7 Estruturas Submetidas a Sismos Reais e Artificias com Interação Solo-Estrutura

Com a validação da formulação da análise no domínio do tempo no Capítulo 4, e com base no estudo em frequência realizado no Capítulo 5, é mostrado neste capítulo o estudo de três tipos de galpões industriais submetidos a quatro tipos de ações sísmicas: sismos reais, sismos artificiais com potência similar ao sismo real, sismos artificias com potência concentrada nas regiões de ressonância das estruturas e sismos de ação sucessiva. É considerada também neste Capítulo a influência da interação com a base, considerada com comportamento elasto-plástico.

7.1. Solicitações Sísmicas

7.1.1. Solicitações sísmicas reais

As solicitações sísmicas reais usadas nos exemplos da presente seção são os sismos El Centro (Califórnia, 1940) e Kobe (Kobe, 1995). Estes sismos são escolhidos por serem dois sismos com representatividade na área de pesquisa referente a este tema. O sismo El Centro por ser um registro clássico, considerado em inúmeras pesquisas, já o sismo Kobe é um evento mais recente (acontecido em 1995), e que chamou a atenção da comunidade científica pelos impactos negativos causados devido ao registro de grandes acelerações sofridas pelas estruturas e o colapso de diversas estruturas de grande porte. A Figura 7.1 mostra os registros de aceleração das componentes que apresentaram a maior magnitude de aceleração, assim como as respectivas funções densidade de espectro de potência.



Figura 7.1 – Registo de aceleração e FDEP. a) Aceleração do sismo Kobe, componente Leste-Oeste. b) FDEP sismo Kobe. c) Aceleração do sismo El Centro, componente Norte-Sul. d) FDEP sismo El Centro.

Na Figura 7.1 pode-se observada a diferença entre os registros de aceleração dos sismos El Centro e Kobe. No caso do sismo El Centro, a aceleração de pico está em torno de 0.39g, sendo g a aceleração da gravidade, e tendo uma fase intensa de 35 segundos. Já no caso do sismo de Kobe, a aceleração de pico está em torno de 0.5g, com fase intensa claramente concentrada nos primeiros 20 segundos da duração do sismo. Em ambos os casos, a potência sísmica esta concentrada na faixa de frequências de 0 a 40 rad/s. Esta concentração é mais acentuada no caso do sismo Kobe. Estes dados ilustram um dos grandes problemas da análise de estruturas sob uma excitação sísmica; a variabilidade dos sismos e a dificuldade de se definir um sismo de projeto.

7.1.2. Solicitações sísmicas artificiais

Os sismos artificiais são gerados seguindo o algoritmo apresentado no Capítulo 3. Para a presente seção são gerados cinco sismos artificias a partir da FDEP do sismo El Centro, e cinco sismos a partir da FDEP do sismo Kobe, mudando em cada caso o faseamento dos harmônicos. Isto é conseguido com o algoritmo de geração randômica de ângulos de fase descritos no Capítulo 4, Seção 4.4.1, mudando o valor de semente x_0 . Assim, são obtidos cinco conjuntos de ângulos de fase com o algoritmo de geração randômica, considerando cinco valores de semente, a saber: $x_0 = 5$, $x_0 = 10$, $x_0 = 20$, $x_0 = 50$ e $x_0 = 100$. Cabe salientar que todos estes sismos artificiais têm potência sísmica similar ao sismo do qual foram gerados. Os sismos artificias advindos da FDEP do sismo El Centro são nomeados através das seguintes siglas: SAEC1, SAEC2, SAEC3, SAEC4 e SAEC5. As siglas SAKB1, SAKB2, SAKB3, SAKB4 e SAKB5 identificam os sismos artificiais gerados a partir do sismo Kobe. Todos os sismos têm uma duração de 45 segundos e uma fase intensa de 30 segundos que comeca após os 7 segundos iniciais do evento sísmico. Da mesma forma, todos os sismos estão normalizados para terem como aceleração de pico uma amplitude de 0.4g. Nas Figuras 7.2 e 7.3 são mostrados os acelerogramas dos sismos gerados artificialmente.

Todos os acelerogramas correspondem à solicitação horizontal para os exemplos realizados nesta seção. Além disto, em todos os exemplos apresentados no presente Capítulo, é considerada a ação de aceleração vertical igual a 0.667 vezes a aceleração horizontal, como considerado também no Capítulo 5, seguindo a recomendação da norma RNE-E-030 (2007).



Figura 7.2 – Registo de aceleração artificiais gerados a partir do sismo El Centro.



Figura 7.3 – Registo de aceleração artificiais gerados a partir do sismo Kobe.

