

6 ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA TORRE SUBMETIDA A UM MOVIMENTO DE BASE

6.1. CARACTERÍSTICAS DO MODELO

Apresenta-se neste capítulo a análise de uma estrutura esbelta com base na formulação desenvolvida no capítulo 3.5, eq.(3.61). As características físicas e geométricas da estrutura necessárias à dedução das matrizes de massa e rigidez são apresentadas na Figura 6.1. Os parâmetros característicos do amortecedor MR também são os mesmos do que foram utilizados nos exemplos do capítulo 5.

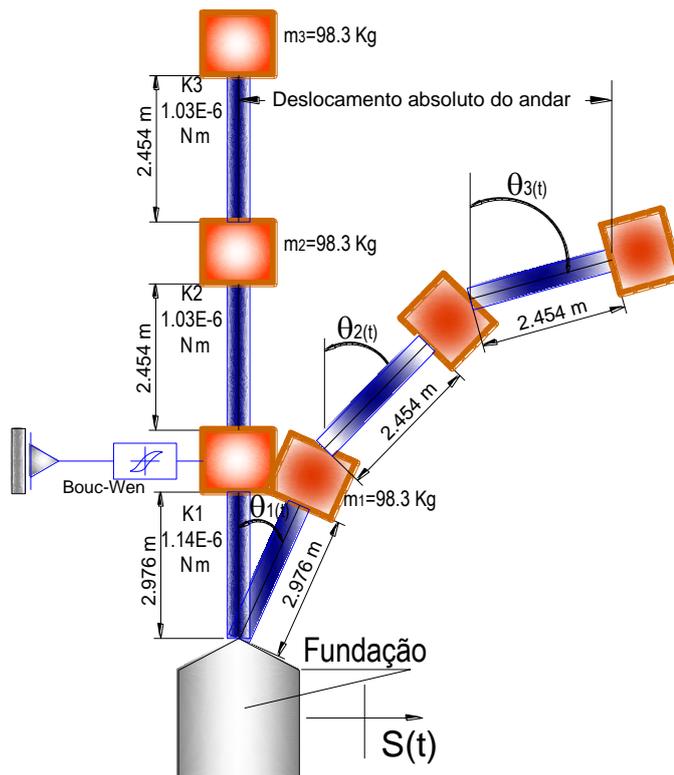


Figura 6.1 Superestrutura de uma torre modelada como um pêndulo múltiplo. Dados físicos e geométricos.

A matriz de massas linearizada, considerando pequenos deslocamentos, é dada por

$$M = \begin{bmatrix} 2612.53 & 1436.33 & 718.16 \\ 1436.33 & 1184.51 & 592.25 \\ 718.16 & 592.25 & 592.25 \end{bmatrix} Kg \quad (6.1)$$

A matriz de amortecimento da estrutura é dada por

$$Kr = 10^6 \cdot \begin{bmatrix} 2.173 & -1.030 & 0 \\ -1.030 & 2.060 & -1.030 \\ 0 & -1.030 & 1.030 \end{bmatrix} N \cdot m \quad (6.2)$$

A matriz de amortecimento da superestrutura é tomada como.

$$Cr = \begin{bmatrix} 184.27 & -41.53 & 3.18 \\ -41.53 & 95.81 & -47.42 \\ 3.18 & -47.42 & 44.90 \end{bmatrix} N \cdot m \cdot s \quad (6.3)$$

As frequências naturais e modos de vibração da estrutura são mostrados na Figura 6.2. Nota-se que as frequências são inferiores às do shear bulding, apesar de se ter adotado as mesmas massas e colunas com as mesmas características geométricas.

6.1.1. FREQUÊNCIAS E MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA.

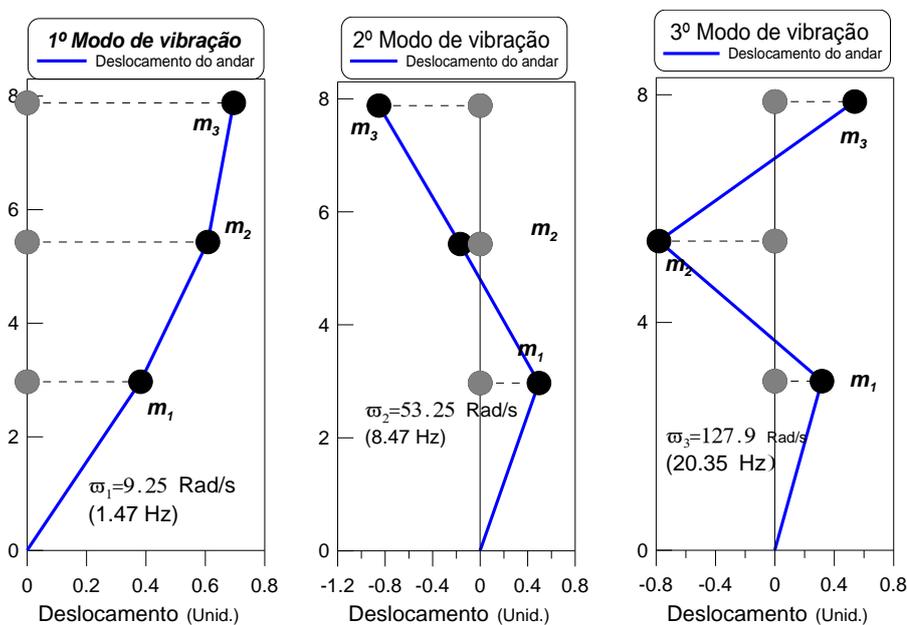


Figura 6.2 Frequências naturais e modos de vibração da estrutura.

6.2. ANÁLISE DINÂMICA SOB UMA EXCITAÇÃO DE BASE HARMÔNICA

Inicialmente considera-se uma excitação harmônica de base, eq.(5.4), com uma frequência de excitação de $\Omega = 9.25 \frac{rad}{s}$ e magnitude de 0.3g.

O amortecedor MR está localizado no primeiro andar, como ilustra a Figura 6.3. A força exercida pelo amortecedor é proporcional ao deslocamento horizontal da primeira massa, x_1 ($x_i = x_{(i-1)} + h_i \cdot \text{sen}(\theta_i)$).

A Figura 6.4 mostra a força exercida pelo amortecedor ao longo do tempo, enquanto as Figura 6.5 e Figura 6.6 mostram, respectivamente, a variação do deslocamento e aceleração da terceira massa que correspondem aos valores máximos observados na estrutura. Cabe lembrar que a estrutura foi excitada na região de ressonância associada ao primeiro modo de vibração.

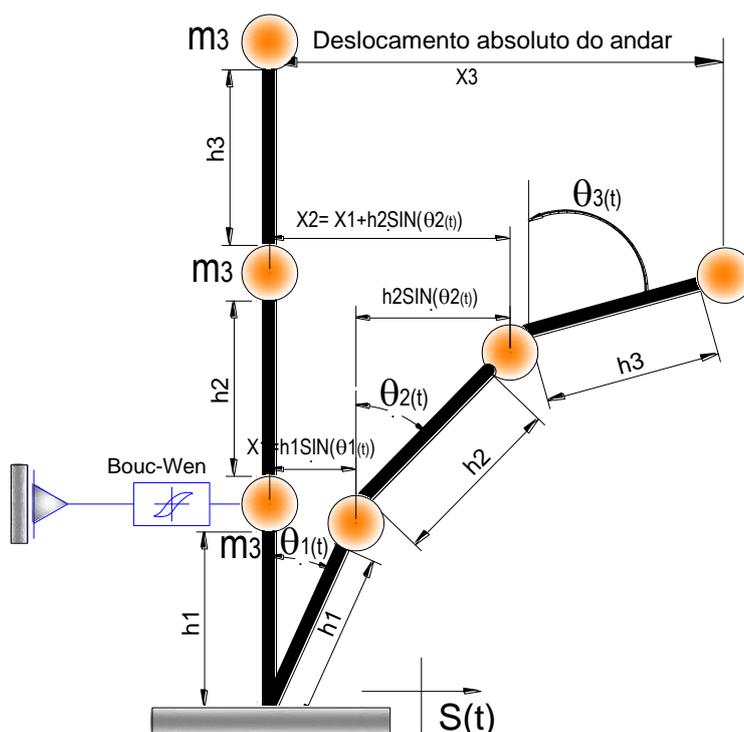


Figura 6.3 Quantificação do deslocamento horizontal x_i em função do giro $\theta_i(t)$.

