e dois blocos de coroamento de 1,3 metros de altura. Para a fundação do encontro foram adotadas 12 estacas (2 fileiras transversais de 6 estacas cada) também com 40 cm de diâmetro e 10 m de comprimento.

Para este trabalho foram gerados três modelos de pontes onde todas as variáveis aleatórias expostas para essa tipologia, exceto taxa de amortecimento, comprimento das juntas e o módulo de elasticidade transversal do aparelho de apoio elastomérico, foram adotadas com seus respectivos valores médios. O modelo da estrutura está representado na Figura 2.

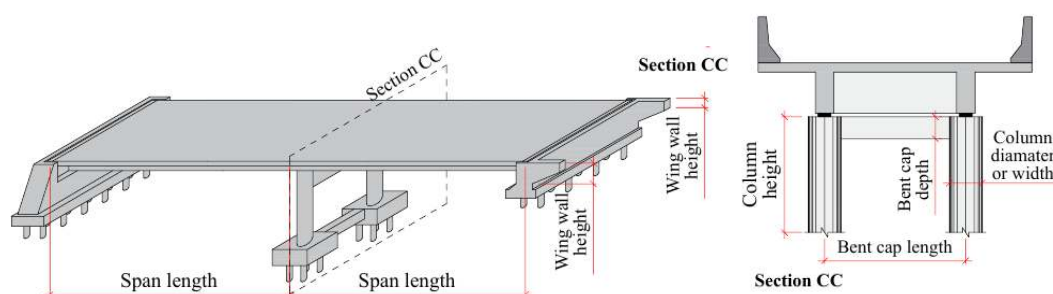


Figura 2 – Representação do modelo estrutural (adaptado de Cavalcante, 2020)

3.2 Modelagem numérica

Para criar o modelo de elementos finitos (MEF) que pudesse ser parametrizado para permitir a variação dos parâmetros do modelo, foi utilizado o *Failure Engineering and Analysis of Reliability for Bridges* (FEAR-Bridge). O FEAR-bridge é uma plataforma desenvolvida no MATLAB que permite interação com a plataforma de análise *OpenSees* (2019). A metodologia utilizada para descrever os modelos numéricos que representam o comportamento estrutural da ponte é empregada em diversos trabalhos como Siqueira et. al. (2014c) e Tavares et. al. (2012).

Os tabuleiros são modelados através de elementos de pórticos com comportamento elástico linear que apresentam seis graus de liberdade em cada nó, que estão posicionados no centro de gravidade da seção transversal, uma vez que se admite que estes se mantêm no regime elástico linear quando submetidos a um evento sísmico conforme Choi e Jeon (2003), Nielson e DesRoches (2006b), Pan et al. (2007), Siqueira et al. (2014a) e Song et al. (2019).

As vigas e pilares dos pórticos foram representados por elementos de pórtico não-lineares, baseado em deslocamentos com plasticidade distribuída. Este método discretiza os elementos estruturais em vários segmentos, que por sua vez é subdividida em vários elementos finitos (fibras) conforme a Figura 3.

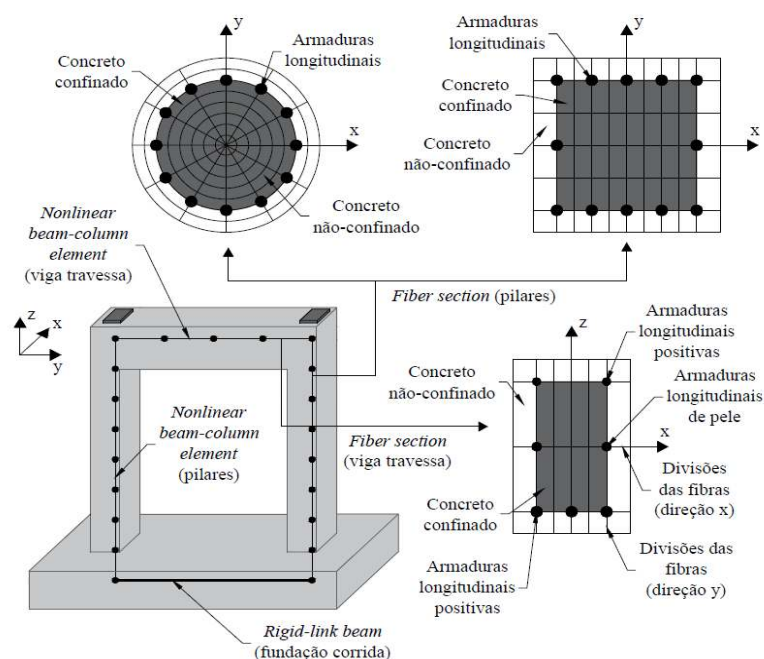


Figura 3 – Esquema representativo da modelagem dos pórticos (adaptado de Cavalcante, 2020)

