

5 ANÁLISE NUMÉRICA DE UM EDIFÍCIO TIPO *SHEAR BUILDING*

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma análise paramétrica detalhada com o objetivo de analisar a influência do amortecedor magnetoreológico nas vibrações de um edifício simples (*shear building*) sujeito a movimento de base gerado por forças harmônicas ou por sismos.

5.2. CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO.

Para a análise paramétrica adota-se um modelo de edifício com três andares mostrado na Figura 5.1. O amortecedor está inicialmente localizado no primeiro andar do edifício.

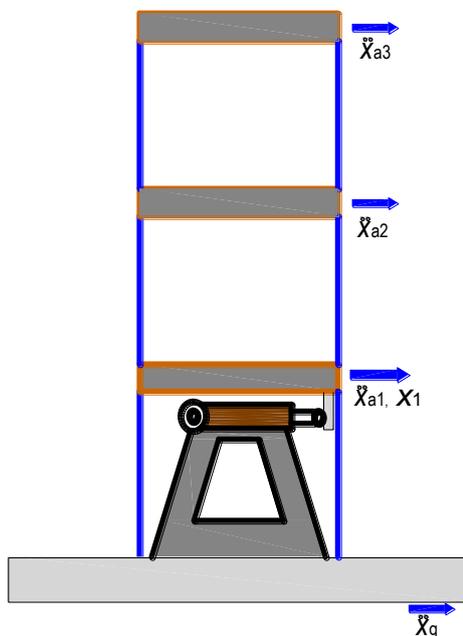


Figura 5.1 Modelo de pórtico plano com amortecedor MR. Spencer et al, (1996)

As matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura são respectivamente:

$$M = \begin{bmatrix} 98.3 & 0 & 0 \\ 0 & 98.3 & 0 \\ 0 & 0 & 98.3 \end{bmatrix} Kg \quad (5.1)$$

$$C = \begin{bmatrix} 175 & -50 & 0 \\ -50 & 100 & -50 \\ 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \frac{N \cdot s}{m} \quad (5.2)$$

$$K = 10^5 \begin{bmatrix} 12.0 & -6.84 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix} \frac{N}{m} \quad (5.3)$$

Estes dados correspondem a um pórtico estudado experimentalmente por Spencer et al, (1996), com o objetivo de analisar a eficiência de um amortecedor MR no controle de vibrações. No presente exemplo são também usados para o amortecedor MR os parâmetros obtidos experimentalmente por Spencer et al, (1996), a saber:

$$c_0 = 21N \cdot s/cm, \quad k_0 = 46.9N/cm, \quad x_0 = 14.3 \text{ cm}, \quad \alpha = 140N/cm, \\ \gamma = 363 \text{ cm}^{-2}, \quad \beta = 363 \text{ cm}^{-2}, \quad \gamma = 363 \text{ cm}^{-2}, \quad A = 301, \quad n = 2.$$

Estes parâmetros foram obtidos com o amortecedor MR submetido a uma voltagem de 1.5 V e a uma frequência de excitação de 2.5 Hz.

Estas características do amortecedor são compatíveis com as dimensões e dados do edifício. Este exemplo foi posteriormente usado em outros trabalhos sobre controle de vibrações de edifícios sob excitação sísmica. (Zhou et al, 2003; (Kim et al. 2009) e (Medina et al. 2008)

Considerando o problema de autovalor associado, $|K - \omega^2 M| = 0$, obtêm-se as frequências naturais e modos de vibração do edifício. As três frequências naturais são, respectivamente, 34.18rad/s (5.42 Hz), 99.33rad/s (15.81Hz) e 148.48rad/s (23.63 Hz). Os respectivos modos de vibração são ilustrados na Figura 5.2.

5.2.1. ESTRUTURA SOB UMA EXCITAÇÃO HARMÔNICA DE BASE

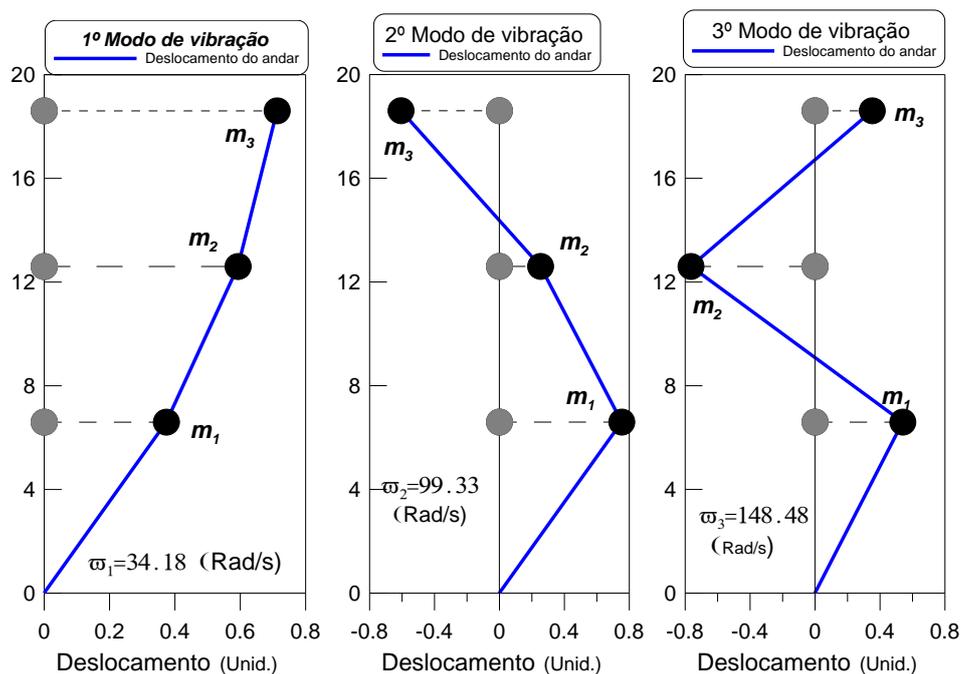


Figura 5.2 Frequências naturais e modos de vibração do edifício.

Considera-se inicialmente uma excitação de base harmônica (\ddot{x}_g), com magnitude de $0.3g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$), dada por:

$$f := \begin{bmatrix} 9.83 & 0 & 0 \\ 0 & 9.83 & 0 \\ 0 & 0 & 9.83 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -0.3g \sin(\Omega t) \\ -0.3g \sin(\Omega t) \\ -0.3g \sin(\Omega t) \end{Bmatrix} N \quad (5.4)$$

onde $\Omega = 34 \text{ rad/s}$, é a frequência de excitação da força. Tem-se, pois, que a excitação está na região de ressonância associada à primeira frequência de vibração, o que corresponde ao pior caso em termos dos deslocamentos e acelerações máximas.

Para o controle de vibrações na estrutura, é considerado um amortecedor MR conectando ao primeiro andar, como mostra a Figura 5.1. A força gerada pelo amortecedor MR é obtida a partir das equações (2.3) e (2.6), e sua variação no tempo é ilustrada na Figura 5.3.

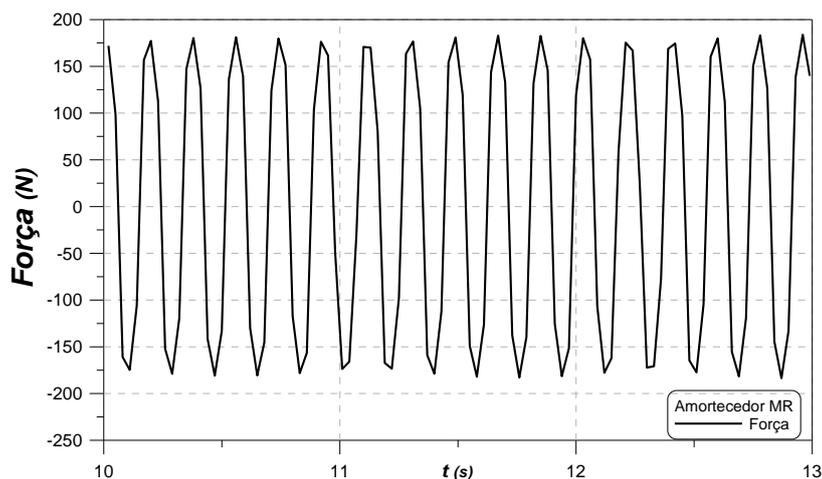


Figura 5.3 Variação da força no amortecedor MR no tempo para a excitação harmônica.

Para ilustrar a resposta do edifício, compara-se nas Figura 5.4 à Figura 5.6, respectivamente, o deslocamento absoluto do terceiro andar (deslocamento máximo), o deslocamento relativo do primeiro andar (deslocamento relativo máximo) e a aceleração absoluta do terceiro andar do edifício com e sem amortecedor MR.

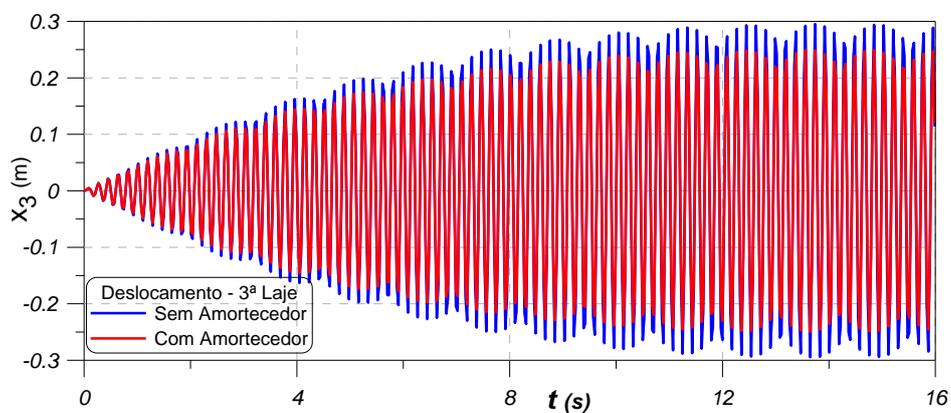


Figura 5.4 Variação no tempo do deslocamento absoluto do terceiro andar; excitação harmônica.

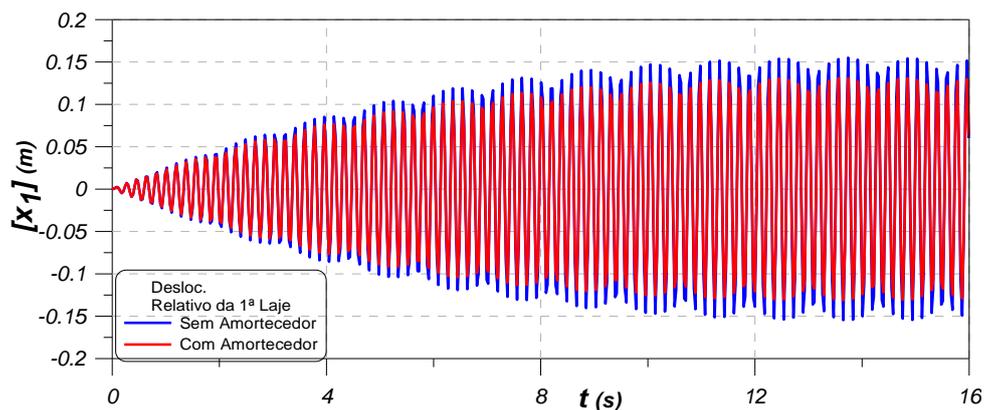


Figura 5.5 Variação no tempo do deslocamento relativo do primeiro andar; excitação harmônica.

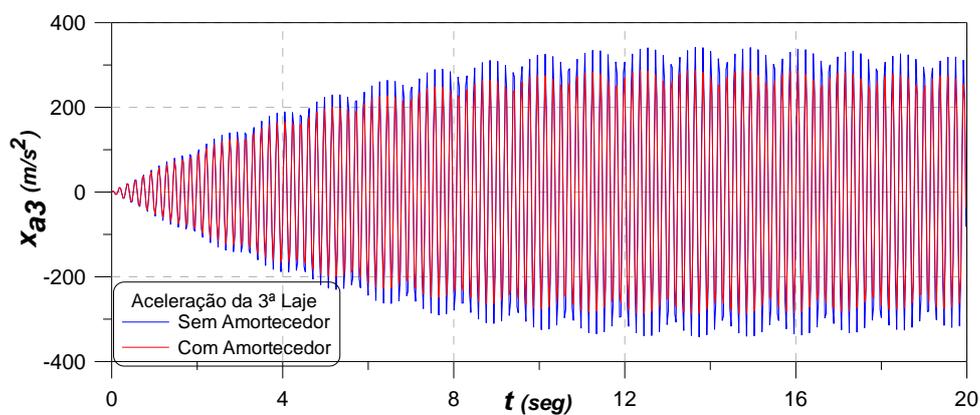


Figura 5.6 Variação no tempo do aceleração do terceiro andar, excitação harmônica.

Tabela 5.1 Tabela comparativa das respostas máximas devidas à excitação harmônica.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Variação
Deslocamento absoluto x_i (cm)	1º nível	15,490	13,090	15,49%
	2º nível	24,570	20,750	15,55%
	3º nível	29,520	24,920	15,58%
Deslocamento Relativo ao andar d_i (cm)	1º nível	15,490	13,090	15,49%
	2º nível	9,080	7,660	15,64%
	3º nível	4,950	4,180	15,56%
Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s ²)	1º nível	179,230	153,780	14,20%
	2º nível	284,170	240,999	15,19%
	3º nível	341,410	288,330	15,55%
Força Amortecedor MR (N)	1º nível	0	183,88	

Tabela 5.2 Tabela comparativa das forças cortantes e momentos máximos nas colunas do edifício devidas à excitação harmônica.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
Momentos máximos (N-m)	1º nível	5760,870	4866,290	15,53%
	2º nível	2678,170	2259,930	15,62%
	3º nível	1460,710	1232,090	15,65%
Cortantes máximas (N)	1º nível	1935,510	1634,950	15,53%
	2º nível	1091,090	920,690	15,62%
	3º nível	595,090	501,950	15,65%

A Tabela 5.1 apresenta os deslocamentos absolutos e relativos e acelerações máximas do edifício com e sem amortecedor MR, bem como a redução provocada pelo amortecedor. Nesta tabela x_i é o deslocamento relativo ao solo do i -ésimo andar, d_i , é o deslocamento relativo de entre dois andares consecutivos, i.e., $x_i - x_{i-1}$ e \ddot{x}_i é a aceleração do i -ésimo andar da estrutura.

A Tabela 5.2 mostra a força cortante e momento máximos nas colunas de cada andar do edifício. Em todos os casos observa-se uma redução de aproximadamente 15.5% nos valores máximos.

A Figura 5.7 mostra a variação da força no amortecedor em função do deslocamento e da velocidade, onde se pode observar o ciclo de histerese característico do amortecedor de Bouc-Wen.

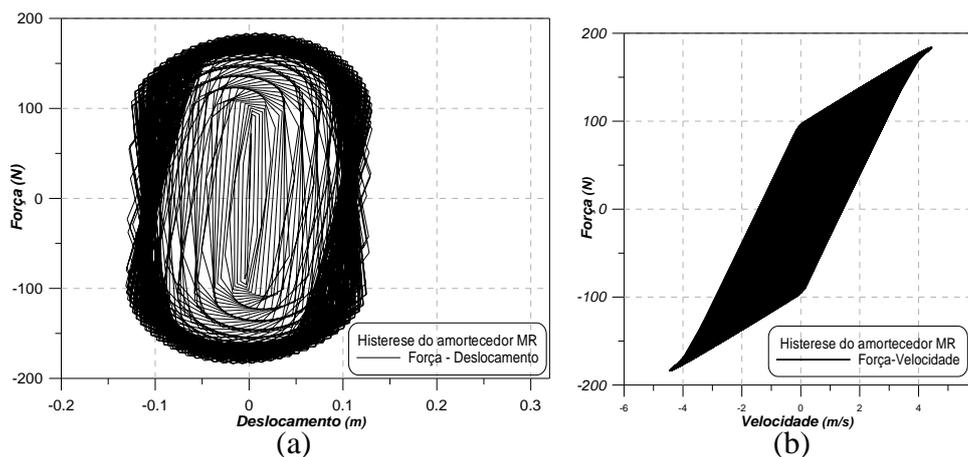


Figura 5.7 Ciclo de histerese do amortecedor MR; excitação harmônica.

5.2.2. ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA SOB UMA EXCITAÇÃO SÍSMICA REAL.

Para ilustrar o comportamento da estrutura submetida a um sismo real, considera-se o acelerograma da componente NS do terremoto “*El Centro*” ocorrido em 1940 e bastante usado na literatura. Este sinal é mostrado na Figura 5.8.

Neste caso, a parcela de forças externas na eq.(3.1) é descrita por:

$$f := \begin{bmatrix} 9.83 & 0 & 0 \\ 0 & 9.83 & 0 \\ 0 & 0 & 9.83 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} -\frac{d^2S(t)}{dt^2} \\ -\frac{d^2S(t)}{dt^2} \\ -\frac{d^2S(t)}{dt^2} \end{array} \right\} N \quad (5.5)$$

onde $\frac{d^2S(t)}{dt^2}$, é a aceleração da base da estrutura na forma discretizada, obtida a partir do acelerograma do sismo real ilustrado na Figura 5.8.

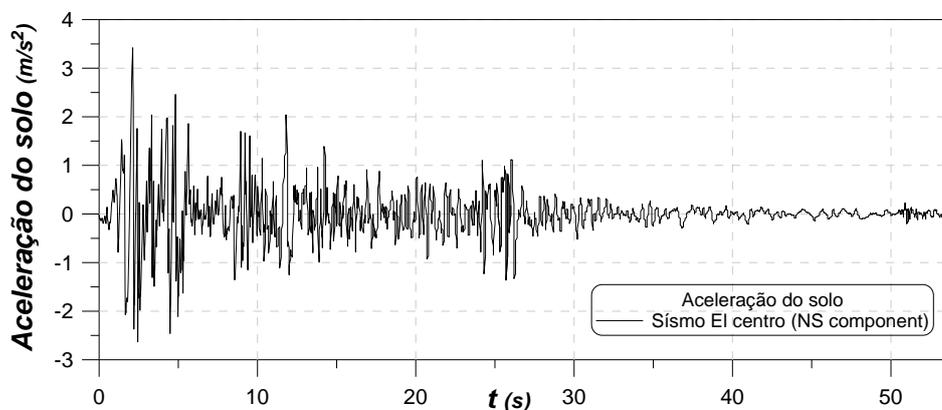


Figura 5.8 Acelerograma do sismo “*El Centro*” (Welcome to Vibrationdata El Centro Earthquake Page, acessado 5/10/2011).

O conteúdo de frequências do sismo “*El Centro*”, obtido a partir do acelerograma, é mostrado na Figura 5.9 e comparado com as frequências naturais do edifício. Verifica-se que apenas a primeira frequência se encontra na região de interesse.