7.2. Pórtico Plano PT-1

Nesta seção é estudado um pórtico plano. As dimensões da estrutura e propriedades de material são adotadas com base no estudo em frequência realizado no Capítulo 6. O pórtico tem 6.0 metros de altura e vão livre de 10 metros de comprimento, dimensões iguais à estrutura PT-1 analisada no item 6.3.1. (vide Figura 6.11). É considerado comportamento elasto-plástico à rotação na região dos apoios. Este comportamento é simulado através de molas rotacionais elasto-plásticas. A geometria, características de seção e parâmetros

elasto-plásticos dos apoios são mostrados na Figura 7.4. A estrutura estudada nesta seção é identificada com a sigla PT-1



Figura 7.4 – Geometria e parâmetros de pórtico plano PT-1. Parâmetros da mola elasto-plástica: $k_r = 5 * 10^{10} Nm/rad$, $k^{ep} = 0.1 * k_r$, Mp = $10^5 Nm$.

7.2.1. Resposta aos sismos reais

Na Figura 7.5 são apresentadas as respostas no tempo do deslocamento horizontal e aceleração horizontal no meio do vão do pórtico PT-1 (topo da estrutura), quando submetido à ação sísmica real El Kobe (1995), considerando base rígida e com flexibilidade à rotação. Pode-se observar que a resposta que considera flexibilidade da base apresenta picos menores tanto de deslocamento máximo quanto de aceleração máxima, havendo uma redução de 20% no deslocamento máximo, e uma redução de 23% na aceleração máxima. Isto indica que a combinação do efeito de dissipação plástica e de mudança das propriedades em frequência diminui as amplitudes de vibração e aceleração do pórtico.



Figura 7.5 – Resposta de deslocamento e aceleração no centro do vão central. Sismo Kobe (1995).

Na Figura 7.6 são apresentadas as respostas no tempo do deslocamento e aceleração horizontal no topo da estrutura PT-1 quando submetida ao sismo real El Centro (1940). Neste caso, há uma diminuição de aproximadamente 10.5% do deslocamento horizontal máximo quando considerada rotação com comportamento elasto-plástico; já a aceleração máxima tem uma redução de 27%, efeito similar ao obtido no caso do sismo Kobe.



Figura 7.6 – Resposta de deslocamento e aceleração no centro do vão. Sismo El Centro (1940).

Pode ser visto também que o sismo Kobe registra deslocamentos e acelerações horizontais maiores que no caso do Sismo El Centro, sendo o deslocamento horizontal máximo de 0.083m no caso do sismo Kobe e de 0.057m no caso do sismo El Centro. Na Figura 7.7 são mostradas as relações de momento-rotação no apoio direito da estrutura, o qual apresenta as maiores rotações. Pode ser observado que, para ambas as solicitações, há evidência de rotação acumulada.



Figura 7.7 - Relação momento-rotação no apoio elasto-plástico.

7.2.2. Resposta a sismos artificiais com semelhança de potência

Na presente seção é analisada a resposta da estrutura quando submetida a ações sísmicas artificias apresentadas na seção 7.1, as quais possuem o mesmo conteúdo de frequências que os sismos que originaram estas ações artificiais. São considerados os 10 sismos artificiais definidos na seção 7.1. Na Figura 7.8 são apresentadas as respostas de deslocamento e aceleração horizontal para o sismo artificial SAKB1 ($x_0 = 5$). Novamente verifica-se que a consideração de

ü

50

40

176



flexibilidade modifica a resposta da estrutura. Comparando-se com a Figura 7.5, verifica-se que a resposta no tempo é bastante diferente.

Figura 7.8 - Resposta de deslocamento e aceleração horizontal no topo de PT-1. SAKB1.

20

tempo (s)

30

Na Figura 7.9 são apresentadas as respostas no tempo do deslocamento horizontal e aceleração horizontal do topo da estrutura PT-1, considerando como ação sísmica o registro gerado artificialmente SAEC1 ($x_0 = 5$). Comparando-se com a Figura 7.6, verifica-se novamente a grande influência da excitação na resposta no tempo.

0.00

-0.50 -1.00 -1.50 -2.00

0

10



Figura 7.9 – Resposta de deslocamento e aceleração no centro do vão. SAEC1.

A Figura 7.10 mostra a relação momento-rotação no apoio direito (apoio que registrou as máximas rotações). A resposta obtida com o sismo artificial SAEC1 tem uma configuração diferente da resposta obtida com o sismo SAKB1. Enquanto a resposta obtida com SAEC1 tem uma configuração simétrica com respeito à configuração indeformada, a resposta obtida com SAKB1 concentra as deformações rotacionais no lado da rotação negativa. No entanto, ambas as respostas registram uma deformação máxima próxima em ordem de grandeza, sendo de 0.22mrad no caso de SAEC1 e de 0.25mrad no caso do sismo SAKB1. Este processo de plastificação é o responsável pela diminuição das vibrações em virtude da energia dissipada em cada ciclo.



Figura 7.10 - Relação momento rotação no apoio elasto-plástico.

