

4. Análise Numérica

4.1. Apresentação do modelo

Para a análise do comportamento de amortecedores fluidos como forma de reduzir os efeitos do vento em edifícios altos, é estudado um exemplo de um edifício de 48 pavimentos, com altura total de 172,8m e dimensões em planta de 45,0 x 32,0 m, sendo um núcleo central com 27,0 x 9,0 m. Esta planta, ilustrada na Figura 4.2, foi inspirada em um exemplo apresentado por Chien & Ritchie (1984), para o cálculo de vigas mistas.

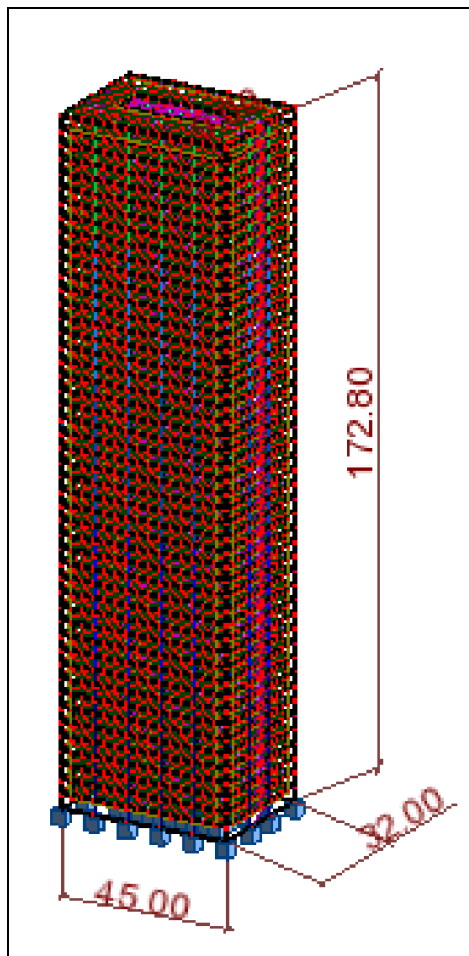


Figura 4.1 - Vista geral da estrutura do edifício

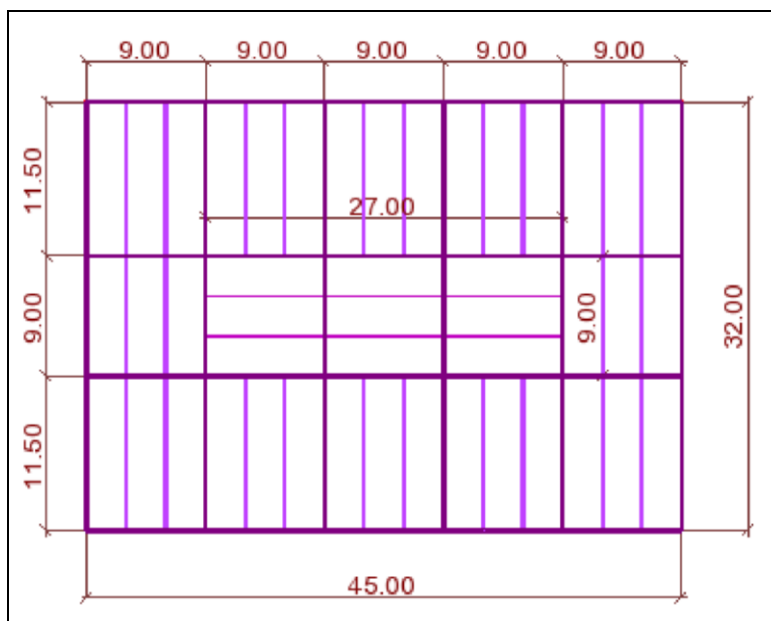


Figura 4.2 - Vista superior da estrutura do edifício

O edifício é constituído de vigas e pilares de aço, com lajes em concreto armado de 15,0 cm de espessura. Os materiais utilizados e suas características são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características dos materiais

Material	Utilização	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	G (MPa)
Concreto	Lajes	25	-	-	38.000	16.300
Aço ASTM 572 Grau 50	Vigas e travamentos	-	345	450	210.000	80.800
Aço ASTM 913 Grau 60	Pilares	-	415	520	210.000	80.800

Os pilares são de perfil laminado do tipo HD, sendo os pilares de fachada com bitola variável entre HD400x990 e HD400x187 e os pilares do núcleo central entre HD400x554 a HD260x114, variando aproximadamente a cada 10 andares, conforme apresentado nas Figuras 4.3 e 4.4.

As vigas principais são W460x106, e as vigas secundárias W410x60. As vigas são rotuladas, com exceção das localizadas na fachada, que são engastadas nos pilares, como forma de combater os esforços de torção. A Figura 4.5 apresenta esquematicamente a distribuição das vigas em cada pavimento. As vigas

são conectadas às lajes de concreto, fazendo com que trabalhem como estruturas mistas, aumentando assim a sua resistência à flexão. Para isso, no modelo computacional, foram definidos offsets entre as vigas e a laje.

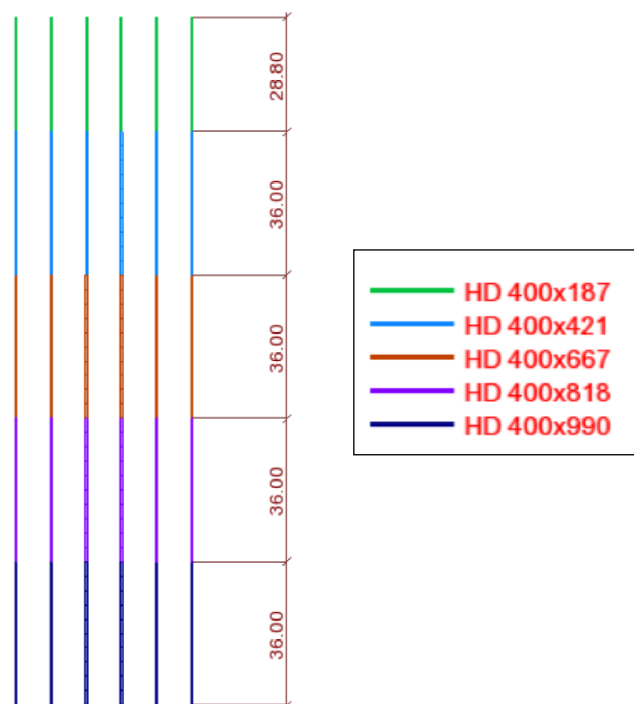


Figura 4.3 – Pilares da fachada

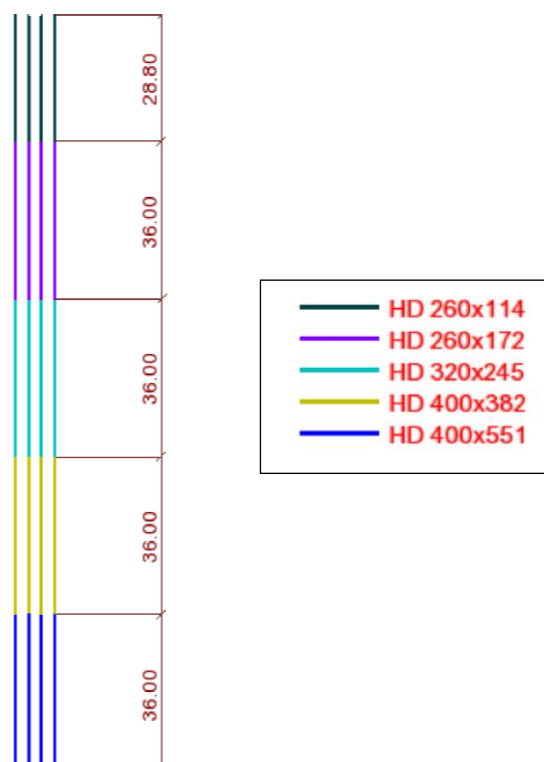


Figura 4.4 – Pilares do core

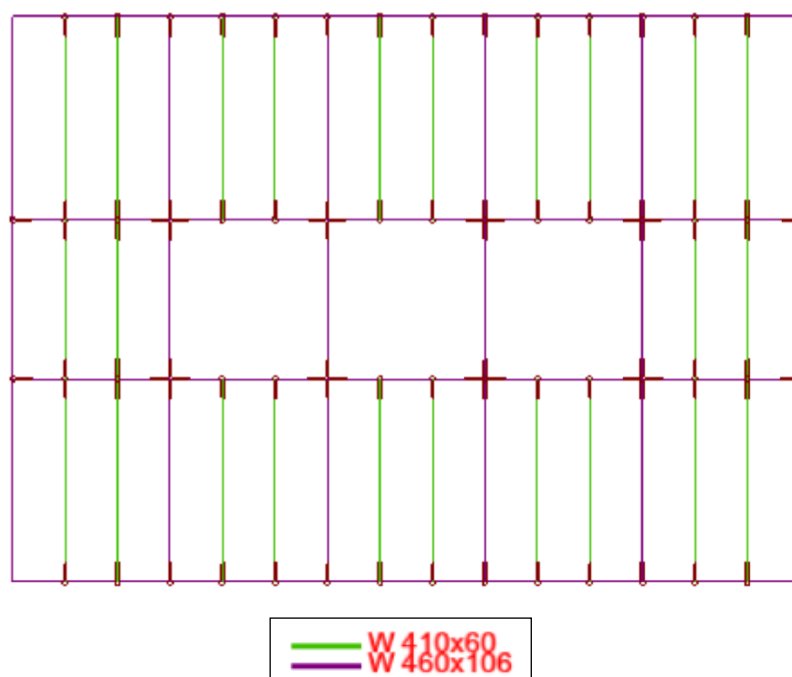


Figura 4.5 - Planta esquemática das vigas em cada pavimento

O modelo inicial apresenta um sistema de resistência a cargas horizontais utilizando travamentos com barras inclinadas HP 310x94, em X no núcleo, tanto na direção x como na direção y. Essas barras são modeladas como barras de treliça, e são capazes de absorver somente esforços axiais. A disposição, em planta e em cortes desses travamentos é apresentada nas Figuras 4.6 a 4.8. O total de aço necessário para este projeto é de 3.164.597 kg.

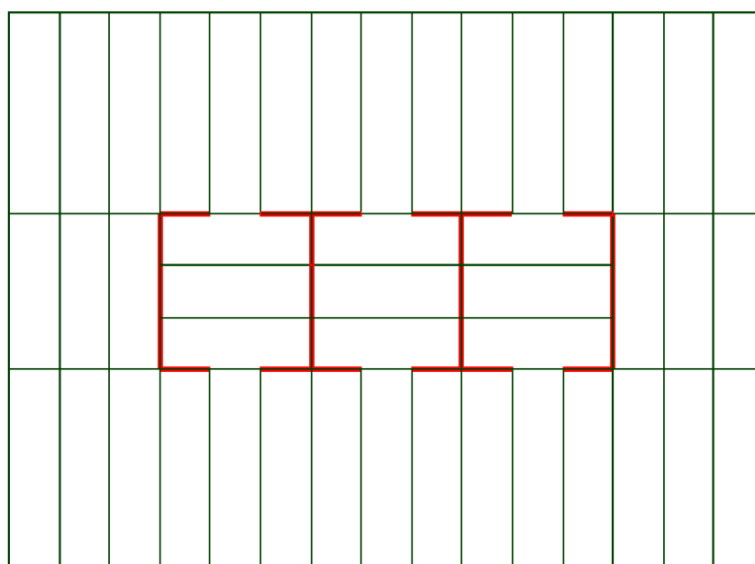


Figura 4.6 - Travamentos no projeto original - vista superior

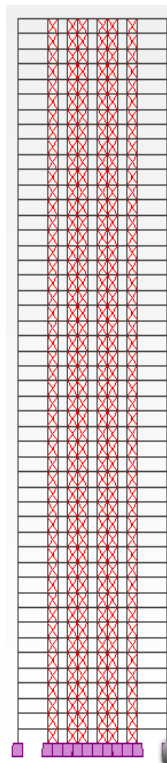


Figura 4.7 - Travamentos na direção x - Vista Frontal

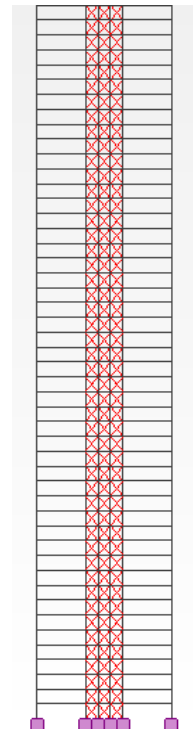


Figura 4.8 - Travamentos na direção y - Vista Frontal

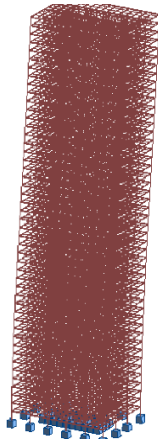
Além do peso próprio da estrutura, são consideradas as cargas permanentes de 35 kg/m^2 em cada pavimento, referente a revestimentos, e 150 kg/m^2 nas fachadas, relativo ao peso de vidros e esquadrias. Essas cargas foram incorporadas no cálculo da massa modal da estrutura, chegando a um total de $34.508.921,40 \text{ kg}$.

Foi feito inicialmente um pré-dimensionamento da estrutura, considerando uma sobrecarga na estrutura de 300 kg/m^2 em cada pavimento, e a carga de vento estática, calculada segundo a NBR 6123 (1988), conforme apresentado anteriormente. O modelo computacional foi desenvolvido usando o programa Autodesk Robot Structural Analysis, e, a partir dele, foi feita uma análise não linear. No modelo foram usados elementos finitos do tipo barra para vigas, pilares e contraventamentos, além de elementos finitos do tipo Q4 para as lajes. Na base de cada pilar foram definidos apoios engastados. O modelo possui, com isso, um total de 26156 nós e 156672 graus de liberdade.

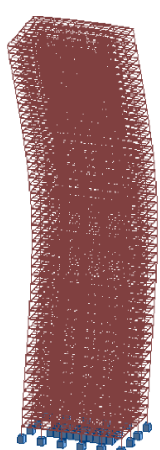
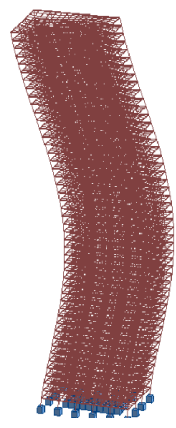
Os deslocamentos máximos encontrados no topo do edifício para essas cargas foram: 197 mm para o caso do vento atuando na direção x, 364 mm para o caso do vento atuando na direção y, além de um deslocamento vertical de 102 mm .

A seguir, são apresentadas as frequências naturais dos nove primeiros modos de vibração e o percentual de massa mobilizado em cada modo para as direções x e y e a sua forma modal.

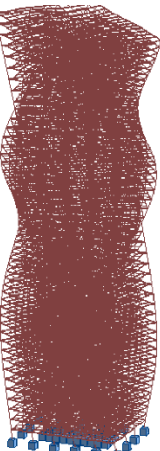
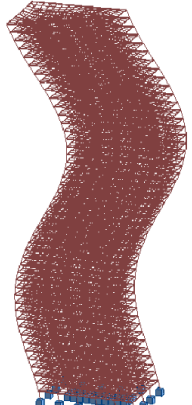
Tabela 4.2 - Modos de vibração natural da estrutura inicial

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)	Massa mobilizada UX (%)	Massa mobilizada UY (%)	Forma do modo de vibração	Comportamento do modo de vibração
1	0,18	5,58	0,00	66,18		Flexão no eixo fraco (eixo y)
2	0,19	5,25	0,00	66,18		Torção
3	0,21	4,82	70,22	66,18		Flexão no eixo forte (eixo x)

Continuação da Tabela 4.2 - Modos de vibração natural da estrutura inicial

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)	Massa mobilizada UX (%)	Massa mobilizada UY (%)	Forma do modo de vibração	Comportamento do modo de vibração
4	0,57	1,76	70,22	66,18		Torção
5	0,62	1,62	70,22	82,41		Flexão no eixo fraco (eixo y)
6	0,63	1,59	84,66	82,41		Flexão no eixo forte (eixo x)

Continuação da Tabela 4.2 - Modos de vibração natural da estrutura inicial

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)	Massa mobilizada UX (%)	Massa mobilizada UY (%)	Forma do modo de vibração	Comportamento do modo de vibração
7	1,02	0,98	84,66	82,41		Torção
8	1,17	0,85	89,64	82,41		Flexão no eixo fraco (eixo y)
9	1,28	0,78	89,64	89,31		Flexão no eixo forte (eixo x)

Os três primeiros modos de vibração são responsáveis pela mobilização de mais de 50% da massa da estrutura, e serão usados em comparações com os

demais sistemas estruturais. Observa-se que este é um edifício bastante flexível e que as seis primeiras frequências são inferiores a 1 Hz e, portanto, torna-se necessária uma análise dinâmica considerando o efeito de vento, seguindo os critérios da NBR 6123 (1988).

4.2. Casos estudados

A partir do modelo inicial, foram testadas diferentes configurações, com a inclusão de novos travamentos e de amortecedores, de forma a atingir os níveis de deslocamento e aceleração satisfatórios à segurança da estrutura e conforto de seus usuários.

Para cada Modelo são analisados os resultados considerando a constante dos amortecedores variando de 0 a 40% da constante de amortecimento crítico da estrutura, $C_{cr} = 4\pi f_1 M$, sendo M a massa modal e f_1 a frequência natural em Hz do primeiro modo de vibração de cada modelo estudado. Em cada caso, são analisados os valores alcançados para o deslocamento, velocidade e aceleração na direção do eixo fraco da estrutura (eixo Y), em um ponto no topo do edifício. Para cada uma dessas respostas, são analisados os valores máximos, a média dos picos ao longo do período estudado, e os valores RMS. Além disso, é analisado o deslocamento médio da estrutura, que no caso de aceleração e velocidade é zero. Os resultados para cada constante são comparados com os resultados para a constante $C=0$ (sem amortecedores), sendo assim possível avaliar o efeito dos amortecedores na resposta dinâmica da estrutura.

Todas as hipóteses apresentadas neste estudo consideram um amortecimento inerente à estrutura de 1%, valor indicado na tabela 19 da NBR 6123 (1988) para edifícios de estrutura metálica. Nos casos em que há acréscimo de amortecedores fluidos associados à estrutura, os efeitos são somados.

Para a análise dinâmica da estrutura, o programa utiliza o método de integração de Newmark. Por este método, segundo o manual do programa Autodesk Robot Structural Analysis (2014), podemos definir o amortecimento inerente à estrutura através das constantes α e β , definidas a seguir:

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4.2)$$

onde ω_1 e ω_2 são as frequências referentes aos dois primeiros modos de vibração e ξ é o coeficiente de amortecimento da estrutura.

A matriz de amortecimento C é calculada então em função das matrizes de rigidez K e de massa M , considerando os parâmetros definidos acima, através da equação:

$$C = \beta \times K + \alpha \times M \quad (4.3)$$

Em todos os casos estudados, os amortecedores fluidos são aplicados à estrutura associados a barras diagonais, que são introduzidos no modelo através da definição de liberação graus de liberdade das barras aos quais eles são associados. Neste caso, libera-se o deslocamento axial da barra e associa-se a esse deslocamento uma constante de amortecimento. Esta constante de amortecimento só é considerada na análise dinâmica, e não altera os modos de vibração da estrutura.

Para os casos com inclusão de amortecedores, foi feita uma análise linear para obter a resposta da estrutura. Isto ocorre uma vez que o programa utilizado não é capaz de reconhecer a utilização de amortecedores adicionais à estrutura para uma análise dinâmica não linear.

A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos diversos modelos que foram analisados nesse estudo. Cada Modelo será detalhado nos itens 4.2.1 a 4.2.5.