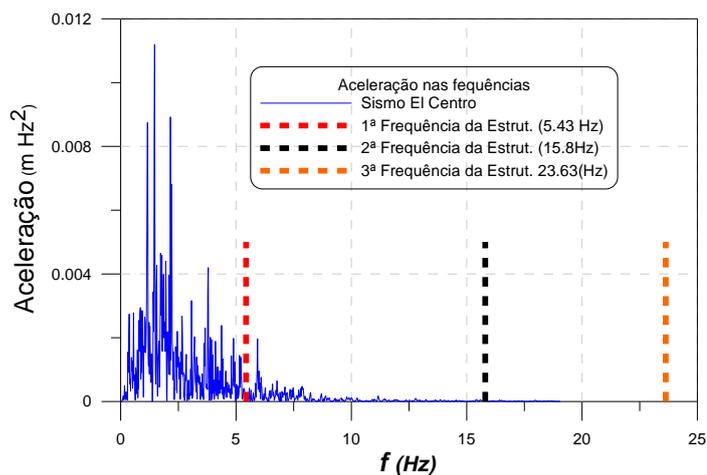


Figura 5.9 Conteúdo de frequências do sismo “*El Centro*”, e da estrutura.

A variação da força no amortecedor ao longo do tempo é mostrada na Figura 5.10. A resposta no tempo da estrutura considerando a excitação sísmica é ilustrada nas Figura 5.11 a Figura 5.13, onde se comparam as respostas com e sem amortecedor MR.

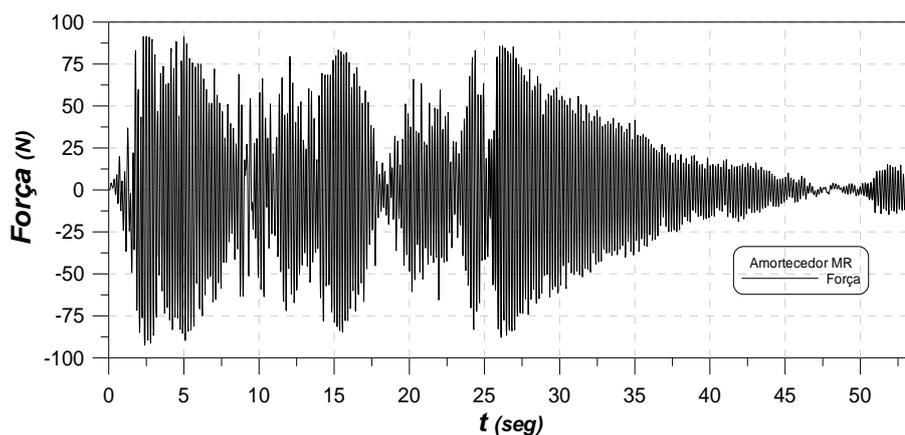


Figura 5.10 Força exercida pelo amortecedor MR para o sismo “*El Centro*”.

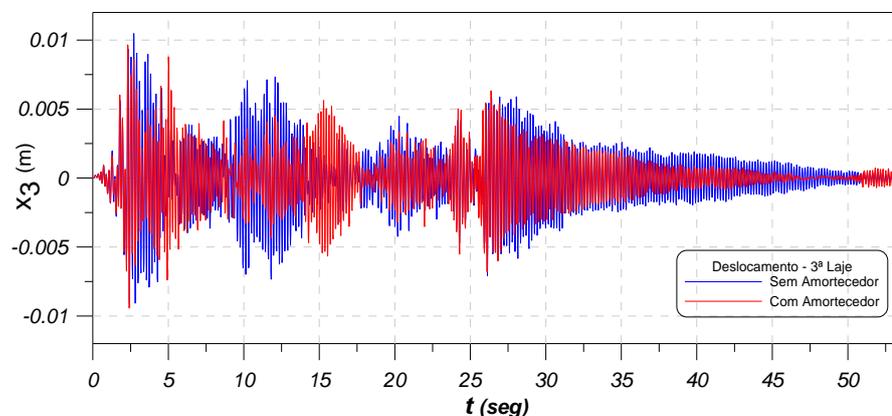


Figura 5.11 Deslocamento absoluto do terceiro andar no tempo para o sismo “*El Centro*”.

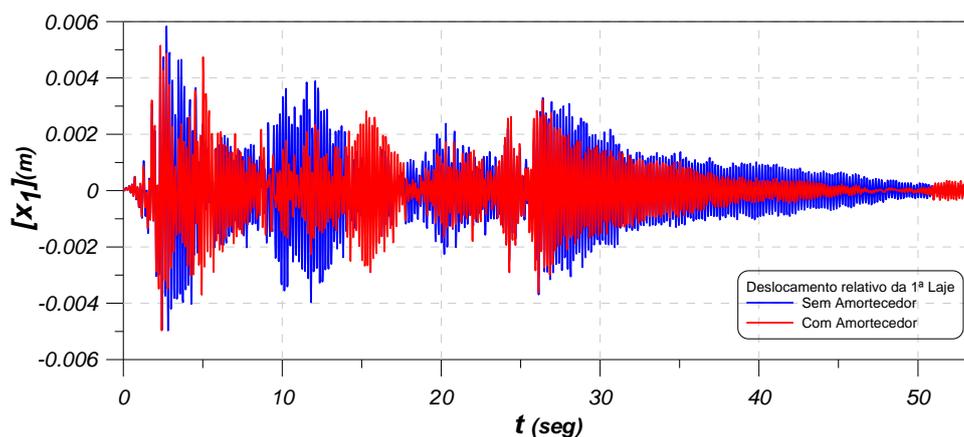


Figura 5.12 Deslocamento relativo do primeiro andar no tempo, sismo “*El Centro*”

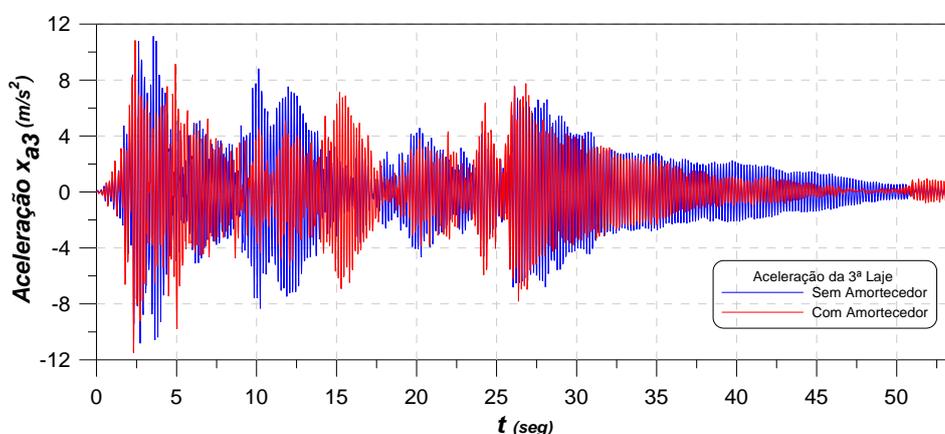


Figura 5.13 Aceleração absoluta do terceiro andar, sismo “*El Centro*”.

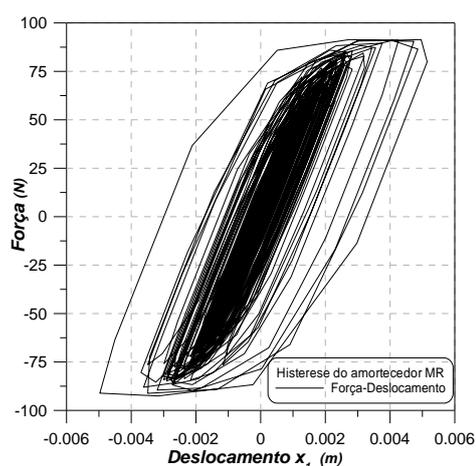
As respostas máximas da estrutura para o sismo do “*El Centro*” são apresentadas na Tabela 5.3. Como é mostrada na Tabela 5.3, a estrutura com o amortecedor MR apresenta respostas menores que a estrutura sem o amortecedor MR, embora o decréscimo nas acelerações seja relativamente pequeno. Nota-se que a maior redução ocorre para os deslocamentos do primeiro andar onde se tem os maiores esforços causada pelo deslocamento de base, como mostra a Tabela 5.1, e onde geralmente ocorrem os primeiros danos nos edifícios sob um sismo. A dissipação de energia devida ao amortecedor MR durante a resposta no tempo é ilustrada na Figura 5.14, onde se mostra a variação da força no amortecedor em função do deslocamento e da velocidade impostos pela estrutura em movimento.

Tabela 5.3 Tabela comparativa das respostas máximas da estrutura com e sem amortecedor MR, para o sismo “El Centro”.

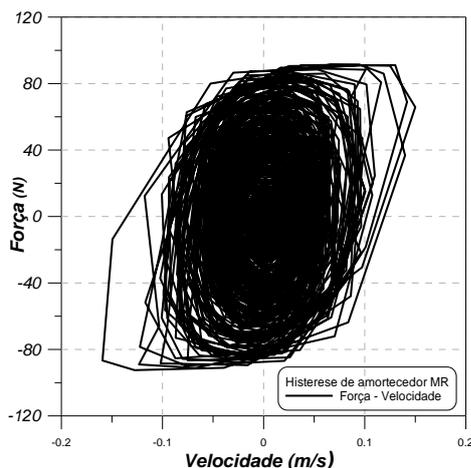
Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
Deslocamento absoluto x_i (cm)	1º nível	0,583	0,515	11,71%
	2º nível	0,895	0,808	9,72%
	3º nível	1,046	0,965	7,80%
Deslocamento Relativo ao andar	1º nível	0,583	0,515	11,71%
	2º nível	0,312	0,302	2,98%
	3º nível	0,170	0,166	2,13%
Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s^2)	1º nível	6,931	6,801	1,88%
	2º nível	9,841	9,669	1,75%
	3º nível	11,109	10,817	2,63%
Força Amortecedor MR (N)	1º nível	0	91,40	

Tabela 5.4 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos nas colunas do edifício devido ao sismo “El Centro”.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
Momentos máximos (N-m)	1º nível	216,740	191,350	11,71%
	2º nível	91,940	89,200	2,98%
	3º nível	50,130	49,060	2,13%
Cortantes máximas (N)	1º nível	72,810	64,290	11,70%
	2º nível	37,450	36,340	2,96%
	3º nível	20,420	19,990	2,11%



(a)



(b)

Figura 5.14 Ciclo de histerese do amortecedor MR no tempo; sismo “El Centro”.

5.2.3. ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA COM EXCITAÇÃO DE BASE COM MOVIMENTO SÍSMICO ARTIFICIAL.

Na análise sísmica de estruturas muitas vezes não se dispõe de um acelerograma que represente um determinado local. Nestes casos é conveniente o uso de sismos gerados artificialmente. Neste item faz-se a simulação do movimento da estrutura em análise considerando um sismo artificial com um conteúdo de frequências distinto do “*El Centro*”, obtido a partir do algoritmo apresentado no capítulo 4. O acelerograma do sismo com magnitude de 0.3g é apresentado na Figura 5.15 e o respectivo conteúdo de frequências é apresentado na Figura 5.16. Nota-se que, neste caso, as frequências dominantes do sismo estão concentradas na região de baixas frequências, fora das regiões de ressonância da estrutura. A variação da força do amortecedor é apresentada na Figura 5.17.

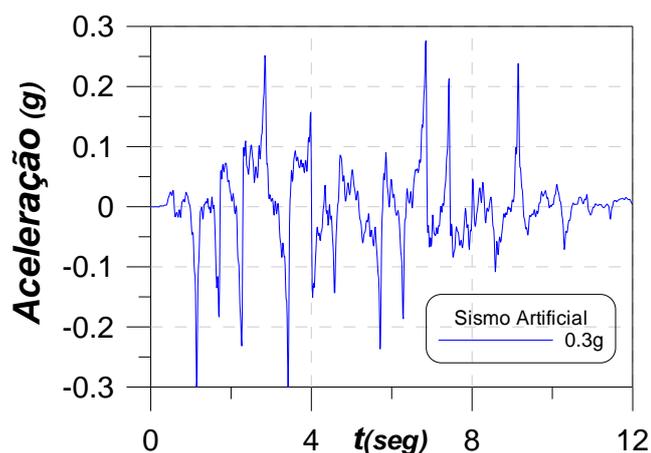


Figura 5.15 Acelerograma artificial.

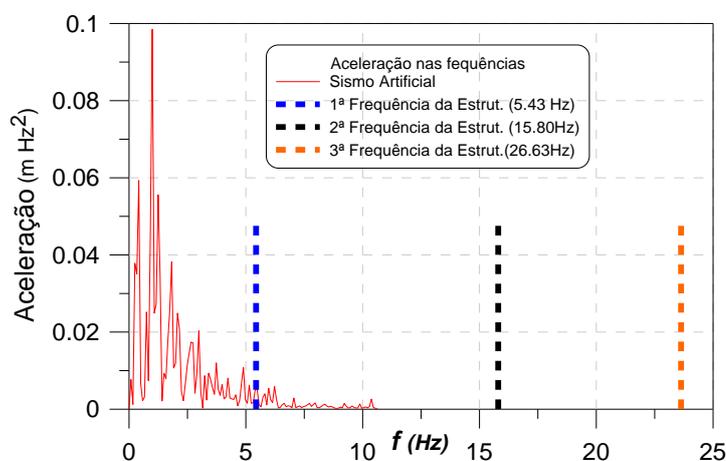


Figura 5.16 Conteúdo de frequências do sismo artificial e da estrutura.

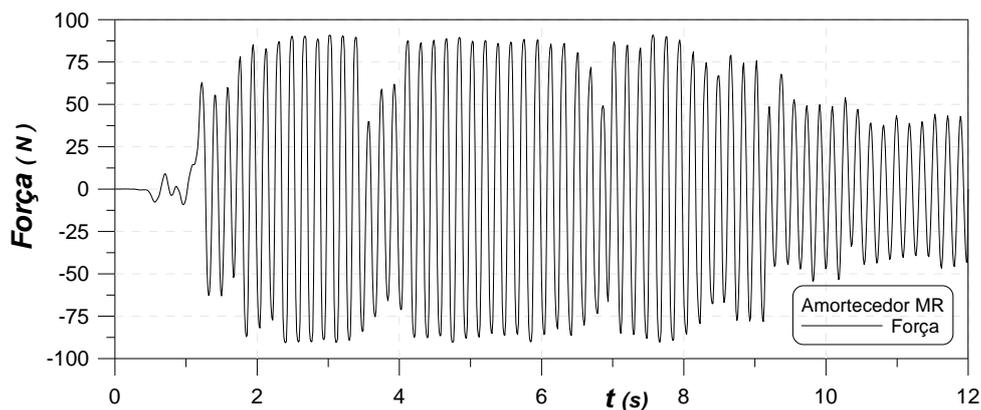


Figura 5.17 Força exercida pelo amortecedor MR no tempo, sismo artificial.

A resposta da estrutura para a excitação sísmica artificial, com e sem amortecedor, é ilustrada nas Figura 5.18 a Figura 5.20, sendo os valores máximos obtidos durante a resposta no tempo reportados nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6. A dissipação de energia no amortecedor é ilustrada na Figura 5.21. Apesar de o sismo artificial ter a magnitude máxima cerca ao do sismo “*El Centro*”, nota-se que a resposta da estrutura é bastante diferente nos dois casos. Isto se deve à diferença no conteúdo de frequências e na variação da magnitude do sismo ao longo do tempo. Verifica-se que no presente caso os valores máximos alcançados pela estrutura sem amortecedor são superiores a aqueles obtidos para o “*El Centro*”. Entretanto, a redução proporcionada pelo amortecedor é bem maior que no caso anterior, tanto para deslocamentos como para acelerações, sendo inclusive a maioria dos valores máximos da estrutura controlada inferiores aos obtidos para o sismo “*El Centro*” nas mesmas condições. Como se pode observar, a eficiência de mecanismos de dissipação de energia como amortecedores MR e isoladores de base em geral depende das características do sismo e não só de sua magnitude.

Observa-se também que os valores máximos alcançados pela estrutura sob uma excitação sísmica são bem menores que aqueles alcançados pela estrutura sob uma excitação harmônica de mesma magnitude com frequência próxima daquela associada ao primeiro modo de vibração (comparem-se os resultados apresentados na Tabela 5.1 com aqueles das Tabela 5.3 e Tabela 5.5).

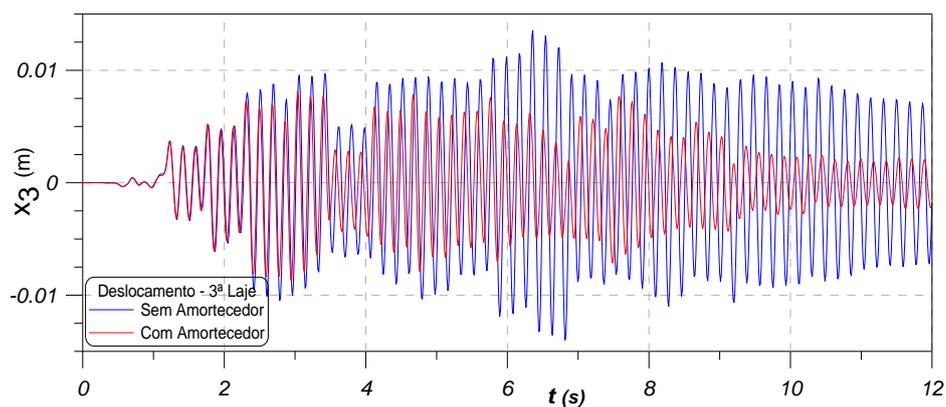


Figura 5.18 Deslocamento absoluto do terceiro andar, sismo artificial.

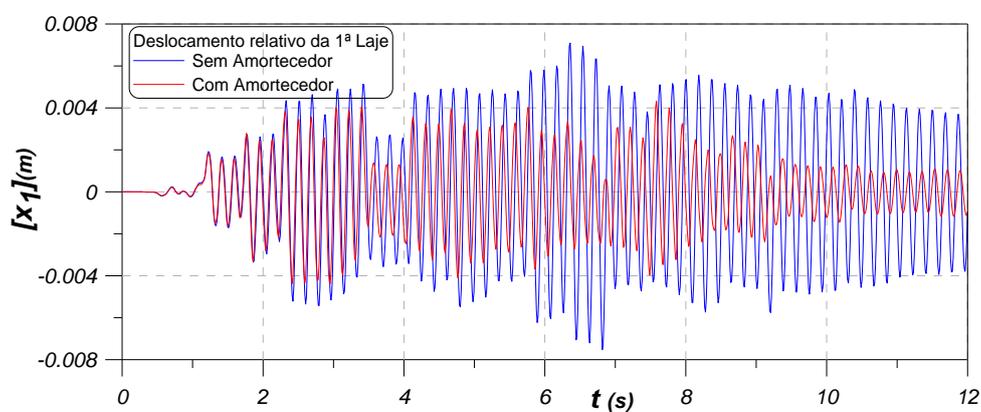


Figura 5.19 Deslocamento relativo do primeiro andar, sismo artificial.