Na Tabela 7-1, são apresentados os valores do deslocamento horizontal máximo e aceleração horizontal máxima na seção central de PT-1, para os sismos El Centro e os cinco sismos artificiais gerados a partir deste. Para os sismos artificias gerados, o deslocamento horizontal máximo varia de 0.0572m a 0.0755m no caso de apoios rígidos e entre 0.057m e 0.063m para apoios elastoplásticos. Ambos os valores máximos ocorrem para o sismo artificial SAEC2, sendo 19.8% (apoios rígidos) e 12.7% (apoios elasto-plásticos) maior que os obtidos para o sismo real El Centro. Já no caso das acelerações máximas, nota-se

uma variabilidade maior, com valores de 0.43 a 1.40 vezes a aceleração da gravidade, para o caso de apoios rígidos e de 0.43 a 1.23 vezes a aceleração da gravidade para o caso de apoios flexíveis. As maiores acelerações máximas são registradas, para ambas as condições de apoios, para o sismo artificial SAEC-2, similar ao caso dos deslocamentos. No caso das acelerações, a comparação com a resposta ao sismo real registra uma variação maior que no caso dos deslocamentos, sendo 2.3 vezes para as condições de apoio rígido e 2.85 vezes para apoio flexível. Este comportamento mostra a grande influência no faseamento das frequências presentes em um sismo. Sismos com potência similar podem gerar respostas máximas distintas, apenas mudando o faseamento das frequências. Ou seja, sismos com o mesmo conteúdo de frequências podem levar a respostas completamente distintas, o que enfatiza a dificuldade de definir um sismo de projeto.

Sismo	Deslocamento Horizontal Máximo (m)		Aceleração Horizontal Máxima (g)		Amplificação em Aceleração (g/g)	
	Rígido	Elasto- Plástico	Rígido	Elasto- Plástico	Rígido	Elasto- Plástico
El Centro	0.063	0.055	0.6	0.43	1.50	1.08
SAEC1	0.0575	0.0501	1.06	1.06	2.65	2.65
SAEC2	0.0755	0.6274	1.40	1.23	3.50	3.08
SAEC3	0.0573	0.0571	0.43	0.44	1.08	1.10
SAEC4	0.0628	0.0577	0.54	1.08	1.35	2.70
SAEC5	0.0572	0.0573	1.07	1.07	2.68	2.68

 Tabela 7-1. Deslocamento e aceleração máxima no topo de PT-1 obtidos com o sismo real e artificiais a partir de El Centro

Na Tabela 7-2 são apresentados os valores do deslocamento horizontal máximo e aceleração horizontal máxima obtidos da análise do sismo Kobe e dos cinco sismos artificiais gerados a partir deste. Para os sismos artificias, o deslocamento horizontal máximo varia de 0.075m a 0.101m no caso de apoios rígidos, e de 0.075m a 0.097m para apoios rotacionais elasto-plásticos. Ambos os

valores máximos são registrados para o sismo artificial SAKB1. Já as acelerações máximas estão no intervalo de 1.29g a 1.85g, para o caso de apoios rígidos, e de 0.92g a 1.75g para o caso de apoios flexíveis. Um detalhe a salientar é que estes valores são maiores que os registrados a partir do sismo El Centro, mostrando desta forma que a composição de frequências presentes no sismo Kobe, resulta mais desfavorável para a estrutura.

Sismo	Deslocament	o Horizontal	Aceleração Horizontal		Amplificação em	
	Máximo (m)		Máxima (g)		Aceleração (g/g)	
	Díaide	Elasto-	Pígido	Elasto-	Rígido	Elasto-
	Kigiuo	Plástico	Kigiuo	Plástico		Plástico
Kobe	0.088	0.078	1.29	0.93	2.580	1.860
SAKB1	0.101	0.097	1.85	1.75	3.700	3.500
SAKB2	0.075	0.0754	1.23	0.92	2.450	1.840
SAKB3	0.101	0.0921	1.72	1.90	3.448	3.800
SAKB4	0.095	0.093	1.66	1.75	3.320	3.700
SAKB5	0.092	0.0931	1.87	1.8	3.740	3.600

Tabela 7-2. Deslocamento e aceleração máxima no topo de PT-1 obtidos com o sismo real e artificiais a partir do registro de Kobe

7.2.3.

Resposta a sismo artificial com potência concentrada nas regiões de ressonância

Nesta seção é estudada a resposta do sistema PT-1 considerando sismos artificias gerados a partir de um espectro que tenha picos de maior potência concentrados nas regiões das frequências naturais de vibração, com o objetivo de estudar a influência do conteúdo de frequências de um sismo quando estas estão próximas às frequências de vibração da estrutura.