Tabela 4.3 - Resumo dos modelos estudados

Modelo	Características
1	Amortecedores aplicados a diagonais simples no vão central das fachadas do eixo y
2	Amortecedores aplicados em dois eixos do núcleo, em diagonais simples, substituindo o travamento original.
3	Amortecedores aplicados a diagonais duplas no vão central das fachadas do eixo y, com a inclusão de uma linha de pilares.
4	Amortecedores aplicados a diagonais simples nos dois vãos laterais das fachadas do eixo y
5	Amortecedores aplicados a diagonais simples nos três vãos das fachadas do eixo y
5 ^a	Variação do modelo cinco, com pórticos enrijecidos

4.2.1. Modelo 1

Neste caso, diagonais HP 250x85 foram incluídas entre os dois pilares centrais de cada fachada paralela ao eixo y. A Figura 4.9 ilustra a vista de uma das fachadas em y, com os amortecedores considerados (diagonais em vermelho).

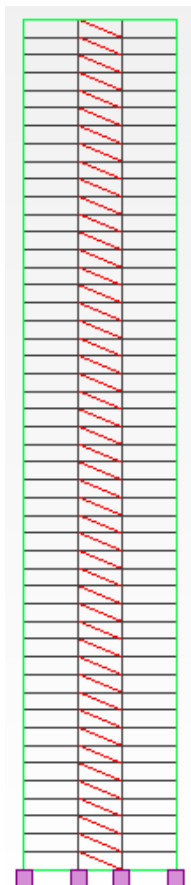


Figura 4.9 - Disposição dos amortecedores na fachada - Modelo 1

A cada uma destas barras, foram associados amortecedores fluidos, atuando no seu sentido axial. A estrutura conta, portanto, com dois amortecedores por andar, totalizando 96 amortecedores. As frequências naturais do Modelo 1 são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Modos de vibração natural da estrutura com amortecedores - Modelo 1

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,18	5,59
2	0,19	5,26
3	0,21	4,83

4.2.2. Modelo 2

Neste modelo foram incluídas diagonais com amortecedores, substituindo os travamentos com X nos dois eixos centrais. Portanto, foram eliminadas duas linhas com três travamentos em X de seção HP310x94, além de duas colunas de pilares do núcleo, para serem incluídas diagonais simples HP250x85 associadas a amortecedores. Neste modelo mantém-se a quantidade de dois amortecedores por andar. Na Figura 4.10 são apresentadas a configuração original dos pórticos centrais e a configuração adotada nesta hipótese.

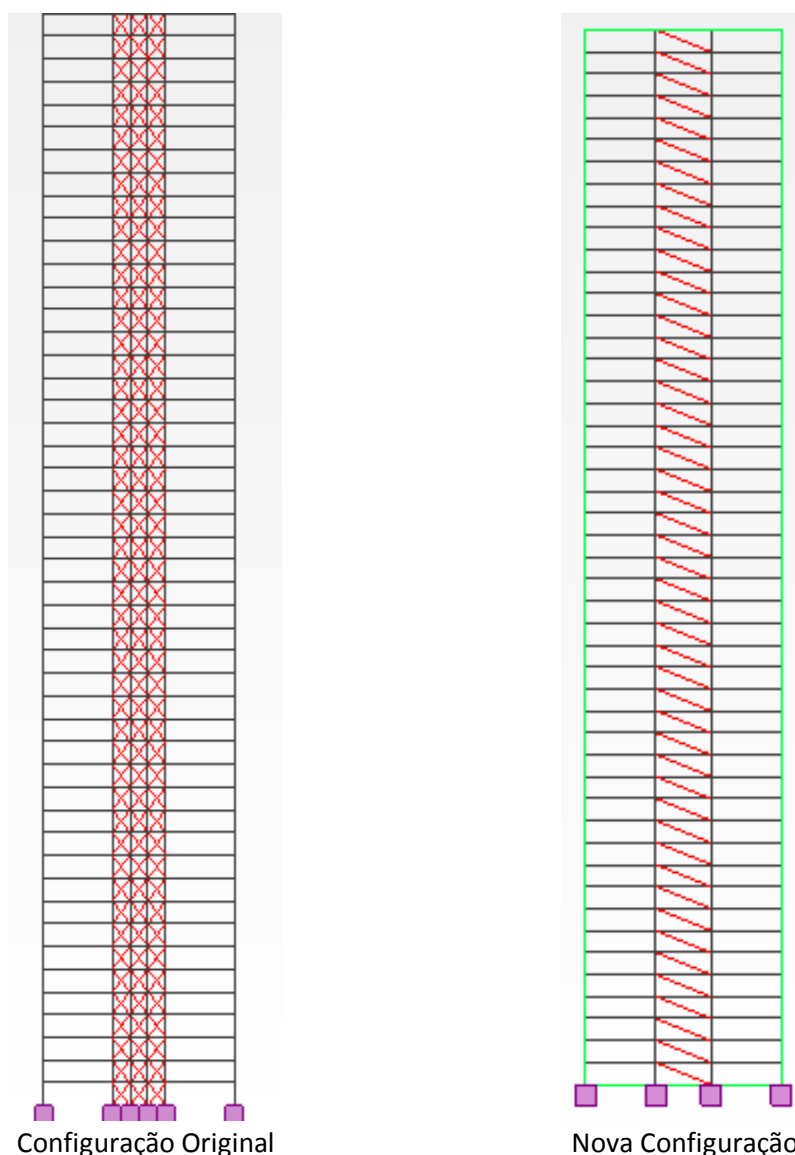


Figura 4.10 - Substituição de travamentos rígidos em X por barras com amortecedores - Modelo 2

As frequências naturais do Modelo 2 são apresentas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Modos de vibração natural da estrutura com amortecedores - Modelo 2

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,16	6,21
2	0,19	5,29
3	0,21	4,82

4.2.3. Modelo 3

Foram incluídas, neste Modelo, duas diagonais HP 250x85 nas fachadas do eixo y, separadas por uma linha de pilares com seção semelhante aos demais pilares de fachada. A essas diagonais foram associados amortecedores fluidos, passando neste caso a quatro amortecedores por andar, como ilustra a Figura 4.11.

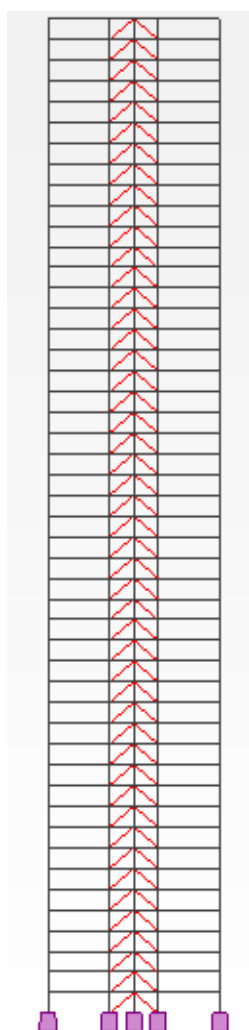


Figura 4.11 - Disposição dos amortecedores na fachada - Modelo 3

As frequências naturais do Modelo 3 são apresentas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Modos de vibração natural da estrutura com amortecedores - Modelo 3

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,18	5,46
2	0,20	5,06
3	0,21	4,80

4.2.4. Modelo 4

Este Modelo consiste na inclusão de duas diagonais HP 250x85 nas fachadas do eixo y, em cada um dos vãos externos, às quais foram associados amortecedores fluidos. Neste modelo temos quatro amortecedores por andar, com um total de 192 amortecedores. A Figura 4.12 apresenta a vista da fachada, com a distribuição das diagonais com amortecedores.

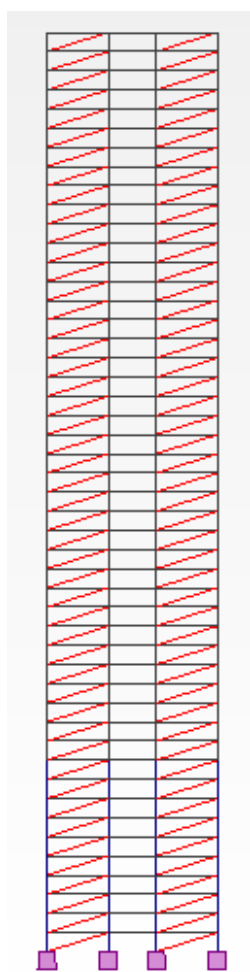


Figura 4.12 - Disposição dos amortecedores na fachada - Modelo 4

As frequências naturais do Modelo 4 são apresentas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Modos de vibração natural da estrutura com amortecedores - Modelo 4

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,18	5,60
2	0,19	5,29
3	0,21	4,84

4.2.5. Modelo 5

Neste caso, modifica-se o Modelo 4 incluindo além das duas diagonais mencionadas anteriormente, uma terceira diagonal em cada fachada do eixo y, no vão central. A imagem abaixo apresenta a nova configuração. Neste caso, portanto, são seis amortecedores por andar, com um total de 288 amortecedores em todo edifício, como ilustra a Figura 4.13.

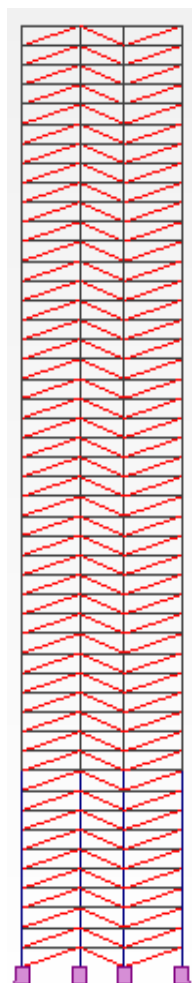


Figura 4.13 - Disposição dos amortecedores na fachada - Modelo 5

As frequências naturais do Modelo 5 são apresentas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Modos de vibração natural da estrutura com amortecedores - Modelo 5

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,18	5,60
2	0,19	5,30
3	0,21	4,84

4.2.6. Modelo 5.1

Esse Modelo é uma variação do Modelo 5, em que foram retiradas as rótulas das vigas referentes aos pórticos principais do eixo y, de forma a enrijecer a estrutura nessa direção e reduzir os seus deslocamentos. Na Figura 4.14, as vigas em vermelho foram alteradas, as ligações com rótulas foram substituídas por ligações resistentes a momento.

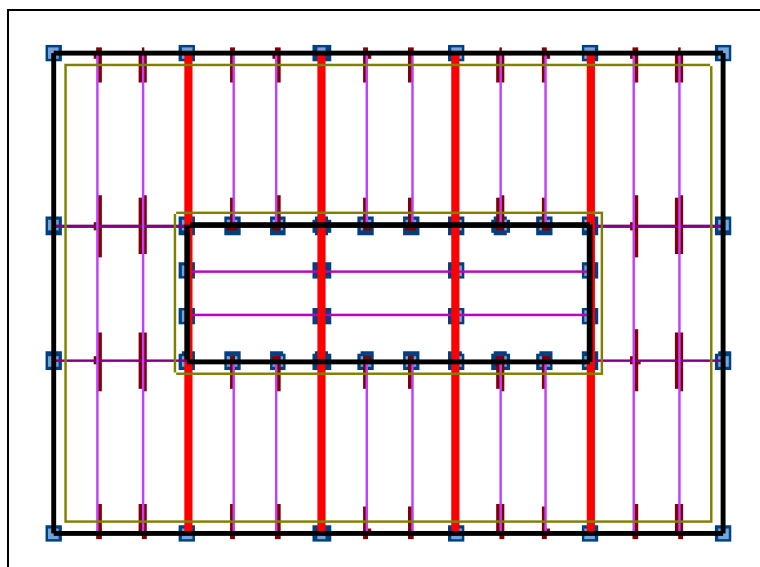


Figura 4.14 - Vigas com ligações por rótula substituídas por ligações resistentes a momento - Modelo 5.1

As frequências naturais do Modelo 5.1 são apresentas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Modos de vibração natural da estrutura com amortecedores - Modelo 5.1

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)
1	0,19	5,21
2	0,19	5,18
3	0,22	4,63

Verifica-se a partir das Tabelas 4.4 a 4.9 que os amortecedores têm, como esperado, pouca influência nas frequências naturais da estrutura devido ao fato da rigidez do amortecedor ser desprezível.

4.3.

Análise dinâmica pelo método dos ventos sintéticos

Considera-se a modelagem de carregamento apresentada no Capítulo 2, de forma a simular o transiente provocado por uma rajada de vento real. Como exposto anteriormente, a magnitude das cargas varia conforme a altura, em intervalos de 36,0 m. A carga é aplicada por um período de 300s, e os resultados analisados para intervalos de 0,5s.

Foram analisados os modelos citados anteriormente, com o objetivo de investigar os deslocamentos, velocidades e acelerações sofridas pela estrutura em função da ação do vento. Vale ressaltar que o carregamento foi ajustado para cada caso, em função da frequência natural do primeiro modo de vibração de cada uma das opções apresentadas.

4.3.1.

Modelo inicial: definição do espectro de potência a ser adotado

No Capítulo 2 foram apresentados dois espectros de potência diferentes, o espectro de Kaimal e o de Davenport. O espectro de Kaimal é mais indicado para estruturas com baixas frequências. No entanto, o espectro de Davenport é largamente usado na literatura. Apresenta-se na Tabela 4.10 e nas Figuras 4.15 a 4.17 uma comparação da resposta da estrutura de referência para cada um desses espectros.

Tabela 4.10 - Comparação da resposta no topo da estrutura submetida aos esforços de vento definidos pelos espectros de potência de Davenport e Kaimal

	Uy (mm)		Vy (mm/s)		Ay (mm/s ²)	
	Davenport	Kaimal	Davenport	Kaimal	Davenport	Kaimal
Máximos	600,39	608,84	366,24	375,25	379,23	365,63
Média Picos	507,93	458,35	256,78	196,29	332,63	255,39
Média geral	281,90	284,76				
RMS	167,94	131,66	188,97	146,35	217,95	169,02

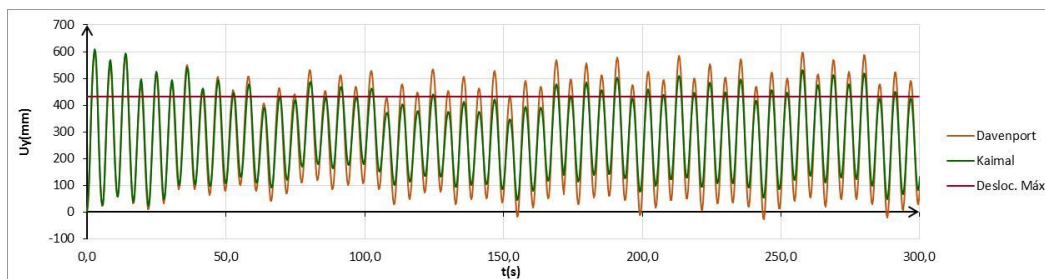


Figura 4.15 - Comparação do deslocamento sofrido pela estrutura em seu topo submetida aos esforços de vento definidos pelos espectros de potência de Davenport e Kaimal

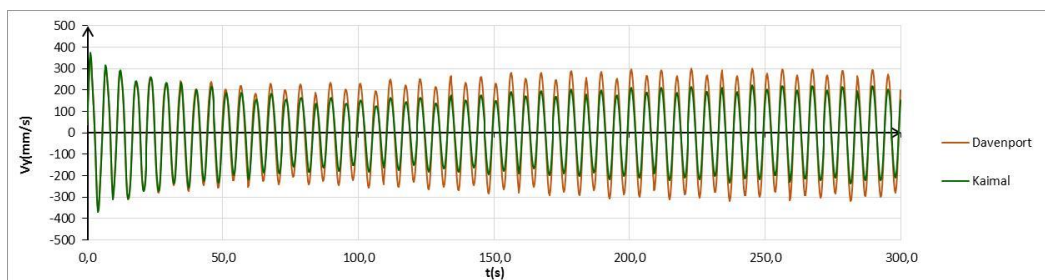


Figura 4.16 - Comparação da velocidade apresentada no topo da estrutura submetida aos esforços de vento definidos pelos espectros de potência de Davenport e Kaimal

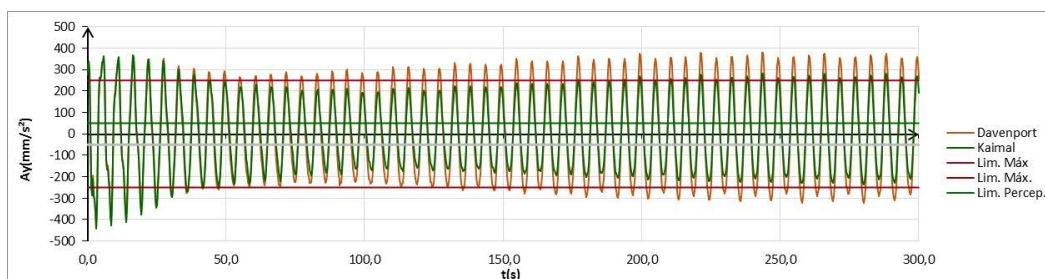


Figura 4.17 - Comparação da aceleração apresentada no topo da estrutura submetida aos esforços de vento definidos pelos espectros de potência de Davenport e Kaimal

Pelos resultados, pode-se perceber que as respostas e valores máximos são bastante parecidos. Inicialmente ambos os espectros fornecem a mesma resposta, mas após aproximadamente 40s as respostas divergem. O espectro de Kaimal apresenta deslocamentos e velocidades máximos ligeiramente maiores. Porém, Davenport apresentou resultados um pouco superiores para a aceleração. Neste estudo será adotado então o espectro de Davenport.

É interessante observar que o deslocamento no topo do edifício cresce 65% com a inclusão da parcela flutuante da carga de vento. Conforme apresentado na Tabela C.1 da NBR 8800 (2008), os deslocamentos entre o topo e a base do pilar não devem ultrapassar $H/400$. Portanto, o deslocamento máximo permitido no topo é de 432 mm. A Tabela 4.10 indica que esse deslocamento é ultrapassado tanto no seu deslocamento máximo, de 600,39 mm, quanto na média dos picos

que é de 509,61mm. O deslocamento médio, que representa a parcela do deslocamento referente à força média do vento, no entanto, está dentro deste limite com um valor de 281,90mm.

Em relação ao conforto do usuário, considera-se que acelerações abaixo de 50 mm/s^2 não são perceptíveis aos seres humanos, no entanto, acelerações de até 250 mm/s^2 são aceitáveis, se forem consideradas acelerações de pico, conforme apresentado no capítulo 2. Nos resultados acima, a aceleração máxima alcançada é de $379,23 \text{ mm/s}^2$, enquanto a média dos picos é de $333,43 \text{ mm/s}^2$, ambas ultrapassando o limite máximo aceitável. O valor RMS representa a intensidade média de um fenômeno. No caso da aceleração, que possui média zero, o valor RMS equivale ao desvio padrão. Com isso, temos o valor de $167,94 \text{ mm/s}^2$ para aceleração média, valor superior ao limite de percepção dos usuários.

Verifica-se, portanto, que a estrutura, em virtude da sua esbeltez e flexibilidade, não atende os critérios impostos de conforto e segurança, sendo necessárias modificações de projeto ou o uso de mecanismos de controle de vibrações.

4.3.2. Modelo 1

Consideram-se inicialmente, como descrito no item 4.2.1., 96 amortecedores, sendo dois por andar, com constantes de amortecimento de $C=7824 \text{ kNs/m}$, $C=15648 \text{ kNs/m}$ e $C=23286 \text{ kNs/m}$, que representam, respectivamente 10, 20 e 30% do amortecimento crítico do primeiro modo, $C_{cr}=78240 \text{ kNs/m}$. Os resultados são comparados com aqueles da estrutura sem controle passivo ($C=0$) nas Tabelas 4.11 a 4.13. Nas Figuras 4.18 a 4.20 se mostra, para 30% C_{cr} , respectivamente, a resposta no tempo do deslocamento, velocidade e aceleração no topo do edifício. Para efeito de comparação, mostra-se na Figura 4.18 o limite máximo de deslocamento ($H/400$) e na Figura 4.20 o limite máximo de aceleração e o limite de percepção.

Tabela 4.11 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 1 com amortecedores com 10% C_{cr} . $C=7824$ kNs/m.

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=7824	C=0	C=7824	C=0	C=7824	C=0
Máximos	574,78	582,36	324,59	328,39	363,50	421,66
Média Picos	427,70	447,26	163,24	180,80	193,87	203,62
Média	282,17	282,22				
RMS	95,76	103,50	105,62	114,79	127,02	138,35

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	1,30%	1,16%	13,79%
Média Picos	4,37%	9,72%	4,79%
Média			
RMS	7,48%	7,99%	8,19%

Tabela 4.12 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 1 com amortecedores com 20% C_{cr} . $C=15648$ kNs/m.