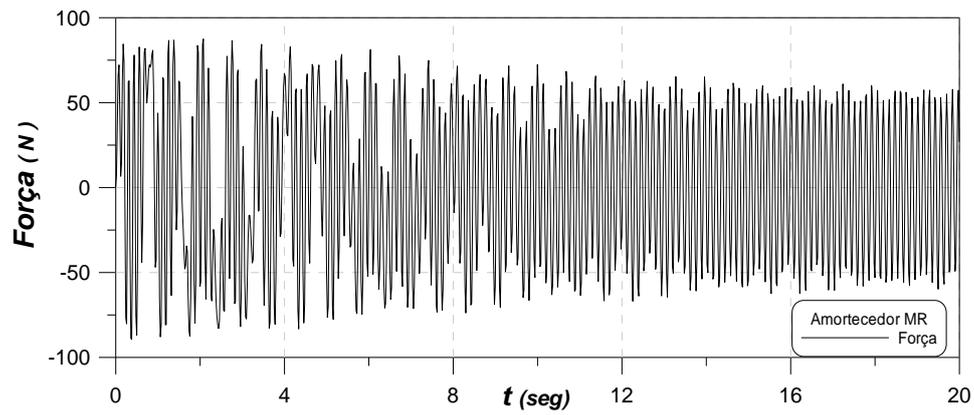


Figura 6.4 Variação no tempo da força no amortecedor MR para a excitação harmônica.

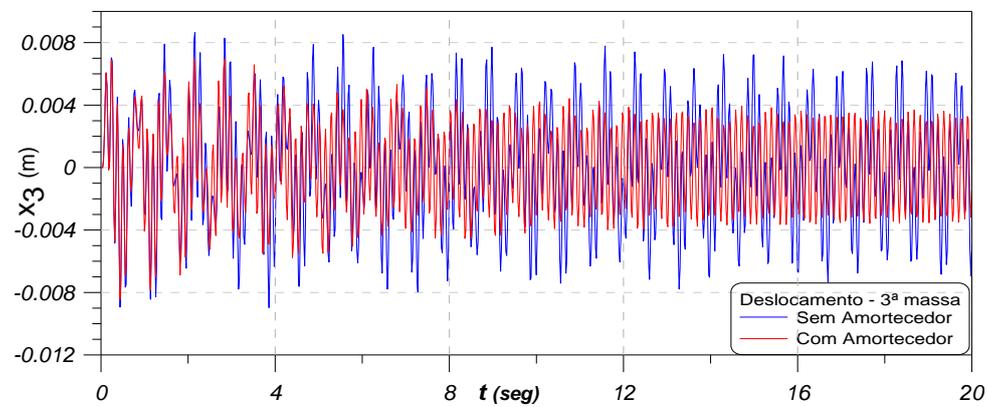


Figura 6.5 Variação no tempo do deslocamento absoluto do terceiro andar. Estrutura sob uma excitação harmônica.

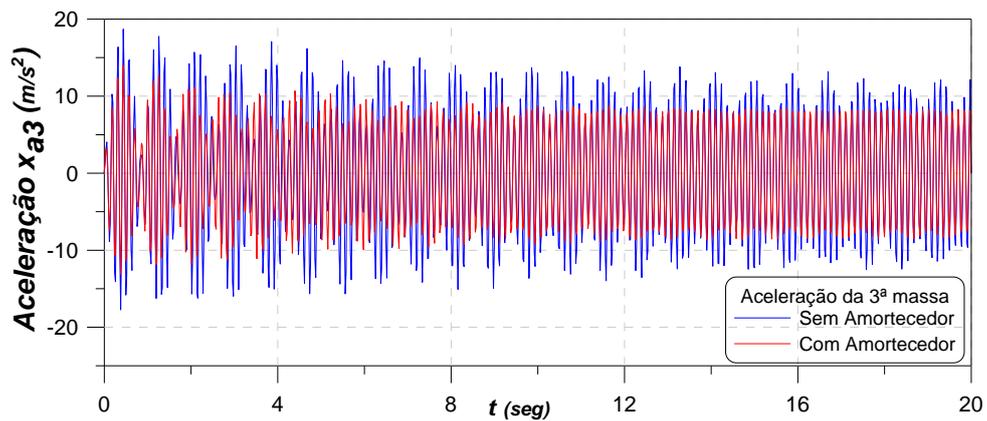


Figura 6.6 Variação no tempo da aceleração absoluta do terceiro andar. Estrutura sob uma excitação harmônica.

Tabela 6.1 Tabela comparativa das respostas máximas. Excitação harmônica.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Deslocamento absoluto x_i (cm)</i>	1º nível	0,546	0,428	21,61%
	2º nível	0,707	0,657	7,07%
	3º nível	1,320	1,160	12,12%
<i>Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s²)</i>	1º nível	17,650	13,470	23,68%
	2º nível	21,979	17,519	20,29%
	3º nível	18,688	13,915	25,54%
<i>Força Amortecedor MR (N)</i>	1º nível	0	87,397	

Os valores máximos da resposta da superestrutura, considerando o sistema com e sem amortecedor são apresentados na Tabela 6.1. Observa-se que para esta classe de estruturas as maiores reduções ocorrem na aceleração das massas, atingindo valores superiores a 20% em todos os andares. Neste exemplo, o sistema sem amortecedor MR apresenta uma resposta complexa, com uma espécie de batimento, em virtude da não linearidade geométrica, que desaparece quando se coloca o amortecedor. A dissipação de energia é ilustrada na Figura 6.7.

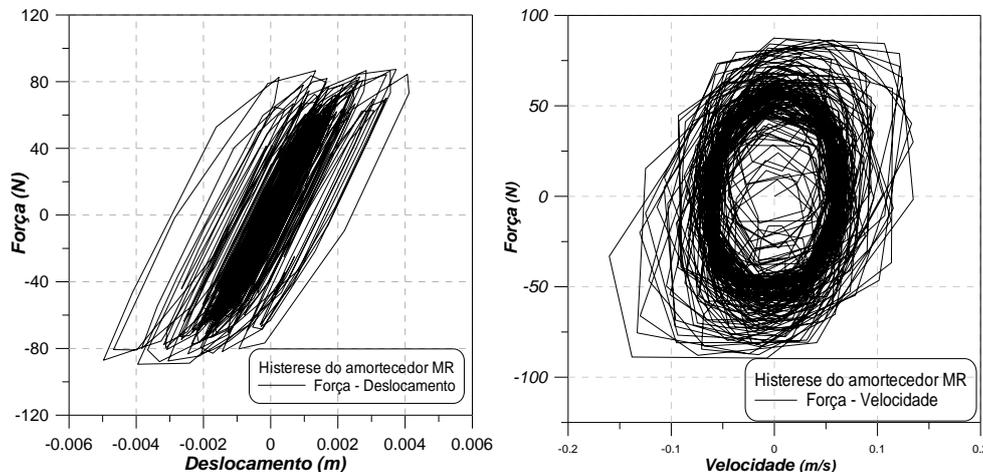


Figura 6.7 Ciclo de histerese do amortecedor MR; excitação harmônica.