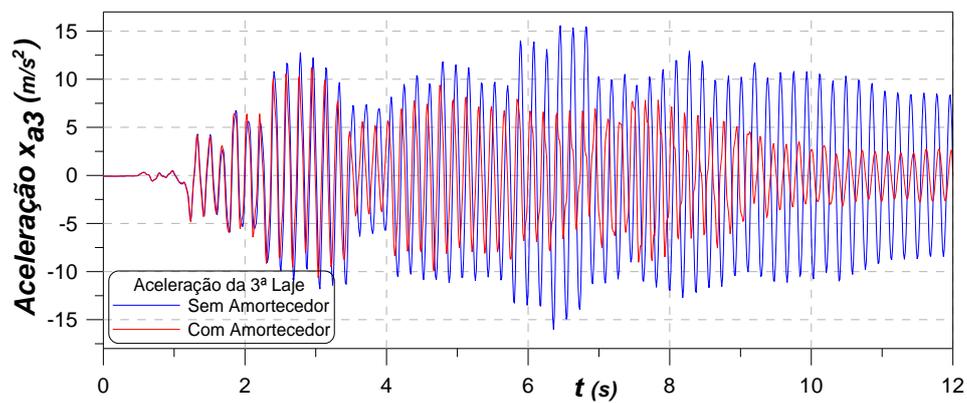


Figura 5.20 Aceleração absoluta do terceiro andar, sismo artificial.

Tabela 5.5 Tabela comparativa das respostas máximas. Estrutura sob sismo artificial.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Deslocamento absoluto x_i (cm)</i>	1º nível	0,709	0,432	39,07%
	2º nível	1,126	0,662	41,21%
	3º nível	1,354	0,814	39,88%
<i>Deslocamento Relativo ao andar d_i (cm)</i>	1º nível	0,709	0,432	39,07%
	2º nível	0,346	0,261	24,57%
	3º nível	0,229	0,152	33,62%
<i>Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s²)</i>	1º nível	9,865	6,687	32,21%
	2º nível	13,928	8,555	38,58%
	3º nível	15,560	11,200	28,02%
<i>Força Amortecedor MR (N)</i>	1º nível	0	90,86	

Tabela 5.6 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos máximos nas colunas do edifício.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Momentos máximos (N-m)</i>	1º nível	263,580	160,480	39,12%
	2º nível	102,130	76,990	24,62%
	3º nível	67,520	44,870	33,55%
<i>Cortantes máximas (N)</i>	1º nível	88,550	53,910	39,12%
	2º nível	41,600	31,360	24,62%
	3º nível	27,500	18,280	33,53%

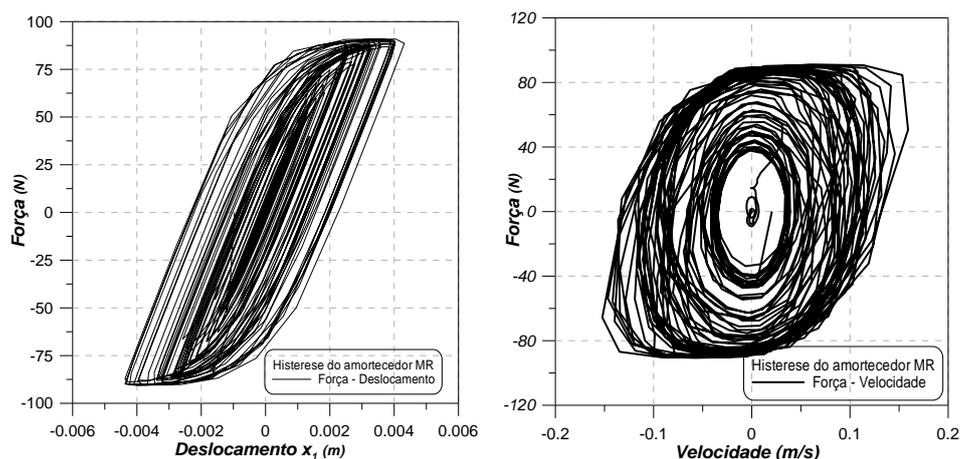


Figura 5.21 Ciclo de histerese do amortecedor MR; sismo artificial.

5.2.4. ANÁLISE DINÂMICA DE UM EDIFÍCIO MAIS FLEXÍVEL SOB O SISMO REAL

Outro fator importante na análise sísmica de estruturas é a relação entre as frequências naturais da mesma com o conteúdo de frequências do sismo. Neste item analisa-se o comportamento dinâmico de um edifício mais flexível. Para isto consideram-se as mesmas matrizes de massa e amortecimento do exemplo anterior e diminui-se a rigidez dos pilares, fazendo com que as frequências naturais da estrutura se encontrem dentro da faixa de frequências do sismo com maior conteúdo energético.

Neste caso adota-se a seguinte matriz de rigidez

$$K = 10^5 \begin{bmatrix} 1.831 & -1.044 & 0 \\ -1.044 & 2.087 & -1.044 \\ 0 & -1.044 & 1.044 \end{bmatrix} \frac{N}{m} \quad (5.6)$$

Com isto tem-se que todas as frequências naturais da estrutura são inferiores a 10Hz, mais precisamente 1.52Hz, 4.41Hz e 6.60Hz. Estas frequências são comparadas com o conteúdo de frequências do sismo “*El Centro*” na Figura 5.22.

A força exercida pelo amortecedor neste caso é mostrada na Figura 5.23, enquanto a resposta no tempo da estrutura é mostrada nas Figura 5.24 a Figura 5.26 e os valores máximos observados durante o sismo são apresentados nas Tabela 5.7 e Tabela 5.8. Finalmente a dissipação de energia no amortecedor é ilustrada na Figura 5.27. Verifica-se um aumento significativo (superior a dez vezes) nos valores máximos de deslocamentos alcançados pela estrutura quando comparados com a resposta do edifício mais rígido sujeito à mesma excitação (Tabela 5.3). Entretanto as acelerações permanecem com a mesma ordem de grandeza. Isto se deve ao fato da massa do edifício ter permanecido constante, havendo apenas, com relação ao exemplo anterior, um decréscimo da rigidez dos pilares. Em virtude do aumento dos deslocamentos relativos entre os andares do edifício cresce de forma acentuada o esforço cortante e o momento fletor nos pilares do edifício, aumentando a probabilidade de ruína dos mesmos. Neste exemplo, observa-se que o amortecedor MR reduz de forma ponderável os deslocamentos e conseqüentemente os esforços no edifício. Nota-se também que o

edifício com amortecedor atinge mais rapidamente o estado de repouso que o edifício sem amortecedor.

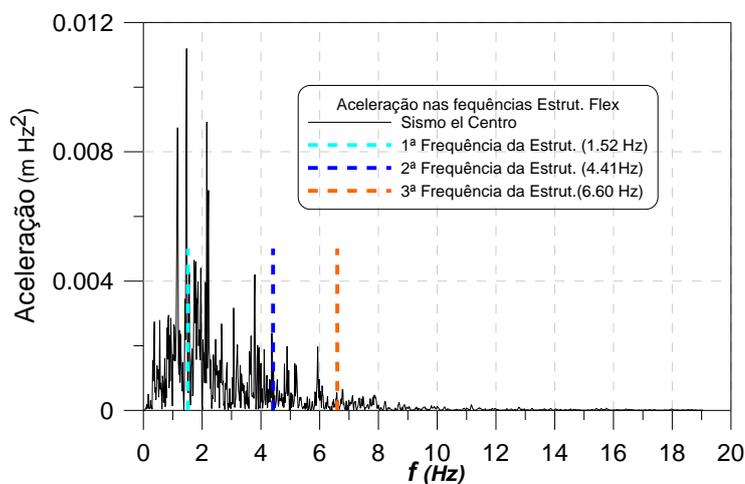


Figura 5.22 Conteúdo de Frequências do sismo “El Centro”, e da estrutura mais flexível.

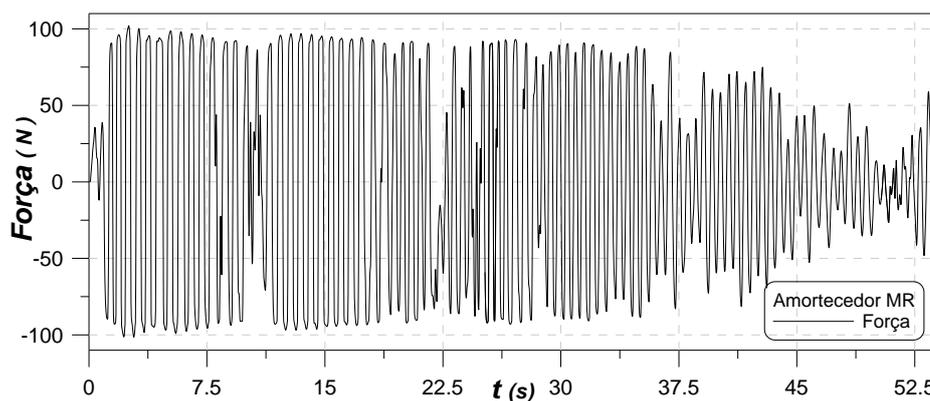


Figura 5.23 Força exercida pelo amortecedor MR, sismo “El Centro”, estrutura mais flexível.

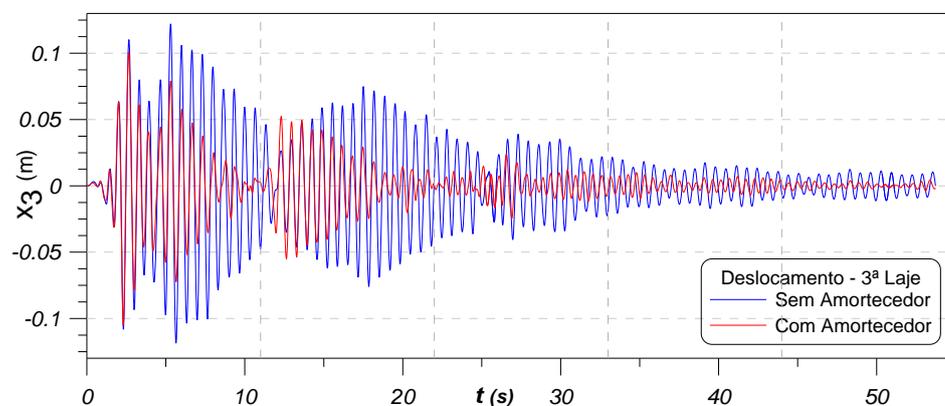


Figura 5.24 Deslocamento do terceiro andar, sismo “El Centro”, estrutura mais flexível.

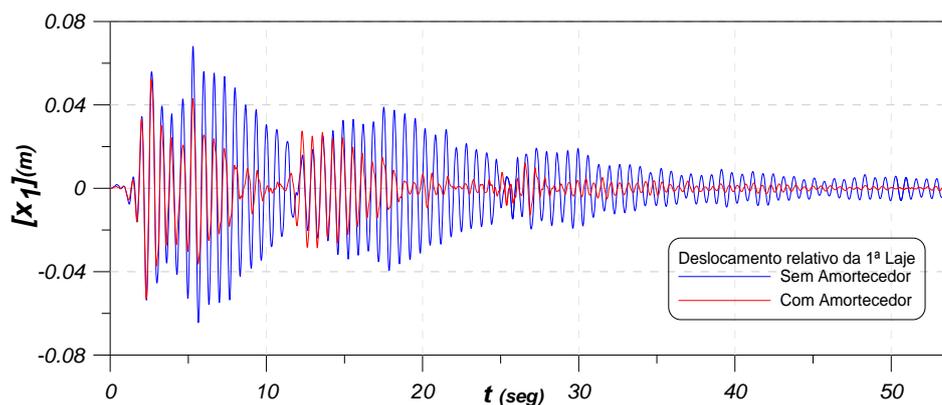


Figura 5.25 Deslocamento relativo do primeiro andar, sismo “El Centro”, estrutura mais flexível.

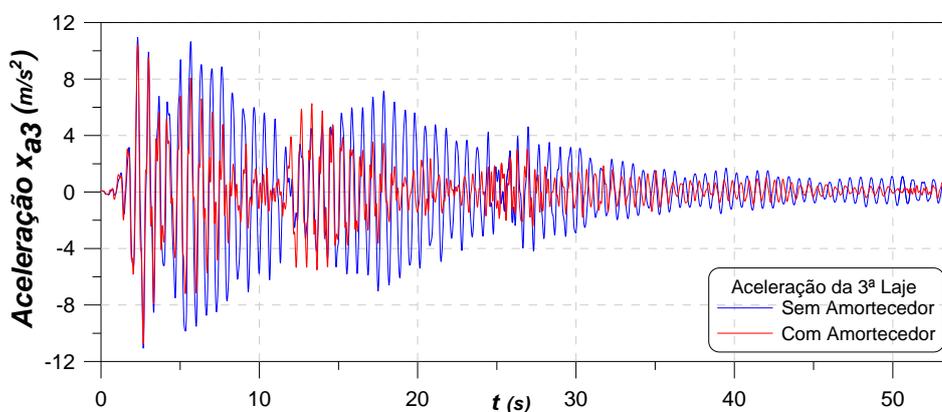


Figura 5.26 Aceleração do terceiro andar, sismo “El Centro”, estrutura mais flexível.

Tabela 5.7 Tabela comparativa das respostas máximas, para a estrutura mais flexível sujeita ao sismo “El Centro”.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
Deslocamento Total x_i (cm)	1º nível	6,810	5,230	23,20%
	2º nível	10,390	8,260	20,50%
	3º nível	12,200	10,106	17,16%
Deslocamento Relativo d_i (cm)	1º nível	6,810	5,230	23,20%
	2º nível	3,640	3,209	11,84%
	3º nível	2,050	1,989	2,98%
Aceleração x''_i (m/s²)	1º nível	7,460	5,728	23,22%
	2º nível	9,420	8,236	12,57%
	3º nível	10,946	10,431	4,70%
Força Amortecedor MR (N)	1º nível	0	102,01	

Tabela 5.8 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos nas colunas do edifício simples, devido ao “El Centro”. Estrutura mais flexível.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
Momentos máximos (N-m)	1º nível	2531,190	1946,050	23,12%
	2º nível	1047,560	946,990	9,60%
	3º nível	604,510	587,050	2,89%
Cortantes máximas (N)	1º nível	850,410	653,820	23,12%
	2º nível	437,770	385,800	11,87%
	3º nível	426,270	239,160	43,89%

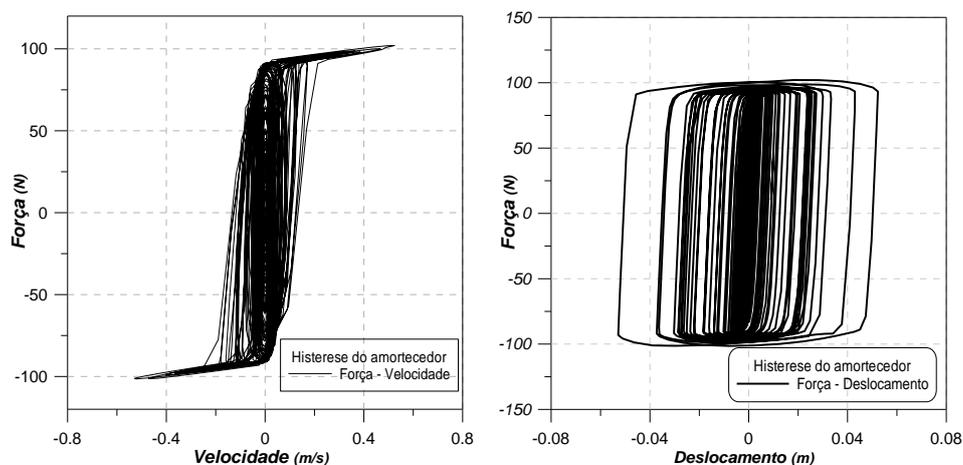


Figura 5.27 Ciclo de histerese do amortecedor MR, sismo “El Centro”, estrutura mais flexível.

5.2.5. ANÁLISE DA ESTRUTURA MAIS FLEXÍVEL SOB O SISMO ARTIFICIAL

Considera-se agora o efeito do sismo artificial, usado anteriormente, na resposta da estrutura com maior flexibilidade. A comparação das frequências naturais da estrutura com o conteúdo de frequências do sismo é mostrada na Figura 5.28. Os valores máximos obtidos neste caso são mostrados nas Tabela 5.9 e Tabela 5.10. Verifica-se que, como esperado, houve um aumento nos deslocamentos com relação à estrutura mais rígida sob a mesma excitação da ordem de 4.5 vezes. Observa-se que este aumento é menos da metade daquele observado na comparação das duas estruturas sob o sismo “El Centro” (ver item anterior). Isto mostra mais uma vez que a resposta da estrutura é altamente dependente das características do sismo que não são conhecidas *a priori*. Nota-se,

entretanto, que o nível de redução dos deslocamentos e consequentemente dos esforços causado pelo amortecedor MR são da mesma ordem de grandeza.

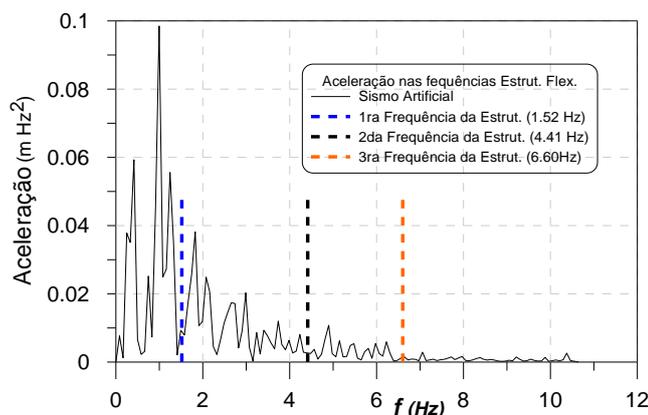


Figura 5.28 Conteúdo de Frequências do sismo artificial, e da estrutura mais flexível.

Tabela 5.9 Tabela comparativa das respostas máximas para a estrutura mais flexível (sismo artificial).

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Deslocamento absoluto x_i (cm)</i>	1º nível	3,202	2,435	23,95%
	2º nível	4,966	3,735	24,79%
	3º nível	5,905	4,449	24,66%
<i>Deslocamento Relativo ao andar d_i (cm)</i>	1º nível	3,200	2,435	23,91%
	2º nível	1,764	1,385	21,49%
	3º nível	0,952	0,874	8,18%
<i>Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s^2)</i>	1º nível	3,410	3,185	6,60%
	2º nível	4,195	3,747	10,68%
	3º nível	4,727	4,258	9,92%
<i>Força Amortecedor MR (N)</i>	1º nível	0	95,42	

Tabela 5.10 Tabela comparativa de forças cortantes e momento, nas colunas do edifício simples, devido a movimento sísmico “*El Centro*”, da estrutura mais flexível.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Momentos máximos (N-m)</i>	1º nível	1190,360	905,460	23,93%
	2º nível	520,530	408,700	21,48%
	3º nível	280,890	257,980	8,16%
<i>Cortantes máximas (N)</i>	1º nível	399,930	304,210	23,93%
	2º nível	212,060	166,500	21,48%
	3º nível	114,430	105,100	8,15%

5.3. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO AMORTECEDOR MR NA RESPOSTA DA ESTRUTURA.