	Uy(mm)		Vy(mm)		Ay(mm)	
	C=15648	C=0	C=15648	C=0	C=15648	C=0
Máximos	569,22	582,36	322,19	328,39	346,09	421,66
Média Picos	416,15	447,26	153,27	180,80	184,30	203,62
Média	282,12	282,22				
RMS	91,66	103,50	100,82	114,79	121,62	138,35

	Uy(mm)	Vy(mm)	Ay(mm)
Máximos	2,26%	1,89%	17,92%
Média Picos	6,96%	15,23%	9,49%
Média			
RMS	11,44%	12,17%	12,09%

Tabela 4.13 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 1 com amortecedores com 30% C_{cr} . $C=23472$ kNs/m.

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=23472	C=0	C=23472	C=0	C=23472	C=0
Máximos	564,31	582,36	320,64	328,39	337,19	421,66
Média Picos	409,67	447,26	150,06	180,80	179,39	203,62
Média	282,09	282,22				
RMS	89,62	103,50	98,51	114,79	119,27	138,35

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	3,10%	2,36%	20,03%
Média Picos	8,41%	17,00%	11,90%
Média			
RMS	13,41%	14,18%	13,79%

Ao analisar a variação do desvio padrão dos deslocamentos, ou seja, a redução do valor RMS da amplitude dos deslocamentos, tem-se um resultado de 7,48% quando se considera a constante equivalente a 10% C_{cr} , passando para 11,44% no caso de 20% C_{cr} e chegando a 13,41% no caso de 30% C_{cr} . Percebe-se também que essa variação é parecida tanto para os valores de velocidade, como de aceleração. Portanto, há uma melhora na resposta da estrutura com o uso de amortecedores. No entanto, esse comportamento não é linear, a diferença entre o resultado para a constante de 10% C_{cr} e 20% C_{cr} é maior do que a diferença entre as constantes de 20% C_{cr} e 30% C_{cr} .

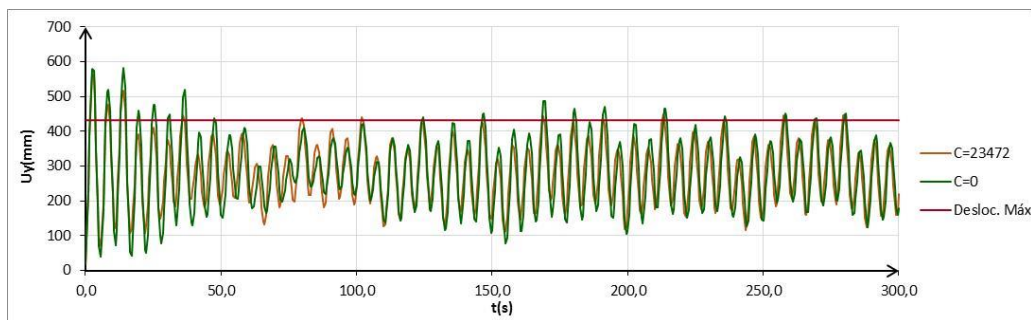


Figura 4.18 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 1 com amortecedores com 30% C_{cr}

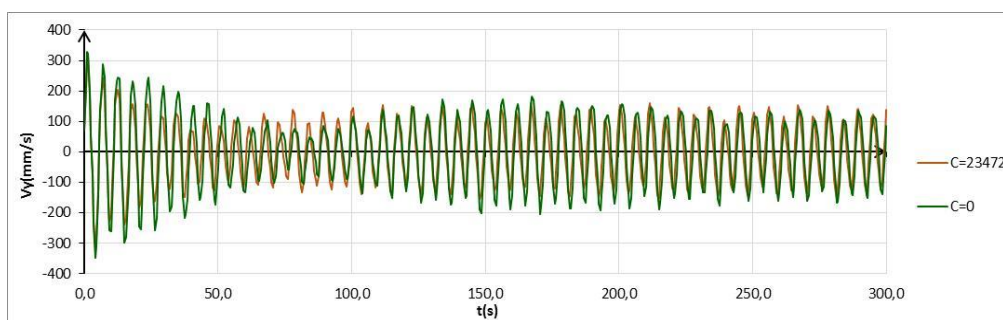


Figura 4.19 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 1 com amortecedores com 30% C_{cr}

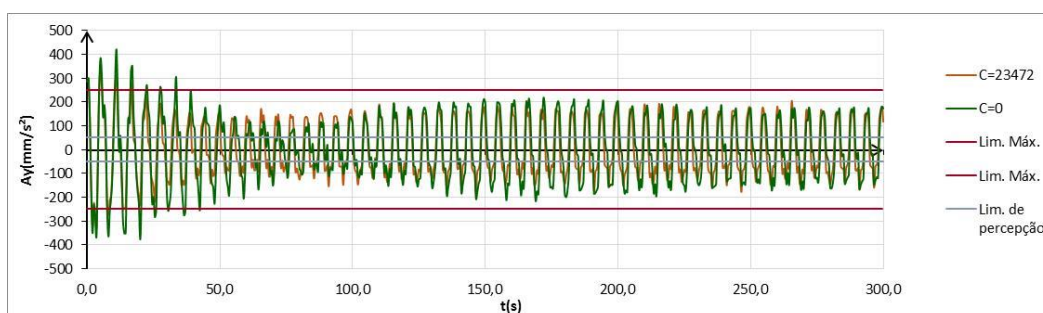


Figura 4.20 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 1 com amortecedores com 30% C_{cr}

Pelos resultados obtidos para a constante de $C=23286$ kNs/m (30% C_{cr}), percebe-se que houve uma pequena melhora no deslocamento máximo. Quando os amortecedores não estão atuando (constante de amortecimento $C=0$), o deslocamento máximo é de 582,36 mm, já menor do que o apresentado pelo modelo inicial, que era de 600,39 mm. Com a atuação dos amortecedores (constante de amortecimento $C=30\%C_{cr}$), esse deslocamento diminui ainda mais, atingindo 564,31 mm. Verifica-se que o deslocamento máximo ainda é 30% acima do valor limite estabelecido para garantir a segurança. Entretanto este limite é ultrapassado apenas nos instantes iniciais em virtude da aplicação súbita da carga de vento. Após 40s nenhum pico ultrapassa o limite de segurança. Também, a média dos picos ao longo dos 300s passa para 409,67mm, abaixo do limite

estabelecido de 432 mm. As variações de amplitude ocorrem em função da característica aleatória das pressões causadas pelo vento.

A aceleração máxima alcançada neste modelo é de 421,66 mm/s² quando os amortecedores não estão atuando, maior que a do modelo inicial, de 379,23 mm/s². Quando os amortecedores começam a atuar, no entanto, esta aceleração é reduzida para 337,19 mm/s², apresentando uma variação de 20,03%, com uma melhora de 11,09% em relação ao modelo inicial. O valor máximo ainda é consideravelmente maior do que o limite, levando aproximadamente 40s para atingir o nível desejado. A média dos picos atinge o valor de 179,39 mm/s², abaixo da recomendação de 250 mm/s² para velocidade de pico. No entanto, segundo a avaliação de Chang, apud Blessmann (2005), ainda é considerado um nível incômodo de aceleração.

Por fim, é feita uma análise considerando as diagonais sem os amortecedores associados a elas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.14. Percebe-se que tanto o deslocamento máximo como o deslocamento médio são aproximadamente 9% menores que o alcançado considerando os amortecedores. Ainda assim, o deslocamento máximo está acima do limite. Já a aceleração máxima é 20% menor com a introdução dos amortecedores, e a média dos picos, 12% menor. Portanto, por mais que para os deslocamentos os amortecedores não tenham se mostrado uma boa solução, eles se mostram importantes para o conforto dos usuários.

Tabela 4.14 - Resposta da estrutura do Modelo 1 com barras sem amortecedores

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximo	517,63	316,06	417,96
Média Picos	398,57	164,35	204,38
Média	253,35		
RMS	89,22	104,25	132,64

É importante ressaltar ainda que, ao se retirar os amortecedores dessas barras, elas perdem a sua capacidade de se deslocar, passando a absorver esforços, que chegam a uma compressão de 1182,00 kN. Esta peça possui um comprimento destravado de 9,70 m, e não é capaz de absorver um esforço desta magnitude sem um travamento intermediário. Seria necessário incluir um travamento intermediário, ou substituir essas barras por outras de seção W310x97, com capacidade para absorver esses esforços.

4.3.3. Modelo 2

Neste modelo foram incluídas diagonais com amortecedores, substituindo os travamentos com X nos dois eixos centrais. Portanto, foram eliminadas duas linhas com três travamentos em X de seção HP310x94, além de duas colunas de pilares do núcleo, para serem incluídas diagonais simples HP250x85, com amortecedores associados a elas. A quantidade de dois amortecedores por andar é mantida. Neste caso, a constante de amortecimento crítico da estrutura é $C_{cr}=68640$ kNs/m. Foram adotados para constante dos amortecedores aplicados à estrutura os valores $C=0$, $C=6864$ kNs/m, $C=13728$ kNs/m e $C=20592$ kNs/m, que representam 0, 10, 20 e 30%, respectivamente, do amortecimento crítico. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.15 a 4.17. Nas Figuras 4.21 a 4.23 mostra-se, para $C=30\%C_{cr}$, respectivamente, a resposta no tempo do deslocamento, velocidade e aceleração no topo do edifício.

Tabela 4.15 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 2 com amortecedores com $10\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=6864	C=0	C=6864	C=0	C=6864	C=0
Máximos	699,95	702,81	368,24	371,59	338,54	361,65
Média Picos	489,47	499,93	155,78	166,59	171,97	186,73
Média	337,24	337,24				
RMS	91,94	99,53	91,42	99,59	104,54	116,91

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	0,41%	0,90%	6,39%
Média Picos	2,09%	6,49%	7,91%
Média			
RMS	7,63%	8,20%	10,58%

Tabela 4.16 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 2 com amortecedores com $20\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=13728	C=0	C=13728	C=0	C=13728	C=0
Máximos	696,95	702,81	365,55	371,59	332,78	361,65
Média Picos	478,63	499,93	146,15	166,59	162,78	186,73
Média	337,25	337,24				
RMS	86,23	99,53	85,34	99,59	97,18	116,91

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	0,83%	1,63%	7,98%
Média Picos	4,26%	12,27%	12,83%
Média			
RMS	13,37%	14,30%	16,88%

Tabela 4.17 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 2 com amortecedores com 30% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=20592	C=0	C=20592	C=0	C=20592	C=0
Máximos	693,90	702,81	363,42	371,59	328,27	361,65
Média Picos	472,92	499,93	139,90	166,68	136,47	164,87
Média	337,25	337,24				
RMS	81,87	99,53	80,74	99,59	92,07	116,91

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	1,27%	2,20%	9,23%
Média Picos	5,40%	16,07%	17,22%
Média			
RMS	17,74%	18,93%	21,25%

Analisando em valores absolutos, o deslocamento cresce consideravelmente nesse modelo, atingindo 702,81 mm sem os amortecedores, passando para 693,90 mm com a constante $C=20592$. A média dos picos é de 472,92mm, ainda maior do que o limite de $H/400$, e maior do que o obtido no Modelo anterior. Isso ocorre devido a estrutura estar menos rígida, com a retirada de alguns travamentos em X.

A aceleração apresenta valores menores que no Modelo 1, tanto se analisarmos os valores máximos, como a média dos picos e o desvio padrão. A média dos picos está dentro do limite considerado aceitável, sendo de 136,47 mm/s², portanto menor do que 250,0 mm/s². Conforme apresentado no capítulo 2, a aceleração é perceptível, porém não chega a um nível incômodo. O valor máximo, entretanto, é de 337,19 mm/s², maior que o limite, que, conforme mostra a Figura 4.23, só é alcançado após aproximadamente 50s.

Por mais que este modelo tenha apresentado ganhos para os valores de aceleração, os deslocamentos resultantes são muito elevados, comprometendo a integridade da estrutura. Não é considerado, então, um modelo viável, sendo mais adequado manter os travamentos do modelo inicial, incluindo os amortecedores em barras adicionais.

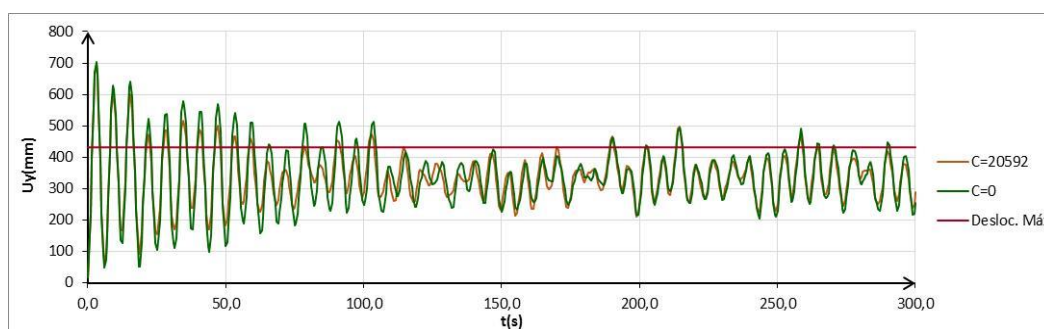


Figura 4.21 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 2 com amortecedores com 30% C_{cr}

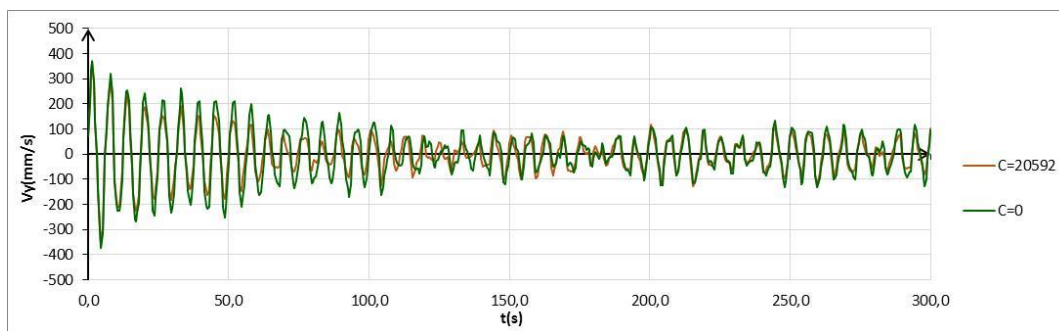


Figura 4.22 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 2 com amortecedores com 30%C_{cr}

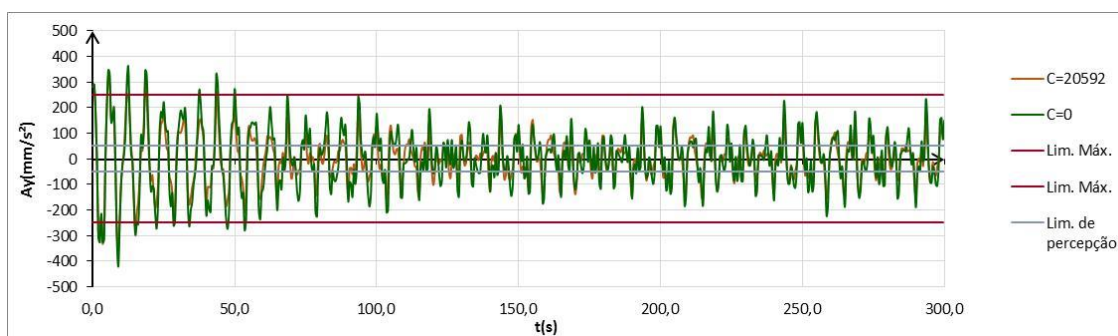


Figura 4.23 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 2 com amortecedores com 30%C_{cr}

4.3.4. Modelo 3

Neste Modelo se consideram duas diagonais HP 250x85 nas fachadas na direção de y, separadas por uma linha de pilares com seção semelhante aos demais pilares de fachada. A essas diagonais são associados amortecedores fluidos, passando neste caso a quatro amortecedores por andar. As Tabelas 4.18 a 4.20 mostram os resultados para $C=0$, $C=7876$ kNs/m, $C=15752$ kNs/m e $C=23628$ kNs/m, que representam 0, 10, 20 e 30%, respectivamente, do amortecimento crítico do modelo. Nas Figuras 4.24 a 4.26 se mostra, para $C=30\%C_{cr}$, respectivamente, a resposta no tempo do deslocamento, velocidade e aceleração no topo do edifício.

Neste modelo, o deslocamento máximo no caso em que os amortecedores não entram em ação apresentou um ligeiro aumento em relação ao modelo original, sendo de 613,66 mm. No entanto, quando os amortecedores passam a atuar, esse valor cai para 542,73 mm, valor inferior ao modelo com somente dois

amortecedores por andar nas fachadas, no entanto ainda acima do limite desejado.

A redução em relação ao caso sem amortecedores foi de aproximadamente 12%.

Tabela 4.18 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 3 com amortecedores com 10% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=7876	C=0	C=7876	C=0	C=7876	C=0
Máximos	554,35	613,66	318,52	363,75	377,07	446,24
Média Pic	475,55	521,86	251,50	301,34	312,34	365,07
Média	267,69	267,57				
RMS	156,00	189,34	178,82	217,84	211,10	257,24

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	9,66%	12,44%	15,50%
Média Pic	8,87%	16,54%	14,44%
Média			
RMS	17,61%	17,91%	17,94%

Tabela 4.19 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 3 com amortecedores com 20% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=15752	C=0	C=15752	C=0	C=15752	C=0
Máximos	546,04	613,66	316,80	363,75	359,86	446,24
Média Pic	448,09	521,86	222,77	301,34	277,22	365,07
Média	267,77	267,57				
RMS	135,86	189,34	155,16	217,84	183,48	257,24

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	11,02%	12,91%	19,36%
Média Pic	14,14%	26,07%	24,06%
Média			
RMS	28,25%	28,77%	28,68%

Tabela 4.20 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=23628	C=0	C=23628	C=0	C=23628	C=0
Máximos	542,73	613,66	315,66	363,75	349,96	446,24
Média Pic	430,49	521,86	204,05	301,34	253,21	365,07
Média	267,84	267,57				
RMS	122,90	189,34	139,88	217,84	165,81	257,24

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	11,56%	13,22%	21,58%
Média Pic	17,51%	32,29%	30,64%
Média			
RMS	35,09%	35,79%	35,54%

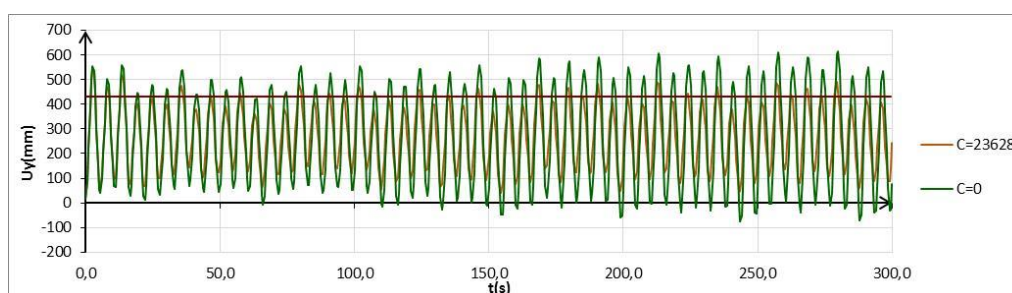


Figura 4.24 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

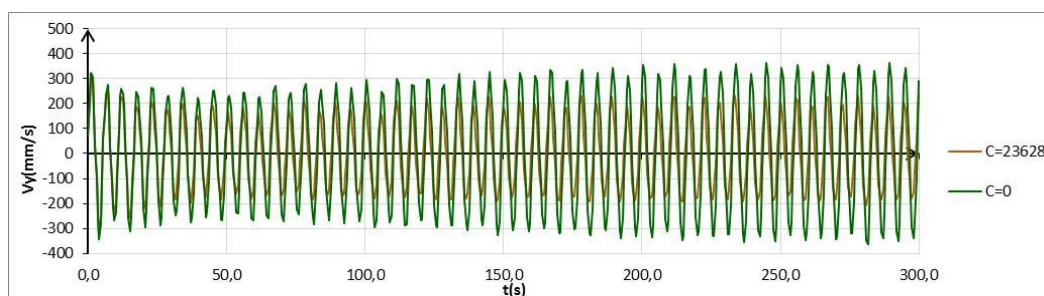


Figura 4.25 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

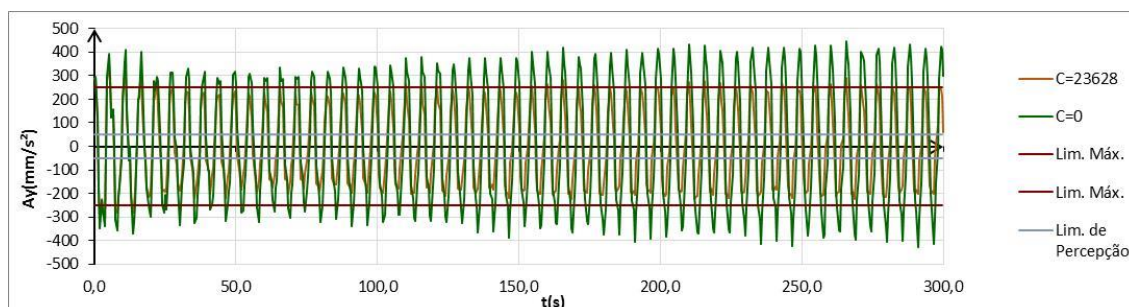


Figura 4.26 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

A aceleração máxima, sem considerar a ação dos amortecedores é de 446,24 mm/s², representando um aumento significativo em relação ao caso inicial. Com a atuação dos amortecedores, chegou-se a 349,96 mm/s², maior do que o resultado obtido no Modelo 1, de 337,19 mm/s. A Tabela 4.21 e as Figuras de 4.27 a 4.29 apresentam a comparação entre o Modelo 1, com diagonal simples e 3, com diagonais duplas.