A seção transversal dos elementos é subdividida em duas regiões. A primeira região é compreendida pela área interna dos estribos e tem comportamento descrito pelo concreto confinado que possui mais ductilidade e resistência e a outra região é compreendida pela área externa aos estribos e é definida pela relação constitutiva do concreto não confinado, conforme modelo constitutivo de Chang e Mander (1994). As armaduras longitudinais são inseridas como elementos pontuais com o comportamento estrutural regido pelo aço conforme modelo constitutivo de Giuffré-Menegetto-Pinto com enrijecimento isotrópico conforme FILIPPOU *et. al.* (1983). O modelo representativo dos comportamentos do concreto e do aço são ilustrados conforme Figura 4.

O modelo numérico completo utilizado para modelar a estrutura da ponte, incluindo o detalhamento da modelagem das ligações entre as componentes, está representado conforme a Figura 5.

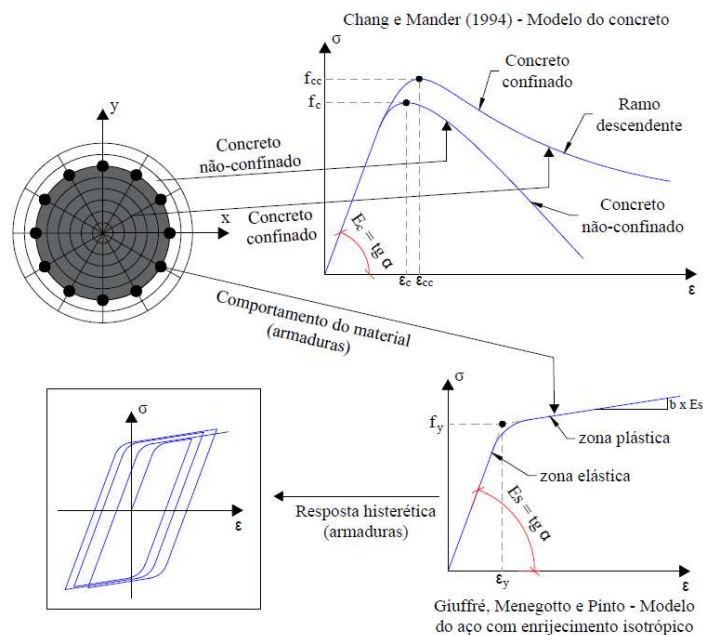


Figura 4 – O modelo dos comportamentos do concreto e do aço (adaptado de Cavalcante, 2020)