Os parâmetros característicos que aparecem no modelo matemático de Bouc-Wen usado para o amortecedor MR, eq.(2.3), e o coeficiente α , na eq.(2.6); foram variados numa faixa de valores, onde os valores dos parâmetros para o amortecedor utilizado por Spencer, et al , (1996) ficam no meio do intervalo.

A variação foi feita considerando a estrutura submetida ao sismo “El Centro”, com as frequências naturais da estrutura dentro do conteúdo das frequências de maior energia.

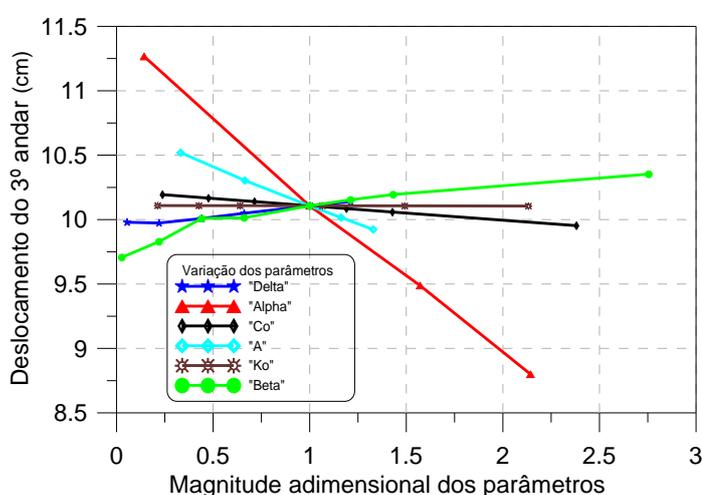


Figura 5.29 Variação dos parâmetros do amortecedor MR do modelo de Bouc-Wen.

A Figura 5.29 mostra a variação do deslocamento absoluto máximo do terceiro andar com a variação de cada um dos parâmetros do amortecedor presentes nas equações diferenciais (2.3) e (2.6), mantendo-se os outros constantes e iguais aos usados nos exemplos anteriores. Na Figura 5.29 o eixo horizontal corresponde ao valor de cada parâmetro dividido pelo valor de referência, ou seja, os usados nos exemplos anteriores. Observa-se que a variação dos parâmetros δ , β , A e K_0 têm pouca influência no valor do deslocamento. Já os parâmetros α e C_0 influenciam de forma bastante significativa o valor do deslocamento máximo, decrescendo este de forma praticamente linear com o aumento destes dois parâmetros. O parâmetro α está relacionado com a magnitude da variável evolutiva $z(t)$ na expressão da força do amortecedor, eq. (2.6), enquanto a variável C_0 é o coeficiente de amortecimento viscoso inerente ao próprio amortecedor. Em

uma aplicação prática estes coeficientes podem ser otimizados para se obter o melhor desempenho possível do amortecedor MR.

Nas Figura 5.30 e Figura 5.31 mostra-se a influência dos parâmetros α e C_0 no ciclo de histerese que está associado à energia dissipada pelo amortecedor durante o movimento da estrutura. Em particular verifica-se o grande aumento do ciclo de histerese com o parâmetro α .

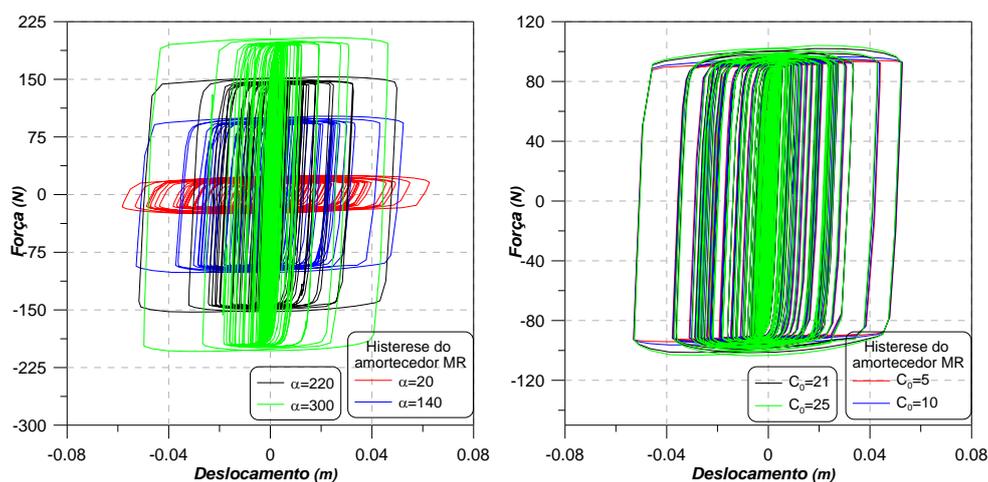


Figura 5.30 Histerese do amortecedor MR pela variação dos parâmetros característicos.

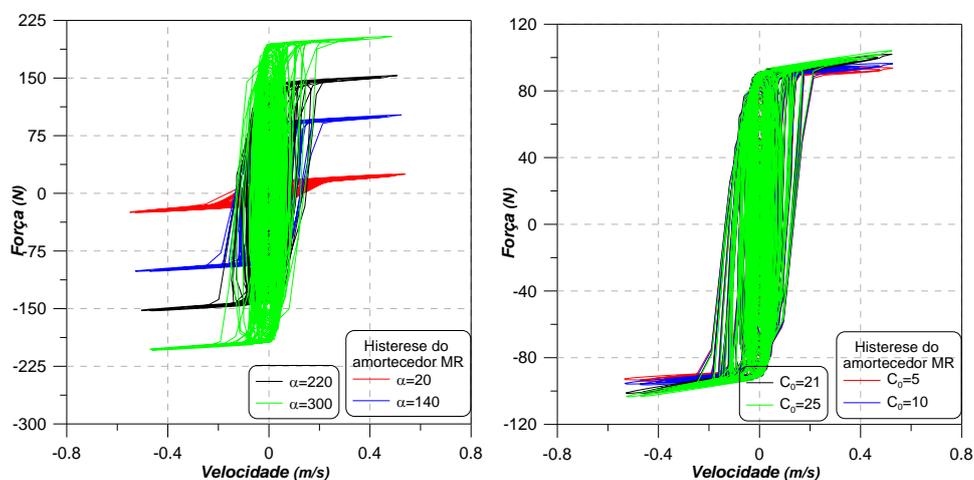


Figura 5.31 Histerese do amortecedor MR pela variação dos parâmetros característicos.

5.4. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMORTECEDORES MR NA RESPOSTA DA ESTRUTURA.

Neste item se investiga a influência do número de amortecedores na resposta da estrutura sob uma excitação sísmica. Para isto, considera-se o edifício

submetido ao sismo “*El Centro*”. Os resultados são apresentados nas Figura 5.32 a Figura 5.35, onde se apresentam os valores máximos obtidos para cada caso em função do número de amortecedores. Verifica-se que há uma variação não-linear em todos os casos, crescendo a eficiência com o número de amortecedores.

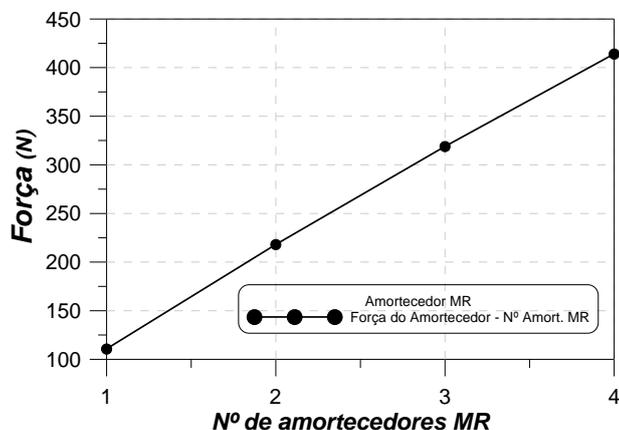


Figura 5.32 Força do amortecedor MR com o número de amortecedores.

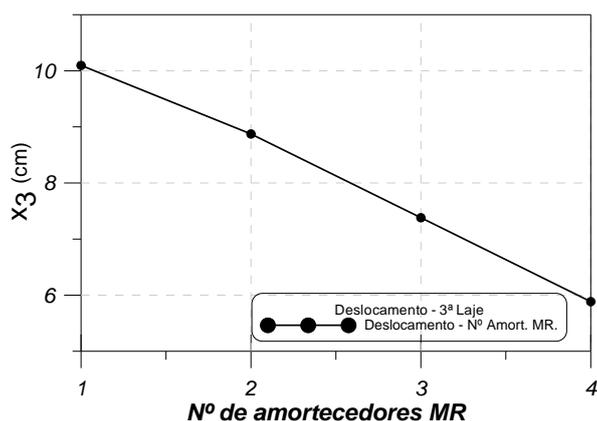


Figura 5.33 Deslocamento do terceiro andar com o número de amortecedores. MR

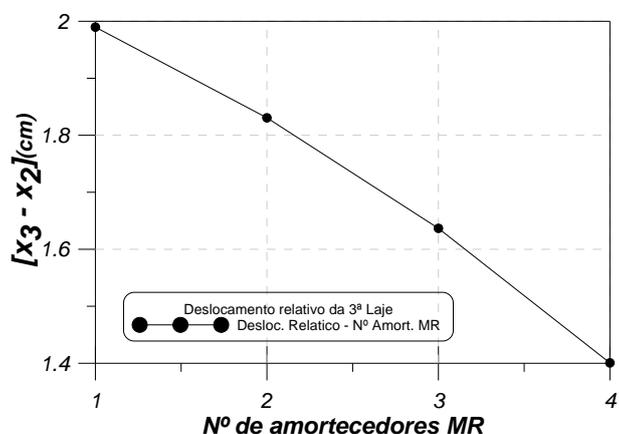


Figura 5.34 Deslocamento relativo do terceiro andar com o número de amortecedores MR.

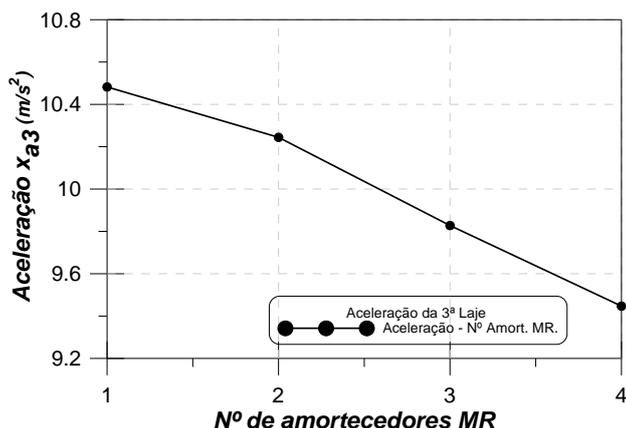


Figura 5.35 Aceleração do terceiro andar com o número de amortecedores MR.

5.5. ANÁLISE DINÂMICA CONSIDERANDO O EFEITO P-DELTA

O efeito do peso próprio e particularmente da sobrecarga da estrutura pode fazer com que a carga axial nos pilares de um edifício seja uma fração ponderável da carga crítica. Com isto, modifica-se a rigidez das colunas e cresce a influência do efeito p-delta nas vibrações da estrutura. O efeito da carga axial nas colunas sobre a rigidez lateral da coluna é descrito no capítulo 3 e definido pela eq.(3.30) e ilustrado na Figura 3.7 onde o valor do parâmetro α expressa a relação entre a carga aplicada e a carga crítica da coluna. Para $\alpha = 1$ tem-se o caso crítico, sendo a rigidez efetiva da coluna igual à zero.

A análise dinâmica apresentada a seguir mostra a influência do acréscimo da carga axial na rigidez nas frequências naturais e na resposta da estrutura. Para se obter a variação da carga axial, multiplica-se o peso da estrutura usado anteriormente por certo número n . A Figura 5.36 mostra a variação do deslocamento máximo com a massa da estrutura. Verifica-se que o deslocamento varia de forma acentuada com a massa do edifício e que a redução provocada pelo amortecedor também depende da massa. Esta variação, ilustrada na Figura 5.37, altamente não linear, é, como já mostrado nos exemplos anteriores, devido à relação entre as frequências do edifício e o conteúdo de frequências do sismo.

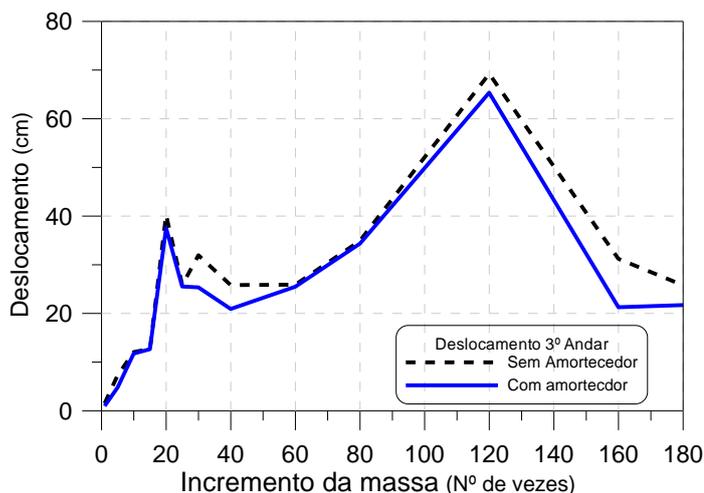


Figura 5.36 Variação do deslocamento máximo do terceiro andar da estrutura sob ação do sismo “El Centro” com incremento da força axial.

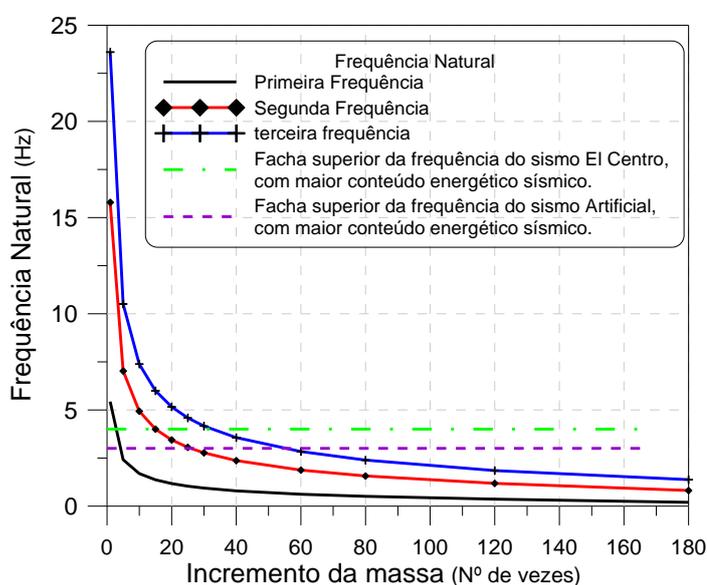


Figura 5.37 Variação das frequências naturais com a variação da força axial

5.6. ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA COM ISOLAMENTO DE BASE.

Nos trabalhos de Zhou et al (2003), Kim et al (2009) e Medina et al (2008) o amortecedor está localizado no primeiro andar do edifício. Esta foi a configuração usada nos exemplos anteriores. Entretanto espera-se que em uma estrutura sob uma excitação de base o amortecedor MR se torne mais eficiente quando usado como um isolador de base, separando a estrutura do solo circundante. Neste item considera-se um edifício com um isolador de base MR, como ilustrado na Figura 5.38, considerando ou não o efeito adicional de um isolador clássico de elastômero (borracha). Para a análise dinâmica utiliza-se o sistema de equações

(3.9). A estrutura em análise é a utilizada nos exemplos anteriores, onde as frequências da estrutura se encontram na região das frequências com maior conteúdo energético do sismo “*El Centro*”.

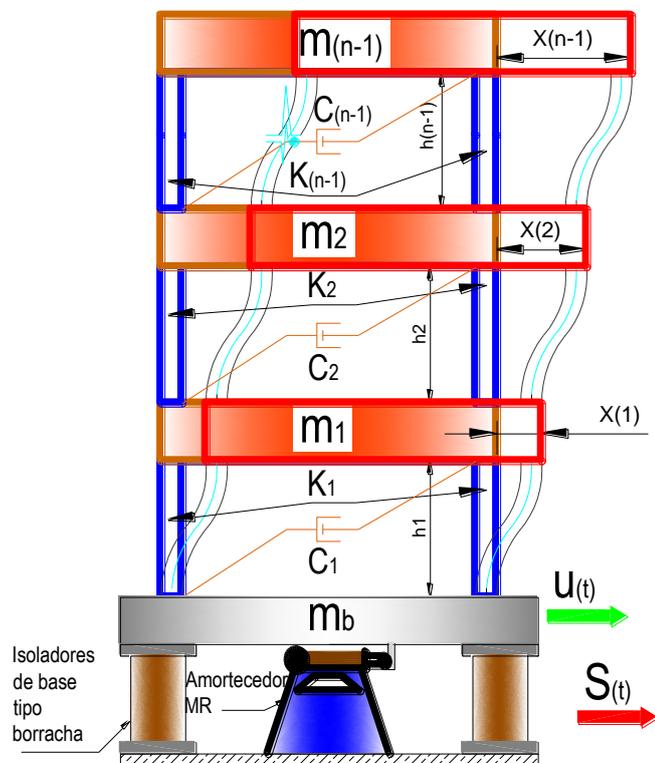


Figura 5.38 Pórtico em análise com isolamento de base de tipo borracha e amortecedor MR.

5.6.1. CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

As matrizes de massa, rigidez e amortecimento do sistema estrutura-base isolada com amortecedor MR são dadas por:

$$M = \begin{bmatrix} 324.39 & 98.3 & 98.3 & 98.3 \\ 0 & 98.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 98.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 98.3 \end{bmatrix} \text{Kg} \quad (5.7)$$

$$K = \begin{bmatrix} 4690 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 49022.34 & -24041.599 & 0 \\ 0 & -24041.599 & 48083.199 & -24041.599 \\ 0 & 0 & -24041.599 & 24041.599 \end{bmatrix} \frac{N}{m} \quad (5.8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 2100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 75 & -50 & 0 \\ 0 & -50 & 100 & -50 \\ 0 & 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \frac{N \cdot s}{m} \quad (5.9)$$

As matrizes de rigidez e amortecimento do sistema estrutura-base isolada com amortecedor MR e borracha são dadas por:

$$K = \begin{bmatrix} 21690 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 49022.34 & -24041.599 & 0 \\ 0 & -24041.599 & 48083.199 & -24041.599 \\ 0 & 0 & -24041.599 & 24041.599 \end{bmatrix} \frac{N}{m} \quad (5.10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 2197.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 75 & -50 & 0 \\ 0 & -50 & 100 & -50 \\ 0 & 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \frac{N \cdot s}{m} \quad (5.11)$$

A rigidez horizontal de blocos (k_b) de elastômero cintado pode ser calculada a partir do módulo de distorção (G). Como cada bloco é constituído pela justaposição de camadas de elastômero, a deformação horizontal do conjunto é o somatório das deformações individuais de cada camada. Por seu lado a deformação de cada camada, devido à sua pequena espessura, é essencialmente por corte. Desta forma a relação entre a rigidez do bloco e o módulo de distorção obedece à seguinte expressão.

$$k_b = \frac{G \cdot A}{h_{el}} \quad (5.12)$$

Com: G – módulo de distorção do elastômero ($G \sim 0.4$ a 2.0 MPa);

A – Secção transversal da camada de elastômero;

h_{el} - Espessura da camada de elastômero;

Frequência do bloco de elastômero.

$$\varpi_b = \sqrt{\frac{k_b}{M_t}} \quad (5.13)$$

Onde: M_t - Massa total, incluindo o isolador de massa m_b .