Tabela 4.21 - Comparação das respostas das opções 2 e 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	Modelo 1	Modelo 3	Modelo 1	Modelo 3	Modelo 1	Modelo 3
Máximos	564,31	542,73	320,64	315,66	337,19	349,96
Média Picos	409,67	439,78	150,06	209,03	179,39	262,62
Média	282,09	267,84				
RMS	89,62	122,90	98,51	139,88	119,27	165,81

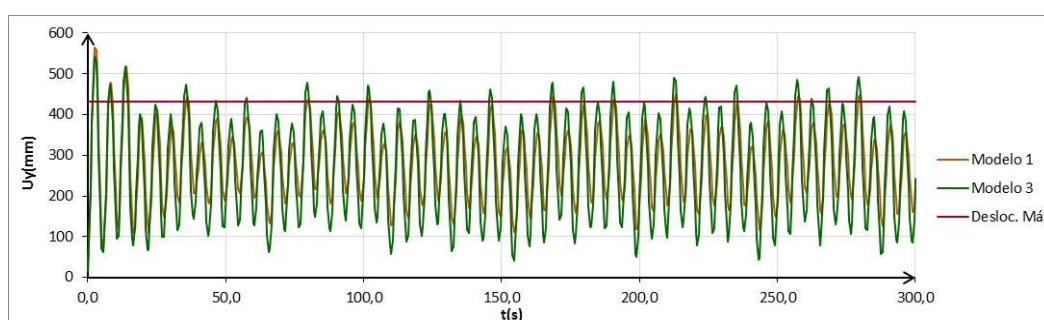


Figura 4.27 - Comparação dos deslocamentos das opções 2 e 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

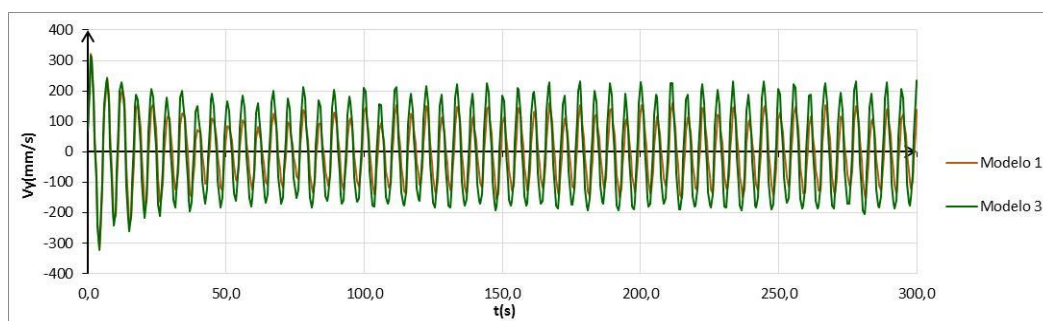


Figura 4.28 - Comparação das velocidades das opções 2 e 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

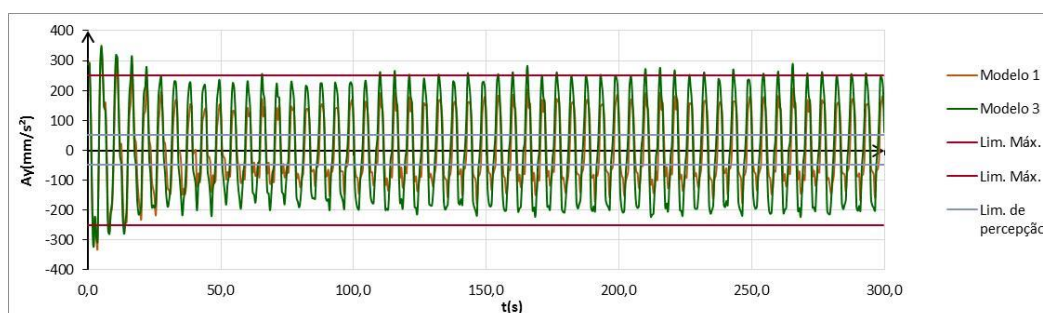


Figura 4.29 - Comparação das acelerações das opções 2 e 3 com amortecedores com 30% C_{cr}

A seguir faz-se também uma análise considerando as diagonais funcionando como contraventamento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.22. O deslocamento máximo e o deslocamento médio são ligeiramente menores que o alcançado pelos amortecedores. Ainda assim, o deslocamento máximo está acima do limite. A aceleração máxima, no entanto, é 16% menor com a introdução dos amortecedores, e a média dos picos permanece aproximadamente a mesma, ambas acima do limite recomendado para conforto dos usuários.

Tabela 4.22 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 3 com barras sem amortecedores

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	515,01	312,53	417,11
Média Picos	425,78	203,80	259,83
Média	261,10		
RMS	124,43	143,86	174,45

Neste caso, o esforço de compressão imposto às diagonais de seção HP250x85 é de 1067,30 kN. Como a barra tem um comprimento livre de 5,80m, essa seção é suficiente para absorver tais esforços.

4.3.5. Modelo 4

O modelo consiste na inclusão de duas diagonais HP 250x85 nas fachadas do eixo y, em cada um dos vãos externos, às quais foram associados amortecedores fluidos. Neste modelo têm-se quatro amortecedores por andar, com um total de 192 amortecedores. Os resultados para o carregamento de ventos sintéticos, tanto para os casos de $C=0$, quanto os casos de $C=7774$ kNs/m, $C=15549$ kNs/m e $C=23322$ kNs/m, que representam 10, 20 e 30%, respectivamente, do valor crítico, $C_{cr}=77740$ kNs/m, são apresentados nas Tabelas 4.23 a 4.25 e nas Figuras 4.30 a 4.32.

Tabela 4.23 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 4 com amortecedores com $10\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=7774	C=0	C=7774	C=0	C=7774	C=0
Máximos	565,00	581,97	317,64	327,55	327,66	418,85
Média Picos	398,27	443,16	138,63	185,13	167,51	230,31
Média	282,14	282,22				
RMS	81,76	100,25	88,48	110,69	106,48	133,48

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	2,92%	3,03%	21,77%
Média Picos	10,13%	25,12%	27,27%
Média			
RMS	18,44%	20,06%	20,23%

Tabela 4.24 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 4 com amortecedores com $20\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=15549	C=0	C=15549	C=0	C=15549	C=0
Máximos	550,59	581,97	311,23	327,55	294,33	418,85
Média Picos	375,82	443,16	115,55	185,13	136,74	230,31
Média	282,12	282,22				
RMS	70,65	100,25	74,79	110,69	90,69	133,48

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	5,39%	4,98%	29,73%
Média Picos	15,20%	37,58%	40,63%
Média			
RMS	29,53%	32,43%	32,06%

Tabela 4.25 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 4 com amortecedores com $30\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm)		Ay(mm)	
	C=23323	C=0	C=23323	C=0	C=23323	C=0
Máximos	537,79	581,97	306,89	327,55	285,36	418,85
Média Picos	369,08	443,16	100,79	185,13	122,53	230,31
Média	282,12	282,22				
RMS	63,44	100,25	65,79	110,69	80,75	133,48

	Uy(mm)	Vy(mm)	Ay(mm)
Máximos	7,59%	6,31%	31,87%
Média Picos	16,72%	45,56%	46,80%
Média			
RMS	36,72%	40,57%	39,50%

A redução do desvio padrão para os deslocamentos chega a 36,72%, para $C=30\%C_{cr}$, passando para 40,57% na velocidade, e 39,50% na aceleração. Esses resultados são ligeiramente superiores aos 35% encontrados no Modelo 3, ainda que tenhamos a mesma quantidade de amortecedores nos dois casos.

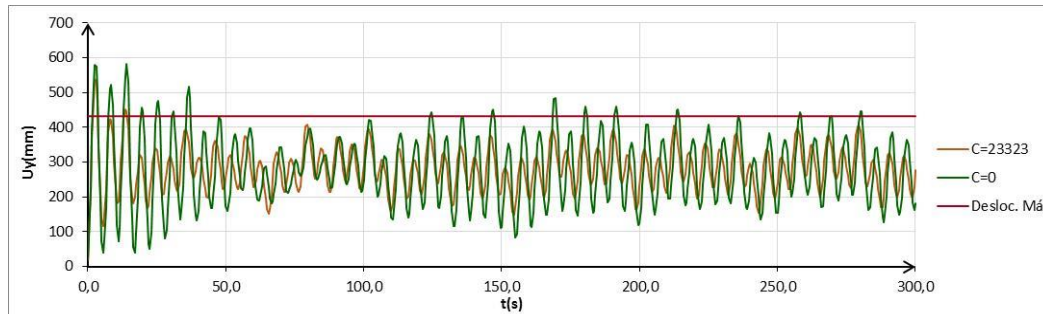


Figura 4.30 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 4 com amortecedores com $30\%C_{cr}$

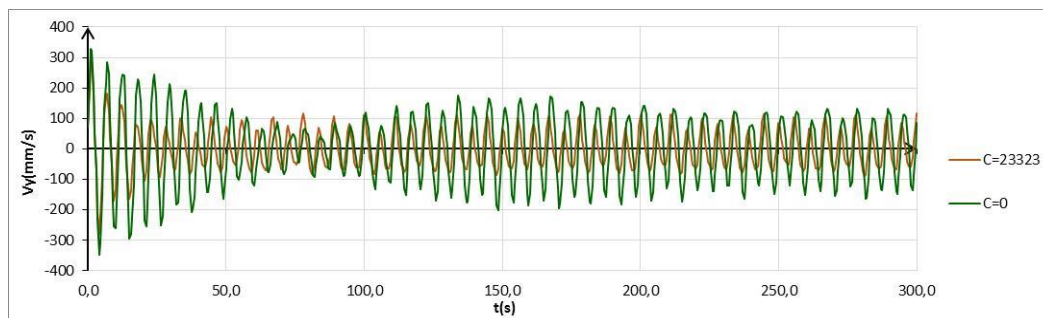


Figura 4.31 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 4 com amortecedores com $30\%C_{cr}$

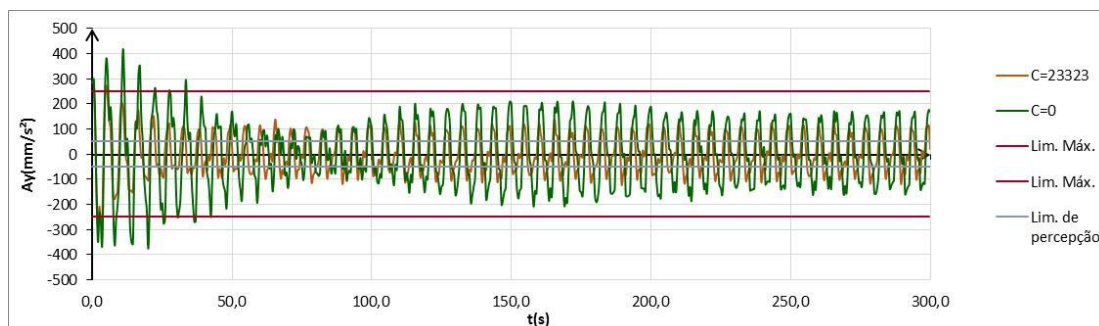


Figura 4.32 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 4 com amortecedores com $30\%C_{cr}$

O deslocamento máximo no caso em que os amortecedores não entram em ação é de 581,97mm, já inferior aos 600,39 mm do caso inicial. Com os amortecedores de constante $C=23323$, esse valor cai para 537,79 mm, valor inferior aos demais modelos testados até então, mas, ainda assim, 24% acima do limite desejado de 432,00mm. A média dos picos, no entanto, é de 369,08 mm, ou seja, inferior ao limite da norma.

A aceleração máxima, sem considerar a ação dos amortecedores, é de 418,85 mm/s², representando um aumento significativo em relação ao caso inicial de 379,23 mm/s². No entanto, ela é reduzida consideravelmente com a introdução dos amortecedores chegando a 285,36 mm/s², mas ainda ligeiramente superior ao que o limite recomendável de 250mm/s². A média dos picos é de 122,53 mm/s², atingindo um nível perceptível, porém não mais incômodo.

Para uma mesma quantidade de amortecedores, esse modelo mostrou-se muito mais eficaz do que o Modelo 3. A Tabela 4.26 e as Figuras 4.33 a 4.35 mostram a diferença entre os resultados obtidos pelos dois modelos. Essa diferença ocorre pelo fato de os pórticos serem menos rígidos, permitindo assim um maior deslocamento do pistão do amortecedor, aumentando com isso a sua capacidade de dissipação de energia.

Tabela 4.26 - Comparação das respostas das opções 3 e 4 com amortecedores com 30% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	Modelo 4	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 3
Máximos	537,79	542,73	306,89	315,66	285,36	349,96
Média Picos	364,59	439,78	105,79	209,03	120,77	262,62
Média	282,12	267,84				
RMS	63,44	122,90	65,79	139,88	80,75	165,81

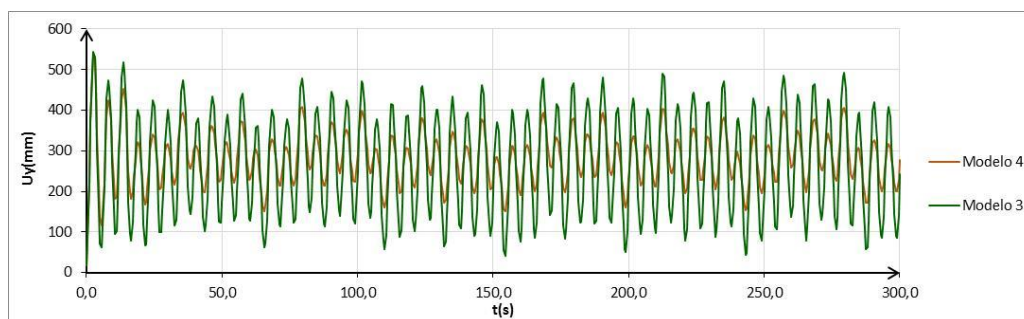


Figura 4.33 - Comparação dos deslocamentos das opções 3 e 4 com amortecedores com

30% C_{cr}

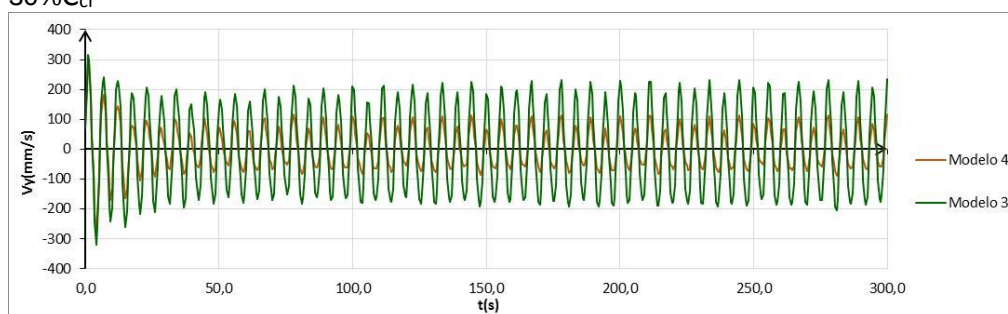


Figura 4.34 - Comparação das velocidades das opções 3 e 4 com amortecedores com 30% C_{cr}

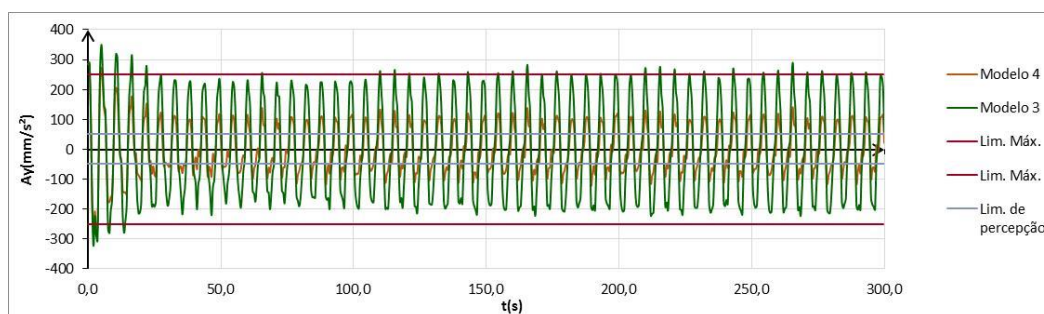


Figura 4.35 - Comparação das acelerações das opções 3 e 4 com amortecedores com 30% C_{cr}

Considerando as diagonais como contraventamentos adicionais, como mostra a Tabela 4.27, o deslocamento máximo é 18% menor do que o caso com amortecedores, enquanto o deslocamento médio é 25% menor. O deslocamento máximo fica ligeiramente acima do limite. A aceleração máxima é 32% menor com a introdução dos amortecedores, e a média dos picos, 42%. Portanto, por mais que se tenha uma melhora em relação ao deslocamento, a aceleração ainda continua acima do limite de conforto dos usuários.

Tabela 4.27 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 4 com barras sem amortecedores

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	441,48	296,30	417,76
Média Picos	304,39	120,88	171,54
Média	211,26		
RMS	62,94	78,16	107,21

Neste caso, o esforço de compressão imposto às diagonais de seção HP250x85 é de 1160,06 kN. Como a barra tem um comprimento livre de 12,00m, essa seção não é capaz de absorver esse esforço, sendo necessária uma seção W610x155, com uma taxa de utilização de 94,5%.

4.3.6. Modelo 5

Neste caso considera-se, além das duas diagonais incluídas no Modelo 4, uma terceira diagonal em cada fachada na direção y, no vão central. Portanto, são seis amortecedores por andar, com um total de 288 amortecedores em todo edifício. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.28 a 4.30 e nas Figuras 4.36 a 4.39, para $C=0$, $C=7793$ kNs/m, $C=15585$ kNs/m e $C=23378$ kNs/m, que

representam 0, 10, 20 e 30%, respectivamente, do valor crítico, $C_{cr}=77930$ kNs/m.