7.2.3.1. Obtenção do espectro de potência

O espectro de potência com concentração de maior intensidade nas regiões de ressonância é obtido a partir da modificação e combinação dos espectros de potência dos sismos reais El Centro e Kobe. São consideradas as duas primeiras frequências de vibração da estrutura para a determinação das regiões onde será concentrada a maior potência do sismo. Para a obtenção deste espectro segue-se o seguinte processo:

- A. Concentração na região da primeira frequência de vibração: É feita a modificação do espectro de potência dos sismos El Centro e Kobe, deslocando os valores de potência sobre o eixo das frequências para que o pico de potência máximo coincida com a primeira frequência de vibração do pórtico PT-1. O ponto de maior potência do sismo El Centro corresponde a um valor de frequência de 12.87rad/s e, no caso do sismo Kobe, o pico de maior potência corresponde a um valor de frequência de 9.19rad/s (ver Figura 7.1), sendo a primeira frequência natural do Pórtico PT-1 igual a 25.63rad/s. (ver Figura 7.4). Este deslocamento do ponto máximo deixa um espaço em branco nos espectros de potência na faixa de valores de 0rad/s a 12.76 rad/s no sismo El Centro e de 0rad/s a 15.84rad/s no caso do sismo Kobe.
- B. Preenchimento do espectro modificado: Os espaços em branco nos espectros modificados, produto do processo de modificação do passo A, são substituídos com os valores de espectro de potência correspondentes às faixas de valores 40-52.76rad/s no sismo El Centro e 40-55.84rad/s no caso do sismo Kobe.
- C. Concentração de potência na região da segunda frequência natural: Com os espectros modificados, após os passos A e B, é feita a concentração de potência na região da segunda frequência natural do pórtico PT-1, que tem um valor de 57.24rad/s. Para isto é substituída a faixa de valores dos espectros já modificados após os passos A e B na faixa de valores de frequência de 52.24-62.24rad/s com os valores de frequência localizados na faixa de 21.63-31.63rad/s dos espectros modificados após os passos A e B, multiplicados por um fator de 0.66 já que este valor de frequência natural corresponde a um modo de vibração com predominância de vibração vertical da estrutura. Desta forma são modificados os espectros de potência de El Centro e Kobe, com potências concentradas nas duas primeiras frequências naturais de vibração do pórtico PT-1.

D. Combinação de espectros modificados e normalização: O último passo é a combinação dos espectros, esta combinação é feita superpondo os valores de potência de ambos os espectros modificados após o passo C com os valores de potência divididos pela metade. Finalmente é feita a normalização do espectro para ter um pico de potência máxima de 0.4 m/s².

Na Figura 7.11 é mostrado o espectro de potência obtido com o processo anteriormente descrito e a curva de ressonância da vibração horizontal do topo de PT-1 quando submetido a uma aceleração harmônica de base com componente horizontal e vertical. Verifica-se a coincidência dos picos do espectro de potência com as duas primeiras regiões de ressonância.



Figura 7.11 – Superior: FDEP com concentração de potência nas regiões de ressonância. Inferior: Amplitude de vibração horizontal no topo de PT-1 sob aceleração harmônica com componente horizontal e vertical.

7.2.3.2. Resposta a sismos artificias com potência concentrada na ressonância

São gerados cinco registros de aceleração artificias usando o espectro de potência obtido na seção anterior (Figura 7.11) e os cinco grupos de ângulos de fase obtidos na seção 7.1.2. Os sismos são identificados com as siglas SAPCP1, SAPCP2, SAPCP3, SAPCP4 e SAPCP5. Estes cinco sismos são normalizados para terem uma aceleração máxima de 0.4g, similar aos sismos obtidos a partir da potência dos sismos reais El Centro e Kobe. Na Figura 7.12 é mostrado o registro de aceleração do sismo gerado artificialmente SAPCP1.



Figura7.12 – Aceleração do sismo SAPCP1.

Na Figura 7.13 é mostrada a resposta no tempo do deslocamento e aceleração horizontal do topo da estrutura PT-1 submetido ao sismo SAPCP1. É registrado um deslocamento horizontal máximo de 0.133m e uma aceleração máxima de 2.12g. Tanto os deslocamentos horizontais quanto as acelerações horizontais registram valores máximos superiores aos obtidos quando considerados os sismos reais El Centro, Kobe e os sismos artificias gerados a partir destes, onde o maior valor de deslocamento registrado corresponde a um valor de 0.097m no sismo artificial SAKB1.

Na Tabela 7-3 são mostrados os valores máximos de deslocamento e aceleração máximos para cada sinal, onde pode ser observado que o sismo

SAPCP1 registra os maiores valores de aceleração máxima e deslocamento máximos. Há uma menor variabilidade nas acelerações máximas que nos exemplos anteriores (Tabelas 7-1 e 7-2). Isto indica que, neste caso, a mudança de faseamento tem menor impacto que no caso dos sismos artificias gerados a partir do sismo Kobe e El Centro.



Figura 7.13 – Deslocamento e aceleração horizontal do topo de PT-1 submetido ao sismo artificial SAPCP1.