Razão de amortecimento do bloco de elastômero ($\xi_b < 3\%$).

$$\xi_b = \frac{C_b}{2M_1\omega_b} \quad (5.14)$$

5.6.2. MODOS E FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA.

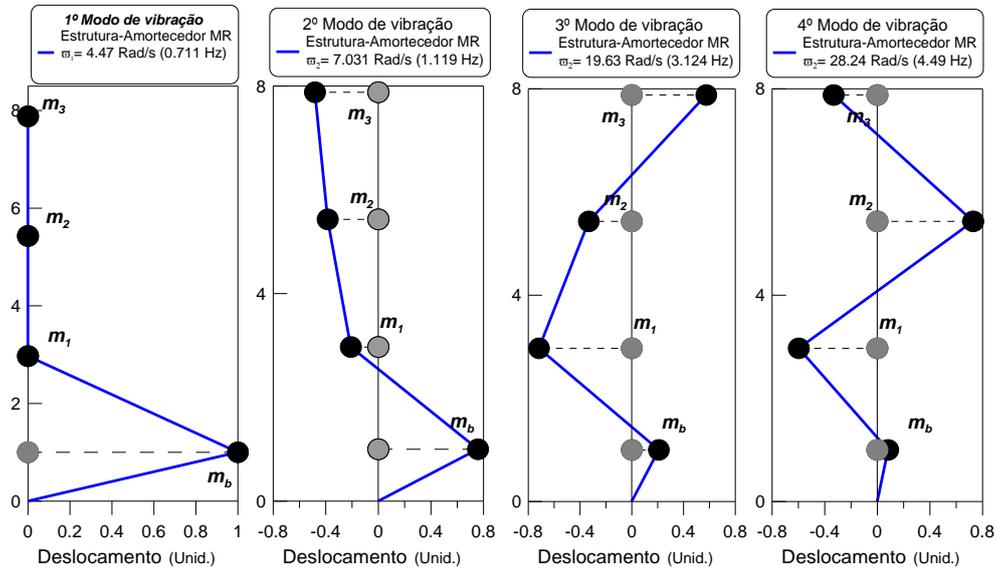


Figura 5.39 Frequências e modos de vibração da estrutura-base isolada com amortecedor MR.

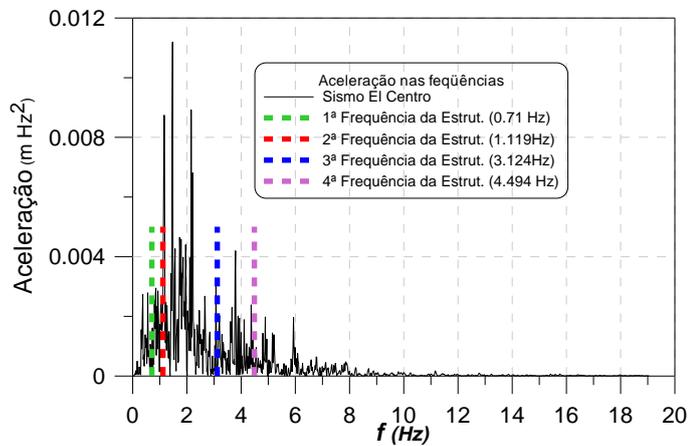


Figura 5.40 Conteúdo de frequências do sismo “El Centro” e da estrutura-base isolada com amortecedor MR.

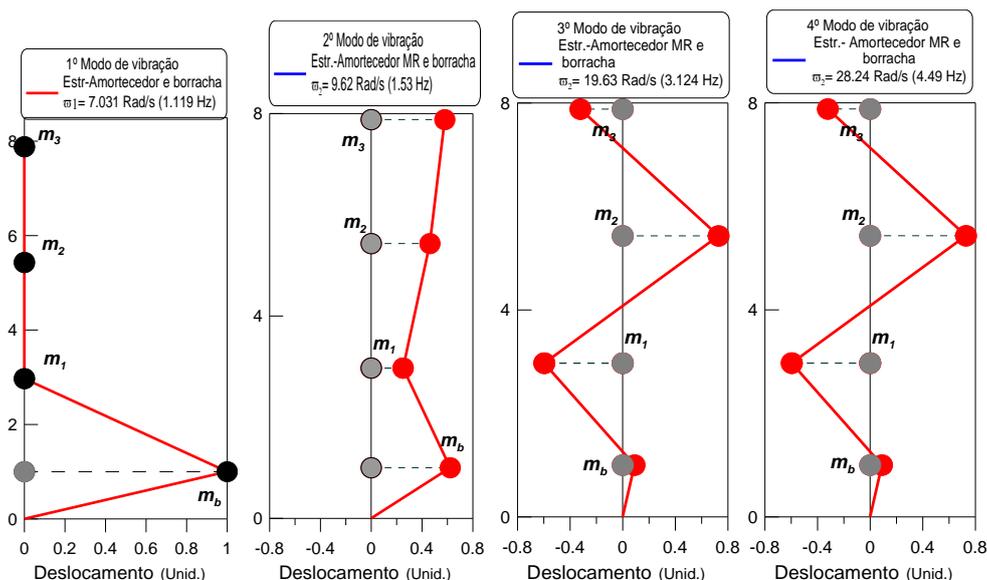


Figura 5.41 Frequências e modos de vibração da estrutura-base isolada com amortecedor MR e apoios de borracha.

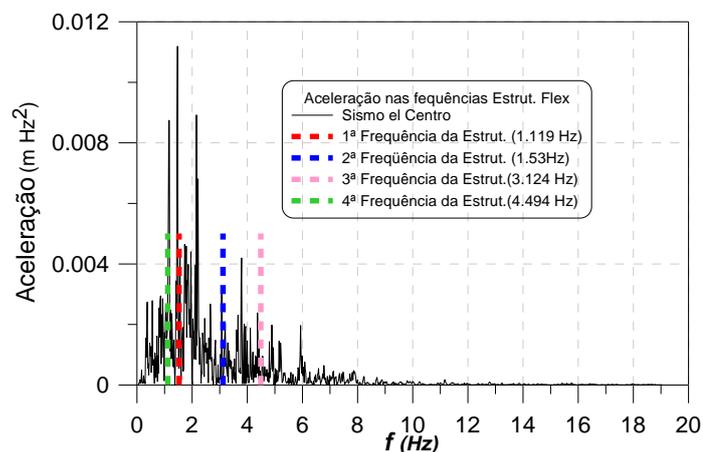


Figura 5.42 Conteúdo de frequências do sismo “El Centro”, e da estrutura-base isolada com amortecedor MR e bloco de elastômero (borracha).

5.7. COMPARAÇÃO DE RESPOSTAS DA ESTRUTURA SUBMETIDA A MOVIMENTO DE BASE SOB AÇÃO SÍSMICA.

5.7.1. COMPARAÇÃO DE RESPOSTAS DO SISTEMA COM E SEM AMORTECEDOR NA BASE DA ESTRUTURA.

Neste item compara-se a resposta da estrutura com e sem isolamento de base constituído pelo amortecedor MR. Para isto utiliza-se a estrutura com suas frequências dentro da faixa de frequências com maior conteúdo energético do sismo “El Centro”. Esta comparação é ilustrada nas Figura 5.43 a Figura 5.45, sendo os valores máximos em ambos os casos comparados nas Tabela 5.11 e

Tabela 5.12. Observa-se que há um aumento no deslocamento absoluto de cada andar em função do grande deslocamento sofrido pela base. Nota-se que os três andares sofrem praticamente o mesmo deslocamento absoluto, mostrando que o edifício se desloca quase que como um corpo rígido. Assim, há um decréscimo considerável nos deslocamentos relativos, chegando, no primeiro nível, a uma redução de 89.97% (redução de 6.81cm para 0.68cm). Com isto há uma queda apreciável no valor dos esforços nos pilares, diminuindo a probabilidade de ruína dos mesmos. Este exemplo mostra com clareza o efeito benéfico do isolamento de base no comportamento de estruturas sob um deslocamento de base. Também nota-se um decréscimo acentuado nas acelerações, aumentando o conforto das pessoas no edifício e a segurança de equipamentos e instalações.

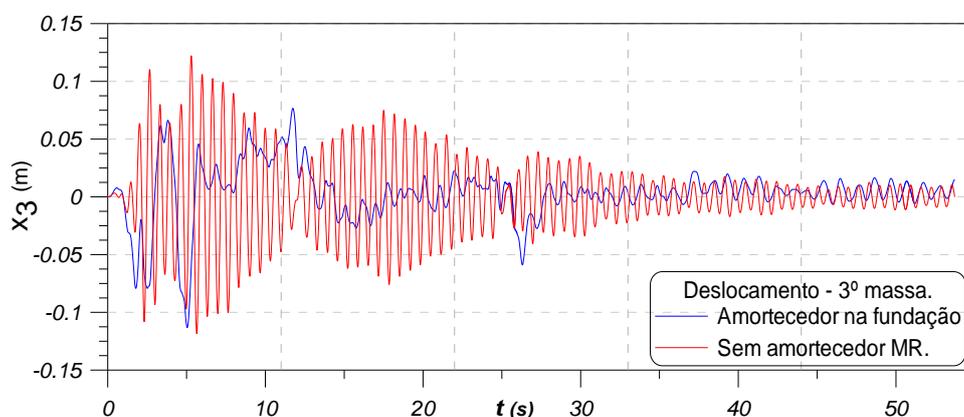


Figura 5.43 Deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob a ação do sismo “*El Centro*”, com e sem amortecedor MR na base.

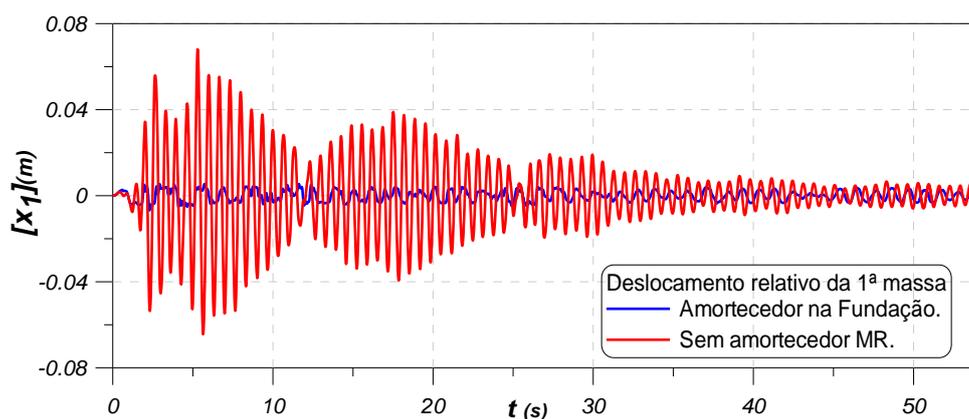


Figura 5.44 Deslocamento relativo do primeiro andar. Estrutura sob a ação do sismo “*El Centro*”, com e sem amortecedor MR na base.

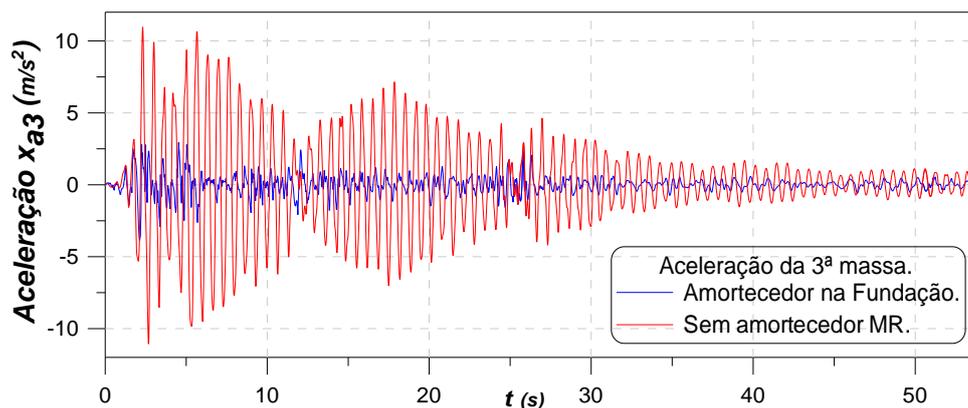


Figura 5.45 Aceleração absoluta do terceiro andar no tempo. Estrutura sob a ação do sismo “El Centro”, com e sem amortecedor MR na base.

Tabela 5.11 Respostas máximas da estrutura.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Deslocamento absoluto</i> x_i (cm)	Fundação	0	10,17	
	1º nível	6,810	10,640	-56,24%
	2º nível	10,390	11,052	-6,37%
	3º nível	12,200	11,320	7,21%
<i>Deslocamento Relativo</i> d_i (cm)	1º nível	6,810	0,683	89,97%
	2º nível	3,640	0,974	73,24%
	3º nível	2,040	0,695	65,93%
<i>Aceleração absoluta</i> \ddot{x}_i (m/s^2)	Fundação	0,000	3,610	
	1º nível	7,460	3,100	58,45%
	2º nível	9,420	4,080	56,69%
	3º nível	10,940	3,850	64,81%
<i>Força Amortecedor MR</i> (N)	1º nível	0	112,17	

Tabela 5.12 Comparação de forças cortantes e momentos fletores máximos nas colunas.

Descrição	Localização	Sem amortecedor MR	Com amortecedor MR	% Variação
<i>Momentos máximos</i> (N-m)	1º nível	2531,190	253,740	89,98%
	2º nível	1074,560	287,420	73,25%
	3º nível	604,508	205,130	66,07%
<i>Cortantes máximas</i> (N)	1º nível	850,410	85,250	89,98%
	2º nível	437,770	117,090	73,25%
	3º nível	426,270	83,570	80,40%

5.7.2. COMPARAÇÃO DA RESPOSTA DO SISTEMA PARA DIFERENTES LOCALIZAÇÕES DO AMORTECEDOR MR.

Neste item estuda-se a influência da localização do amortecedor na redução das vibrações. Para isto compara-se a resposta do edifício com um amortecedor MR localizado no primeiro andar e na fundação do edifício. Os resultados são apresentados nas Figura 5.46 a Figura 5.50 e nas Tabela 5.13 e Tabela 5.14. Na análise consideram-se os mesmos dados usados no item anterior, ou seja, edifício submetido ao sismo “*El Centro*” e com frequências naturais dentro da faixa de frequências de maior conteúdo energético do sismo. Observa-se na Figura 5.46 que em ambos os casos a força no amortecedor atinge o mesmo valor máximo trabalhando no limite de sua capacidade na maior parte do tempo. Entretanto, como se mostra na Figura 5.50, os ciclos de histerese são distintos nos dois casos. Comparando-se os deslocamentos relativos, acelerações e esforços, observa-se que o amortecedor localizado na base, isolando a estrutura do meio circundante, é bem mais eficiente, levando a uma estrutura bem mais segura e eficiente na presença de deslocamentos de base.

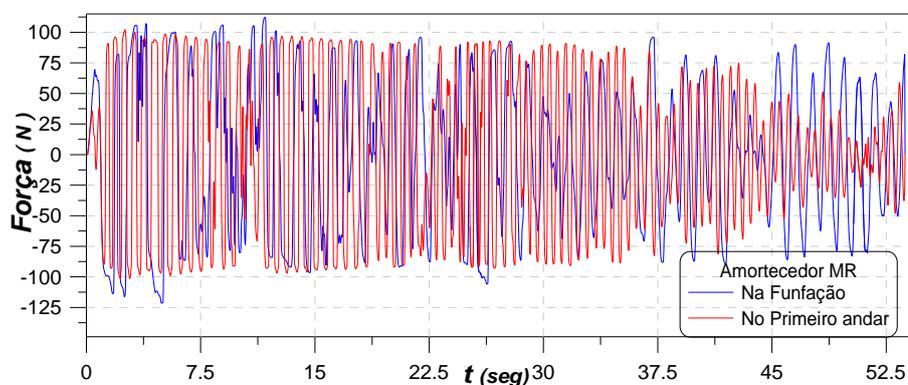


Figura 5.46 Força no amortecedor MR.

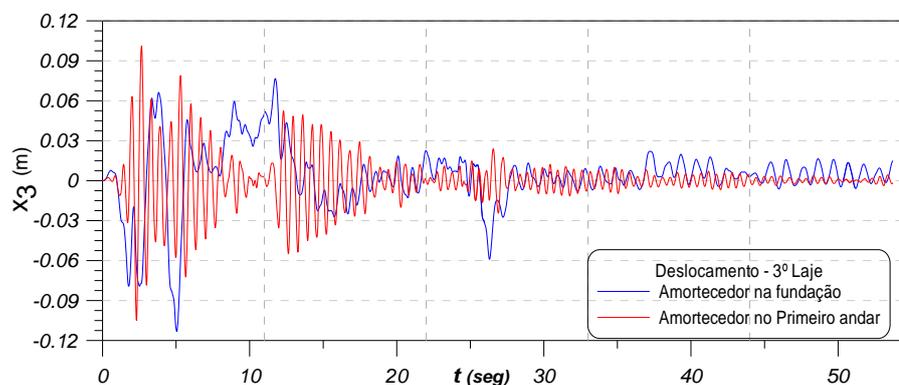


Figura 5.47 Deslocamento absoluto do terceiro andar.

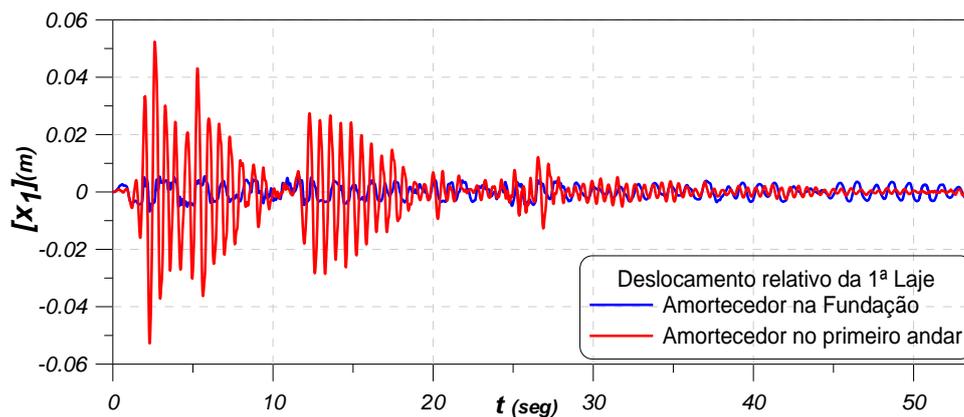


Figura 5.48 Deslocamento relativo do primeiro andar.