Tabela 4.28 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5 com amortecedores com $10\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=7793	C=0	C=7793	C=0	C=7793	C=0
Máximos	559,30	581,65	313,10	327,08	307,65	417,29
Média Picos	384,13	441,11	122,55	182,41	145,08	227,17
Média	282,15	282,23				
RMS	74,57	98,81	79,45	108,85	95,45	131,29

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	3,84%	4,27%	26,27%
Média Picos	12,92%	32,82%	36,14%
Média			
RMS	24,53%	27,01%	27,30%

Tabela 4.29 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5 com amortecedores com $20\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=15585	C=0	C=15585	C=0	C=15585	C=0
Máximos	539,55	581,65	303,38	327,08	284,04	417,29
Média Picos	359,63	441,11	94,10	182,41	114,08	227,17
Média	282,14	282,23				
RMS	61,19	98,81	62,44	108,85	75,74	131,29

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	7,24%	7,25%	31,93%
Média Picos	18,47%	48,41%	49,78%
Média			
RMS	38,07%	42,64%	42,31%

Tabela 4.30 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5 com amortecedores com $30\%C_{cr}$

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=23378	C=0	C=23378	C=0	C=23378	C=0
Máximos	521,72	581,65	296,34	327,08	283,96	417,29
Média Picos	352,02	441,11	78,62	182,41	100,40	227,17
Média	282,13	282,23				
RMS	53,52	98,81	52,35	108,85	64,64	131,29

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	10,30%	9,40%	31,95%
Média Picos	20,20%	56,90%	55,80%
Média			
RMS	45,83%	51,91%	50,77%

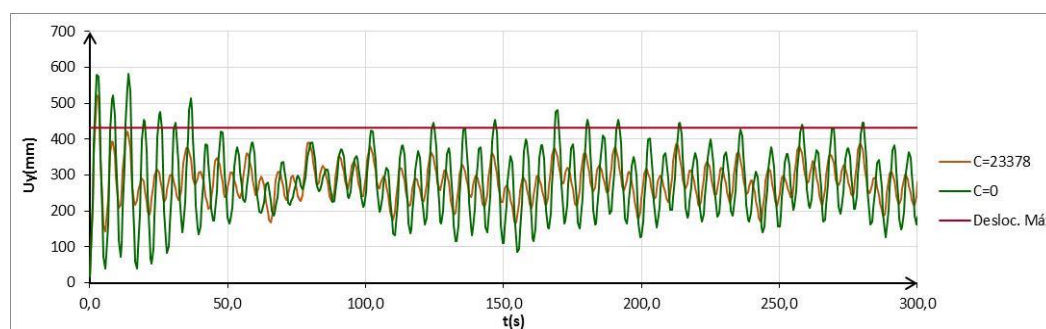


Figura 4.36 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5 com amortecedores com $30\%C_{cr}$

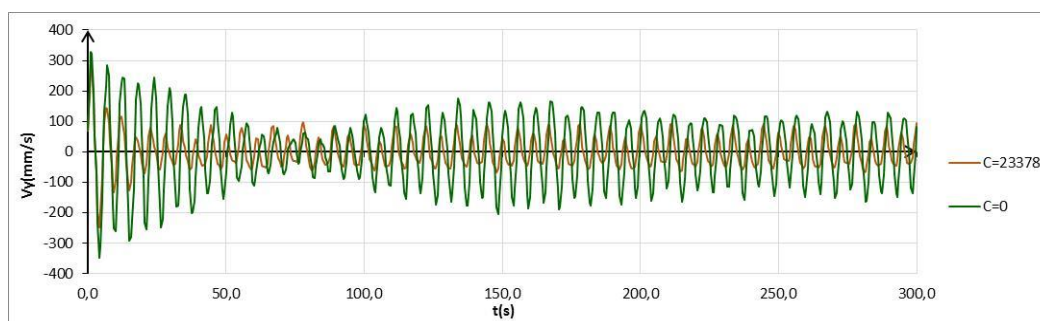


Figura 4.37 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5 com amortecedores com 30% C_{cr}

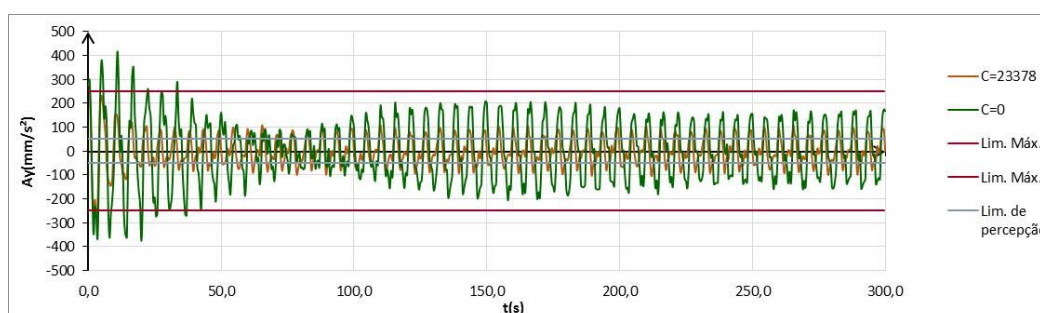


Figura 4.38 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5 com amortecedores com 30% C_{cr}

Sem os amortecedores, o deslocamento máximo é 581,65mm, muito próximo ao apresentado pelo modelo anterior. Com os amortecedores com valor 30% C_{cr} , esse valor cai para 521,72mm, apresentando uma redução de 14% do modelo original mais ainda está acima do limite definido pela NBR 8800 (2008). No entanto, pelo gráfico, percebemos que o valor limite é ultrapassado apenas no primeiro pico em 2,0s, mas logo volta a ser inferior ao limite e se mantém inferior por todo o período de aplicação da carga.

A aceleração máxima chega a 283,96mm/s² com a introdução dos amortecedores, mas ainda é ligeiramente superior ao que o limite recomendável de 250 mm/s². Para a aceleração, também após 4,0s se alcança o limite desejável. A média dos picos é de 100,40 mm/s², nível perceptível, porém não incômodo aos usuários, e menor do que o limite de 250 mm/s². A magnitude média da aceleração é de 64,64 mm/s², ligeiramente superior ao limite para a percepção humana.

A comparação dos resultados obtidos entre as opções 4 e 5 é apresentada na Tabela 4.31 e nas Figuras 4.39 a 4.41. Percebe-se uma melhora em relação ao modelo anterior.

Tabela 4.31 - Comparação das respostas das opções 4 e 5 com amortecedores com 30% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	Modelo 5	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 4
Máximos	521,72	537,79	296,34	306,89	283,96	285,36
Média Picos	352,02	369,08	78,62	100,79	100,40	122,53
Média	282,13	282,12				
RMS	53,52	63,44	52,35	65,79	64,64	80,75

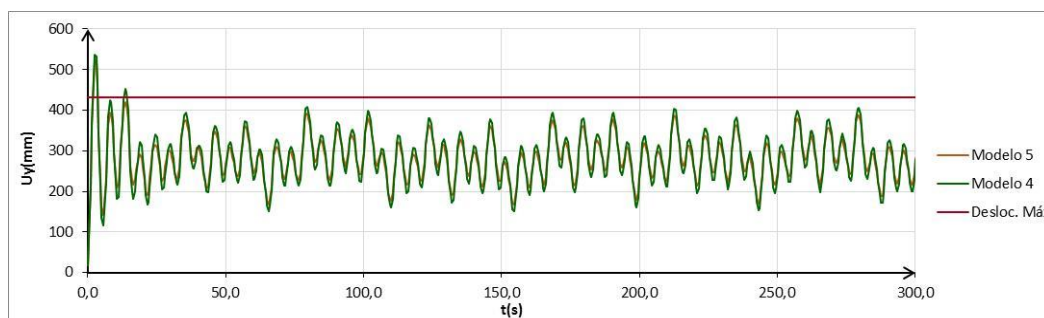


Figura 4.39 - Comparação dos deslocamentos das opções 4 e 5 com amortecedores com 30% C_{cr}

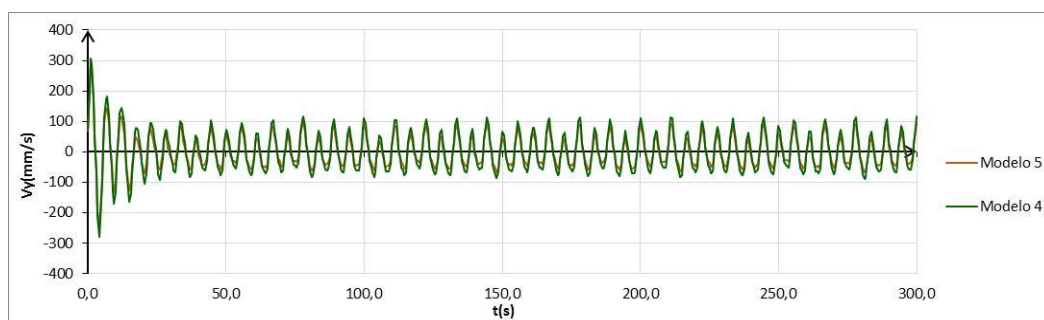


Figura 4.40 - Comparação das velocidades das opções 4 e 5 com amortecedores com 30% C_{cr}

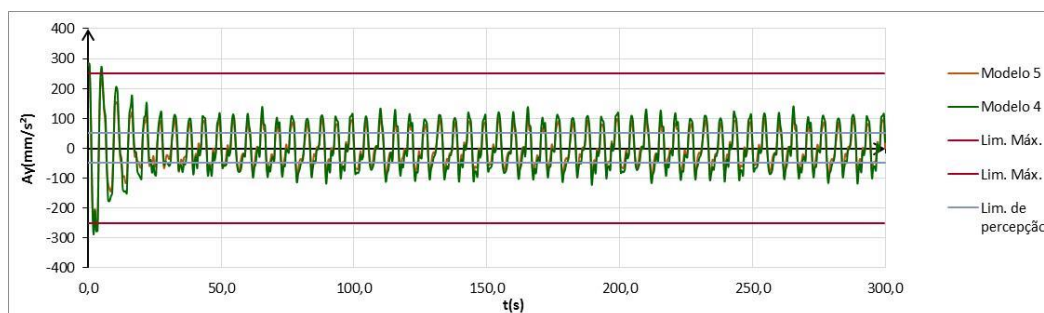


Figura 4.41 - Comparação das acelerações das opções 4 e 5 com amortecedores com 30% C_{cr}

Para esta modelo, foi testado ainda uma variante com a constante de amortecimento equivalente a 40% do amortecimento da estrutura, portanto $C=31172$ kNs/m. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.32.

Com o aumento da constante de amortecimento, o deslocamento máximo passa a 506,52 mm com uma redução de aproximadamente 3% em relação ao caso

com constante $C=23378$ kNs/m, mas ainda segue superior ao limite estabelecido. A aceleração máxima se mantém estável com o aumento da constante aplicada aos amortecedores, sendo de $283,96\text{mm/s}^2$. Quando os amortecedores são substituídos por contraventamentos, passando a absorver esforços, o deslocamento máximo passa para $372,25\text{mm}$, ou seja, 26,5% menor do que apresentado pelos amortecedores com constante $C=31172$ kNs/m. Nos deslocamentos médios, a diferença é de 38%. A aceleração máxima, no entanto, é consideravelmente superior, sendo próxima à situação em que os amortecedores não entram em ação. A média dos picos também é superior, em 66%.

Tabela 4.32 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5 com amortecedores com 40% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=31172	C=0	C=31172	C=0	C=31172	C=0
Máximos	506,52	581,65	291,23	327,08	283,96	417,29
Média Picos	345,02	441,11	69,24	182,41	94,67	227,17
Média	282,11	282,23				
RMS	48,97	98,81	46,30	108,85	58,51	131,29

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	12,92%	10,96%	31,95%
Média Picos	21,78%	62,04%	58,33%
Média			
RMS	50,44%	57,47%	55,43%

Tabela 4.33 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5 com barras sem amortecedores

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	372,25	267,21	405,38
Média Picos	246,87	100,48	156,92
Média	175,40		
RMS	49,66	66,55	99,66

Neste caso, as diagonais com seção HP 250x85 possuem 12,00m de comprimento nos vãos externos e 9,00m no vão interno. Para as barras de 12,00m, o esforço de compressão é de 1184,40 kN, e a seção HP250x85 não é suficiente para suportá-lo. Seria necessário, portanto, uma seção W610x155, que funcionaria a uma taxa de utilização de 96,4%. Nas barras com 9,00m de comprimento, o esforço é majoritariamente de tração, chegando a 887,00 kN, suportado pela seção HP 250x85.

4.3.7. Modelo 5.1

O modelo anterior alcançou valores considerados aceitáveis em relação à aceleração, porém o deslocamento máximo ainda é um pouco maior do que o limite estabelecido em norma. Como a estrutura já conta com uma grande quantidade de amortecedores, optou-se por enrijecê-la, de forma a reduzir os seus deslocamentos.

Na Tabela 4.34 são apresentados os resultados considerando uma constante de amortecimento $C=32560$ kNs/m, referente a 40% C_{cr} .

Tabela 4.34 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	436,93	503,73	274,52	307,19	283,05	400,53
Média Picos	301,49	411,29	66,60	211,57	107,57	272,93
Média	242,61	242,56				
RMS	43,64	115,70	44,94	138,94	61,80	175,12

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	13,26%	10,63%	29,33%
Média Picos	26,70%	68,52%	60,59%
Média			
RMS	62,28%	67,65%	64,71%

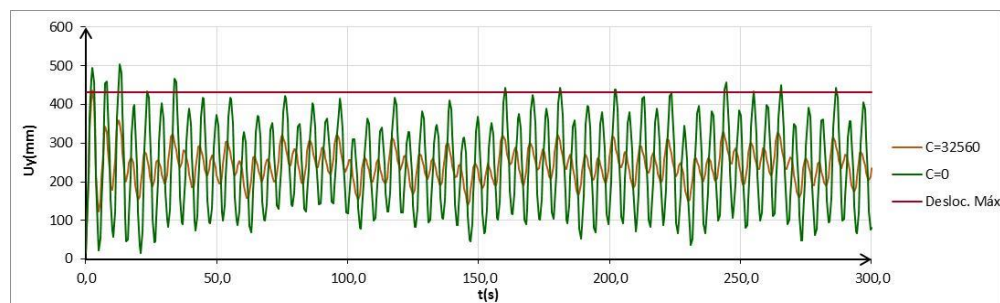


Figura 4.42 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% C_{cr}

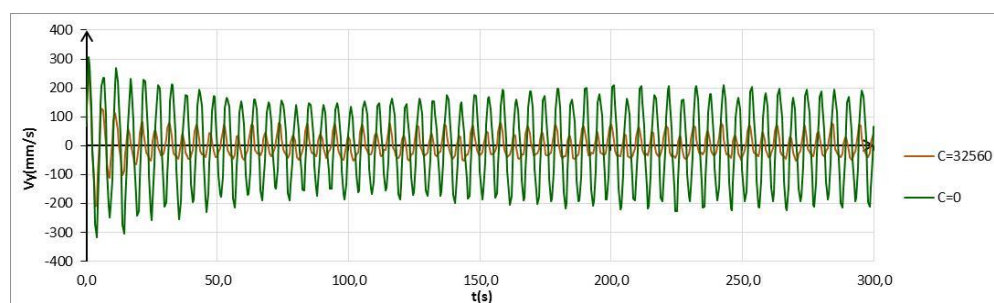


Figura 4.43 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% C_{cr}

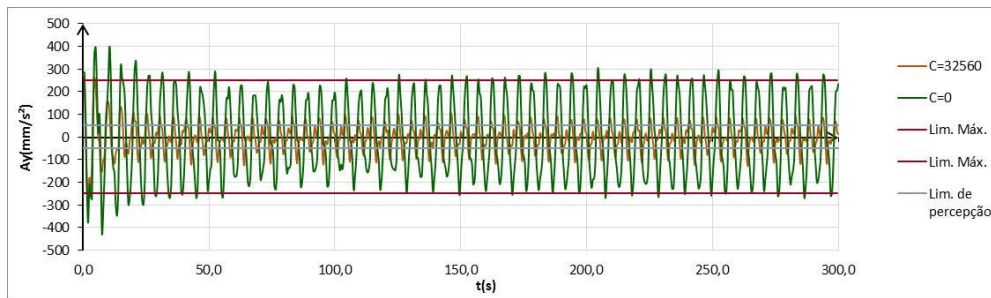


Figura 4.44 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% C_{cr}

Neste modelo, o deslocamento máximo chega a 436,93 mm, aproximadamente igual ao limite da norma de 432,00mm. A média dos picos e a média geral também reduzem para 301,49 mm e 242,61 mm respectivamente. A aceleração máxima mantém-se estável. Ambos, no entanto, ainda podem ser considerados aceitáveis pelos limites estabelecidos em norma, uma vez que a média dos picos, com o valor de 107,50mm/s² é considerado perceptível, mas não chega a ser incômoda aos usuários. Vale ressaltar ainda que, segundo a NBR 6123 (1988), para a análise do conforto dos usuários, é indicado um período de recorrência da velocidade do vento de 10 anos, enquanto nesta análise considerou-se uma velocidade definida para um período de 50 anos. Portanto, os valores alcançados para a aceleração da estrutura podem ser considerados aceitáveis em relação ao conforto dos usuários.

4.3.8. Resumo dos resultados

A Tabela 4.35 apresenta um resumo dos resultados obtidos para cada um dos modelos com uma constante de amortecimento de $C=30\%C_{cr}$.

4.4. Variação do período de carregamento

Considerando novamente o método dos ventos sintéticos, foi feita uma análise para a carga atuando em 25, 50, 100, 150 e 200 segundos. Esta análise foi feita para o modelo 5.1, uma vez que este apresentou resultados satisfatórios de deslocamento e aceleração, com amortecedores com uma constante de 40% C_{cr} .

Tabela 4.35 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% C_{cr} e carga atuando por 25s

Modelo		Inicial	1	2	3	4	5
Uy (m)	Máximo	600,39	564,31	699,90	542,73	537,79	521,72
	Méd Picos	507,93	409,67	472,92	430,49	369,08	352,02
	RMS	164,94	89,62	81,87	122,90	63,44	53,52
Vy (m/s)	Máximo	366,24	320,64	363,42	315,65	306,89	296,34
	Méd Picos	256,78	150,06	139,90	204,05	100,79	78,62
	RMS	188,97	98,51	80,74	139,88	65,79	52,35
Ay (m/s ²)	Máximo	379,23	421,66	328,27	349,96	285,36	283,96
	Méd Picos	332,65	179,39	136,47	253,21	122,53	109,4
	RMS	217,95	119,27	92,07	165,81	80,75	64,64

Conforme apresentado a seguir, a resposta obtida foi similar em todos os casos, ou seja, os valores máximos não se alteram com a variação do período de aplicação da carga. O período para atingir novamente o equilíbrio da estrutura com amortecedores também é aproximadamente o mesmo, levando em torno de 30 s após a cessar o carregamento.