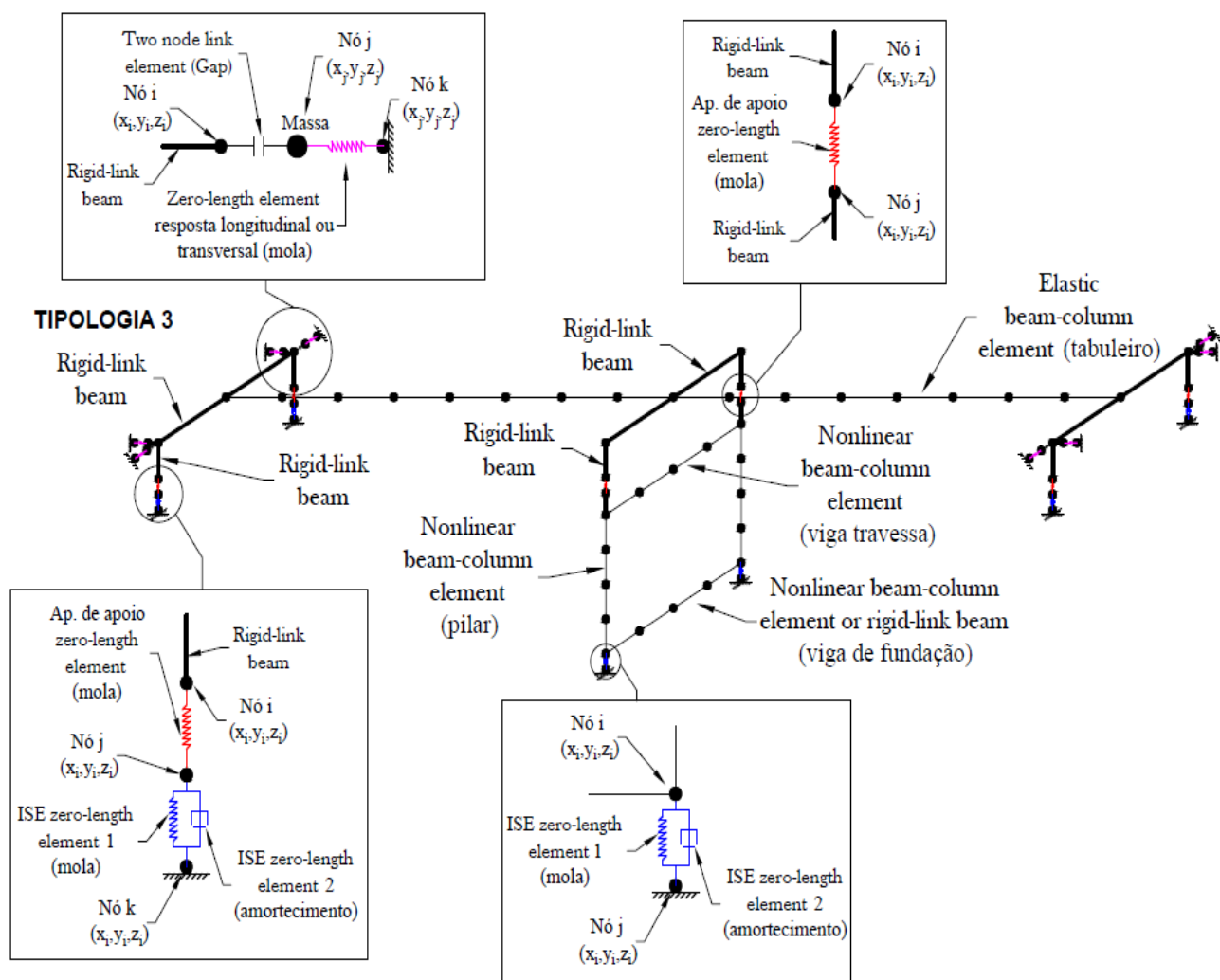


Figura 5 – Descrição do modelo estrutural da ponte (adaptado de Cavalcante, 2020)

3.3 Sinais sísmicos compatíveis

Com a falta de registros detalhados de atividades sísmicas no Brasil, seis terremotos naturais foram coletados da base de dados do *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER). O espectro de resposta para cada terremoto é calculado com base na média geométrica das duas componentes horizontais do terremoto. O espectro de resposta média para as acelerações sísmicas corresponde ao espectro de resposta de risco uniforme para uma probabilidade de 10% de excedência em 50 anos para a área de estudo (FIG. 1), conforme mostra a Figura 6.

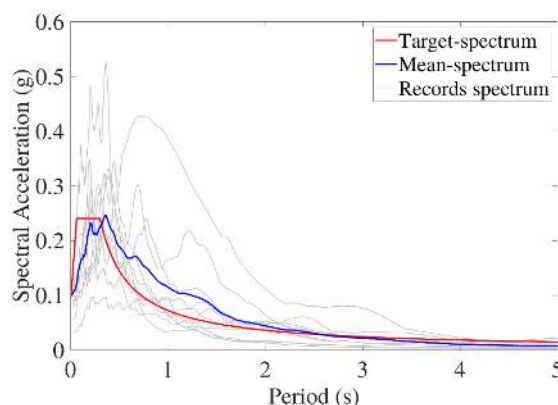


Figura 6 – Espectros para 5% de amortecimento (adaptado de Cavalcante, 2020)

O formato do espectro de resposta de risco uniforme é calculado com base nos padrões da *American Society of Civil Engineers* (ASCE) e a aceleração espectral utilizada neste trabalho para a região nordeste é proposta por Petersen et. al. (2018).

3.4 Geração das curvas de fragilidade

A demanda sísmica corresponde a resposta máxima de um componente estrutural quando solicitadas por atividade sísmica, portanto, a partir da definição dos componentes estruturais é necessário selecionar os parâmetros de demanda. Dentre diversas opções disponíveis, o deslocamento dos encontros, a curvatura dos pilares, o deslocamento do tabuleiro e o deslocamento dos aparelhos de apoio foram adotados. O *peak ground acceleration* (PGA) foi escolhido como medida de intensidade (IM).