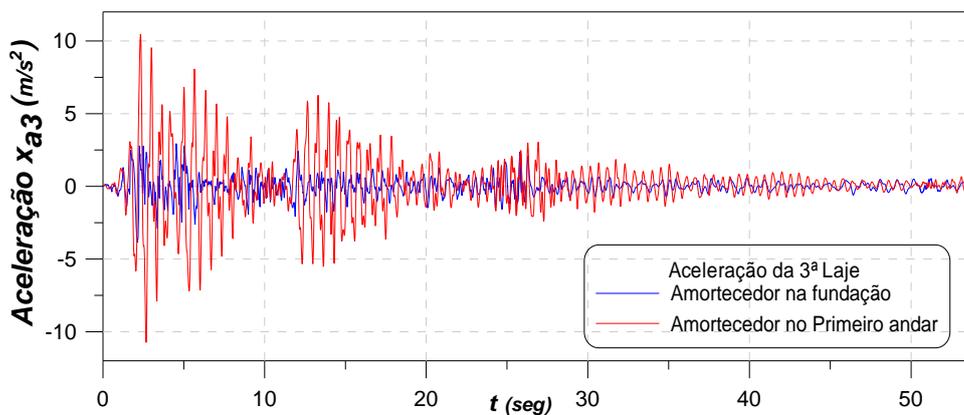


Figura 5.49 Aceleração absoluta do terceiro andar.

Tabela 5.13 Quadro comparativo de respostas máximas da estrutura em função da localização do amortecedor MR.

Descrição	Localização	Localização do amortecedor MR		% Variação
		No Primeiro andar	Na fundação	
Deslocamento absoluto x_i (cm)	Fundação	0,000	10,170	
	1° nível	5,230	10,640	103,44%
	2° nível	8,260	11,050	33,78%
	3° nível	10,100	11,320	12,08%
Deslocamento Relativo ao andar d_i (cm)	1° nível	5,230	0,683	86,94%
	2° nível	3,230	0,974	69,85%
	3° nível	1,980	0,695	64,90%
Aceleração absoluta x''_i (m/s²)	Fundação	0,000	3,610	
	1° nível	5,720	3,500	38,81%
	2° nível	8,230	4,080	50,43%
	3° nível	10,430	3,850	63,09%
Força Amortecedor MR (N)		102	112,17	

Tabela 5.14 Comparação das forças cortantes e momentos fletores nas colunas em função da localização do amortecedor MR. Sismo “*El Centro*”.

Descrição	Localização	Localização do amortecedor MR		% Variação
		No primeiro andar	Na fundação	
Momentos máximos (N-m)	1° nível	1946,050	253,740	86,96%
	2° nível	946,990	287,420	69,65%
	3° nível	587,050	205,130	65,06%
Cortantes máximas (N)	1° nível	653,820	85,250	86,96%
	2° nível	385,800	117,090	69,65%
	3° nível	239,160	83,570	65,06%

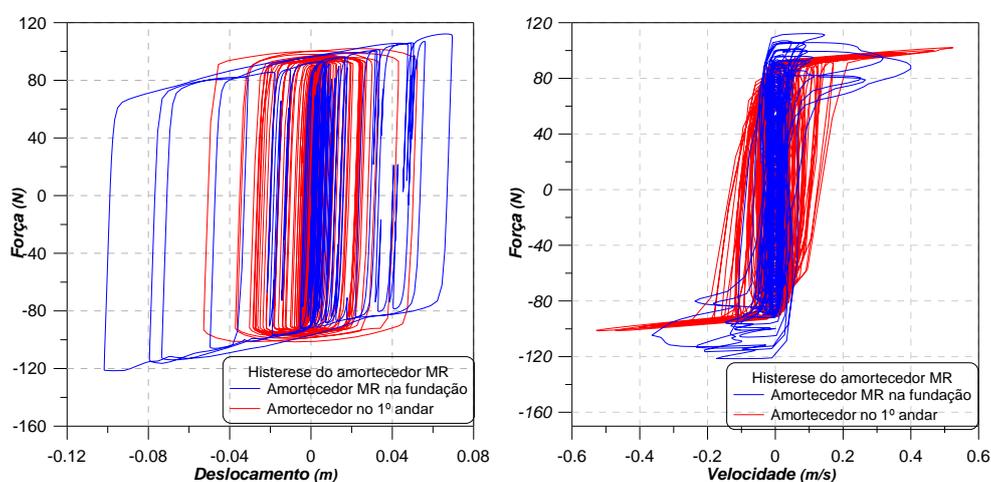


Figura 5.50 Ciclo de histerese do amortecedor MR.

5.8. ANÁLISE DA RESPOSTA DA ESTRUTURA A UM MOVIMENTO DE BASE COM O INCREMENTO DO NÚMERO DE AMORTECEDORES MR.

Neste item estuda-se o efeito de um número crescente de amortecedores MR na base do edifício sobre a redução dos deslocamentos e acelerações. As Figuras apresentadas são para mostrar a não linearidade das respostas com o incremento do número de amortecedores MR., na fundação do edifício.

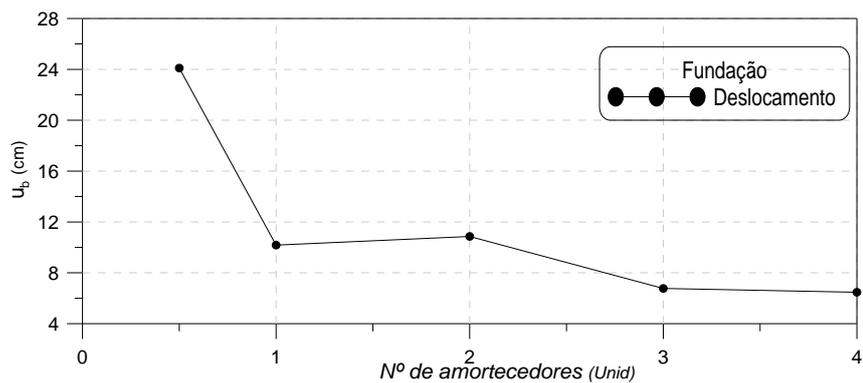


Figura 5.51 Deslocamento da fundação, com o número de amortecedores MR na fundação.

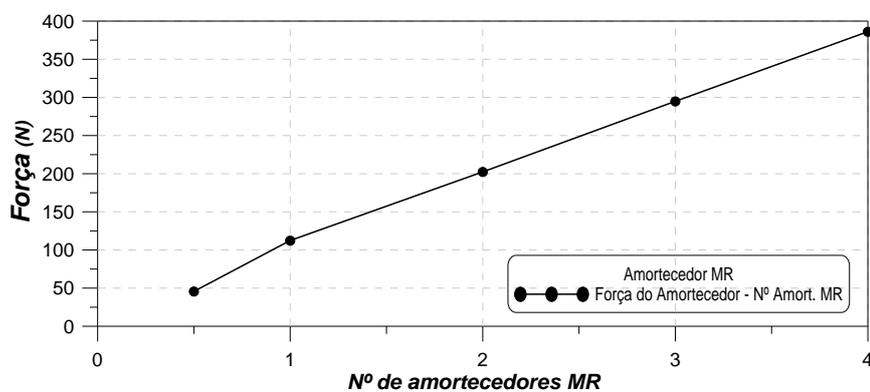


Figura 5.52 Variação da força do amortecedor MR com o número de amortecedores.

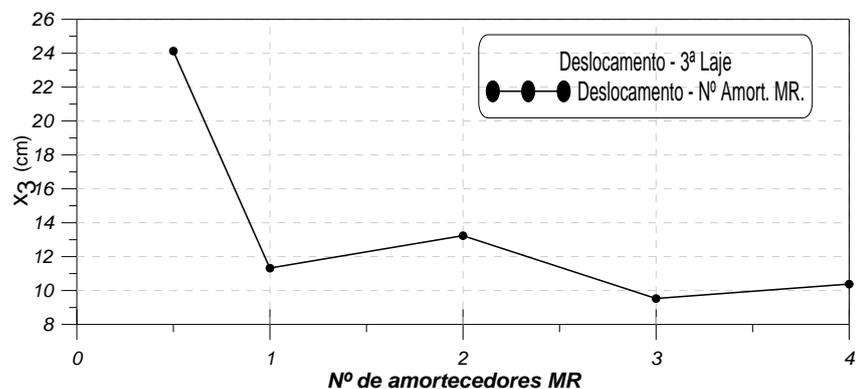


Figura 5.53 Variação do deslocamento do terceiro andar com o número de amortecedores.

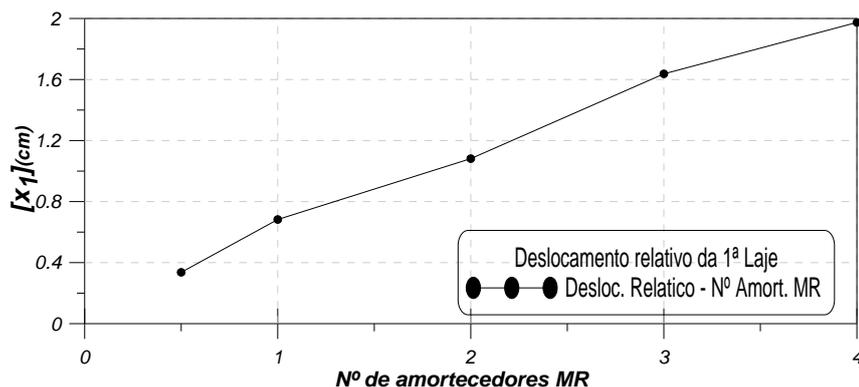


Figura 5.54 Variação do deslocamento relativo do primeiro andar com o número de amortecedores.

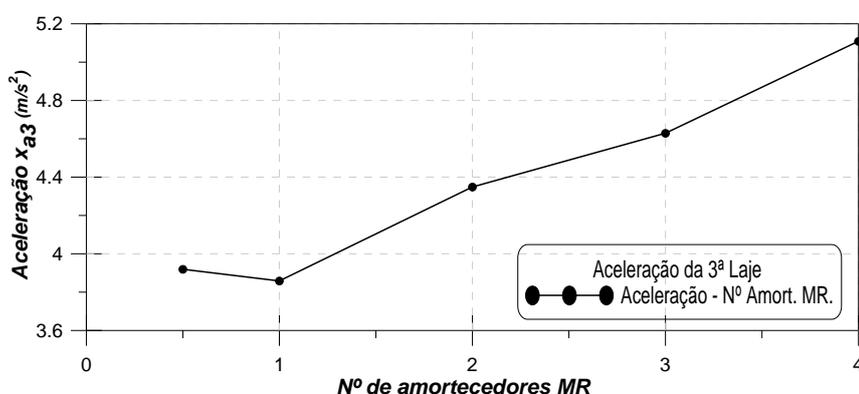


Figura 5.55 Variação da Aceleração do terceiro andar com o número de amortecedores.

Os resultados apresentados nas Figura 5.51 até a Figura 5.55 mostram que há uma variação não linear dos deslocamentos e acelerações com o aumento no número de amortecedores. Há um aumento na força exercida sobre a estrutura, com uma diminuição nos deslocamentos absolutos, mas um acréscimo nos deslocamentos relativos e acelerações. Isto se deve ao aumento da rigidez do sistema de isolamento de base. Um sistema de isolamento de base com maior rigidez faz que uma maior parcela da energia do sismo seja transmitida para a estrutura. Assim, no projeto de um sistema de isolamento de base, deve-se ter em mente que o sistema deve ser robusto o suficiente para suportar a edificação sem, contudo, oferecer grande resistência ao deslocamento horizontal. A Figura 5.56 mostra a variação do deslocamento relativo do primeiro andar para um número crescente de amortecedores, onde se observa o aumento gradativo dos deslocamentos ao longo do tempo com o número de amortecedores.

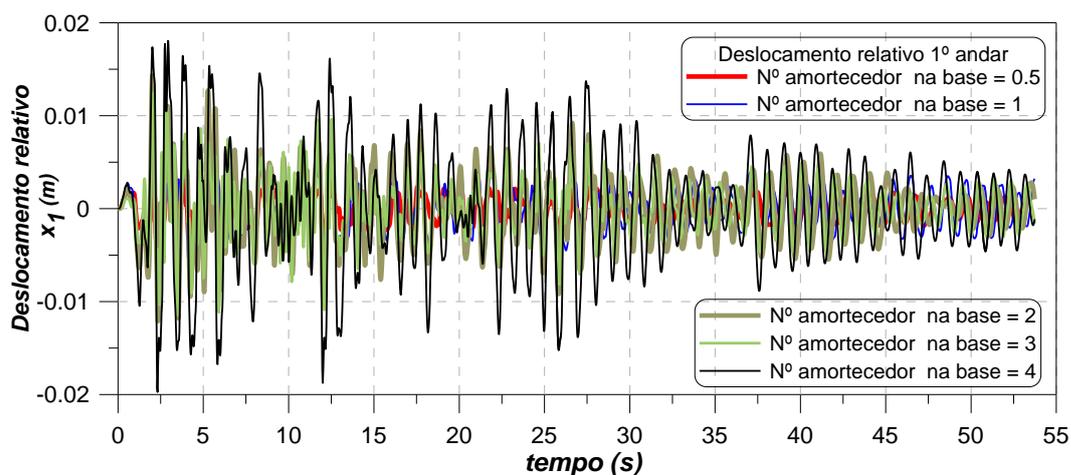


Figura 5.56 Deslocamento relativo do primeiro andar no tempo com acréscimo de número de amortecedores na fundação.

5.9. ESTUDO PARAMÉTRICO DA VARIAÇÃO DA MATRIZ DE RIGIDEZ NA RESPOSTA DO EDIFÍCIO COM ISOLAMENTO DE BASE SOB AÇÃO SÍSMICA.

Como observado nos exemplos anteriores, a relação entre as frequências naturais da estrutura e o espectro de frequências do sismo tem grande influência na eficiência do isolamento de base. Para se estudar esta correlação, fixa-se o movimento de base (terremoto “*El Centro*”) e varia-se a matriz de rigidez do edifício da forma:

$$K = \alpha \cdot 10^5 \begin{bmatrix} 12.0 & -6.84 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix} \begin{matrix} N \\ m \end{matrix} \quad (5.15)$$

onde: $0 < \alpha \leq 1$.

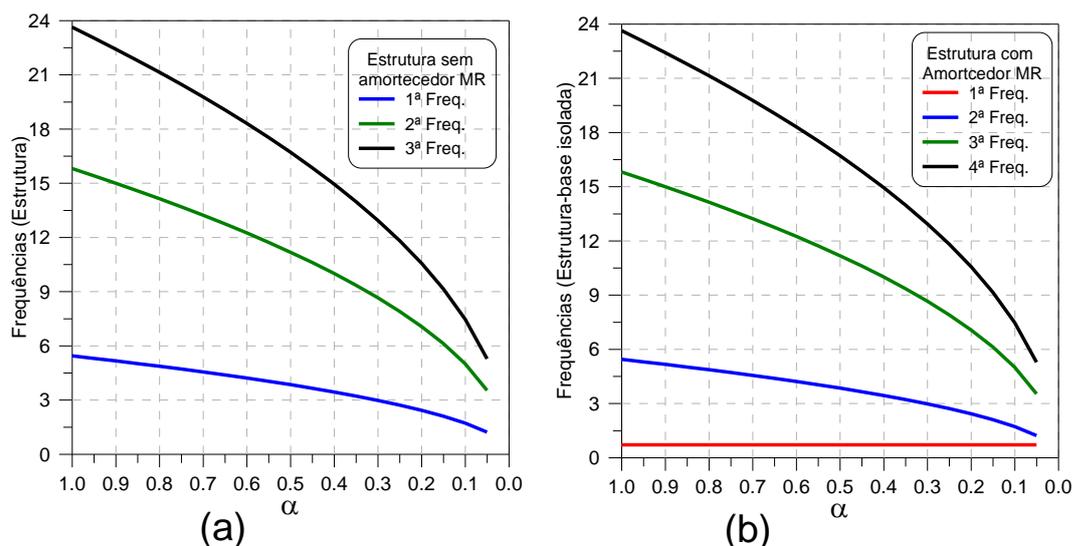


Figura 5.57 Variação das frequências naturais do sistema estrutura-base isolada com o parâmetro α .

A Figura 5.57 mostra a variação das frequências naturais da estrutura sem (Fig. a) e com isolamento de base (fig. b) em função do parâmetro α . A menor frequência na Fig. 5-57(b) está associada ao isolamento de base e mantém-se constante, já que a rigidez do amortecedor MR foi mantida constante durante todo o estudo paramétrico, enquanto as outras três frequências decrescem a medida que α cresce. Quando o valor de α tende a zero e estrutura se torna mais flexível e suas frequências naturais se aproximam cada vez mais da faixa de frequências do sismo com maior conteúdo energético. Observando a Fig. 5-57(a), verifica-se que o isolamento de base tem pouca influência sobre as frequências naturais do edifício.

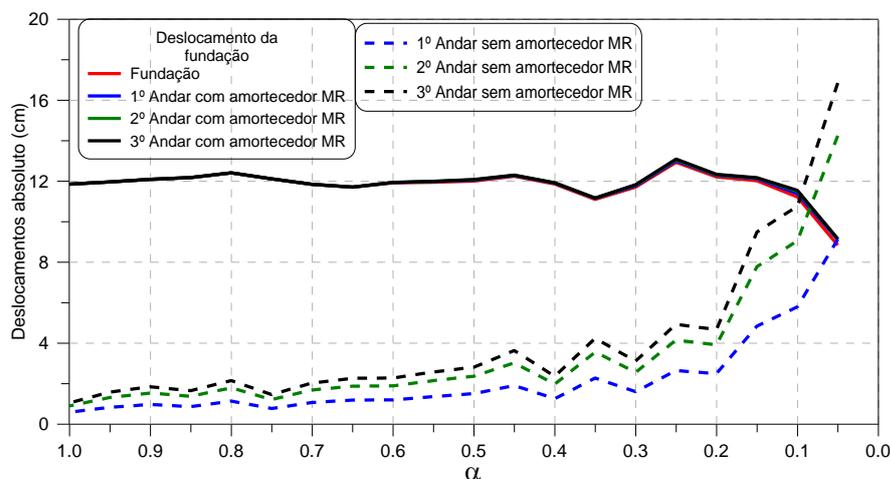


Figura 5.58 Variação dos deslocamentos absolutos máximos sem e com amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .

A Figura 5.58 mostra os deslocamentos absolutos da estrutura com e sem amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α . Para a estrutura com isolamento de base a variação do deslocamento absoluto de cada andar é aproximadamente constante até o valor de $\alpha = 0.2$, depois os deslocamentos da estrutura passam a decrescer de uma forma não linear. No caso da resposta da estrutura sem amortecedor MR os deslocamentos absolutos da estrutura apresentam um crescimento constante com α , sendo que a taxa de crescimento se acelera a partir de $\alpha = 0.2$. Cabe lembrar que α não pode ter valor de zero ($\alpha = 0 =$ estrutura instável). Como esperado, a estrutura isolada apresenta um deslocamento semelhante a um corpo rígido, tendo todos os andares praticamente o mesmo deslocamento absoluto, o que não se observa na estrutura sem isolamento, onde o deslocamento absoluto cresce a partir da base do edifício.