4.4.1. Carga atuando em 25 segundos

Tabela 4.36 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% C_{cr} e carga atuando por 25s

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	436,93	503,73	274,52	307,19	283,05	400,53
Média Picos	271,08	360,70	35,68	143,93	46,37	181,87
Média	241,46	241,60				
RMS	24,23	73,87	28,76	89,14	37,53	109,59

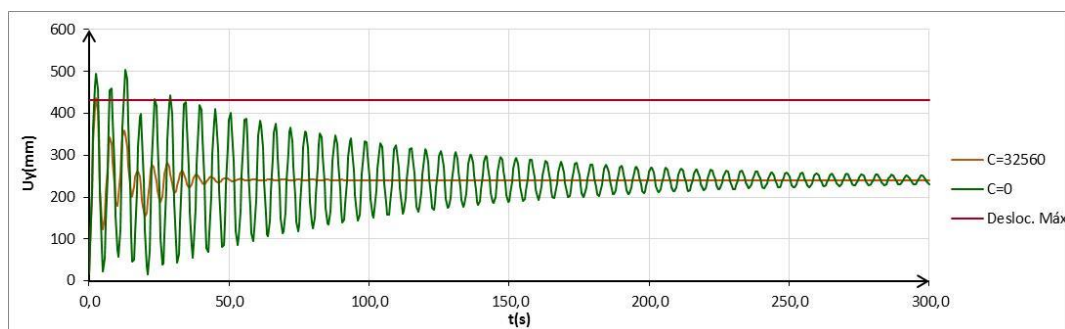


Figura 4.45 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% C_{cr} com a carga atuando por 25 s

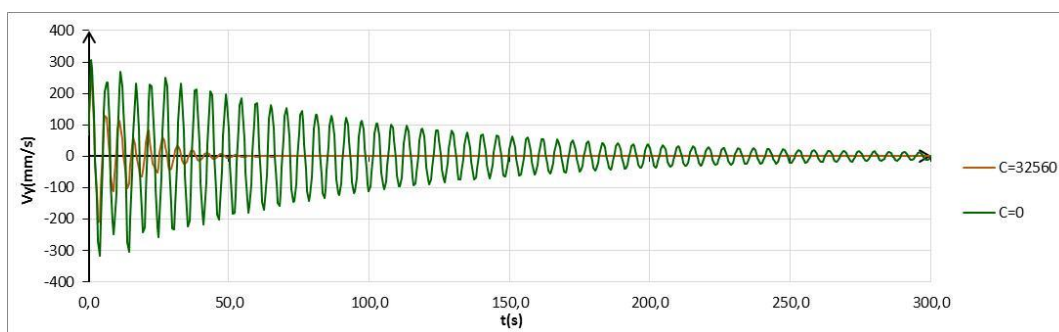


Figura 4.46 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 25 s

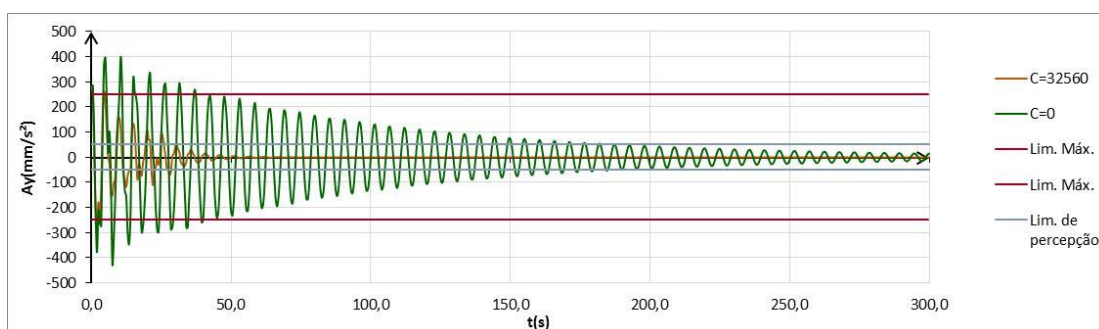


Figura 4.47 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 25 s

4.4.2. Carga atuando em 50 segundos

Tabela 4.37 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr e carga atuando por 50s

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	436,93	503,73	274,52	307,19	283,05	400,53
Média Picos	272,51	346,58	42,54	138,96	62,44	176,76
Média	228,63	228,74				
RMS	27,17	71,16	30,34	85,45	40,12	106,23

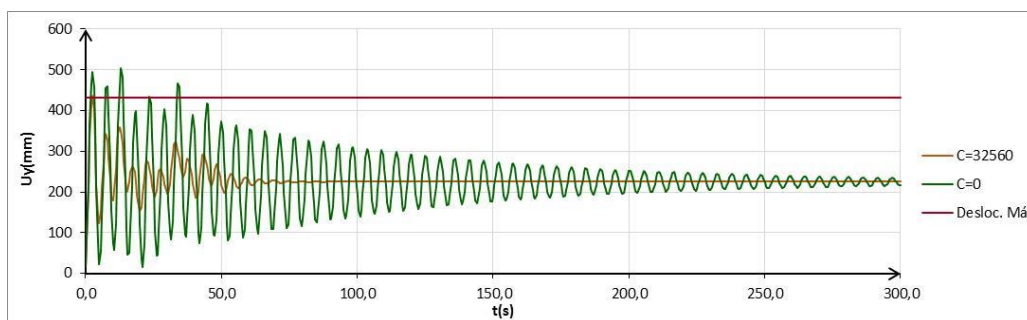


Figura 4.48 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 50 s

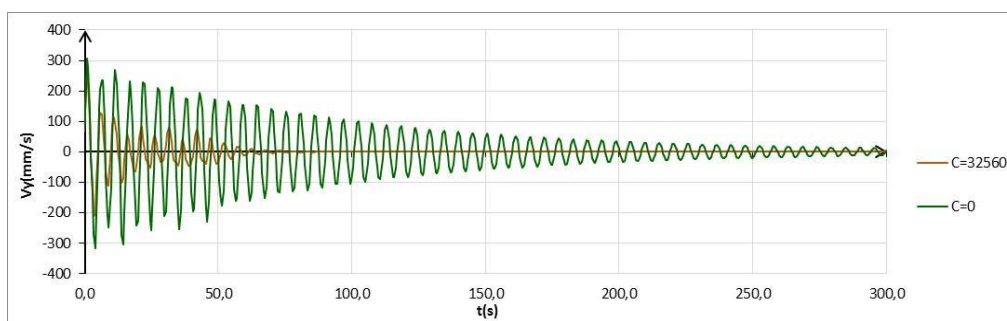


Figura 4.49 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 50 s

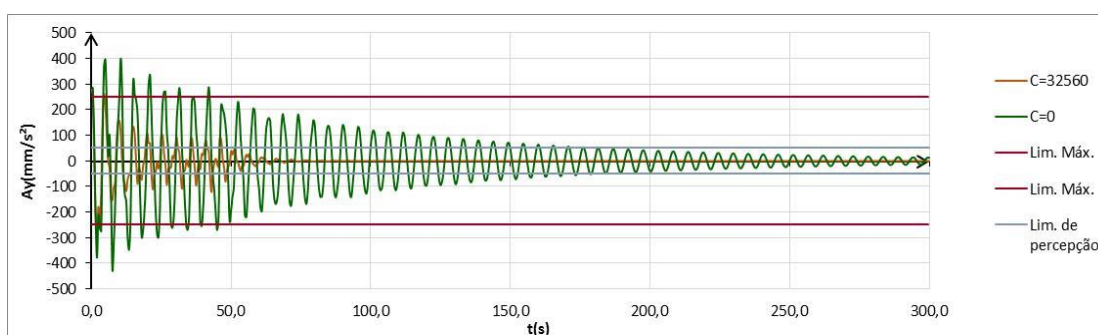


Figura 4.50 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 50 s

4.4.3. Carga atuando em 100 segundos

Tabela 4.38 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr e carga atuando por 100s

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	436,93	503,73	274,52	307,19	283,05	400,53
Média Picos	283,63	365,94	44,10	149,92	63,84	190,38
Média	245,98	246,09				
RMS	30,24	78,98	33,76	95,31	45,29	119,31

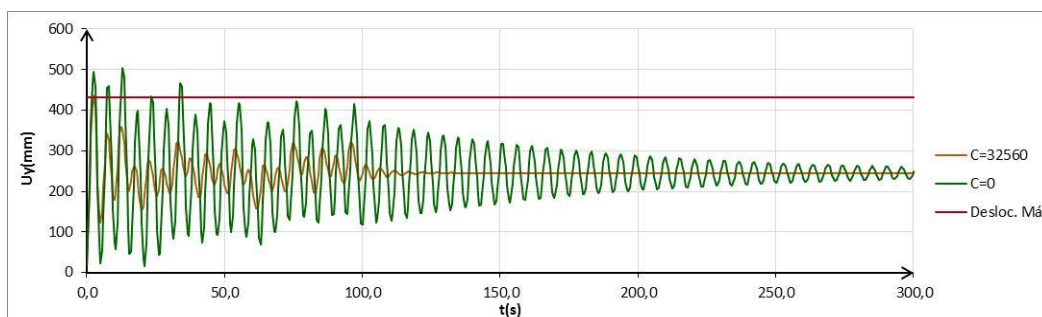


Figura 4.51 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 100 s

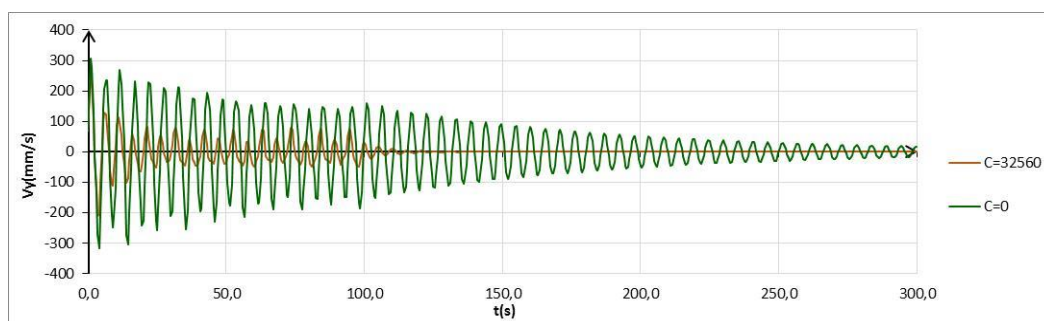


Figura 4.52 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 100 s

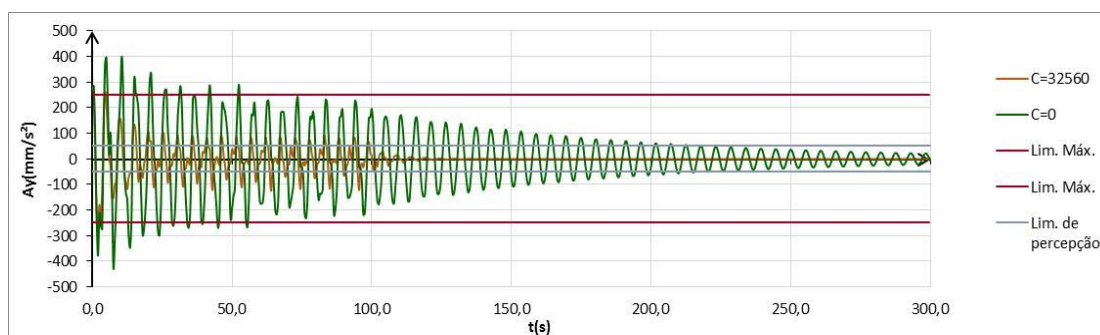


Figura 4.53 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 100 s

4.4.4. Carga atuando em 150 segundos

Tabela 4.39 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr e carga atuando por 150s

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	436,93	458,53	274,52	272,68	283,05	345,09
Média Picos	278,35	336,98	51,93	154,95	77,46	192,91
Média	228,33	208,57				
RMS	36,87	83,04	36,99	98,66	50,05	122,25

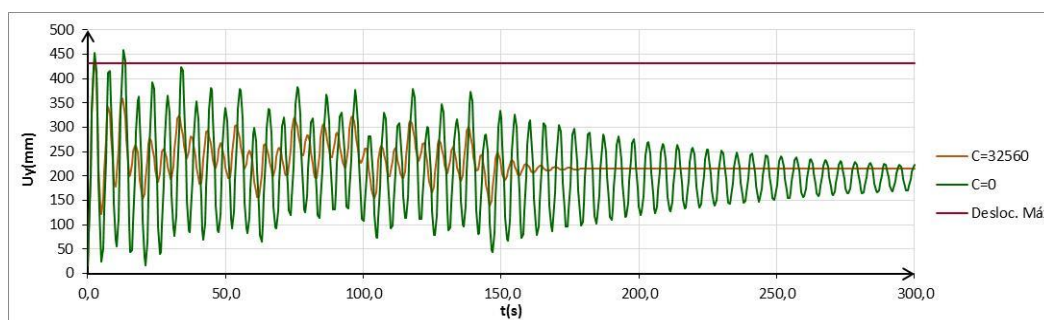


Figura 4.54 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 150 s

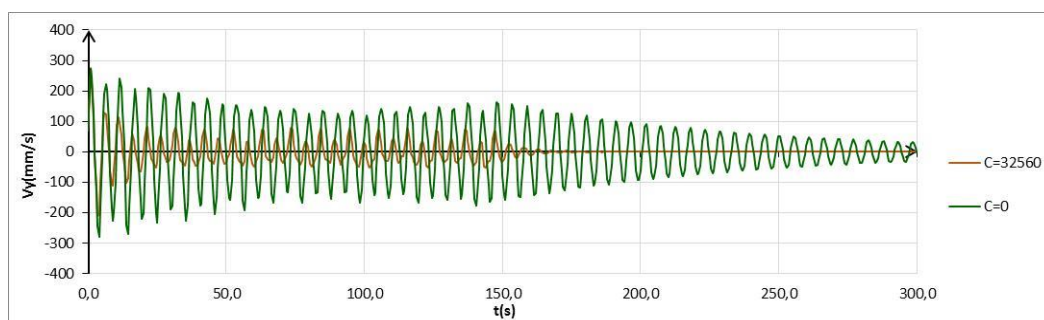


Figura 4.55 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 150 s

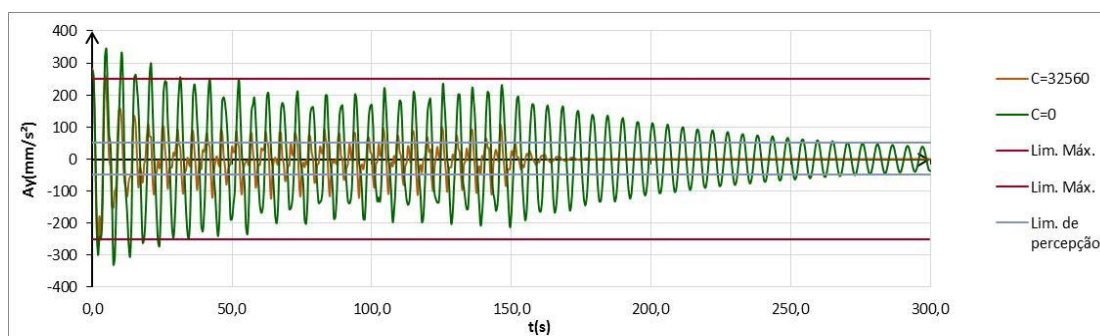


Figura 4.56 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 150 s

4.4.5. Carga atuando em 200 segundos

Tabela 4.40 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr e carga atuando por 200s

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	436,93	503,73	274,52	307,19	283,05	400,53
Média Picos	298,75	405,89	57,12	195,57	87,54	250,52
Média	251,88	252,22				
RMS	40,49	105,58	40,24	125,96	54,74	157,63

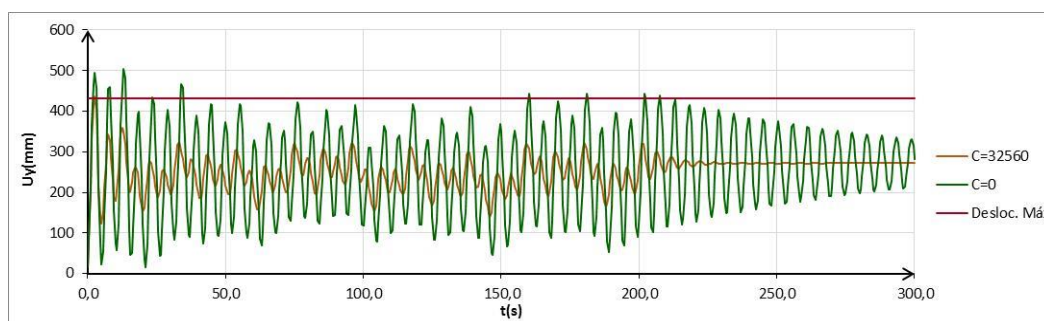


Figura 4.57 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 200 s

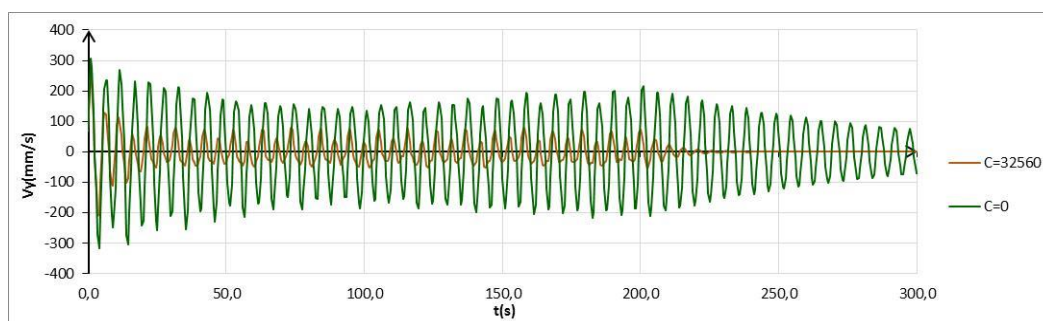


Figura 4.58 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 200 s

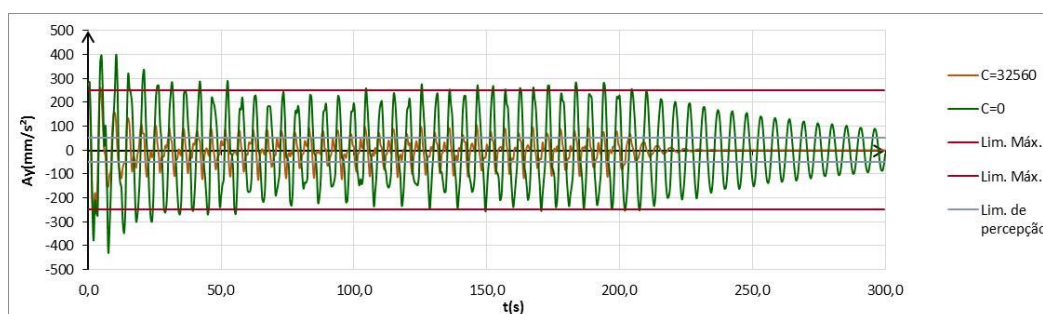


Figura 4.59 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga atuando por 200 s

4.5. Crescimento gradual do carregamento

Nos casos anteriores, percebe-se que a grande dificuldade é controlar o deslocamento inicial da estrutura, que, por sofrer um carregamento abrupto, apresenta uma resposta muito elevada. Foi feita então uma análise do crescimento gradual da carga, multiplicando-se a função obtida pelo método dos ventos sintéticos, apresentada no capítulo 2, pela seguinte função:

$$g(t) = \frac{t}{t + 2} \quad (4.4)$$

Esta carga foi aplicada ao modelo 5.1, com a constante dos amortecedores equivalente a 40% Ccr, uma vez que esta configuração apresentou resultados satisfatórios.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.41 e nas Figuras 4.60 a 4.62. Percebe-se que o deslocamento máximo se reduz em 35%, enquanto a aceleração máxima chega a ser 1/3 da anterior, concluindo que a dificuldade em

alcançar os valores limites ocorre apenas em função da aplicação brusca da carga, o que nem sempre acontece. Cabe ressaltar que, mesmo considerando o mesmo espectro de potência, a força é aleatória em função dos ângulos de fase.