6.3. SUPERESTRUTURA SOB AÇÃO DO SISMO EL CENTRO.

Considera-se agora, como no capítulo anterior, a estrutura sob a ação do sismo El Centro. Na Figura 6.8 comparam-se as frequências naturais da estrutura com o espectro de frequências do El Centro.

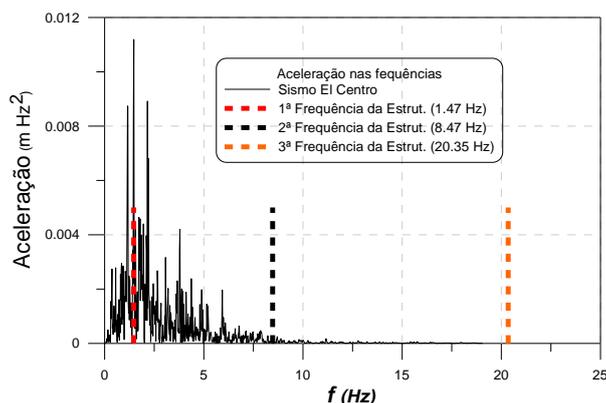


Figura 6.8 Conteúdo de Frequências do sismo El Centro, e da estrutura.

Fazendo uma comparação da Figura (5.11), (frequências da estrutura tipo “*Shear building*”), com a Figura 6.8 (frequências da estrutura tipo torre com massas concentradas), em relação das frequências do sismo El Centro; pode-se observar que as frequências naturais da estrutura (torre com massas concentradas), ficam mais próximas do conteúdo de frequências com maior energia do sismo que as frequências de edifício tipo *shear building*; mostrando que a rigidez rotacional da superestrutura é menor do que a rigidez lateral para edifícios simples. O efeito benéfico do amortecedor MR é ilustrado nas Figura 6.9 e Figura 6.10 e os valores máximos de deslocamentos e acelerações para cada grau de liberdade são mostrados na Tabela 6.3. Novamente observa-se uma diminuição dos deslocamentos e acelerações. Cabe observar que, no presente exemplo, como os valores máximos ocorrem logo no início da resposta transiente, eles não refletem totalmente o efeito do amortecedor MR. No entanto, observando-se a resposta no tempo, verifica-se que durante o sismo a resposta da estrutura com amortecedor MR é bem inferior à resposta da estrutura não controlada.

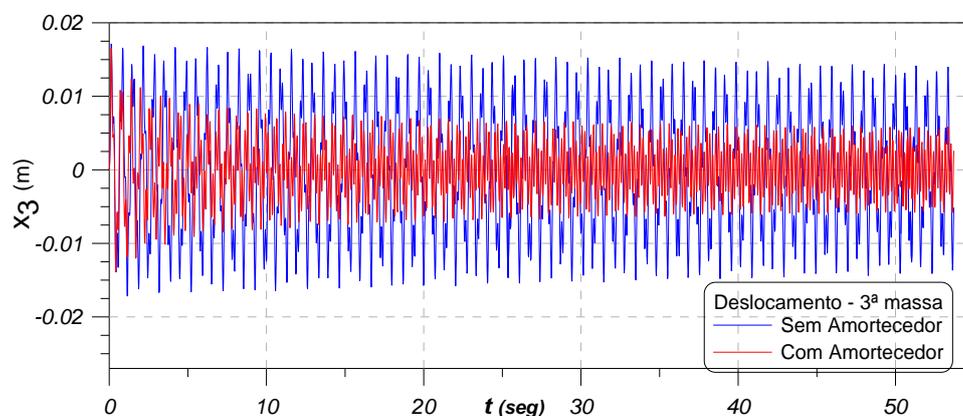


Figura 6.9 Deslocamento absoluto do terceiro andar, no tempo, sob ação do sismo El centro.

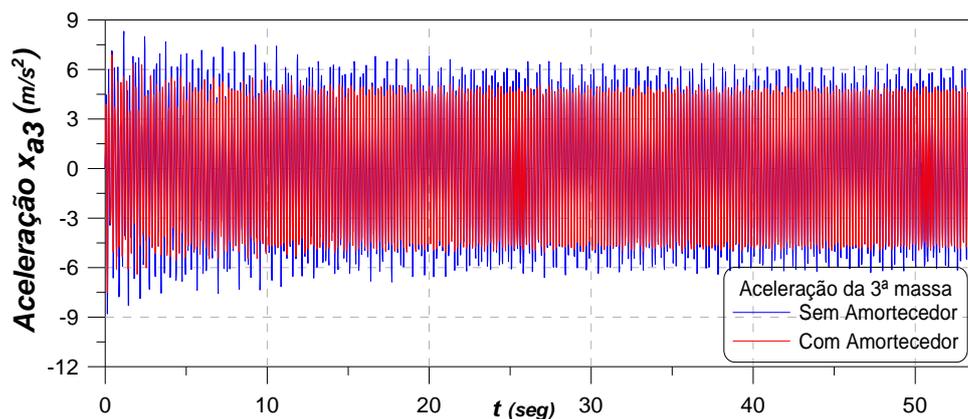


Figura 6.10 Aceleração do terceiro andar no tempo, sob ação do sismo El centro.

Tabela 6.2 Tabela comparativa das respostas máximas, sob ação do sismo El centro.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
<i>Deslocamento absoluto x_i (cm)</i>	1° nível	0.392	0.322	17.86%
	2° nível	0.949	0.837	11.80%
	3° nível	1.717	1.654	3.67%
<i>Aceleração absoluta x''_i (m/s²)</i>	1° nível	6.103	5.680	6.93%
	2° nível	9.240	7.970	13.74%
	3° nível	8.810	7.500	14.87%
<i>Força Amortecedor MR (N)</i>	1° nível	0	84.74	

Tabela 6.3 Tabela comparativa das respostas máximas, sob ação do sismo El centro.

6.4. ANÁLISE DINÂMICA DA TORRE CONSIDERANDO A ESTRUTURA COM MAIOR FLEXIBILIDADE.

No presente caso considera-se a seguinte matriz de rigidez

$$Kr = 10^4 \begin{bmatrix} 9.154 & -3.621 & 0 \\ -3.621 & 7.242 & -3.621 \\ 0 & -3.621 & 3.621 \end{bmatrix} N \cdot m \quad (6.4)$$

A estrutura agora é mais flexível, e todas as suas frequências naturais encontram-se dentro da faixa das frequências com maior conteúdo energético do terremoto El Centro, como é mostrado na Figura 6.11. A variação no tempo do

deslocamento do terceiro grau de liberdade é mostrada nas Figura 6.12 e a variação da aceleração na Figura 6.13. Os valores máximos constam da Tabela 6.4. Verifica-se que o decréscimo do deslocamento máximo é, em ordem de grandeza, semelhante ao da estrutura mais rígida, como se pode verificar na Tabela 6.4. Entretanto nota-se, ao comparar as respostas no tempo para o deslocamento da terceira massa que, no presente caso, o amortecedor MR rapidamente diminui a magnitude dos deslocamentos, o que não acontece com a estrutura sem amortecedor. O decréscimo do valor máximo, que ocorre logo no início do movimento, não expressa de forma clara o efeito benéfico do amortecedor neste exemplo. O mesmo se observa para a aceleração. Embora ocorra logo no início do movimento um pico de aceleração da estrutura com amortecedor superior a aquele da estrutura sem amortecedor MR, a resposta no tempo mostra ser a resposta amortecida consistentemente inferior à da estrutura sem amortecedor MR. A Figura 6.14 mostra a resposta no amortecedor.