	Deslocamento	Aceleração Horizontal	Amplificação em
Sismo	Horizontal Máximo (m)	Máxima (g)	Aceleração (g/g)
	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico
SAPCP1	0.1328	2.12	5.3
SAPCP2	0.1169	2.07	5.1
SAPCP3	0.1112	2.01	5.0
SACPC4	0.1104	1.98	4.9
SAPCP5	0.1143	2.07	5.1

Tabela 7-3. Deslocamento e aceleração máxima no topo de PT-1

7.3. Galpão com duas águas:

Nesta seção é estudado um galpão com cobertura a duas águas. As dimensões e propriedades de material são adotadas com base no estudo em frequência realizado no Capítulo 6. O galpão tem pilares de 6.0 metros de altura e vão livre de 10 metros de comprimento, dimensões iguais à estrutura PT-1 e à analisada no item 6.3.1. A altura da cobertura do galpão é fixada em 3 metros (vide Figura 6.11), com base no fato desta geometria apresentar a maior relação $|A_x|_{NL}/|A_x|_L$, sendo $|A_x|_{NL}$ a amplitude de vibração horizontal não linear e $|A_x|_L$ a amplitude de vibração horizontal linear, ambas obtidas na região da primeira frequência de ressonância (modo de deformação lateral), considerando excitação de base horizontal e vertical simultânea (vide Figura 6.16). Adicionalmente, são considerados apoios com molas rotacionais elasto-plásticas, como mostrado na Figura 7.14. A estrutura estudada nesta seção é identificada com a sigla GPD-1.



Figura 7.14 – Geometria e propriedades de galpão a duas águas GPD-1. Parâmetros da mola elasto-plástica: $k_r = 5 * 10^{10} Nm/rad$, $k^{ep} = 0.1 * k_r$, Mp = $10^5 Nm$.

7.3.1. Resposta a sismos reais

Nesta seção é analisada a resposta da estrutura GPD-1 quando submetida a ação dos sismos reais El Centro e Kobe. Na Figura 7.15 é mostrada a variação do deslocamento horizontal do topo da estrutura quando submetido aos sismos El Centro e Kobe. Pode ser observado que o sismo Kobe registra um deslocamento máximo de 0.091m maior que do sismo El Centro, onde o deslocamento horizontal máximo está em torno de 0.0534m, efeito similar ao encontrado para o pórtico PT-1. Neste caso, a diferença entre as respostas dos sismos é maior que no caso do pórtico PT-1, sendo a resposta para Kobe 41% maior do que para o El Centro. Esta diferença é de 28% no caso do pórtico PT-1.



Figura 7.15 – Deslocamento horizontal do meio do vão (topo da estrutura).

Na Figura 7.16 é apresentada a relação momento-rotação no apoio direito, que registrou a maior rotação em ambos os casos. Pode-se notar que o sismo El Centro, leva a uma maior rotação permanente acumulada que o sismo Kobe. No entanto, estas rotações acumuladas permanentes não são refletidas em um deslocamento residual importante, como pode ser notado na Figura 7.15, onde pode ser visto que o deslocamento tende a zero após o término dos sismos.



Figura 7.16 -. Relação momento-rotação no apoio elasto-plástico.

7.3.2. Resposta a sismos artificiais com semelhança de potência

Na presente seção é analisada a resposta da estrutura submetida aos 10 sismos artificias apresentadas na seção 7.1. Na Figura 7.17 é mostrada a variação do deslocamento horizontal do topo da estrutura, quando submetida aos sismos artificiais SAEC1 e SAKB1. Em ambos os casos são registrados menores deslocamentos máximos que nos seus respectivos sismos de origem. Registra-se um deslocamento máximo de 0.056m para SAKB1, superior ao registrado para SAEC1, que é de 0.043m.



Figura 7.17 – Deslocamento horizontal no meio do vão central.

A Figura 7.18 mostra a relação momento-rotação na base. Pode ser observado que o sismo SAEC1 registra maior acumulação de rotação permanente que o sismo SAKB41. Similar aos sismos de origem, este acúmulo de rotação residual não tem efeito significativo nos deslocamentos finais.



Figura 7.18 - Relação momento rotação no apoio elasto-plástico.

Na Tabela 7-4 é apresentado um resumo dos deslocamentos e acelerações máximas no topo da estrutura GPD-1, considerando o sismo El Centro e os cinco sismos artificiais gerados a partir deste. Os deslocamentos máximos relativos aos sismos artificiais não superam em magnitude o deslocamento máximo registrado com o sismo real, sendo o deslocamento máximo registrado no sismo SAEC1 de 0.0426m e no real de 0.0534m. Já no caso das acelerações máximas, as acelerações obtidas com todos os sismos artificias são maiores que a registrada para o sismo real. O valor máximo de aceleração ocorre para o sismo SAEC1, com uma magnitude de 0.80g, duas vezes maior a registrada para o sismo real El Centro, onde a aceleração máxima é de 0.40g. A amplificação máxima de aceleração é de 2.0, sendo menor que no caso da estrutura PT-1, onde é de 3.08.