Com os parâmetros de demanda sísmica e medida de intensidade definidos, foi realizado uma análise dinâmica incremental. De acordo com Vamvatsikos e Cornell (2002), esta é uma análise paramétrica que envolve submeter um modelo numérico estrutural a um ou mais registros de acelerações escalonados para múltiplos níveis de intensidade, produzindo uma ou mais curvas da resposta parametrizada em função de uma medida de intensidade que caracteriza o registro escalonado. Essa análise é realizada para obter o modelo probabilístico de demanda sísmica. O principal objetivo deste modelo é obter uma relação entre a intensidade de medida e os parâmetros de demanda. A análise dinâmica incremental foi realizada considerando escalonamento, com intervalo 0,1g, da média geométrica dos valores de PGA de 0,1g à 0,5g, totalizando 150 simulações para o

modelo de ponte em estudo. Cada simulação gera uma resposta pico para a componentes das pontes.

A capacidade estrutural dos encontros, tabuleiro e aparelhos de apoio foram obtidos de Pahlavan et al. (2016) e Mangalathu et al. (2007). A partir de um Pushover efetuado na direção transversal, obtém-se o valor da curvatura de escoamento da seção mais crítica. Desta forma, os valores de mediana e dispersão da curvatura dos pilares são obtidos com base nos valores de demanda dúctil dos pilares propostos por Choi, DesRoches e Nielson (2004). A metodologia empregada neste trabalho, para obter o estudo de fragilidade é esquematizada na Figura 7.