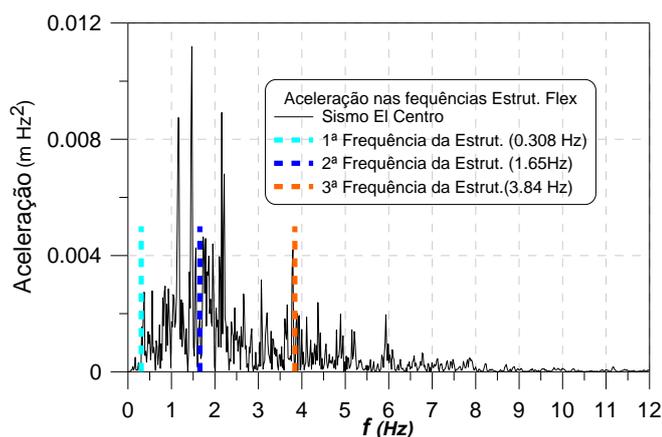


Figura 6.11 Conteúdo de Frequências do sismo El Centro e da estrutura mais flexível.

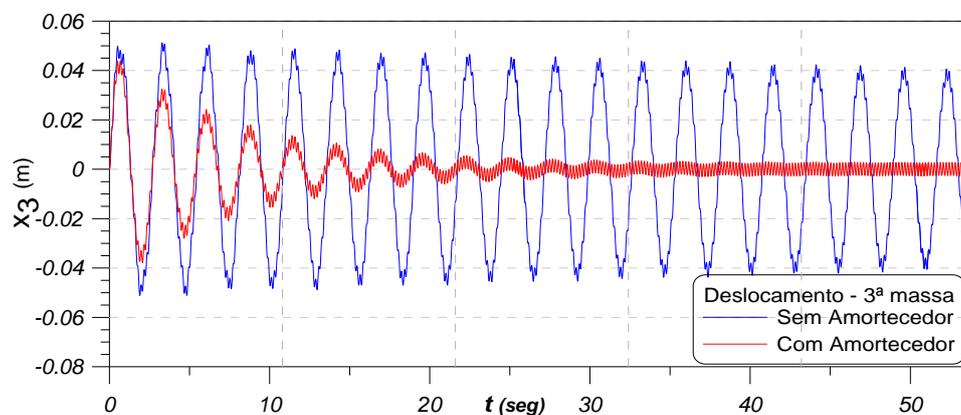


Figura 6.12 Variação do deslocamento absoluto do terceiro andar.

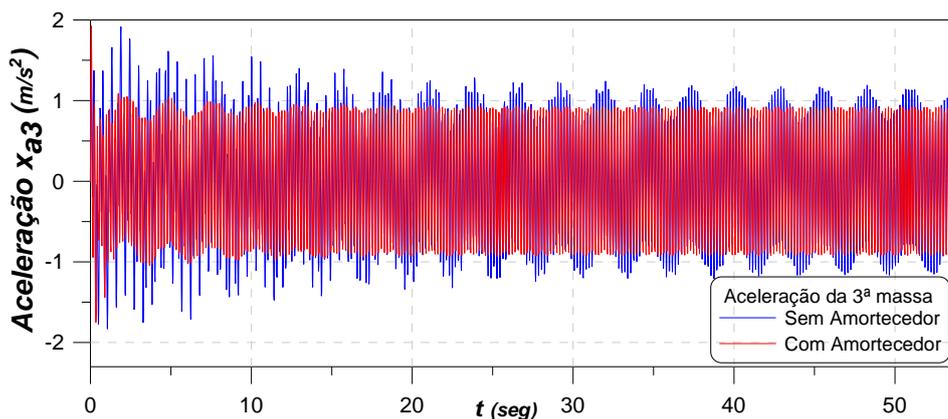


Figura 6.13 Variação da aceleração do terceiro andar .

Tabela 6.4 Comparação das respostas máximas. Estrutura mais flexível sob ação do sismo El Centro.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor MR	Com Amortecedor MR	% Redução
Deslocamento absoluto x_i (cm)	1º nível	1,792	1,543	13,90%
	2º nível	3,497	2,891	17,33%
	3º nível	5,116	4,386	14,27%
Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s²)	1º nível	2,148	2,710	-26,16%
	2º nível	1,940	3,230	-66,49%
	3º nível	1,911	1,922	-0,58%
Força Amortecedor MR (N)	1º nível	0	94,25	

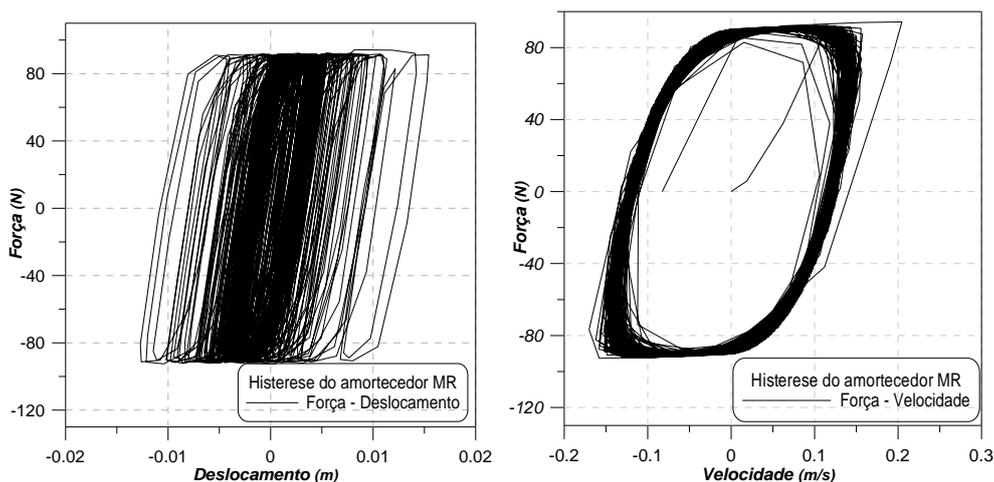


Figura 6.14 Ciclo de histerese do amortecedor MR; excitação sísmica El Centro, estrutura mais flexível.

6.5. ETRUTURA COM ISOLAMENTO DE BASE.

Analisa-se agora o comportamento da estrutura com o amortecedor colocado entre a fundação e o solo, funcionando o mesmo como um isolador de base. Acrescenta-se assim um grau de liberdade relativo à fundação. Os dados do problema são apresentados na Figura 6.15.

As frequências do sistema superestrutura-base isolada, encontram-se dentro da faixa de frequências com maior conteúdo energético do sismo.