	Deslocamento	Aceleração Horizontal	Amplificação em
Sismo	Horizontal Máximo (m)	Máxima (g)	Aceleração (g/g)
	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico
El Centro	0.0534	0.40	1.00
SAEC1	0.0426	0.80	2.00
SAEC2	0.0371	0.38	0.95
SAEC3	0.0322	0.37	0.93
SAEC4	0.0311	0.80	2.00
SAEC5	0.0341	0.73	1.83

Tabela 7-4. Deslocamento e aceleração máxima no topo de GPD-1 obtidos com o sismo real e sismos artificiais a partir do sismo El Centro

Na Tabela 7-5 é apresentado um resumo dos deslocamentos e acelerações máximas no topo da estrutura GPD-1 considerando o sismo Kobe e os cinco sismos artificiais gerados a partir deste. Os deslocamentos máximos dos sismos artificiais não chegam a superar em magnitude o deslocamento máximo registrado com o sismo real. Como nos sismos gerados a partir do El Centro, o maior deslocamento máximo registrado nos sismos artificiais é de 0.056m para o SAKB1, inferior aos 0.073m obtidos para o sismo real. As acelerações máximas obtidas com todos os sismos artificias são maiores que as registrada para o sismo real. O maior valor de aceleração registrado no sismo SAEC1 e tem magnitude de 0.82g. Já a aceleração máxima registrada no sismo real é de 0.56g. Tem-se assim uma amplificação máxima de aceleração de 2.05g, e, similar ao sismo El Centro, esta é menor que a registrada na estrutura PT-1, onde é atingida uma amplificação de 3.50g. Fica evidenciada mais uma vez a influência do faseamento dos harmônicos na magnitude dos deslocamentos e acelerações máximas.

	Deslocamento	Aceleração Horizontal	Amplificação em
Sismo	Horizontal Máximo (m)	Máxima (g)	Aceleração (g/g)
	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico
Kobe*	0.073	0.56	1.40
SAKB1	0.056	0.82	2.05
SAKB2	0.054	0.59	1.48
SAKB3	0.053	0.59	1.48
SAKB4	0.054	0.74	1.85
SAKB5	0.048	0.80	2.00

Tabela 7-5. Deslocamento e aceleração máxima no topo de GPD-1 obtidos com o sismo real e sismos artificiais a partir do sismo Kobe

* Normalizado a uma aceleração máxima de 0.4 g

7.3.3. Resposta a sismos artificiais com potência concentrada nas regiões de ressonância

Nesta seção é estudada a resposta do sistema GPD-1 considerando sismos artificias gerados a partir de um espectro que tenha picos de maior potência concentrados nas regiões das duas primeiras frequências naturais de vibração com o objetivo de avaliar a influência do conteúdo de frequências presentes no sismo.

Na Figura 7.19 é mostrado o espectro de potência com regiões de concentração de potência juntamente com a curva de ressonância da GPD-1, onde pode ser verificada a coincidência dos picos de máxima potência do espectro de potência com as duas primeiras regiões de ressonância.



Figura 7.19 – Superior: FDEP com concentração de potência nas regiões de ressonância. Inferior: Amplitude de vibração horizontal no topo de PT-1 sob carga harmônica com aceleração horizontal e vertical.

São gerados cinco registros de aceleração artificias usando o espectro de potência mostrado na Figura 7.20 e os cinco grupos de ângulos de fase obtidos na seção 7.1.2. Os sismos são identificados pelas siglas SAPCG1, SAPCG2, SAPCG3, SAPCG4 e SAPCG5. Como nos casos anteriores, estes cinco sismos são normalizados para terem uma aceleração máxima de 0.4g. Na Figura 7.20 é mostrado o registro de aceleração do sismo SAPCG1.



Figura 7.20 - Aceleração do sismo SAPCG1.

Na Figura 7.21 é mostrada a resposta no tempo do deslocamento e aceleração horizontal do topo da estrutura GPD-1 submetido ao sismo SAPCG1, sendo possível notar um deslocamento horizontal máximo de 0.126m e uma aceleração máxima de 1.39g. Tanto os deslocamentos horizontais quanto as acelerações horizontais registram valores máximos superiores aos obtidos quando considerados os sismos reais El Centro, Kobe e os sismos artificias gerados a partir destes, onde o maior valor de deslocamento registrado corresponde a um valor de 0.056m no sismo artificial SAKB1.



Figura 7.21 – Deslocamento e aceleração horizontal do topo de GPD-1 submetido ao sismo artificial SAPCP1.

Na Tabela 7-6 são mostrados os valores máximos de deslocamento e aceleração para este caso. Pode ser observado que o sismo SAPCG1 registra o maior valor de deslocamento máximo; já a maior aceleração é registrada para o sismo SAPCG2, com um valor de 1.88g. É importante salientar que, similar ao pórtico PT-1, há um aumento significativo de aceleração e deslocamento máximo quando se compara com os calculados para os sismos El Centro, Kobe e os sismos

artificias gerados a partir destes, onde o maior deslocamento registrado foi de 0.056m no sismo SAKB1 e aceleração de 0.81g no mesmo sismo.