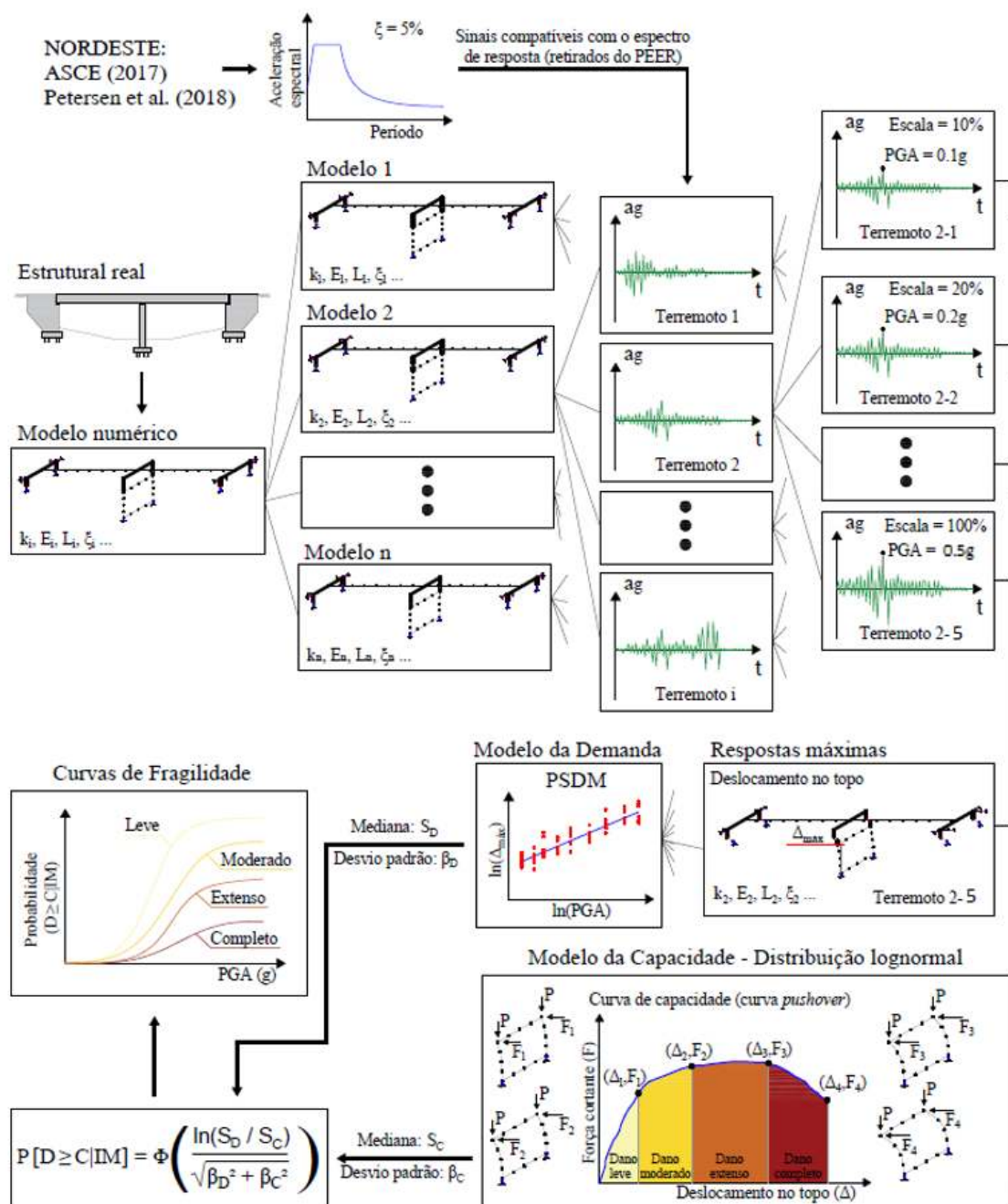


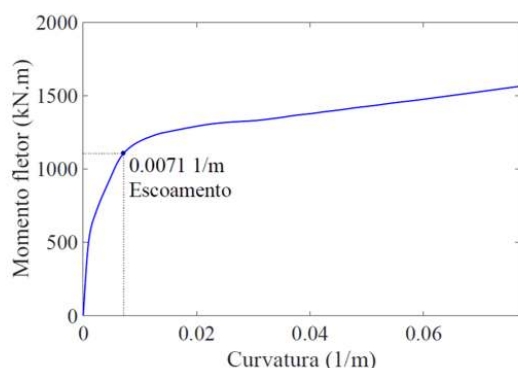
Figura 7 – Esquema representativo da metodologia (adaptado de Cavalcante, 2020)

4 Resultados

4.1 Estimativa da capacidade

Para gerar as curvas de fragilidade, os estados limites de dano de cada componente foram definidos. Análises *Pushover* foram efetuadas nas direções longitudinal e transversal. A curvatura de escoamento acontece quando a armadura mais solicitada ultrapassa a sua tensão de escoamento respectivamente. Os resultados de curvatura de escoamento na direção longitudinal são maiores que na direção transversal devido à redução de força axial no pilar crítica quando uma força transversal ou deslocamento é aplicado no pórtico, como ilustrado na Figura 8. Portanto, os resultados obtidos para a análise na direção transversal são utilizados neste trabalho.

Curvatura limite do pilar crítico na dir. longitudinal



Curvatura limite do pilar crítico na dir. transversal

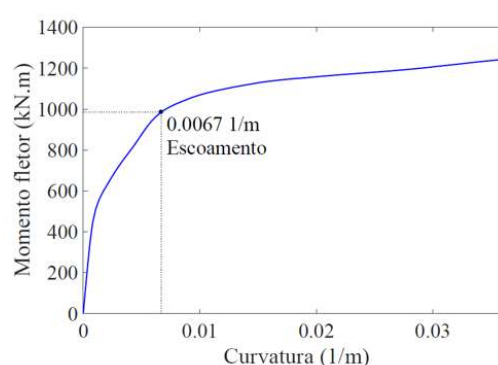


Figura 8 – Comparação da curvatura de escoamento dos pilares na direção longitudinal e transversal

A tabela 2 mostra os valores de mediana e dispersão logarítmica para cada estado limite, conforme Pahlavan et al. (2016) e Mangalathu et al. (2007). Destaca-se que apenas o deslocamento do tabuleiro e a curvatura dos pilares são considerados componentes principais.

Tabela 2 – Valores dos estados limites das componentes

| Componente | Leve | | Moderado | | Extensivo | | Completo | |
|---|---------|------------|----------|------------|-----------|------------|----------|------------|
| | μ_c | σ_c | μ_c | σ_c | μ_c | σ_c | μ_c | σ_c |
| Desloc. do tabuleiro (mm) | 25 | 0,35 | 75 | 0,35 | 150 | 0,35 | 225 | 0,35 |
| Curvatura dos pilares (rad/m) | 0,007 | 0,21 | 0,014 | 0,21 | 0,0277 | 0,21 | 0,048 | 0,21 |
| Desloc. dos aparelhos de apoio na direção longitudinal (mm) | 25 | 0,35 | 76 | 0,35 | - | - | - | - |
| Desloc. dos aparelhos de apoio na direção transversal (mm) | 25 | 0,35 | 76 | 0,35 | | | | |
| Desloc. Ativo dos encontros (mm) | 38 | 0,35 | 102 | 0,35 | | | | |
| Desloc. Passivo dos encontros (mm) | 76 | 0,35 | 254 | 0,35 | | | | |
| Desloc. dos encontros na direção transversal (mm) | 25 | 0,35 | 102 | 0,35 | | | | |