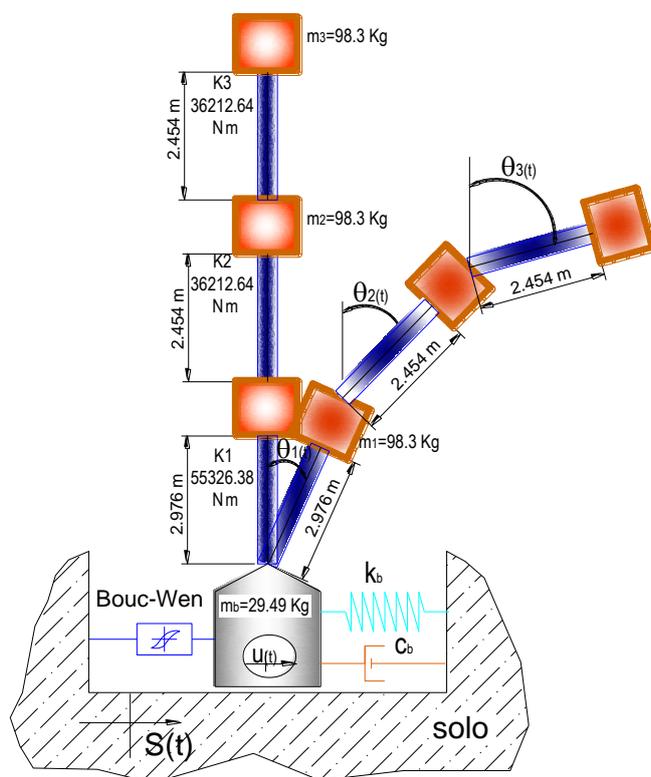


Figura 6.15 Superestrutura-base isolada com sistema de isolamento com elastômero e amortecedor MR.

As equações não lineares de movimento do sistema superestrutura-base isolada com amortecedor MR são dadas pelas equações (3.60) e (3.64).

A matriz de massa linearizada do sistema estrutura-base isolada; tendo em conta pequenos deslocamentos é dada por

$$M = \begin{bmatrix} 619.29 & 877.74 & 482.57 & 241.28 \\ 0 & 2612.53 & 1436.33 & 718.16 \\ 0 & 1436.33 & 1184.51 & 592.25 \\ 0 & 718.16 & 592.25 & 592.25 \end{bmatrix} \text{Kg} \quad (6.5)$$

As matrizes de rigidez e amortecimento da superestrutura-base isolada são:

$$K_r = \begin{bmatrix} 4690 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 91539.033 & -36212.643 & 0 \\ 0 & -36212.643 & 72425.287 & -36212.643 \\ 0 & 0 & -36212.643 & 36212.643 \end{bmatrix} N \cdot m \quad (6.6)$$

$$Cr = \begin{bmatrix} 2100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 184.27 & -41.53 & 0 \\ 0 & -41.53 & 95.81 & -47.42 \\ 0 & 0 & -47.42 & 44.90 \end{bmatrix} N \cdot m \cdot s \quad (6.7)$$

As frequências naturais e modos de vibração da estrutura com isolamento de base são mostrados na Figura 6.16. Há um decréscimo acentuado nas frequências de vibração do sistema provocado pelo isolamento de base, sendo esta uma das principais influências do sistema de isolamento. Nota-se também a grande influência do isolamento de base nos dois primeiros modos de vibração, onde o primeiro modo corresponde basicamente à deformação do sistema de isolamento cuja rigidez é bem inferior à da estrutura.

Matrizes de rigidez e amortecimento do sistema superestrutura-base isolada com amortecedor MR e borracha.

$$K_r = \begin{bmatrix} 21690 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 91539.033 & -36212.643 & 0 \\ 0 & -36212.643 & 72425.287 & -36212.643 \\ 0 & 0 & -36212.643 & 36212.643 \end{bmatrix} N \cdot m \quad (6.8)$$

$$Cr = \begin{bmatrix} 2197.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 184.27 & -41.53 & 0 \\ 0 & -41.53 & 95.81 & -47.42 \\ 0 & 0 & -47.42 & 44.90 \end{bmatrix} N \cdot m \cdot s \quad (6.9)$$

6.5.1. MODOS E FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA.

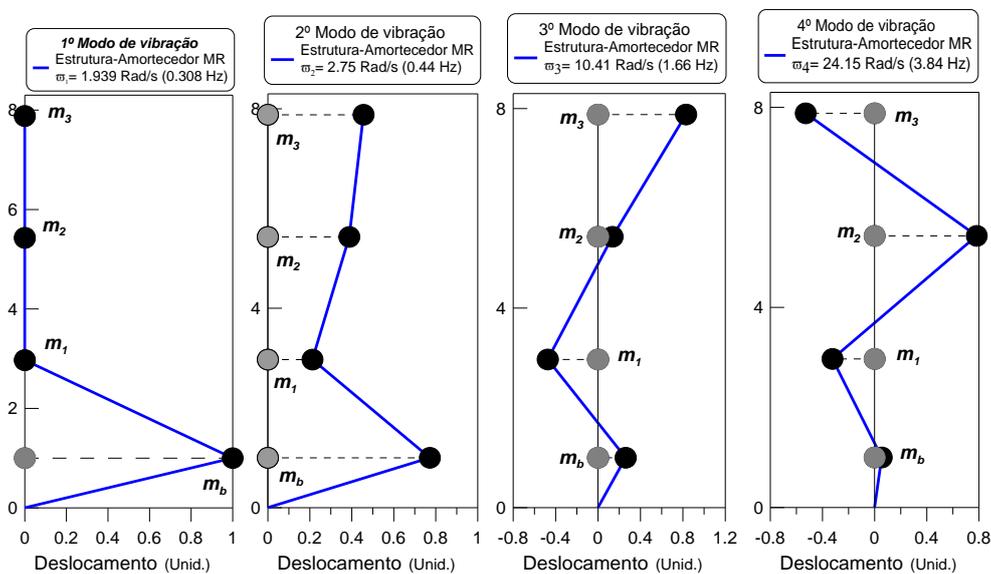


Figura 6.16 Modos de vibração da superestrutura-base isolada com amortecedor MR.

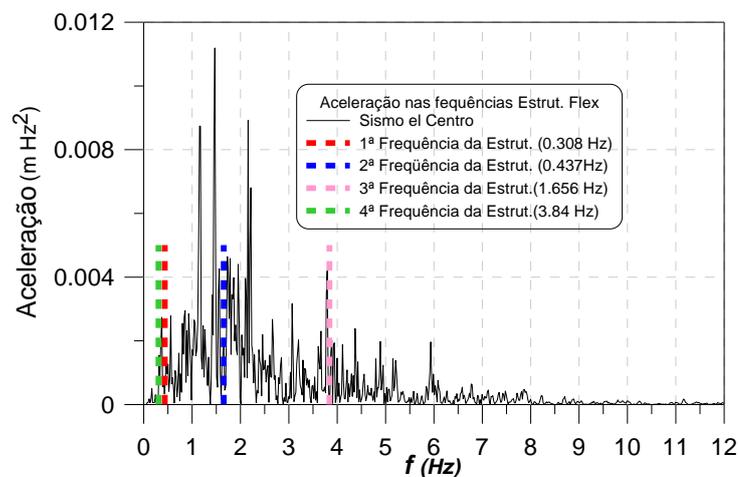


Figura 6.17 Conteúdo de frequências do sismo El Centro e da estrutura-base isolada com amortecedor MR.