	Deslocamento	Aceleração Horizontal	Amplificação em
Sismo	Horizontal Máximo (m)	Máxima (g)	Aceleração (g/g)
	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico
SAPCG1	0.1256	1.40	3.5
SAPCG2	0.1238	1.34	3.35
SAPCG3	0.0989	1.02	2.55
SACPG4	0.1090	1.26	3.15
SAPCG5	0.1182	1.88	4.7

Tabela 7-6. Deslocamento e aceleração máxima no topo de GPD-1 obtidos com potências concentradas

A partir das Tabelas 7-1, 7-2, 7-4 e 7-5 pode-se observar a importância da distribuição de frequências em um evento sísmico. Esta importância é ainda mais evidenciada observando as Tabelas 7-3 e 7-6, onde as respostas de deslocamento e aceleração em ambos os casos são maiores que as mostradas nas Tabelas 7-1, 7-2 e 7-4, 7-5, respectivamente. O procedimento proposto neste Capítulo para gerar um sismo de projeto resguarda o caráter aleatório do evento e as características dos sismos disponíveis para um dado sítio, mas leva em conta o espectro de frequências da estrutura, sendo, pois, a favor da segurança. Este processo, acompanhado de um estudo estatístico, pode ser, portanto, adotado como uma metodologia de projeto segura.

7.4. Galpão Cobertura em Arco

Nesta seção é estudada uma estrutura de pórtico galpão com cobertura em arco circular. As dimensões dos pilares e do vão livre são iguais às das estruturas PT-1 e GPD-1, como mostra a Figura 7.22. A altura da cobertura do galpão é fixada em 3.0 m, que apresenta maior relação $|A_x|_{NL}/|A_x|_L$ monitoradas na região da primeira frequência de ressonância no estudo em frequência realizado na seção 6.3.2.3 (vide Figura 6.22). Adicionalmente são considerados apoios com molas rotacionais elasto-plásticas, como mostrado na Figura 7.22. A estrutura é identificada com a sigla GPA-1.



Figura 7.22 – Geometria e parâmetros de galpão a duas águas GPA-1. Parâmetros da mola elasto-plástica: $k_r = 5 * 10^{10} Nm/rad$, $k^{ep} = 0.1 * k_r Mp = 10^5 Nm$.

7.4.1. Respostas máximas em sismos reais e artificias gerados a partir de potências dos sismos reais

Na Tabela 7-7 é apresentado o resumo dos deslocamentos e acelerações máximas no topo da estrutura GPA-1, registradas considerando o sismo Kobe e os cinco sismos artificiais gerados a partir deste.

Deslocamento Amplificação em Aceleração Horizontal Horizontal Máximo (m) Máxima (g) Aceleração (g/g) Sismo Elasto-Plástico Elasto-Plástico Elasto-Plástico 0.087 0.88 1.58 Kobe* 0.065 0.63 1.43 SAKB1 0.57 1.28 SAKB2 0.065 0.058 0.51 1.35 SAKB3 0.061 0.54 1.28 SAKB4 0.055 0.51 1.58 SAKB5

Tabela 7-7. Deslocamento e aceleração máxima no topo de GPA-1 obtidos com sismos reais e artificiais a partir do sismo Kobe

* Normalizado a uma aceleração máxima de 0.4 g

Finalmente, na Tabela 7-8 é apresentado o resumo dos deslocamentos e acelerações máximas no topo da estrutura GPA-1, registradas considerando o sismo El Centro e os cinco sismos artificiais gerados a partir deste.

Sismo	Deslocamento Horizontal Máximo (m)	Aceleração Horizontal Máxima (g)	Amplificação em Aceleração (g/g)
	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico
El Centro	0.0673	1.06	2.65
SAEC1	0.0581	0.57	1.43
SAEC2	0.0489	0.47	1.18
SAEC3	0.0392	0.43	1.08
SAEC4	0.0401	0.43	1.08
SAEC5	0.0489	0.44	1.10

Tabela 7-8. Deslocamento e aceleração máxima no topo de GPA-1 obtidos com o sismo real e artificiais a partir do sismo El Centro

Nas Tabelas 7-7 e 7-8 pode-se notar que o galpão em arco registra maiores deslocamentos horizontais máximos e maiores acelerações máximas que os registrados para o galpão em duas águas GPD-1, tendo ambos a mesma altura de cobertura e sendo submetidos às mesmas solicitações sísmicas, mostrando assim a influência da geometria da cobertura na resposta da estrutura.

7.4.2.

Resposta a sismos artificiais com potência concentrada nas regiões de ressonância.

Nesta seção é estudada a resposta do sistema GPA-1 considerando sismos com picos de maior potência concentrados nas regiões das duas primeiras frequências naturais frequências naturais de vibração. Na Figura 7.23 é mostrado o espectro de potência obtido para este caso.



Figura 7.23 – Superior: FDEP com concentração de potência nas regiões de ressonância.