4.2 Estimativa da demanda

Ao total foram realizadas 150 simulações na estrutura para estabelecer o PSDM. Durante toda a análise, sete componentes diferentes foram monitorados, conforme a tabela 2. A componente deslocamento do tabuleiro representa a soma dos deslocamentos transversal dos encontros e dos aparelhos de apoio. A Figura 9 ilustra o resultado do PSDM e sua comparação, através da regressão linear no espaço logarítmico para o deslocamento do tabuleiro (Deck). A tabela 4 mostra os valores obtidos para as outras componentes.

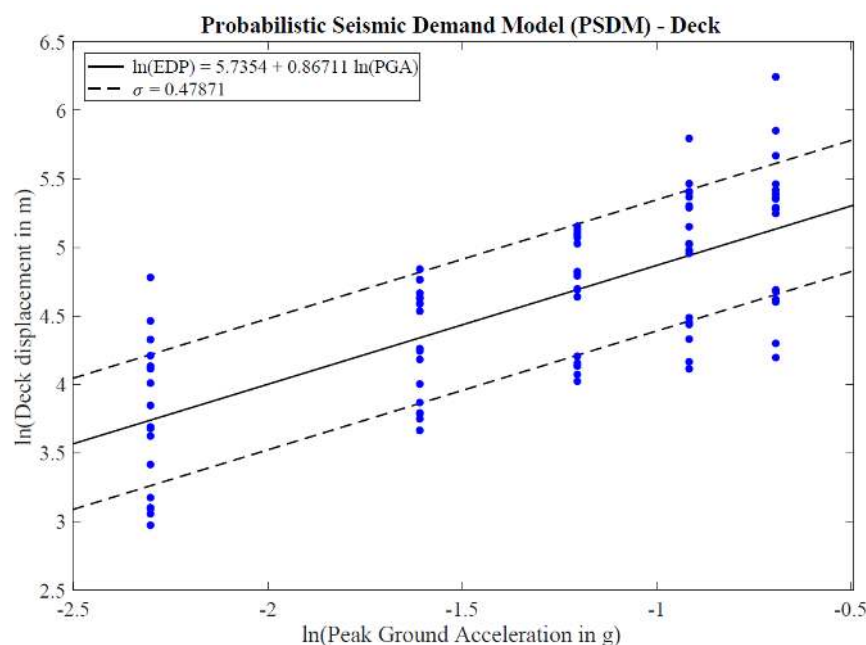


Figura 9 – PSDM do deslocamento do tabuleiro

Tabela 4 – Variáveis aleatórias empregadas pela literatura

| Componente | ln(a) | b | B _{DIM} |
|---|---------|---------|------------------|
| Desloc. do tabuleiro (mm) | 5,7354 | 0,86711 | 0,4787 |
| Curvatura dos pilares (rad/m) | -5,9782 | 0,7491 | 0,4378 |
| Desloc. dos aparelhos de apoio na direção longitudinal (mm) | 4,2805 | 0,2926 | 0,2105 |
| Desloc. dos aparelhos de apoio na direção transversal (mm) | 5,7658 | 0,8790 | 0,4674 |
| Desloc. Ativo dos encontros (mm) | 4,0606 | 0,3354 | 0,5646 |
| Desloc. Passivo dos encontros (mm) | 4,2286 | 0,4081 | 0,4568 |
| Desloc. dos encontros na direção transversal (mm) | 2,6829 | 0,931 | 0,3834 |

4.3 Curvas de Fragilidade

As curvas de fragilidade foram desenvolvidas para a ponte em estudo usando a metodologia descrita anteriormente. A Figura 10 ilustra as curvas de fragilidade de cada componente para todos os estados de dano. Os resultados sugerem que os encontros e

os pilares possuem menor probabilidade condicional da sua respectiva demanda superar sua capacidade estrutural.