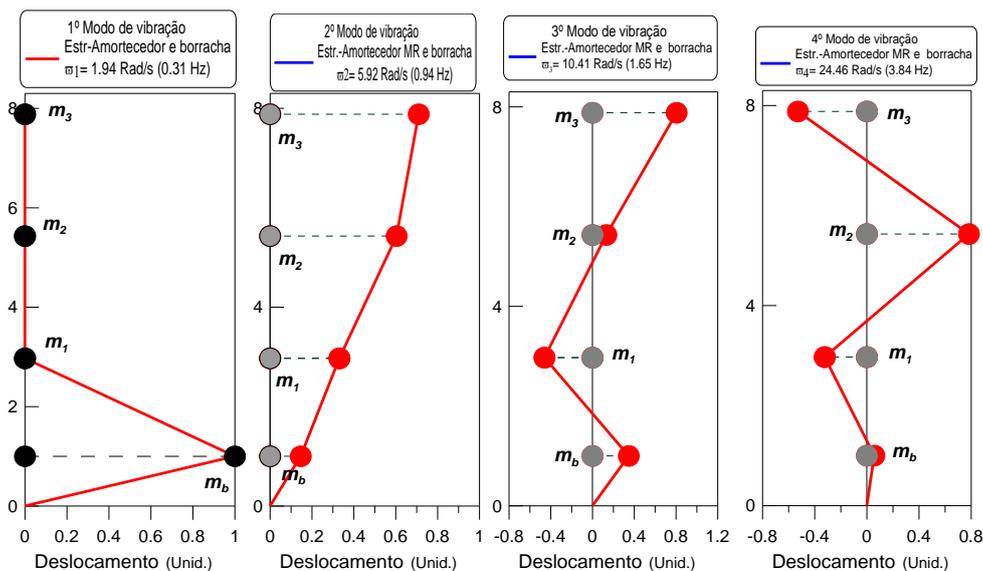


Figura 6.18 Modos de vibração da superestrutura-base isolada com amortecedor MR e borracha.

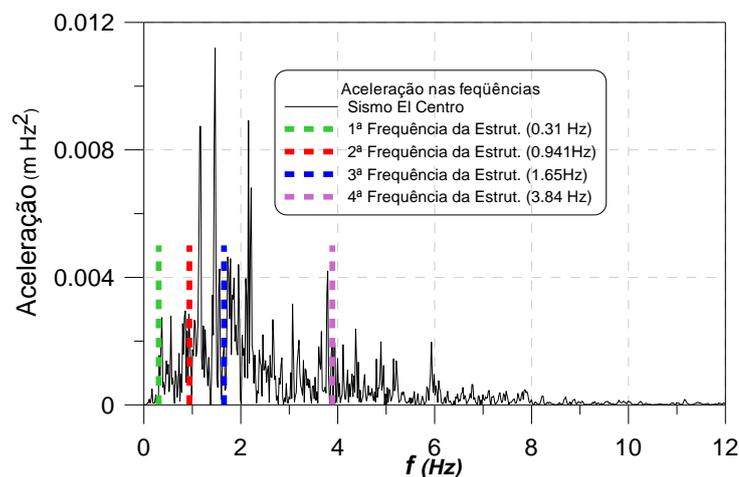


Figura 6.19 Conteúdo de Frequências do sismo El Centro e da estrutura-base isolada com amortecedor MR e bloco de elastômero (borracha).

6.6. RESPOSTAS DA ESTRUTURA COM ISOLAMENTO DE BASE SUBMETIDA SOB AÇÃO SÍSMICA.

6.6.1. COMPARAÇÃO DE RESPOSTAS DA SUPERESTRUTURA COM E SEM ISOLADOR DE BASE.

As Figura 6.20 e Figura 6.21 mostram a resposta no tempo da superestrutura sem e com amortecedor MR na base. A estrutura em ambos os casos é submetida ao sismo El Centro. A Tabela 6.5 mostra as máximas respostas da estrutura. Nota-se um aumento considerável nos deslocamentos absolutos dos três graus de

liberdade da estrutura. Isto se deve fundamentalmente ao deslocamento da base da ordem 17cm. Descontado o deslocamento da base, os deslocamentos permanecem na mesma ordem de grandeza daqueles da estrutura sem isolamento. Nota-se que a presença do isolamento de base, com o conseqüente decréscimo das frequências naturais, provoca uma resposta bem mais complexa, vide, por exemplo, a Figura 6.20. Isto se deve provavelmente à proximidade das duas primeiras frequências de vibração e sua relação com o espectro de frequências do sismo, como se observa na Figura 6.17. Embora haja um decréscimo acentuado das acelerações das duas primeiras massas, observa-se um aumento da aceleração da terceira massa que corresponde a um pico localizado da resposta no tempo, como se observa na Figura 6.21.

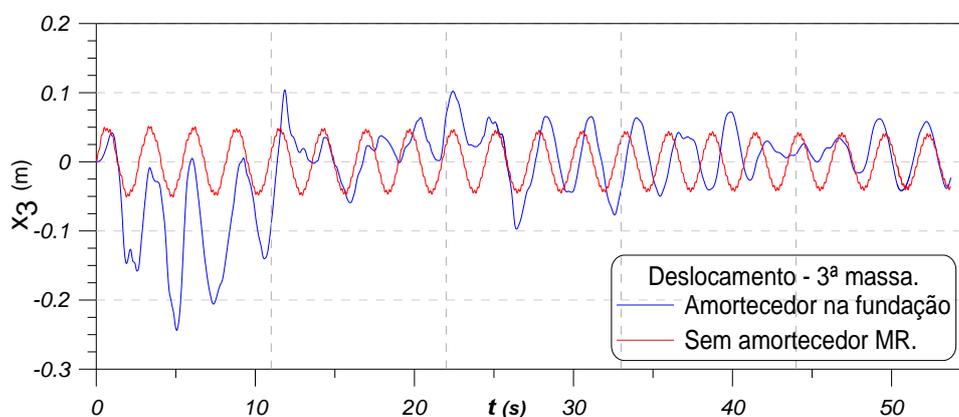


Figura 6.20 Deslocamento absoluto do terceiro andar no tempo, sob ação do sismo El Centro, com e sem amortecedor MR na fundação.

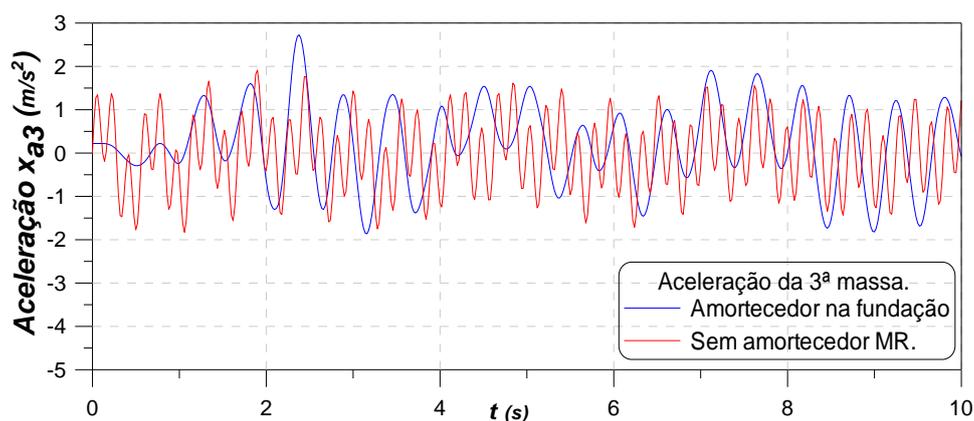


Figura 6.21 Aceleração absoluta do terceiro andar no tempo, sob ação do sismo El Centro, com e sem amortecedor MR na fundação.

Tabela 6.5 Quadro comparativo de respostas máximas da superestrutura com e sem amortecedor MR na fundação.