Tabela 4.41 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr e carga com crescimento gradual

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	325,22	471,36	112,66	233,87	103,54	355,76
Média Picos	267,44	338,41	45,23	133,18	82,32	182,10
Média	234,10	234,05				
RMS	41,85	111,44	35,55	131,51	50,03	164,89

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	31,00%	51,83%	70,90%
Média Picos	20,97%	66,04%	54,79%
Média			
RMS	62,45%	72,97%	69,66%

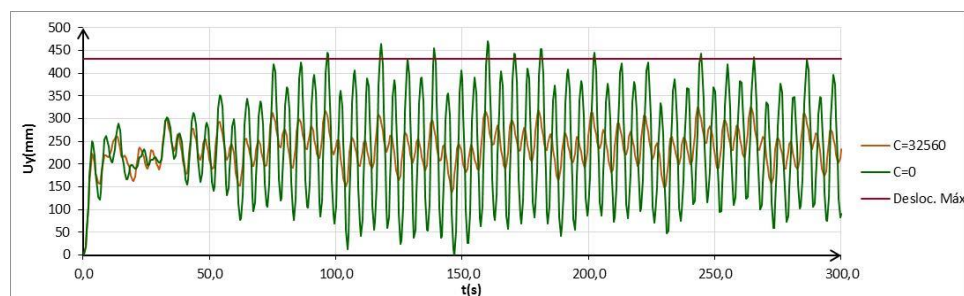


Figura 4.60 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga com crescimento gradual

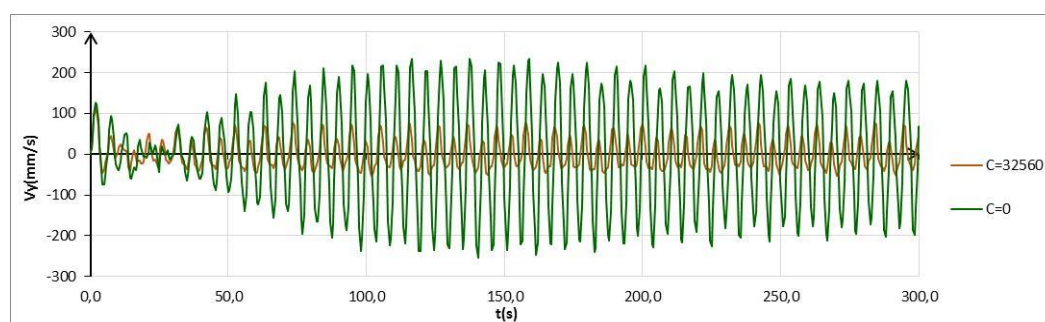


Figura 4.61 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga com crescimento gradual

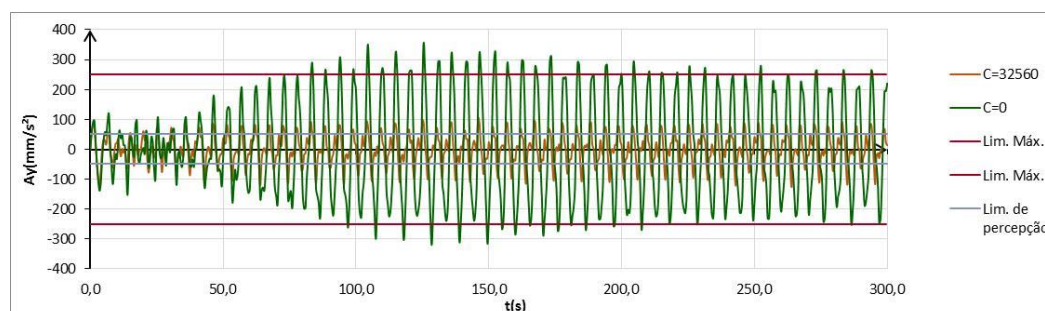


Figura 4.62 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com 40% Ccr com a carga com crescimento gradual

4.6. Modelo com mola e amortecedor em série

Foi feita uma análise do modelo 5.1, porém considerando que as diagonais que receberam os amortecedores mantêm uma rigidez equivalente a 20% da sua rigidez original. Para isto, são aplicados em série um amortecedor e uma mola, definidos no modelo computacional através de uma liberação na direção axial da barra, e a qual são associados, além da constante de amortecimento, uma constante de mola.

Os resultados são apresentados na Tabela 4.42 e nas Figuras 4.63 a 4.65. Quando os amortecedores não entram em ação, os resultados são equivalentes com e sem rigidez. Para o caso dos amortecedores atuando com 40% do C_{cr} , os valores máximos de deslocamento e velocidade são aproximadamente 5% maiores do que obtido anteriormente, porém a aceleração sofre uma grande alteração, sendo 30% maior do que o caso sem rigidez. Já os valores de RMS são 50% maiores para o deslocamento, 75% maiores para velocidade e 70% maiores para aceleração.

Tabela 4.42 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com 20% da rigidez original das diagonais e amortecedores com 40% C_{cr}

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s ²)	
	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0
Máximos	453,18	504,12	291,14	307,32	367,59	401,09
Média Picos	342,71	413,77	124,54	214,86	181,91	276,66
Média	242,57	242,54				
RMS	66,89	118,04	78,06	141,90	102,95	178,70

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s ²)
Máximos	10,10%	5,27%	8,35%
Média Picos	17,18%	42,04%	34,25%
Média			
RMS	43,33%	44,99%	42,39%

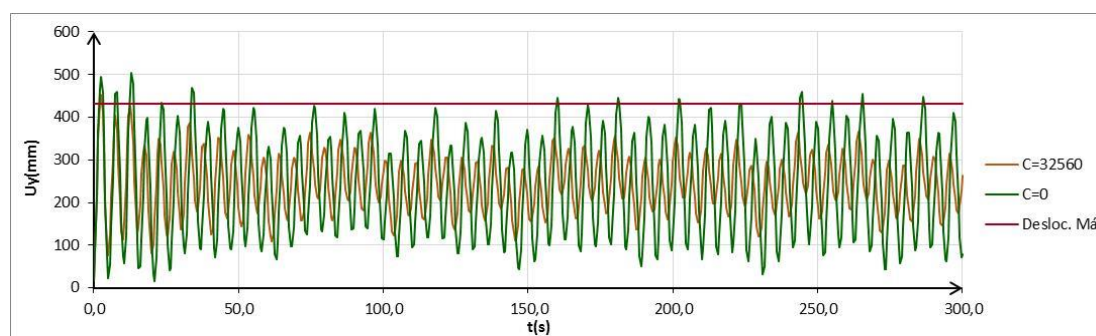


Figura 4.63 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com 20% da rigidez original das diagonais e amortecedores com 40% C_{cr}

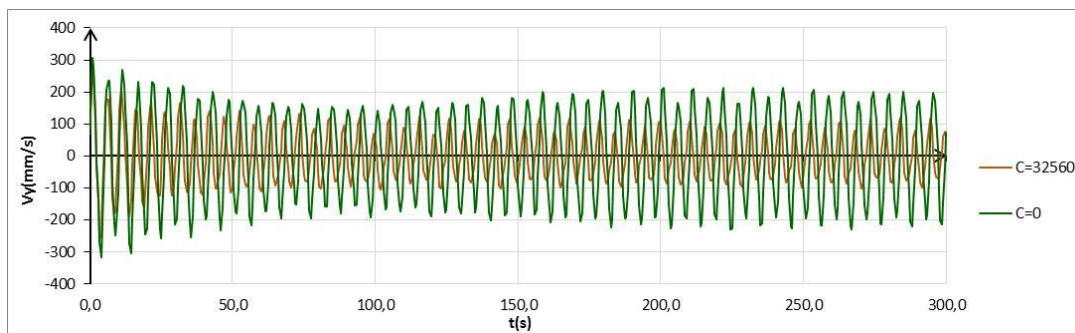


Figura 4.64 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com 20% da rigidez original das diagonais e amortecedores com 40% Ccr

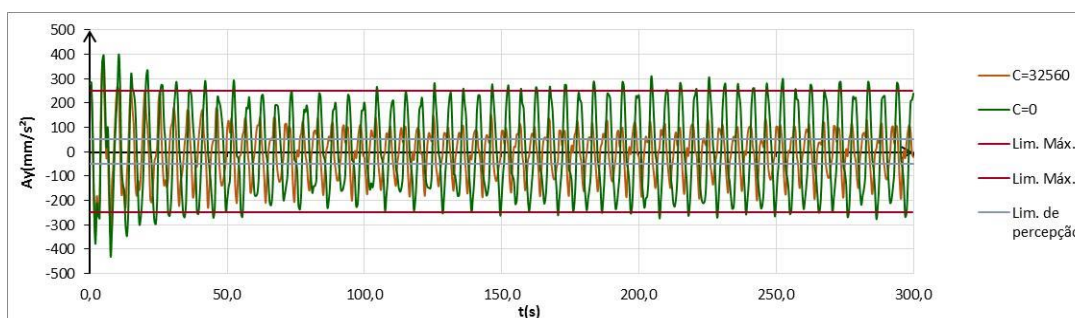


Figura 4.65 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com 20% da rigidez original das diagonais e amortecedores com 40% Ccr

4.7. Variação do ângulo de fase

Conforme apresentado no Capítulo 2, o ângulo de fase associado a cada harmônico é aleatório. Portanto, faz-se aqui uma análise para um dado carregamento considerando diferentes ângulos de fases na Eq. (2.21), de forma a verificar se há grande alteração na resposta da estrutura com a mudança na carga de vento. Para isto são gerados cinco carregamentos, mudando apenas na série de Fourier os ângulos de fase. As Tabelas 4.43 a 4.45 e Figuras 4.66 a 4.68 apresentam a comparação entre cinco casos com ângulos de fases diferentes para cada um dos harmônicos. Nota-se que a resposta no tempo sofre pequenas variações, com pequenas mudanças nos valores extremos. Percebe-se entretanto pelas tabelas que as diferenças entre os resultados para cada um dos modelos não é expressiva. Portanto a análise de um caso de carregamento é suficiente para a análise da efetividade dos amortecedores.

Tabela 4.43 – Comparação dos deslocamentos no topo da estrutura para carregamentos com diferentes ângulos de fases

	Deslocamento (mm)				
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Máximos	436,93	412,06	435,76	400,18	360,45
Média Picos	301,49	298,40	288,32	295,61	287,82
RMS	43,64	44,70	42,72	42,90	43,50

Tabela 4.44 – Comparação das velocidades no topo da estrutura para carregamentos com diferentes ângulos de fases

	Velocidade (mm/s)				
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Máximos	274,52	285,25	265,24	257,26	237,87
Média Picos	66,60	70,14	63,46	64,43	66,70
RMS	44,94	46,56	42,69	43,33	43,58

Tabela 4.45 – Comparação das acelerações no topo da estrutura para carregamentos com diferentes ângulos de fases

	Aceleração (m/s ²)				
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Máximos	283,05	280,64	268,45	270,19	261,10
Média Picos	107,57	111,88	98,96	97,33	96,58
RMS	61,80	64,10	59,18	59,13	59,65

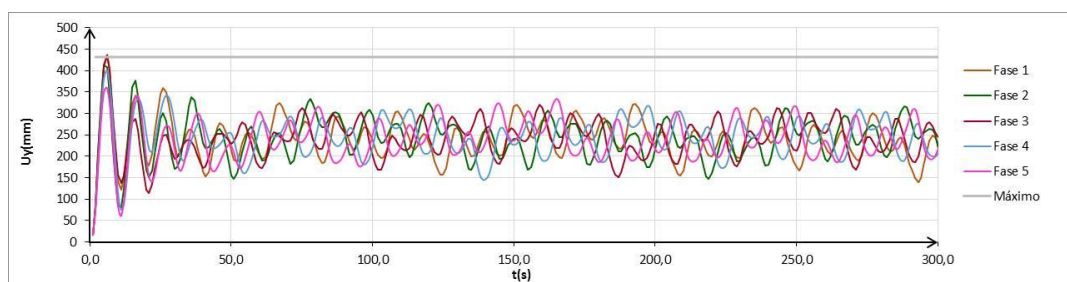


Figura 4.66 - Comparação dos deslocamentos no topo da estrutura para carregamentos com diferentes ângulos de fases

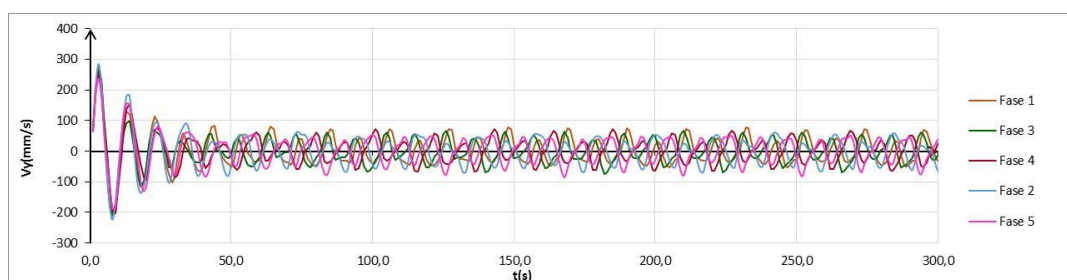


Figura 4.67 - Comparação das velocidades no topo da estrutura para carregamentos com diferentes ângulos de fases

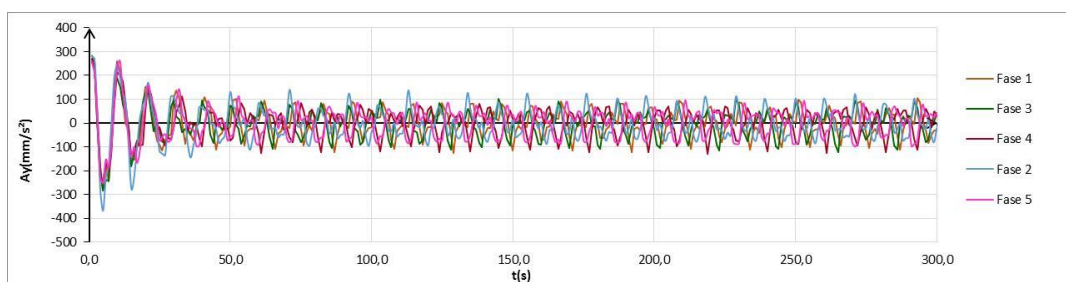


Figura 4.68 - Comparação das acelerações no topo da estrutura para carregamentos com diferentes ângulos de fases

4.8.

Edifício submetido a cargas de vento calculadas pelo espectro de Kaimal

Para o modelo 5.1, que apresentou os melhores resultados, foi feita uma análise do comportamento dinâmico do edifício submetido a uma carga de vento definida pelo espectro de Kaimal. Os resultados, considerando a resposta da estrutura com uma constante de amortecimento $C=0$ e $C=40\%C_{cr}$, são apresentados na Tabela 4.46 e nas Figuras 4.69 a 4.71. Na Tabela 4.47 e nas Figuras 4.72 a 4.74 os resultados aqui obtidos são comparados com resultados obtidos anteriormente com o espectro de Davenport considerando $C=40\%C_{cr}$. Verifica-se que ambos os espectros levam a resultados com a mesma ordem de grandeza, sendo neste exemplo os máximos obtidos com o espectro de Kaimal ligeiramente superiores a aqueles obtidos com o espectro de Davenport, entretanto a uma queda nos valores médios e RMS.

Tabela 4.46 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com $C=40\% C_{cr}$ submetida a cargas de vento definidas pelo espectro de Kaimal

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s²)	
	C=0	C=32560	C=0	C=32560	C=0	C=32560
Máximos	519,01	448,79	314,78	281,57	425,52	287,52
Média Picos	360,87	296,54	188,50	56,00	252,84	82,69
Média	245,09	244,89				
RMS	106,24	39,15	123,22	36,29	152,44	48,88

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s²)
Máximos	13,53%	10,55%	32,43%
Média Picos	17,82%	70,29%	67,30%
Média			
RMS	63,15%	70,55%	67,94%

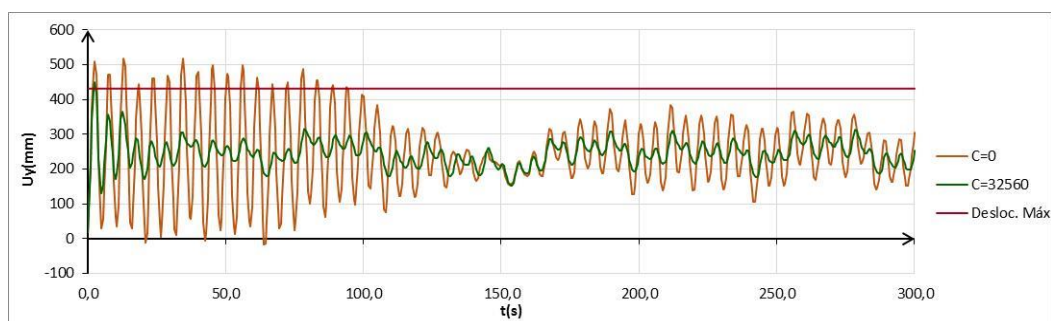


Figura 4.69 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com $C=40\% C_{cr}$ submetida a cargas de vento definidas pelo espectro de Kaimal

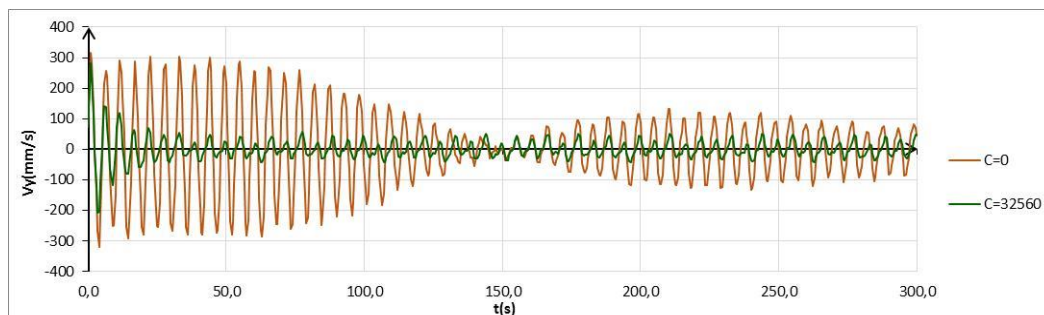


Figura 4.70 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com $C=40\% C_{cr}$ submetida a cargas de vento definidas pelo espectro de Kaimal

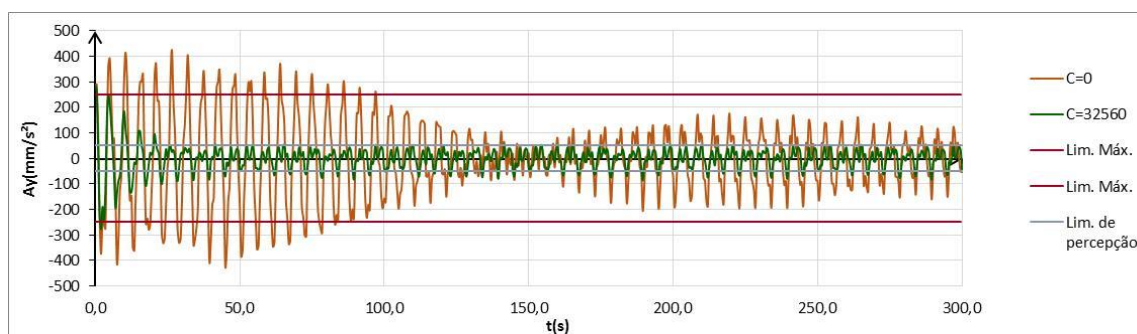


Figura 4.71 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 com amortecedores com $C=40\% C_{cr}$ submetida a cargas de vento definidas pelo espectro de Kaimal

Tabela 4.47 – Comparação entre a resposta no topo da estrutura do Modelo 5.1 com submetido a cargas de vento definidas pelo espectro de Davenport e de Kaimal

	Uy(mm)		Vy(mm/s)		Ay(mm/s²)	
	Davenport	Kaimal	Davenport	Kaimal	Davenport	Kaimal
Máximos	436,93	448,79	274,52	281,57	283,05	287,52
Média Picos	301,49	296,54	66,60	56,00	107,57	82,69
Média	242,61	244,89				
RMS	43,64	39,15	44,94	36,29	61,80	48,88

	Uy(mm)	Vy(mm/s)	Ay(mm/s²)
Máximos	2,64%	2,51%	1,55%
Média Picos	-1,67%	-18,93%	-30,09%
Média			
RMS	-11,47%	-23,83%	-26,44%

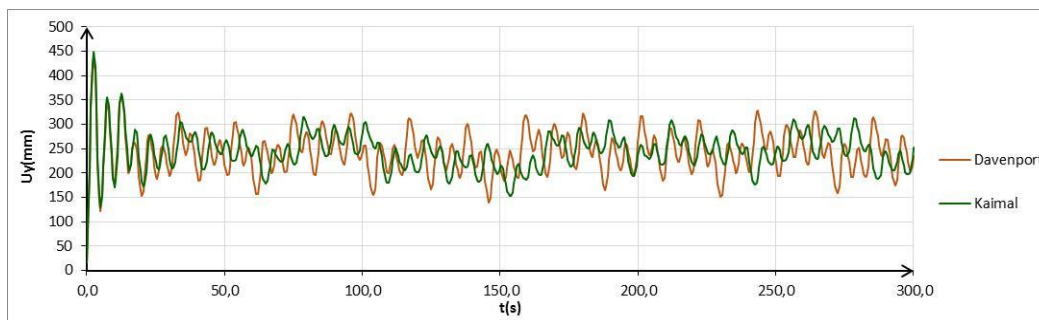


Figura 4.72 - Comparação entre o deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5.1 considerando o espectro de Davenport e de Kaimal