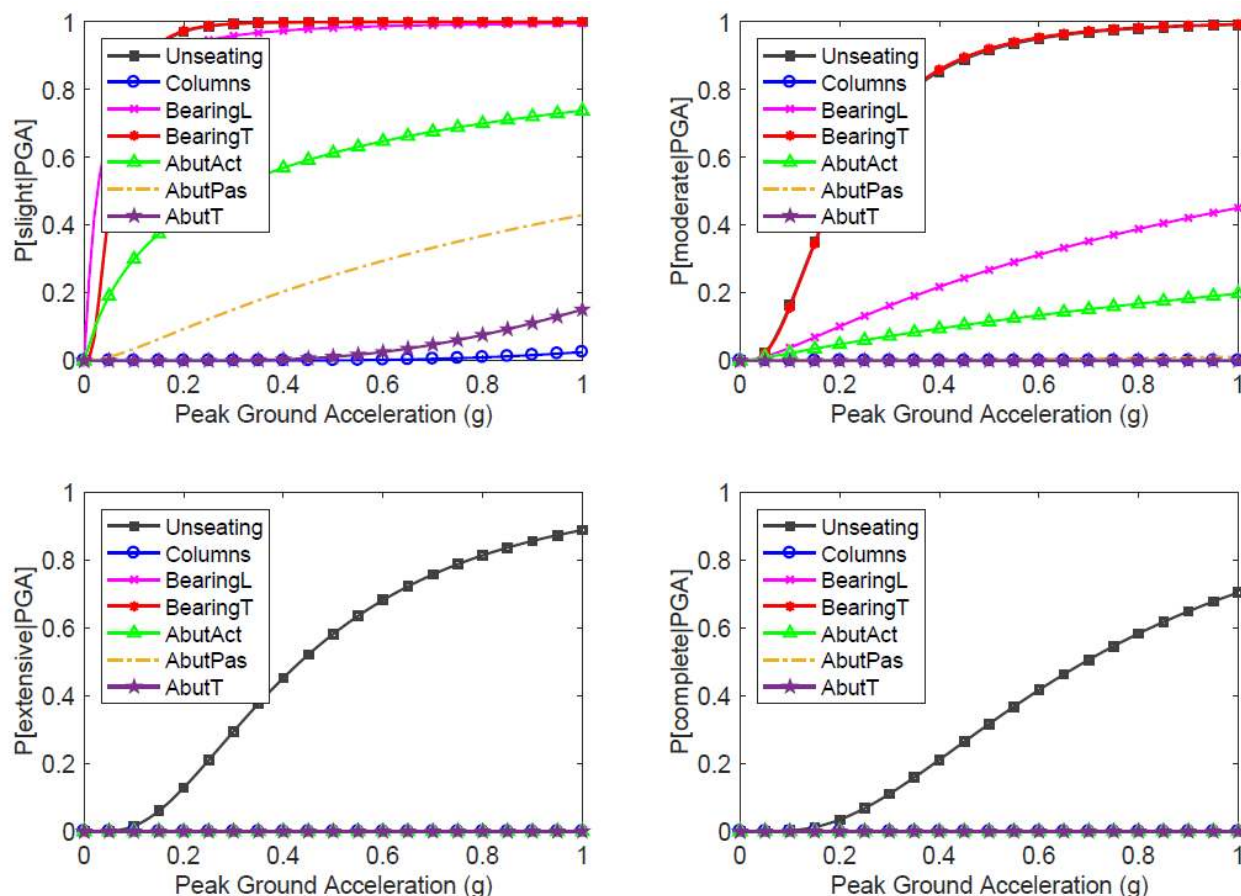


Figura 10 – Curvas de fragilidade de cada componente nos quatro estados limites

Os resultados das curvas de fragilidade apontam que as componentes mais vulneráveis para o estado limite de dano leve (*slight*) são o deslocamento do tabuleiro e o deslocamento longitudinal e transversal dos aparelhos de apoio (*bearings*). Para o estado limite de dano moderado (*moderate*), o deslocamento do tabuleiro e o deslocamento transversal do aparelho de apoio são as componentes mais vulneráveis. No entanto, para os limite de dano extenso (*extensive*) e completo (*complete*), a única componente que se mostra vulnerável é o deslocamento do tabuleiro que a um PGA de 0,5g apresenta aproximadamente 60% e 35% de probabilidade de atingir ou superar o estado de dano extenso e colapso, respectivamente.