Descrição	Localização	Sem Amortecedor	Com Amortecedor na Fundação	% Variação
Deslocamento absoluto x_i (cm)	Fundação	0	17,13	
	1º nível	1,790	19,070	-965,36%
	2º nível	3,490	21,640	-520,06%
	3º nível	5,110	24,400	-377,50%
Aceleração absoluta \ddot{x}_i (m/s ²)	Fundação	0,000	0,676	
	1º nível	2,140	0,930	56,54%
	2º nível	1,940	0,890	54,12%
	3º nível	1,910	2,720	-42,41%
Força Amortecedor MR (N)	1º nível		94,4	

Neste exemplo o isolamento de base não tem um efeito benéfico no comportamento da estrutura. Como os deslocamentos da estrutura com amortecedor são da ordem de grandeza dos deslocamentos da estrutura sem amortecedor, conclui-se que não há redução nos esforços ao longo da estrutura.

6.6.2. COMPARAÇÃO DE RESPOSTAS DA SUPERESTRUTURA EM RELAÇÃO A LOCALIZAÇÃO DO AMORTECEDOR MR.

Os resultados a seguir mostram a diferença da resposta da superestrutura em função à localização do amortecedor MR. As Figura 6.22 e Figura 6.23 mostram, respectivamente, a força no amortecedor localizado na base e no primeiro grau de liberdade. Nota-se que há uma grande diferença no comportamento em virtude da diferença de deslocamentos impostos ao amortecedor. O mesmo acontece ao se observar o ciclo de histerese na Figura 6.26. Observando os resultados apresentados nas Figura 6.24 e Figura 6.25, verifica-se que a estrutura com amortecedor no primeiro grau de liberdade tem um desempenho bem melhor que a estrutura com isolamento de base, como atestam os resultados apresentados na Tabela 6.6. Enquanto a estrutura com amortecedor na estrutura apresenta uma resposta com decréscimo uniforme de amplitude, a resposta da estrutura com isolamento de base apresenta uma resposta complexa com grande variação de amplitude. Isto provavelmente se deve a relação entre as frequências naturais e a excitação. Também, em virtude dos grandes deslocamentos e acelerações, as não linearidades inerciais e geométricas presentes na formulação têm uma influência

significativa na resposta. Este exemplo merece um estudo mais aprofundado para se chegar a conclusões mais objetivas quanto ao efeito do sistema de isolamento de base.

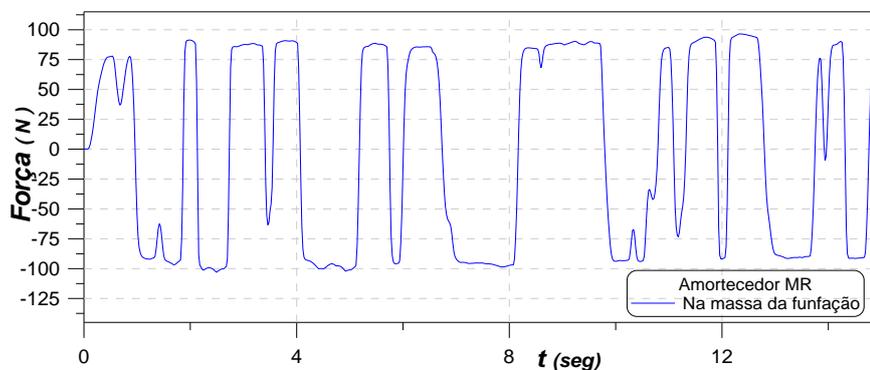


Figura 6.22 Força no amortecedor MR, no tempo sob ação do sismo EI Centro, da estrutura-base isolada com amortecedor MR.

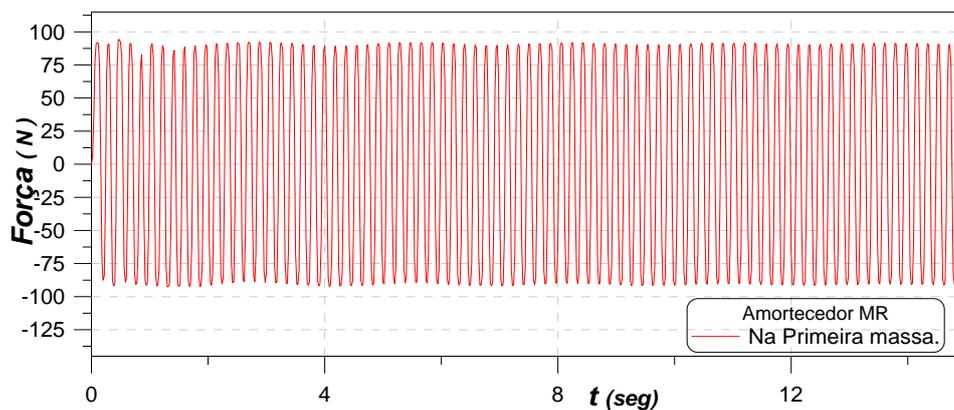


Figura 6.23 Força no amortecedor MR, no tempo sob ação do sismo EI Centro, da estrutura com amortecedor na primeira massa.

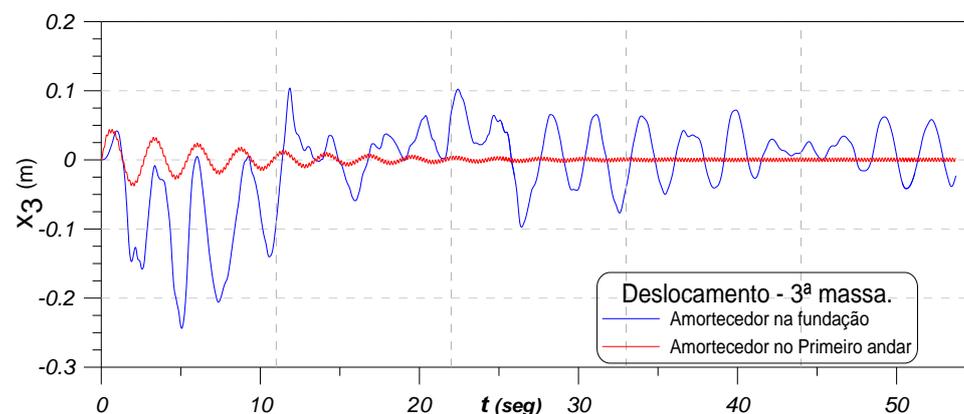


Figura 6.24 Deslocamento absoluto do terceiro andar, no tempo, sob ação do sismo EI Centro, em relação à sua localização do amortecedor MR.

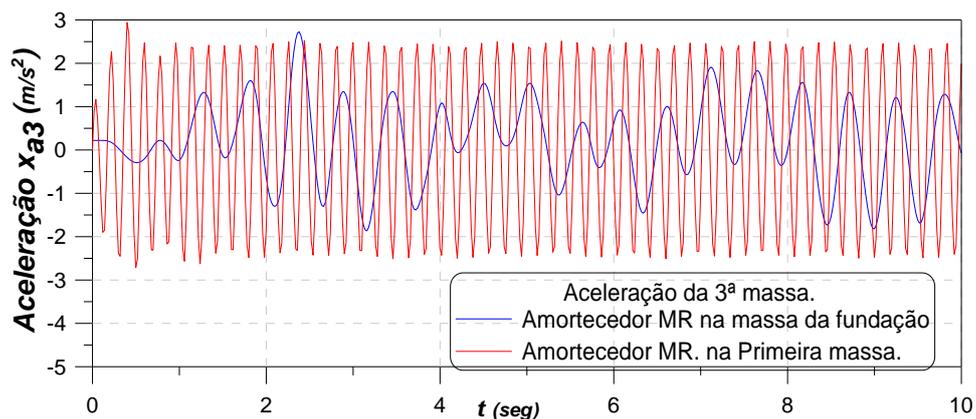


Figura 6.25 Aceleração absoluta da terceira massa, no tempo, sob ação do sismo El Centro, em relação à localização do amortecedor MR.