São gerados cinco registros identificados com as siglas SAPCGA1, SAPCGA2, SAPCGA3, SAPCGA4 e, SAPCGA5 adotando os cinco grupos de ângulos de fase obtidos na seção 7.1.2. Os sismos são normalizados para terem uma aceleração máxima de 0.4g. Na Tabela 7-9 são mostrados os valores máximos de deslocamento e aceleração registrados nos sismos artificias mencionados. Pode-se notar que o sismo SAPGA1 provoca os valores máximos de deslocamento horizontal e aceleração horizontal com valores de 0.15m e 1.78g, respectivamente.

Tabela 7-9. Deslocamento e aceleração máxima no topo de GPD-1 obtidos com potências concentradas

Sismo	Deslocamento Horizontal Máximo (m)	Aceleração Horizontal Máxima (g)	Amplificação em Aceleração (g/g)
	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico
SAPCGA1	0.151	1.78	4.45
SAPCGA2	0.144	1.70	4.25
SAPCGA3	0.119	1.75	4.38
SACPGA4	0.145	1.72	4.30
SAPCGA5	0.131	1.74	4.35

Cabe salientar que esta estrutura experimenta maiores deslocamentos horizontais se comparados com as respostas obtidas para o galpão GPD-1, sendo

que as estruturas são diferenciadas apenas na configuração geométrica da cobertura.

7.4.3. Resposta a ações sísmicas múltiplas

Eventos sísmicos sucessivos têm sido registrados com frequência. Isto leva muitas vezes ao colapso da estrutura em virtude de danos acumulados. Na presente seção é estudada a resposta do galpão GPA-1 quando submetido à ação de sismos que acontecem de forma sucessiva. O segundo evento sísmico tem início após a estabilização da resposta do primeiro evento sísmico. Adicionalmente é considerada uma redução da rigidez elasto-plástica da rotação nos apoios para aumentar o efeito de deslocamentos residuais. Portanto, nos exemplos realizados nesta seção é considerado k^{ep} = 0.001 * k_r.

Na Figura 7.24 é apresentada a variação do deslocamento horizontal no topo do galpão GPA-1 quando submetido à repetição dos sismos El Centro e Kobe. Pode ser observado que o sismo Kobe registra um deslocamento residual de 0.0009m, maior que o registrado para o sismo El Centro, que é 0.0002m no fim do primeiro evento sísmico. Em ambos os casos, o segundo evento sísmico registra uma diminuição do deslocamento horizontal residual após o término do evento sísmico, indicando uma acumulação de deformação plástica de sinal contrário ao da deformação acumulada no primeiro evento.



Figura 7.24 – Deslocamento horizontal no meio do no topo de GPA-1, com sismo replicado.

No caso da repetição do sismo El Centro, nota-se que o deslocamento horizontal máximo registrado no segundo evento tem um valor de 0.059m ligeiramente maior ao registrado no primeiro evento, o qual tem um valor de 0.057m. No caso da repetição do sismo Kobe, o segundo evento também registra um aumento do valor do deslocamento máximo, sendo de 0.089m no primeiro evento e de 0.097m no segundo. Já no caso das acelerações horizontais máximas, na repetição do sismo El Centro, as acelerações máximas registram valores muito próximos nos dois eventos, sendo de 0.965g a aceleração máxima do primeiro evento sísmico, e de 0.967g no segundo. No caso da repetição do sismo Kobe, há uma diminuição da aceleração máxima, sendo de 1.067g no primeiro evento, e de 0.896g no segundo.

Na Figura 7.25 são mostrados os deslocamentos horizontais no topo da estrutura GPA-1 considerando a ocorrência sucessiva dos sismos El Centro e Kobe. É considerada também alternância na ordem de ocorrência dos sismos, ou seja, para um caso, o sismo Kobe é sucedido pelo sismo El Centro, e vice-versa para o segundo caso.



Figura 7.25 – Deslocamento horizontal no meio do no topo de GPA-1, sismos sucessivos alternados.

Em ambos os casos, a sucessão de sismos produz um aumento do deslocamento residual acumulado do primeiro para o segundo evento sísmico, sendo a ocorrência com ordem El Centro – Kobe a que registra o maior aumento; de 0.0022m no fim do primeiro evento para 0.0141m no final do segundo evento sísmico.

No caso do sismo El Centro sucedido pelo sismo Kobe, é observado que há um aumento do deslocamento horizontal máximo no segundo evento, passando de um valor de 0.057m no primeiro evento para um valor de 0.086m no segundo. No caso do sismo Kobe sucedido do sismo El Centro, nota-se que há uma diminuição do valor do deslocamento máximo de 0.089m no primeiro evento para 0.066m no segundo. A aceleração horizontal máxima no caso da sucessão de sismos El Centro – Kobe registra um importante aumento de 0.965g no primeiro evento para 1.98g no segundo. No caso da sucessão de sismos Kobe - El Centro a aceleração máxima registra uma leve diminuição de 1.07g no primeiro evento, para 0.98g no segundo.

Verifica-se que o estudo de sismos sucessivos é importante no caso de acúmulo de danos, podendo levar a um colapso progressivo da estrutura.