5 Conclusão

As curvas de fragilidade são uma ferramenta importante para a análise de risco dessas estruturas e podem ser utilizadas para verificar potenciais perdas durante um evento sísmico na região de estudo. Adicionalmente, esse trabalho pode servir de estudo para métodos de *retrofit* para mitigar os possíveis riscos.

Este trabalho apresentou o desenvolvimento das curvas de fragilidade para uma ponte típica no nordeste do Brasil. O principal objetivo das curvas de fragilidade é descrever a

performance estrutural de um grupo de pontes com atividade sísmica similar. As componentes estudadas neste trabalho foram o tabuleiro, pilares, aparelhos de apoio e encontros. Modelos de demanda foram desenvolvidos através do Modelo Probabilístico de Demanda Sísmica (PSDM). Uma série de análises *Pushover* foram realizadas para desenvolver os modelos de capacidade dos pilares dos pórticos, enquanto as outras componentes foram definidas pela literatura.

Os resultados indicaram que a componente mais vulnerável durante um evento sísmico é o tabuleiro, o que o torna uma componente chave no estudo de vulnerabilidade de pontes similares na região de estudo. Portanto, uma alternativa de minimizar a vulnerabilidade dessas pontes é através da mudança dos sistemas de aparelhos de apoio.

Estudos adicionais são necessários para estimar as potenciais perdas causadas por eventos sísmicos e para avaliar a necessidades de medidas de intervenção, como por exemplo uma medida de *retrofit* ou a substituição do tipo de aparelho de apoio utilizado, para pontes existentes e novos projetos.

6 Referências

ASSUMPTÃO, M.; PIRCHINER, M.; DOURADO, J.; BARROS, L. **Terremotos no Brasil: Preparando-se para eventos raros**. Sociedade Brasileira de Geofísica, Boletim SBGf, n. 96, p. 25–29, 2016.

DUKES, J.; DESROCHES, R.; PADGETT, J. E. **Sensitivity study of design parameters used to develop bridge specific fragility curves**. In: Proc. 15th World Conf. Earthquake Eng. 2012..

PETERSEN, M. D.; HARMSEN, S. C.; JAISWAL, K. S.; RUKSTALES, K. S.; LUCO, N.; HALLER, K. M.; MUELLER, C. S.; SHUMWAY, A. M. **Seismic hazard, risk, and design for south america**. Bulletin of the Seismological Society of America, GeoScienceWorld, v. 108, n. 2, p. 781–800, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos-Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.

NIELSON, B. G. **Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones**. Tese (Doutorado) — Georgia Institute of Technology, 2005.

CORNELL, C. A.; JALAYER, F.; HAMBURGER, R. O.; FOUTCH, D. A. **Probabilistic basis for 2000 sac federal emergency management agency steel moment frame guidelines**. Journal of structural engineering, American Society of Civil Engineers, v. 128, n. 4, p. 526–533, 2002.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **Multi-Hazard loss estimation methodology: earthquake model: HAZUS-MH MR3 Technical Manual**. Washington, DC, 2003.

CODE, PRICE. **Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings.** Brussels, 2005.

NIELSON, G. B.; DESROCHES, R. **Influence of modeling assumptions on the seismic response of multi-span simply supported steel girder bridges in moderate seismic zones.** Engineering Structures, Elsevier, v. 28, p. 1083-1092, 2006.

PADGETT, J. E.; DESROCHES, R. **Sensitiv of seismic response and fragility to parameter uncertainty.** Journal of Structural Engineering, v. 133, n. 12, p. 1710-1718, 2007.

OLIVEIRA, C.; GRECO, M.; BITTENCOURT, T. **Analysis of the brazilian federal bridge inventory.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, SciELO Brasil, v. 12, n. 1, p. 1–3, 2019.

PAHLAVAN, Hossein et al. **Probabilistic vulnerability assessment of horizontally curved multiframe RC box-girder highway bridges.** Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 30, n. 3, p. 04015038, 2016.

CHOI, E.; DESROCHES, R.; NIELSON, B. **Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones.** Engineering Structures, Elsevier, v. 26, n. 2, p. 187–199, 2004.

MANGALATHU, S.; SOLEIMANI, F.; JEON, J.-S. **Bridge classes for regional seismic risk assessment: Improving hazus models.** Engineering Structures, Elsevier, v. 148, p. 755–766, 2017.

VAMVATSIKOS, D.; CORNELL, C. A. **Incremental dynamic analysis.** Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Wiley Online Library, v. 31, n. 3, p. 491–514, 2002.

OPENSEES. 2019. Disponível em:
<https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_User>.