Tabela 6.6 Quadro comparativo de respostas máximas da superestrutura em função da localização do amortecedor MR.

Descrição	Localização	Localização do amortecedor MR		% Variação
		Na fundação	No Primeiro andar	
<i>Deslocamento Total x_i (cm)</i>	Fundação	17,130	0,000	
	1º nível	19,075	1,540	91,93%
	2º nível	21,640	2,890	86,65%
	3º nível	24,400	4,380	82,05%
<i>Aceleração \ddot{x}_i (m/s²)</i>	Fundação	0,676	0,000	
	1º nível	0,930	2,710	65,68%
	2º nível	0,890	3,230	72,45%
	3º nível	2,720	1,920	-41,67%
<i>Força Amortecedor MR (N)</i>		96,4	94,25	

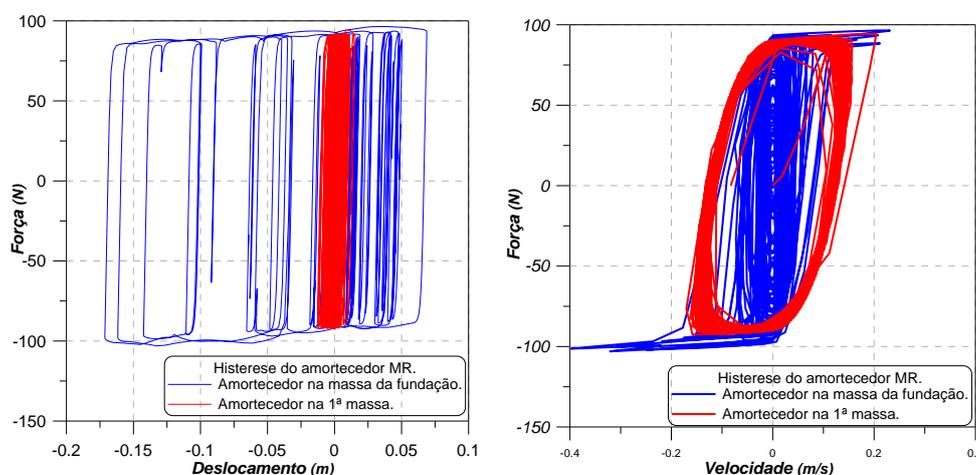


Figura 6.26 Ciclo de histerese do amortecedor MR no tempo; excitação sísmica El Centro, da estrutura mais flexível.

6.7. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE AMORTECEDORES MR

A influência do número de amortecedores MR na fundação do edifício na resposta da superestrutura é mostrada nas Figura 6.27 a Figura 6.30.

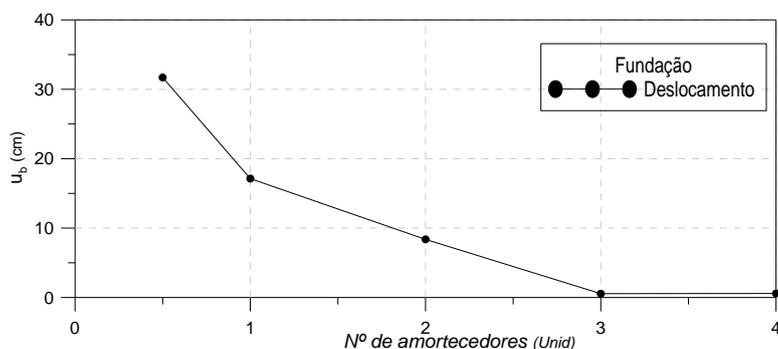


Figura 6.27 Deslocamento da fundação com o número de amortecedores MR.

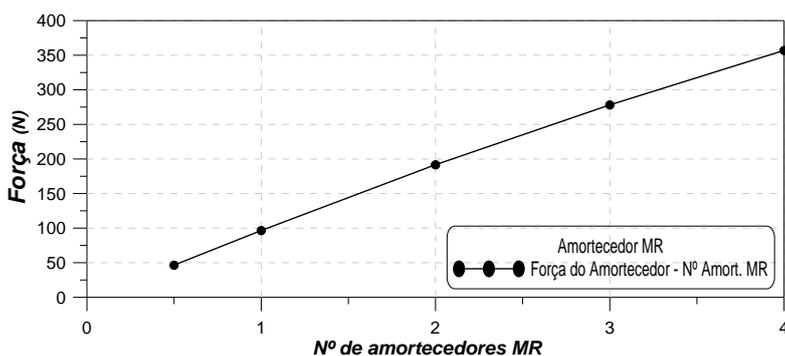


Figura 6.28 Força do amortecedor MR com o número de amortecedores.

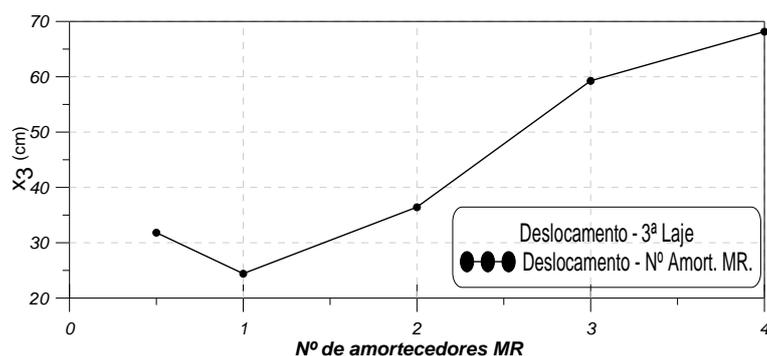


Figura 6.29 Deslocamento do terceiro andar com o número de amortecedores MR.

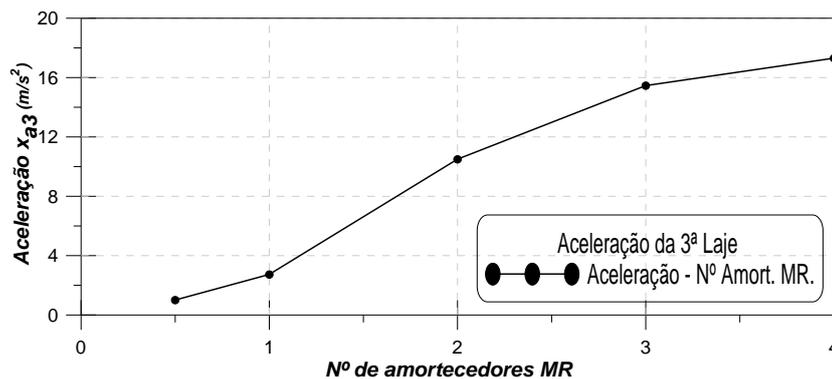


Figura 6.30 Aceleração do terceiro andar com o número de amortecedores MR.

A Figura 6.27, até a Figura 6.30 mostram que o acréscimo do número de amortecedores na fundação para o controle de vibrações da superestrutura faz com que os deslocamentos absolutos e relativos e acelerações apresentem variações não lineares. Verifica-se uma diminuição nos deslocamentos da fundação com um consequente aumento na resposta da estrutura, como no caso do *shear building*, o que é o oposto do desejado. O isolamento de base deve ter a menor rigidez possível. Assim, no projeto do sistema de base, deve-se otimizar o conjunto, diminuindo o máximo possível a rigidez.