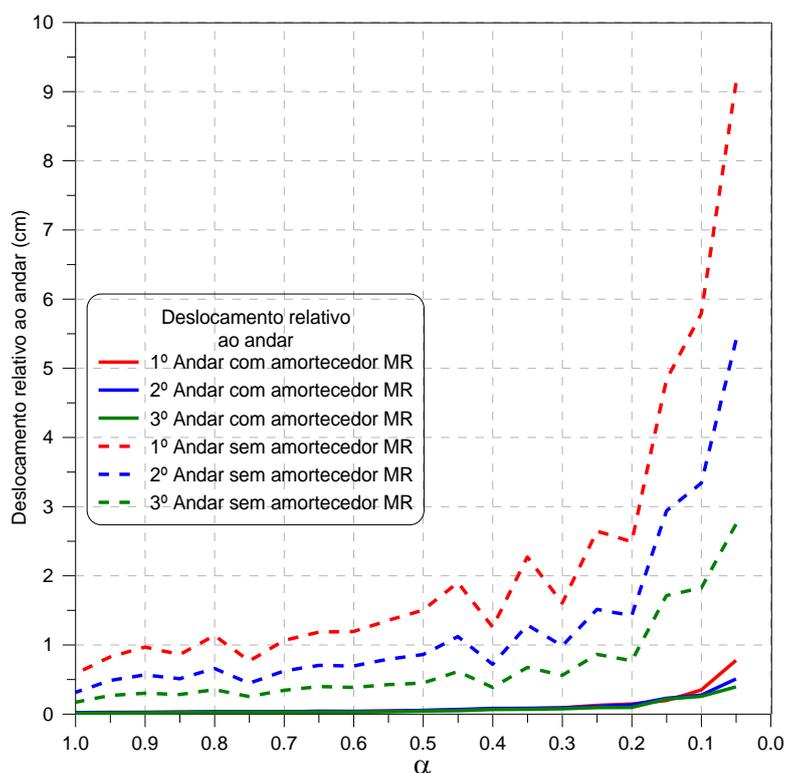


Figura 5.59 Deslocamento relativo de cada andar da estrutura com e sem amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .

A Figura 5.59 mostra os deslocamentos relativos de cada andar com e sem o amortecedor MR na fundação. As linhas tracejadas são os deslocamentos relativos da estrutura sem amortecedor MR, e as linhas contínuas são os deslocamentos relativos de cada andar com o amortecedor MR. Pode observar-se que os deslocamentos relativos da estrutura sem o amortecedor MR na fundação são

muito maiores do que os deslocamentos da estrutura com amortecedor MR na fundação para qualquer valor de α , demonstrando o efeito positivo do isolamento de base. A Figura 5.59 mostra com mais clareza a variação dos deslocamentos relativos da estrutura com deslocamento de base em função da rigidez da estrutura.

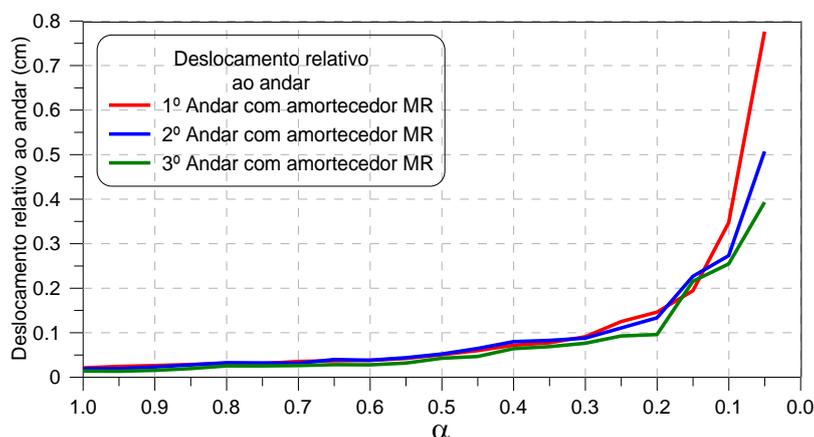


Figura 5.60 Variação dos deslocamentos relativos com o amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .

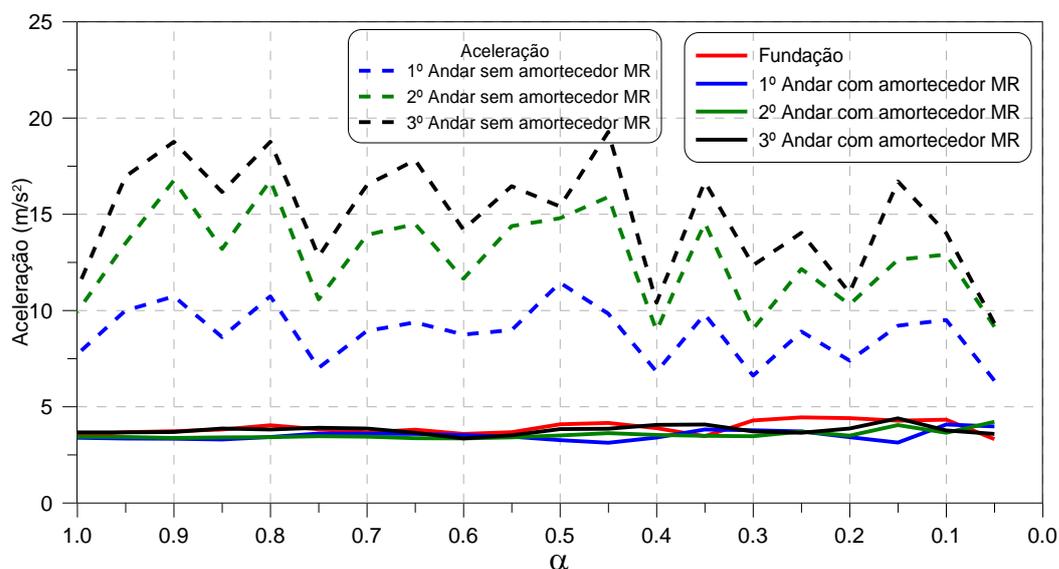


Figura 5.61 Variação da aceleração absoluta do edifícios com e sem amortecedor MR na fundação em função do parâmetro α .

A Figura 5.61 mostra a variação da aceleração de cada andar em função de α , onde as linhas tracejadas são as acelerações dos três andares sem o amortecedor MR, e as linhas contínuas as acelerações considerando o amortecedor MR na fundação. Nota-se que o amortecedor MR não só reduz os deslocamentos relativos, como também as acelerações, contribuindo não somente para a

segurança mas também para o conforto das pessoas e segurança de equipamentos sensíveis a acelerações.

Tabela 5.15 Deslocamentos máximos em função de α .

Parâmetro	Deslocamento absoluto do 3º andar (cm)			Deslocamento relativo do 1º andar (cm)		
	Com AMR	Sem AMR	Diferença %	Sem AMR	Com AMR	Diferença %
0.05	9.151	16.852	45.699	9.123	0.776	91.492
0.1	11.546	10.758	6.826	5.789	0.347	94.012
0.15	12.167	9.487	22.024	4.836	0.194	95.986
0.2	12.335	4.666	62.172	2.490	0.146	94.138
0.25	13.086	4.927	62.346	2.645	0.125	95.284
0.3	11.825	3.112	73.686	1.602	0.091	94.319
0.35	11.166	4.230	62.116	2.270	0.077	96.599
0.4	11.922	2.358	80.221	1.255	0.072	94.294
0.45	12.293	3.633	70.446	1.900	0.060	96.855
0.5	12.083	2.810	76.743	1.503	0.050	96.652
0.55	11.991	2.570	78.563	1.353	0.042	96.908
0.6	11.938	2.271	80.976	1.193	0.038	96.840
0.65	11.702	2.261	80.682	1.184	0.037	96.904
0.7	11.842	2.027	82.880	1.062	0.035	96.700
0.75	12.113	1.459	87.952	0.766	0.030	96.045
0.8	12.405	2.145	82.707	1.134	0.031	97.280
0.85	12.179	1.650	86.453	0.859	0.028	96.714
0.9	12.090	1.841	84.773	0.967	0.026	97.293
0.95	11.956	1.579	86.790	0.826	0.024	97.071
1	11.852	1.046	91.173	0.583	0.021	96.402

A Tabela 5.15, mostra a variação dos deslocamentos absolutos do terceiro andar e dos deslocamentos relativos do primeiro andar da estrutura com e sem amortecedor magnetoreológico (AMR) em função de α . Verifica-se uma redução de mais de 90% nos deslocamentos relativos do primeiro andar onde ocorrem em geral os maiores esforços durante um sismo, independente do valor de α . Isto se traduz em uma redução de mesma magnitude nos esforços, já que estes são proporcionais aos deslocamentos relativos. Isto se deve ao fato do edifício se deslocar praticamente como um corpo rígido, sendo o grande deslocamento absoluto observado na estrutura isolada devido à deformação do sistema de

isolamento. Sem isolamento, decrescem os deslocamentos absolutos, mas há um acréscimo nos deslocamentos relativos.

Tabela 5.16 Acelerações máximas em função de α .

Parâmetro	Aceleração absoluto do 3º andar (m/s ²)		
	Sem AMR	Com AMR	Diferença %
0.05	9.326	3.575	61.661
0.1	14.020	3.763	73.158
0.15	16.702	4.386	73.742
0.2	10.918	3.864	64.606
0.25	14.032	3.639	74.067
0.3	12.344	3.712	69.927
0.35	16.687	4.066	75.635
0.4	10.404	4.048	61.091
0.45	19.268	3.854	80.000
0.5	15.396	3.832	75.108
0.55	16.452	3.511	78.657
0.6	14.197	3.350	76.401
0.65	17.810	3.641	79.558
0.7	16.510	3.860	76.622
0.75	12.813	3.898	69.581
0.8	18.761	3.805	79.717
0.85	16.148	3.857	76.117
0.9	18.761	3.681	80.380
0.95	16.959	3.656	78.443
1	11.110	3.657	67.081

A Tabela 5.16 mostra a variação da aceleração do terceiro andar em função da variação de α . A resposta da estrutura sem o amortecedor MR na fundação tem uma pequena variação em função de α . Para uma estrutura mais flexível $\alpha = 0.05$ a aceleração do terceiro andar é 9.32 m/s^2 e para uma estrutura mais rígida $\alpha = 1$ a aceleração é de 11.11 m/s^2 . A maior aceleração é de 19.23 m/s^2 e ocorre para $\alpha = 0.45$. Em todos os casos a redução em virtude do isolamento de base é superior a 60%

Para a resposta da estrutura com o amortecedor MR na fundação a resposta da estrutura em termos de aceleração é aproximadamente constante para todos os valores de α . Para a estrutura mais flexível, $\alpha = 0.05$, a aceleração é de 3.57 m/s^2 , e para a estrutura mais rígida $\alpha = 1$ a aceleração é de 3.65 m/s^2 .

5.10. ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA COM ISOLAMENTO DE BASE SOB AÇÃO SÍSMICA DO TERREMOTO LOMA PRETA

Os sinais dos terremotos variam bastante em magnitude, conteúdo de frequências e resposta no tempo. Neste exemplo apresenta-se a análise dinâmica da estrutura-isolador de base com o amortecedor MR submetido ao terremoto de “*Loma Preta*”, (componente NS) Figura 5.62, o qual é catalogado como um dos sismos mais importantes no mundo (San Francisco - EE.UU).

A componente NS do terremoto de “*Loma Preta*” tem um conteúdo de frequências (Figura 5.63) diferente do sismo “*El Centro*”, usado nos exemplos anteriores, e uma aceleração máxima de 0.08g

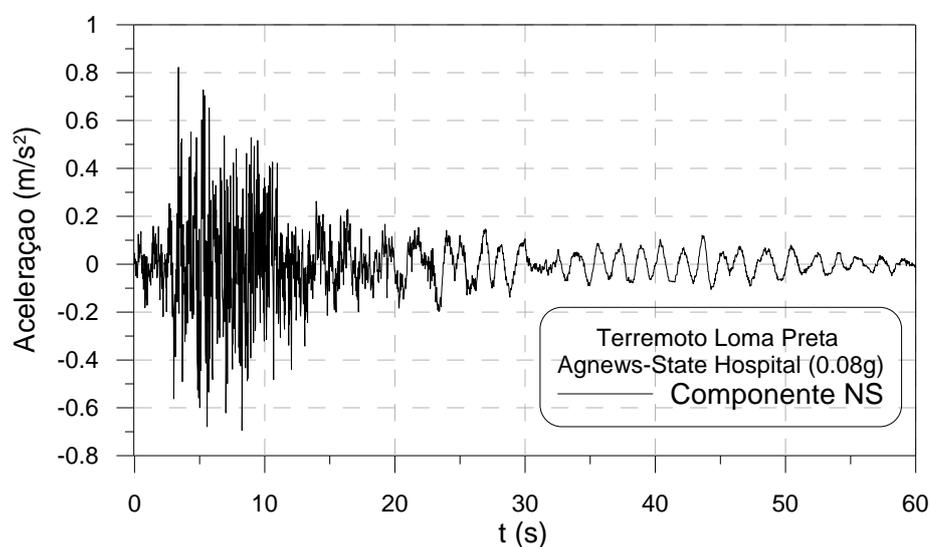


Figura 5.62 Acelerograma do sismo “*Loma Preta*” (Center for engineering strong motion data. Acessada em 05/03/2012)

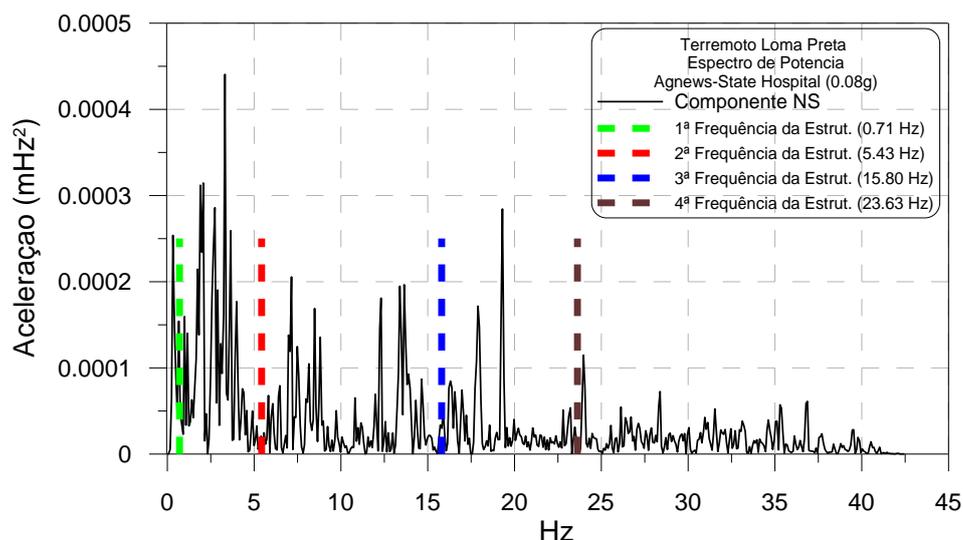


Figura 5.63 Conteúdo de Frequências do sismo “Loma Preta” e da estrutura ($\alpha=1$)

As matrizes de massa eq. (5.1), amortecimento eq.(5.2) e rigidez eq. (5.3), acopladas de acordo com a eq.(3.63) são utilizadas neste exemplo. Considera-se o mesmo amortecedor MR usado anteriormente.

A Figura 5.64 mostra a força exercida pelo amortecedor MR em função do tempo. O valor máximo da força do amortecedor MR é de 91.31 N. A Figura 5.65 mostra a variação no tempo do deslocamento absoluto do terceiro andar da estrutura com e sem amortecedor MR. O valor máximo alcançado pela estrutura com isolador de base é de 1.038 cm e para estrutura sem o amortecedor MR é de 0.27 cm, como mostrado na Tabela 5.17.

O maior deslocamento da estrutura isolada é devido á maior flexibilidade que tem isolador base (amortecedor MR). No entanto; os deslocamentos relativos de cada andar da estrutura isolada são muito menores do que os da estrutura sem o amortecedor MR. Para este caso se tem uma redução de até 88%, como mostra a Tabela 5.17. A Figura 5.68 mostra o ciclo de histerese do amortecedor MR e a quantidade da energia sísmica dissipada.

A Figura 5.67 mostra a aceleração do terceiro andar em função do tempo. Neste caso também pode ser visto que o amortecedor MR provoca uma redução da aceleração até em um 70%, como é mostrado também na Tabela 5.17.

A

Tabela 5.18 mostra os momentos fletores e a forças cortantes máximas, geradas pelo sismo nas colunas do edifício. Nota-se que a inclusão do

amortecedor MR na fundação do edifício provoca uma redução da mesma ordem de grandeza da observada para os deslocamentos relativos de cada andar (cerca de 88%).

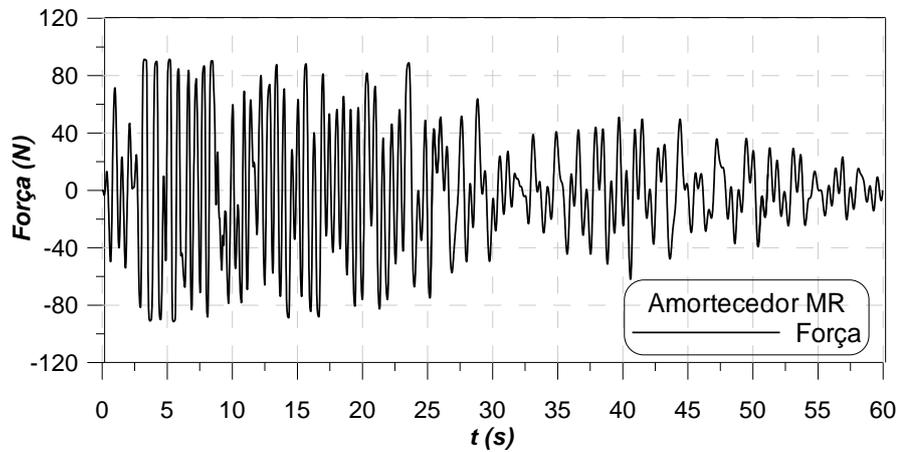


Figura 5.64 Força exercida pelo amortecedor MR. Sismo “Loma Preta”

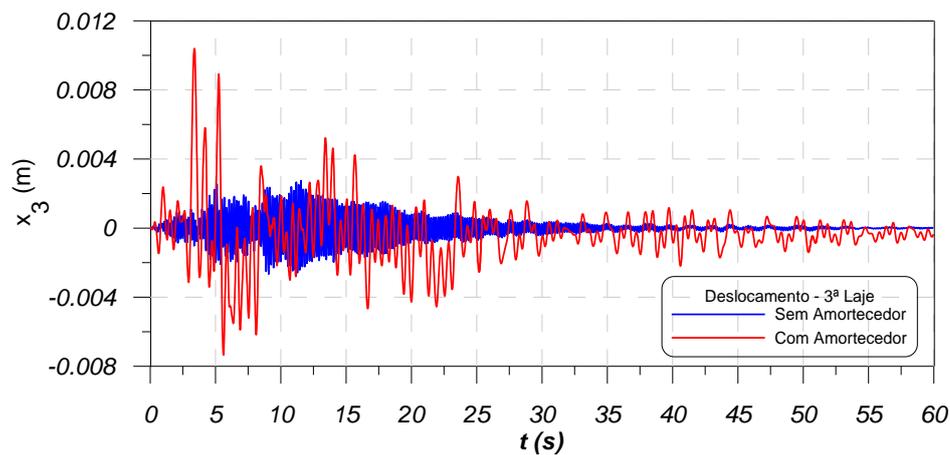


Figura 5.65 Deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob ação do sismo “Loma Preta”; com e sem amortecedor MR na base.