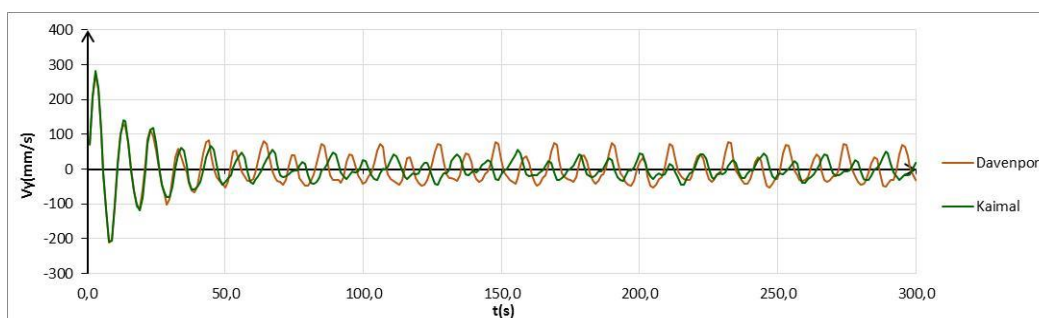


Figura 4.73 - Comparação entre a velocidade no topo da estrutura do Modelo 5.1 considerando o espectro de Davenport e de Kaimal

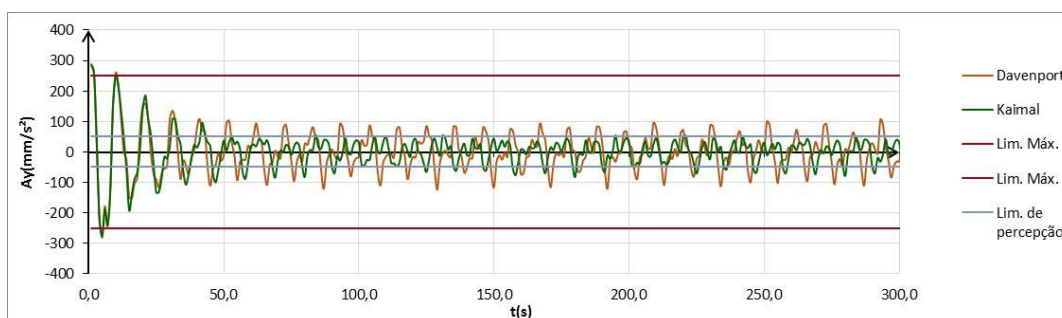


Figura 4.74 - Comparação entre a aceleração no topo da estrutura do Modelo 5.1 considerando o espectro de Davenport e de Kaimal

4.9. Carregamento no caso da ressonância

Este carregamento consiste em uma carga periódica atuando ao longo de toda a altura do edifício, definida segundo os critérios da NBR 6123 (1988), descrita pela função $q(t) = 1,4[0,84 + 0,409\sin(2\pi f_1 t)]$, onde f_1 é a frequência natural do primeiro modo de vibração da estrutura. A magnitude da carga é definida para o pior caso, equivalente ao topo da estrutura. Nesta análise, considera-se a carga atuando ao longo de 100s.

Esta carga é aplicada de forma a se analisar a eficácia dos amortecedores para o caso em que o edifício sofre o efeito de ressonância. Vale ressaltar que este é um carregamento hipotético, e não ocorre em uma situação real, pois o vento atua de forma aleatória.

Como o Modelo 5 apresentou bons resultados no controle da aceleração e deslocamento, faz-se uma análise do seu comportamento também na ressonância. Na Tabela 4.48 e nas Figuras 4.75 a 4.77 são apresentados deslocamento, velocidade e aceleração ao longo do tempo, com amortecedores de $C=30\% C_{cr}$. É possível comparar os resultados entre o caso em que os amortecedores não atuam e o caso em que eles entram em ação. Percebe-se também que a diferença entre os dois resultados cresce com o tempo, pois a amplitude do caso com amortecedores se estabiliza em aproximadamente 35s, enquanto para o caso em que a estrutura conta somente com seu amortecimento inerente, em 60s, tanto para deslocamento, quanto velocidade e aceleração. Os valores máximos alcançados no caso com amortecedores são aproximadamente 30% dos valores alcançados sem eles.

Tabela 4.48 - Resposta no topo da estrutura do Modelo 5 para o carregamento na ressonância

	UY		VY		AY	
	%	MÁX	%	MÁX	%	MÁX
Sem amort		3247,73		3367,00		3855,08
C=23472	35,4	1151,01	29,3	987,87	29,8	1147,95

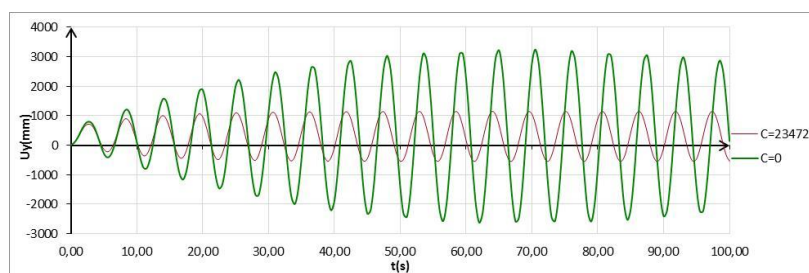


Figura 4.75 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5 para o carregamento de ressonância

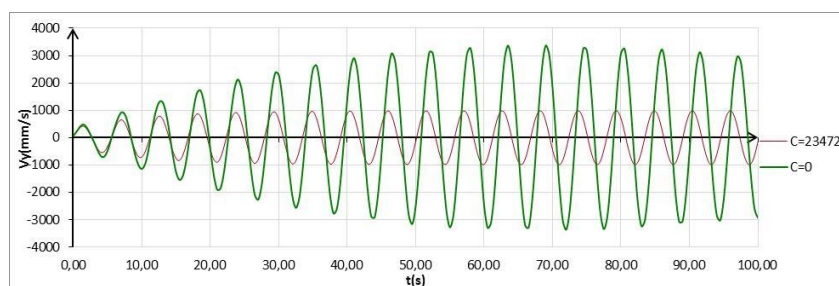


Figura 4.76 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5 para o carregamento de ressonância

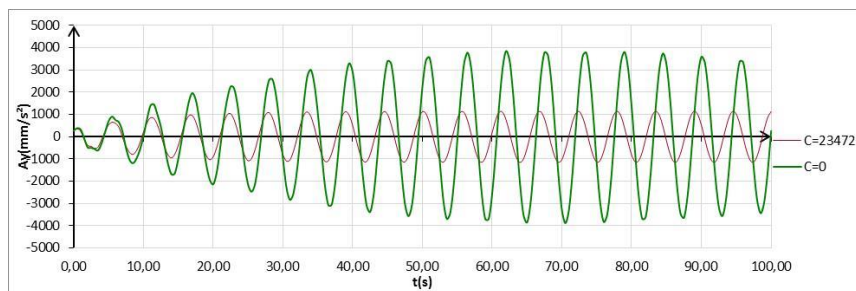


Figura 4.77 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5 para o carregamento de ressonância

Na Figura 4.63 é apresentada a curva de ressonância da estrutura para os deslocamentos. O eixo Y representa a relação X/X_0 , onde X é o deslocamento máximo apresentado pela estrutura, e X_0 o deslocamento médio. O eixo X representa a relação f/f_1 , sendo f a frequência adotada para o carregamento, e f_1 a frequência natural referente ao primeiro modo de vibração da estrutura. A figura 4.78 apresenta a curva de ressonância para as acelerações, equivalente a figura 4.79, sendo que o eixo Y apresenta a aceleração máxima apresentada pela estrutura, A.

Assim como no caso dos ventos sintéticos, a curva foi calculada para a constante dos amortecedores variando a constante dos amortecedores de 0 a 30% de C_{cr} . Vale ressaltar que além dos amortecedores, a estrutura conta com seu amortecimento inerente de 1% C_{cr} . Os valores apresentados foram medidos para uma carga atuando durante 100s.

Percebe-se, portanto, que quando o carregamento se aproxima da frequência natural da estrutura, a curva dos deslocamentos forma um pico, que é reduzido conforme a relação f/f_1 se afasta de 1,0. Percebemos também que, quanto maior a constante de amortecimento aplicada aos amortecedores, mais suave se torna o pico, demonstrando o efeito benéfico dos amortecedores na redução da amplitude da resposta permanente. O mesmo efeito é observado para as acelerações.

Com base neste estudo verifica-se que os amortecedores têm um efeito relevante no controle de vibrações da estrutura. O grande problema é o controle do transiente inicial devido à aplicação brusca da carga de vento com sua magnitude máxima de projeto. Assim, como visto nos diversos exemplos, o controle só se faz sentir a após os primeiros ciclos da resposta da estrutura.

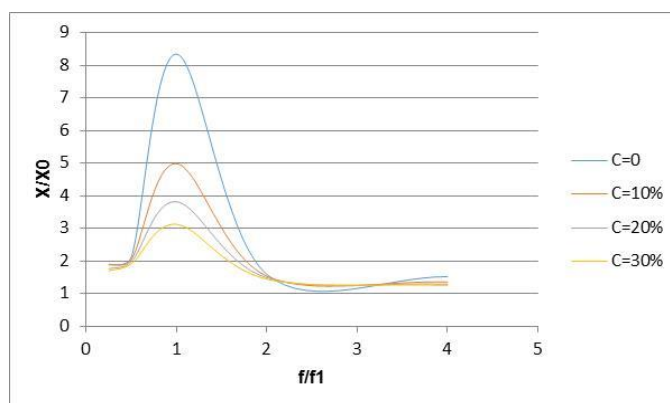


Figura 4.78 - Curva de ressonância dos deslocamentos para o Modelo 5

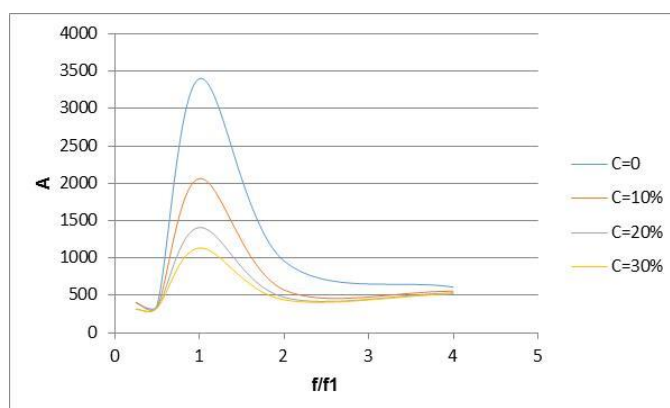


Figura 4.79 - Curva de ressonância das acelerações para o Modelo 5

4.10. Comportamento na vibração livre

Este carregamento consiste no mesmo apresentado para o caso de ressonância, ou seja, uma carga periódica atuando ao longo de toda a altura do edifício segundo a função $q(t) = 1,4(0,84 + 0,409 \sin(2\pi ft))$. Neste caso, no entanto, a carga atua apenas nos primeiros 20s, e a análise segue até 100s. Este carregamento tem por objetivo analisar o amortecimento proporcional equivalente da estrutura após a introdução dos amortecedores, analisando assim a redução da amplitude em cada período (decréscimo logarítmico).

Este estudo é feito para o Modelo 5. Considerando uma constante de $C=23472$ kNs/m para os amortecedores, chega-se aos resultados apresentados nas Figuras 4.80 a 4.82. Através destas respostas no tempo, percebe-se que os amortecedores aumentam de forma considerável o amortecimento proporcional da estrutura. A redução da amplitude entre um período e outro é, em média, 41%,

tanto para o deslocamento, quanto para velocidade e aceleração. Portanto, o amortecimento proporcional da estrutura sai de 1% de C_{cr} , referente ao amortecimento inerente à estrutura, para 41% de C_{cr} com a introdução dos amortecedores.

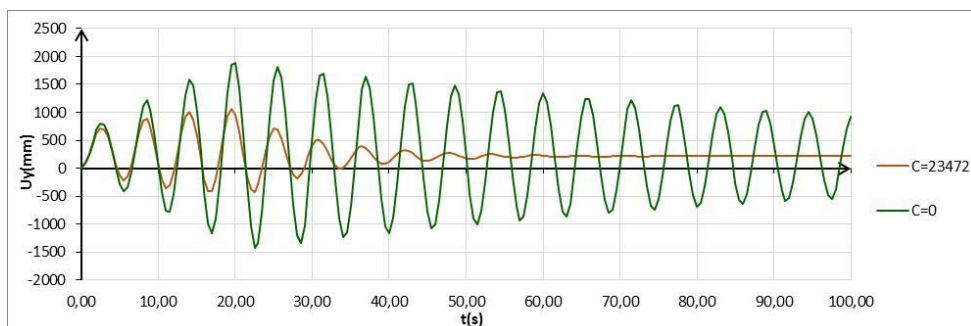


Figura 4.80 - Deslocamento no topo da estrutura do Modelo 5 para o carregamento de vibração livre

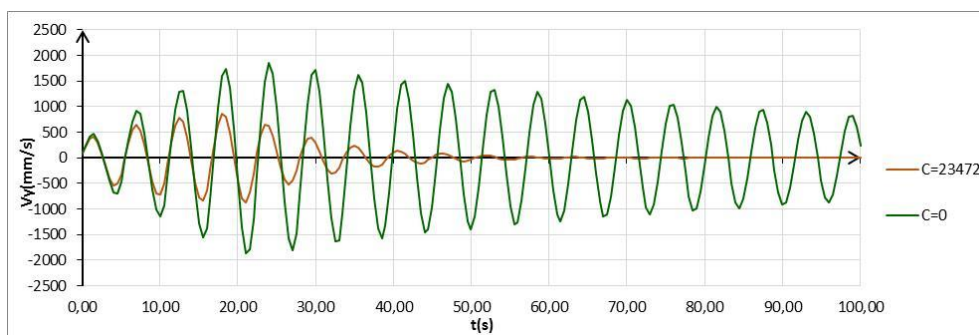


Figura 4.81 - Velocidade no topo da estrutura do Modelo 5 para o carregamento de vibração livre

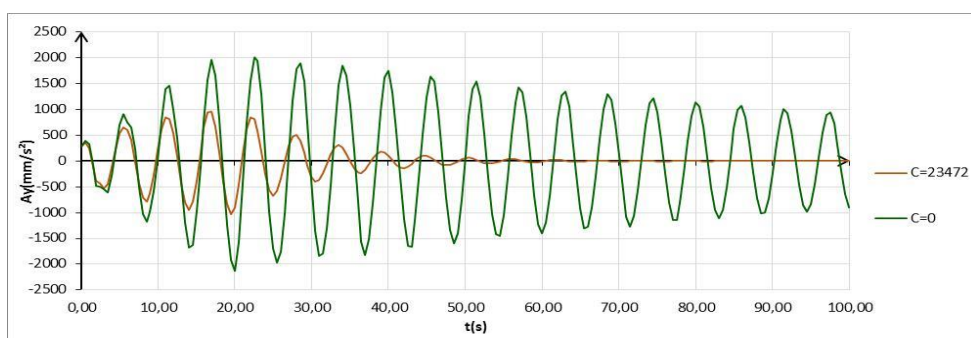


Figura 4.82 - Aceleração no topo da estrutura do Modelo 5 para o carregamento de vibração livre

4.11. Análise Linear x Não Linear

Os modelos apresentados neste capítulo foram calculados usando o programa Robot Structural Analysis. Para o cálculo das cargas estáticas foram

feitas análises não lineares, considerando os efeitos de segunda ordem sofridos pela estrutura. No caso das cargas dinâmicas, por motivos computacionais, a análise foi linear, uma vez que, por limitação do programa, não é possível incluir a ação de amortecedores fluidos na análise não linear.

Com isso, foram feitas comparações entre os resultados obtidos para os dois tipos de análise, de forma a mensurar a diferença entre os resultados obtidos nesse estudo e o resultado real. Para isso, foi aplicada uma carga semelhante ao caso de ressonância de $q(t) = 1,4(0,84 + A \cdot \sin(2\pi f_1 T))$, sendo A a amplitude da excitação harmônica que varia de 0,1 a 0,7. Ambas as hipóteses consideram o amortecimento proporcional da estrutura de 1%.

Como a carga aplicada à estrutura possui amplitude de 0,409, apresentamos na Figura 4.83 o gráfico com a comparação entre a análise linear e não linear obtido para essa amplitude. A diferença obtida foi de 13,9%. Em um carregamento de vento real, a amplitude só atingiria esse valor no topo da estrutura, enquanto nesta simulação ela foi aplicada ao longo de toda a altura. Pode-se assumir, portanto, que 13,9% é a diferença máxima que pode ocorrer entre os resultados de primeira e segunda ordem para essa estrutura.

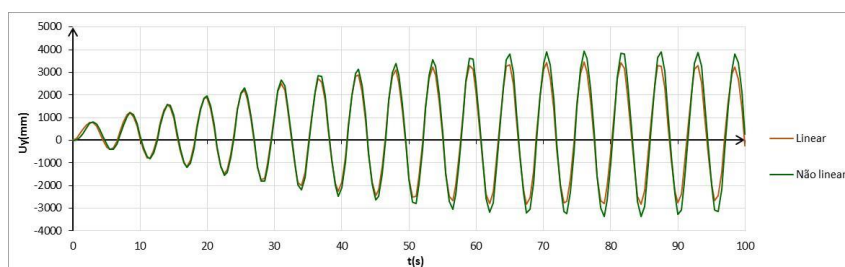


Figura 4.83 - Comparação dos deslocamentos para a análise linear e não linear

A figura 4.84 apresenta a evolução da diferença entre os deslocamentos obtidos pelos dois tipos de análise, em função da variação da amplitude. Pelo gráfico, percebe-se que essa diferença tende a se estabilizar em aproximadamente 16%.

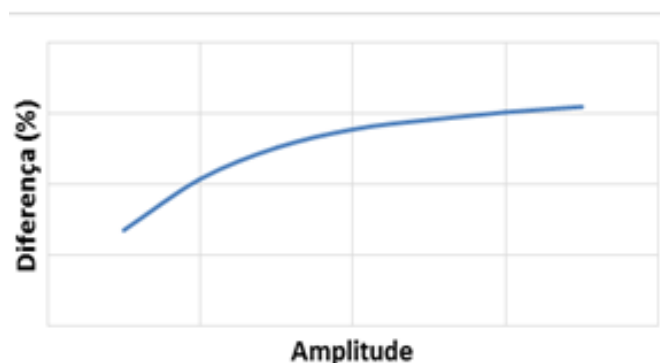


Figura 4.84 - Variação entre a diferença dos resultados para a análise linear e não linear

4.12. Análise dos esforços

A análise dinâmica de um edifício é importante não somente para verificação dos critérios de conforto dos usuários, mas também para avaliar a segurança da estrutura. Os amortecedores, além de reduzirem a resposta da estrutura em relação a deslocamento e aceleração, são capazes de diminuir os esforços provenientes da carga de vento.

Desta forma, com a introdução de amortecedores, é possível reduzir o consumo de aço em uma estrutura nas peças responsáveis pela resistência lateral da estrutura. Para ilustrar esta redução, foram analisados os esforços nos contraventamentos em X do núcleo central, em três alturas: $Z=0$, $Z=36\text{m}$ e $Z=72\text{m}$. Foram comparados os resultados da análise estática da estrutura com os da análise dinâmica, considerando ou não o uso de amortecedores. A Tabela 4.49 apresenta o esforço normal resultante nessas barras para cada caso.

Percebe-se que há um aumento no esforço normal entre o caso dinâmico e o caso estático. Com a introdução dos amortecedores no sistema estrutural, há uma redução da ordem de 30% nos esforços destas barras, permitindo assim uma economia na quantidade de aço empregada na estrutura.

Tabela 4.49 – Redução dos esforços com amortecedores

	ESFORÇO NORMAL (kN)		
	Z=0	Z=36	Z=72
Estático	828,09	607,06	309,78
Sem amortecedores	1169,8	717,18	394,24
Com amortecedores ($C=30\%C_{cr}$)	785,56	470,15	255,04
Redução amortecedores	33%	34%	35%