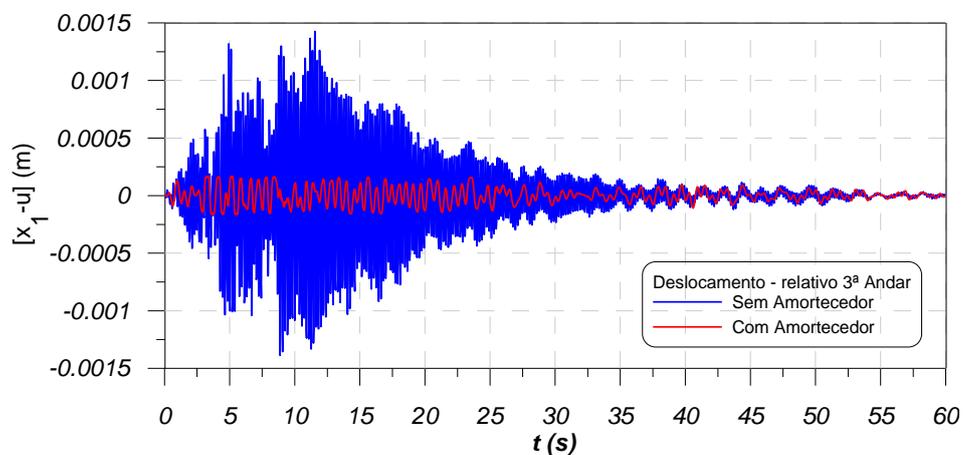


Figura 5.66 Deslocamento relativo do primeiro andar. Estrutura sob ação do sismo “Loma Preta”, com e sem amortecedor MR na base.

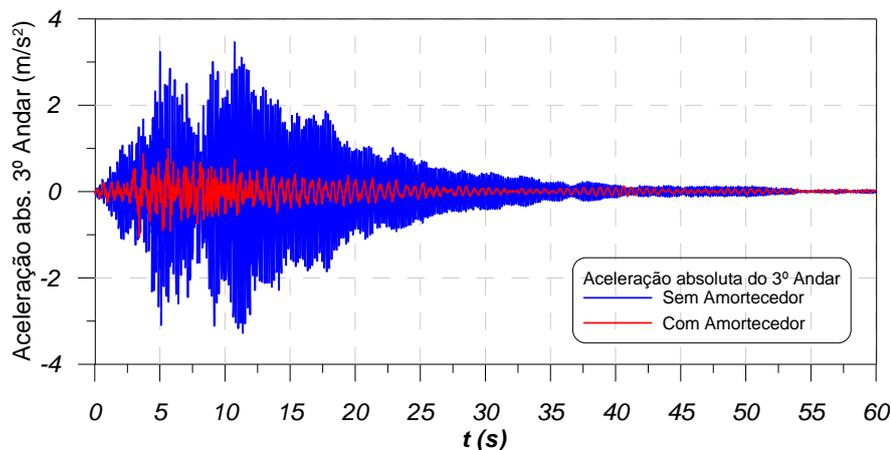


Figura 5.67 Variação da aceleração absoluta do terceiro andar. Estrutura sob a ação do sismo “Loma Preta”, com e sem amortecedor MR na base.

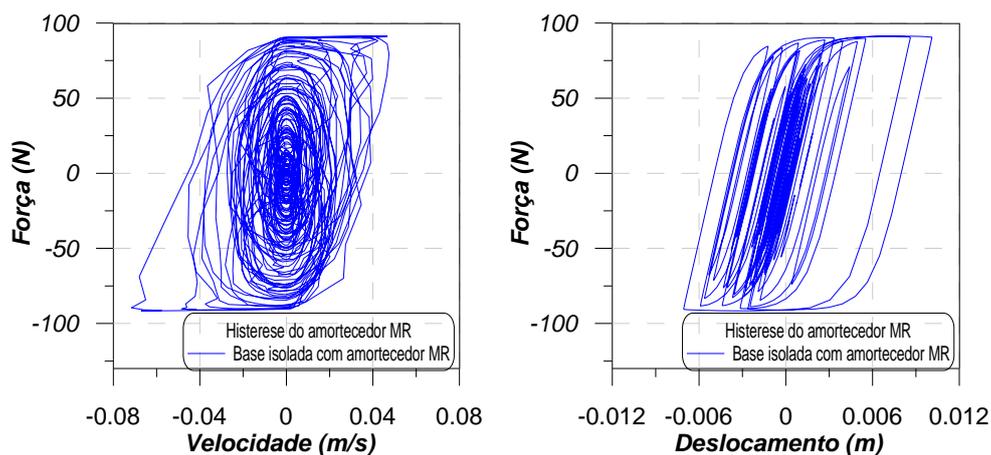


Figura 5.68 Ciclo de histerese do amortecedor MR; sismo “Loma Preta”

5.11. ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA COM MAIOR FLEXIBILIDADE COM ISOLAMENTO DE BASE. SOB AÇÃO SÍSMICA DO TERREMOTO LOMA PRETA

Neste exemplo a estrutura é considerada com uma maior flexibilidade e suas frequências naturais encontram-se dentro da faixa das frequências principais do terremoto de “Loma Preta”, como é mostrado na Figura 5.69. A flexibilidade da estrutura é conseguida multiplicando a matriz de rigidez por $\alpha = 0.05$, como mostrado anteriormente. A Figura 5.71

mostra a resposta do deslocamento absoluto do terceiro andar, pode-se notar que o deslocamento da estrutura sem o amortecedor MR é bem maior do que a resposta com o amortecedor MR. Fazendo uma comparação das Figura 5.65 com a Figura 5.71 (estrutura mais rígida e flexível respectivamente), pode-se observar a importância da rigidez da estrutura na resposta do sistema. Neste exemplo a redução máxima que provoca o amortecedor MR na aceleração de cada andar é de 51.34% para o segundo andar, como mostrado na Tabela 5.19. Os momentos fletores e forças cortantes são reduzidos em até 78.43%, como mostra a

Tabela 5.18. Como esperado, estas reduções são menores que aquelas observadas para a estrutura bem mais rígida ($\alpha=1$). Ainda assim estes valores mostram uma redução significativa nos esforços devidos ao sismo, mostrando o efeito benéfico do isolamento sobre a estrutura.

Tabela 5.17 Quadro comparativo de respostas máximas.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Deslocamento absoluto</i> x_i (cm)	Fundação	0	1.01	
	1° nível	0.140	1.026	-632.86%
	2° nível	0.220	1.034	-370.00%
	3° nível	0.270	1.038	-284.44%
<i>Deslocamento Relativo</i> d_i (cm)	1° nível	0.140	0.016	88.57%
	2° nível	0.084	0.010	88.33%
	3° nível	0.047	0.005	88.51%
<i>Aceleração absoluta</i> \ddot{x}_i (m/s^2)	Fundação	0.000	0.990	
	1° nível	2.200	1.080	50.91%
	2° nível	2.620	1.090	58.40%
	3° nível	3.460	1.060	69.36%
<i>Força Amortecedor MR</i> (N)	1° nível	0	91.31	

Tabela 5.18 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos fletores máximos nas colunas.

Descrição	Localização	Sem amortecedor MR	Com amortecedor MR	% Variação
Momentos máximos (N-m)	1º nível	53.000	6.220	88.26%
	2º nível	24.800	2.910	88.27%
	3º nível	13.990	1.610	88.49%
Cortantes máximas (N)	1º nível	17.800	2.090	88.26%
	2º nível	10.100	1.180	88.32%
	3º nível	5.700	0.650	88.60%

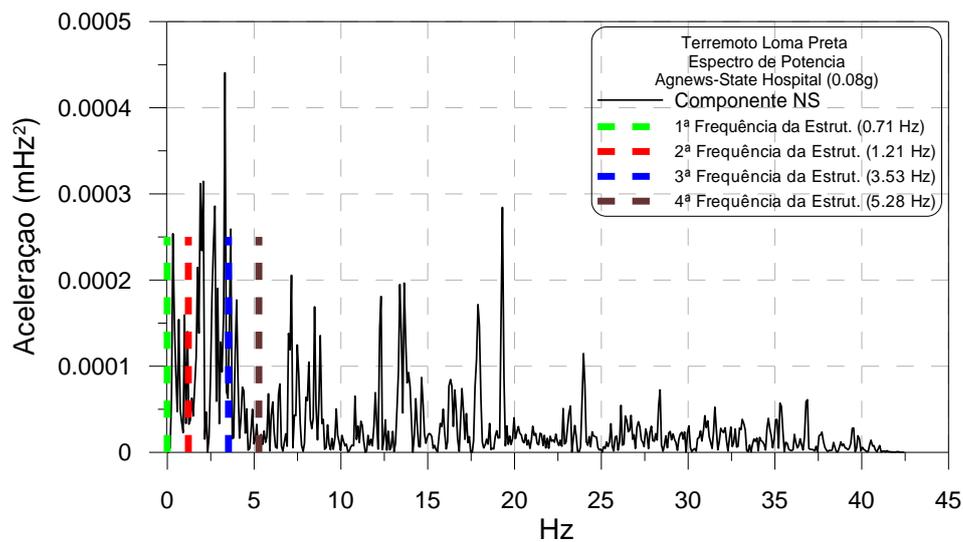


Figura 5.69 Conteúdo de Freqüências do sismo “Loma Preta”, e da estrutura ($\alpha=0.05$).

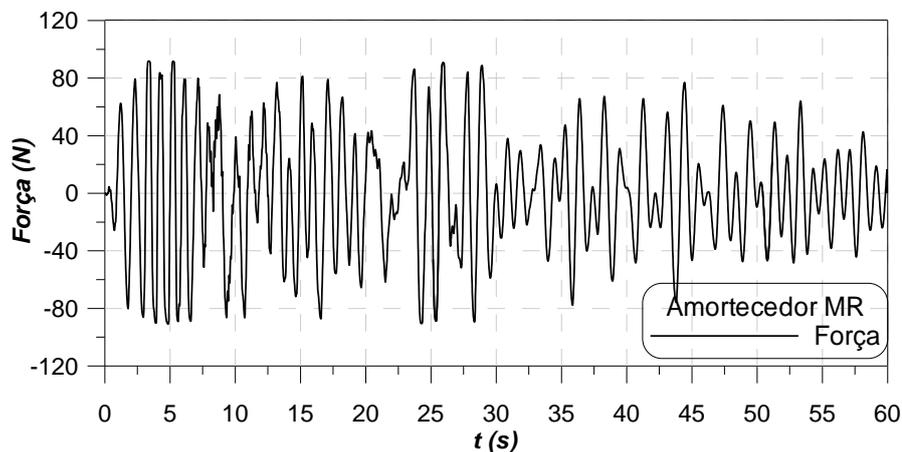


Figura 5.70 Força exercida pelo amortecedor MR. Sismo “Loma Preta”

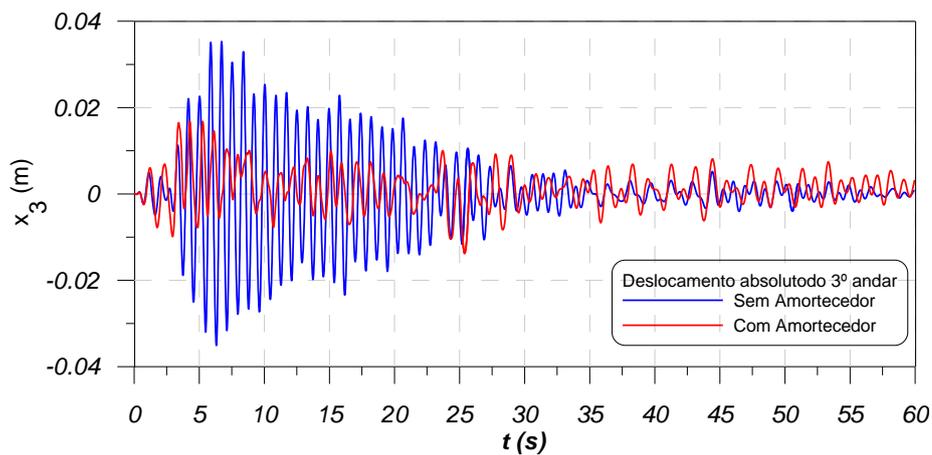


Figura 5.71 Deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob ação do sismo “Loma Preta”; com e sem amortecedor MR na base.

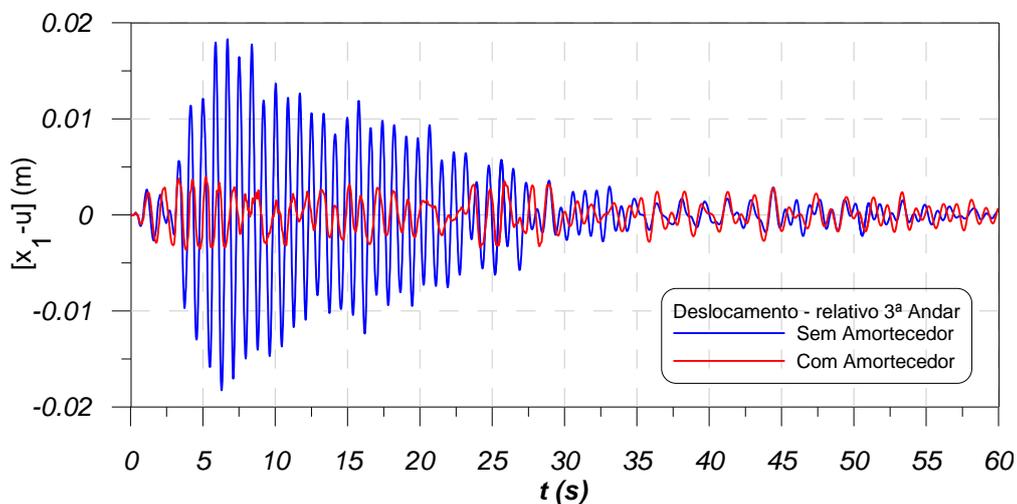


Figura 5.72 Deslocamento relativo do primeiro andar. Estrutura sob ação do sismo “Loma Preta”, com e sem amortecedor MR na base.

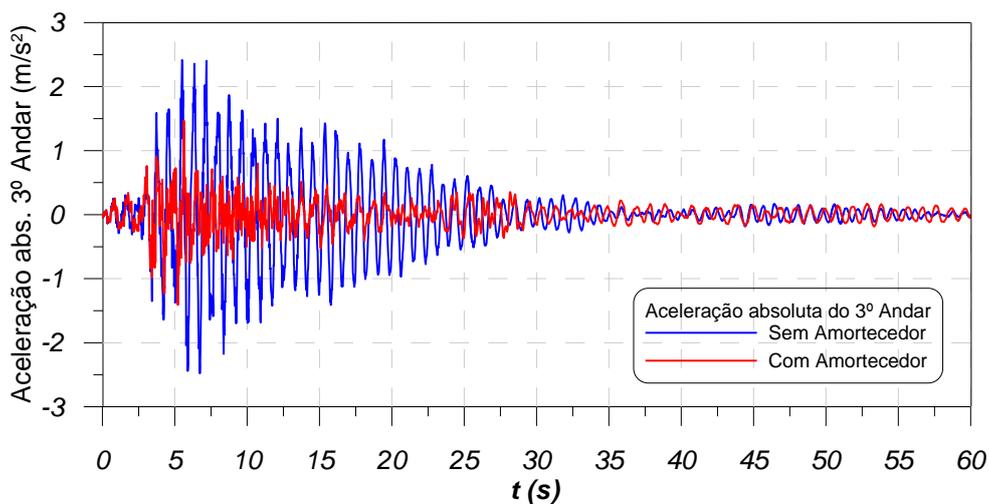


Figura 5.73 Aceleração absoluta do terceiro andar no tempo. Estrutura sob ação do sismo “Loma Preta”, com e sem amortecedor MR na base.

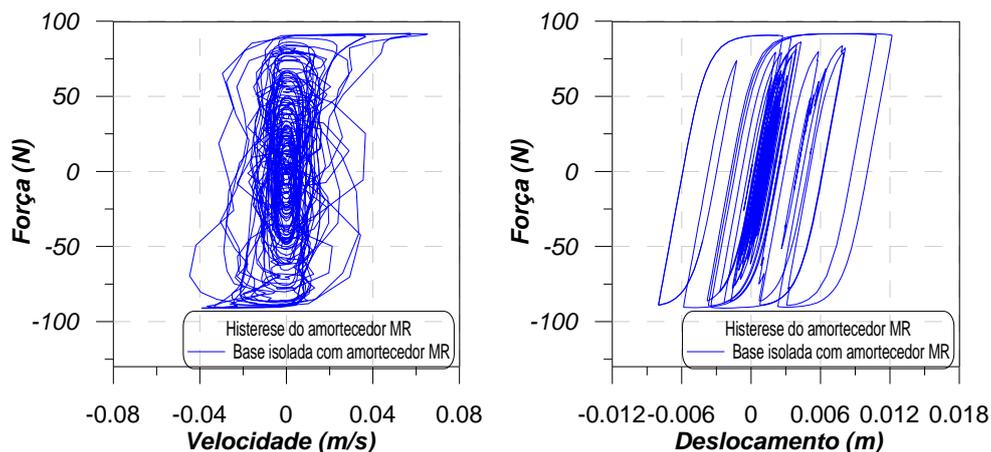


Figura 5.74 Ciclo de histerese do amortecedor MR; sismo “Loma Preta” estrutura mais flexível

Tabela 5.19 Quadro comparativo de respostas máximas.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
Deslocamento absoluto x_i (cm)	Fundação	0	1.21	
	1º nível	1.820	1.510	17.03%
	2º nível	2.930	1.600	45.39%
	3º nível	3.520	1.670	52.56%
Deslocamento Relativo d_i (cm)	1º nível	1.820	0.390	78.57%
	2º nível	1.110	0.330	70.27%
	3º nível	0.630	0.250	60.32%
Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s^2)	Fundação	0.000	1.330	
	1º nível	1.940	1.200	38.14%
	2º nível	2.240	1.090	51.34%
	3º nível	2.480	1.470	40.73%
Força Amortecedor MR (N)	1º nível	0	91.78	

Tabela 5.180 Tabela comparativa de forças cortantes e momentos fletores máximos nas colunas.

Descrição	Localização	Sem amortecedor MR	Com amortecedor MR	% Variação
Momentos máximos (N-m)	1º nível	679.780	146.610	78.43%
	2º nível	328.150	98.520	69.98%
	3º nível	187.670	74.980	60.05%
Cortantes máximas (N)	1º nível	228.390	49.250	78.44%
	2º nível	133.680	40.140	69.97%
	3º nível	76.460	30.540	60.06%