

# **Análise Sísmica de Pontes Com Dissipadores Viscosos Não Lineares**

**Artur Luís Lopes Gonçalves da Providência e Costa**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Civil**

Orientadores:

Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Professor Doutor Francisco Batista Esteves Virtuoso

### **Júri:**

Presidente: Professor Doutor Orlando José Barreiros D'Almeida Pereira

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Vogais: Professor Doutor João José Rio Tinto de Azevedo

**Mai 2022**



## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



# Agradecimentos

Queria agradecer em primeiro lugar ao professor Luís Guerreiro e ao professor Francisco Virtuoso por toda a ajuda que me deram ao longo da execução desta dissertação.

Queria também agradecer ao Pedro Dias, ao Pedro Oliveira, ao Daniel Pereira, ao Miguel Lucena, ao José Peres, ao Diogo Ferreira, ao Jacopo Giancaspro, à Madalena Prata, ao Guilherme Prata, ao Henrique Prata, ao João Moreno, à Catarina Providência, à Filomena Maximino, e ao professor Anísio Andrade por todo o apoio que me deram ao longo destes anos.

Por último queria fazer um agradecimento especial ao meu avô João da Providência, à minha avó Constança Providência, à minha avó Maria Beatriz Gonçalves, ao Rui Prata, à Manuela Carvalho, à minha irmã e aos meus pais.



# Resumo

Os dissipadores viscosos são dispositivos para controlo dos efeitos dos sismos que permitem adicionar valores elevados de amortecimento em estruturas, diminuindo os deslocamentos e acelerações máximas resultantes das ações sísmicas, e consequentemente os esforços.

Nesta dissertação é avaliada a vibração longitudinal de 4 pontes, sob ação sísmica, com dissipadores viscosos de parâmetro  $\alpha$  entre 0.1 e 0.5, instalados nos encontros, comparando os resultados obtidos com amortecimento não-linear e amortecimento equivalente, sendo este último calculado a partir das expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1], documento provisório da próxima versão do NP EN 1998-1 [2]. Uma vez que o amortecimento equivalente pode ser definido como o amortecimento linear que produz uma dissipação de energia equivalente ao amortecimento não-linear de uma estrutura, a vibração longitudinal de uma ponte com dissipadores sob ação sísmica calculada com os dois tipos de amortecimento deverá ser semelhante.

A resposta dinâmica longitudinal de cada ponte com dissipadores é obtida com recurso ao programa de cálculo SAP2000 através de integração numérica no tempo (*time-history analysis*), usando um acelerograma representativo de um sismo para a zona considerada.

Conclui-se que os resultados obtidos são satisfatórios usando-se as expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1] para obter a resposta dinâmica longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos não-lineares usando o coeficiente de amortecimento equivalente calculado através das mesmas, sendo tanto mais próximos aos obtidos através de uma análise numérica no tempo não-linear quanto maior for o valor de  $\alpha$  dos dissipadores.

**Palavras-chave:** pontes, dissipadores viscosos, ações sísmicas, vibração longitudinal, amortecimento efetivo





# Abstract

Fluid viscous dampers (FVDs) are devices that allow to control the seismic effects since they can add high values of damping to structures, reducing the maximum displacements and accelerations caused by earthquake forces.

In this dissertation the longitudinal vibration of 4 bridges, under seismic actions, with FVDs in the abutments having  $\alpha$  between 0.1 and 0.5 is evaluated, comparing the results obtained with non-linear damping and equivalent damping, calculated using the expressions (D.4) and (D.5) in prEN 1998-1 [1], the provisional document for the next version of NP EN 1998-1 [2]. Given that equivalent damping may be defined as the linear damping force that dissipates the same amount of energy as the non-linear damping in a structure, the longitudinal vibration of a bridge with FVDs calculated with both types of damping should be similar.

The longitudinal dynamic vibration of each bridge with FVDs is obtained using the software SAP2000 with a time-history analysis, being the seismic action represented by an accelerogram that describes the ground motion in the considered zone.

The results obtained using the (D.4) and (D.5) expressions in prEN 1998-1 [1] to calculate the longitudinal dynamic vibration of a bridge with FVDs with effective damping ratio are good, being the closer to the ones obtained by a non-linear dynamic analysis the higher the value of  $\alpha$  is.

**Keywords:** bridges, fluid viscous dampers, earthquake, longitudinal vibration, effective damping





# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>13</b>
<b>Índice de Símbolos</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos propostos .....	1
1.3 Organização do documento .....	2
<b>2. Estado de Arte</b> .....	<b>5</b>
2.1 Ação Sísmica .....	5
2.1.1 Espectro de Resposta Elástica .....	5
2.1.2 Espectro de Resposta Elástica de Deslocamento .....	8
2.1.3 Representação Temporal da Ação Sísmica .....	8
2.2 Dispositivos de Proteção Sísmica.....	9
2.3 Dissipadores Viscosos.....	10
2.3.1 Características Gerais.....	10
2.3.2 Modelação.....	13
2.3.3 Pontes Existentes com Dissipadores Viscosos .....	15
2.3.4 Viaduto do Loureiro .....	16
2.3.5 Dissipação de Energia em Estruturas com Dissipadores Viscosos .....	20
2.3.6 Cálculo do Coeficiente de Amortecimento Equivalente .....	22
2.3.7 Resposta da Estrutura com Representação Temporal da Ação Sísmica.....	24
<b>3. Cálculo das Constantes de Amortecimento</b> .....	<b>26</b>
3.1 Introdução .....	26
3.2 Cálculo do Coeficiente de Amortecimento Equivalente.....	27
3.3 Modelação da Estrutura .....	30
3.4 Representação da Ação Sísmica.....	30
3.5 Constantes de Amortecimento.....	32
<b>4. Avaliação da Resposta Estrutural</b> .....	<b>34</b>
4.1 Introdução .....	34
4.2 Comparação do Deslocamento Relativo Máximo de Vibração Longitudinal.....	35
4.3 Comparação da Velocidade Relativa Máxima de Vibração Longitudinal .....	36
4.4 Comparação da Aceleração Relativa Máxima de Vibração Longitudinal.....	37
4.5 Diferença de Força Máxima Nos Dissipadores .....	38
4.6 Diferença de Força Máxima Total Nos Dissipadores pelo método alternativo.....	40
4.7 Resumo dos Resultados.....	40
<b>5. Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros</b> .....	<b>44</b>

5.1	Considerações Finais .....	44
5.2	Desenvolvimentos Futuros .....	45
	Referências .....	46
<b>Anexos</b>	.....	<b>49</b>
A.1	Tabelas .....	49
A.2	Gráficos .....	51
A.2.1	Deslocamento Relativo de Vibração Longitudinal do Tabuleiro da Ponte .....	52
A.2.2	Velocidade Relativa de Vibração Longitudinal do Tabuleiro da Ponte.....	56
A.2.3	Aceleração Relativa de Vibração Longitudinal do Tabuleiro da Ponte .....	60
A.2.4	Força Total nos Dissipadores .....	64
A.2.5	Força Total nos Dissipadores Pelo Método Alternativo.....	68
A.2.6	Deslocamento Relativo Longitudinal do Tabuleiro da Ponte - Força Total nos Dissipadores para a Ponte com Período de Vibração Longitudinal $T=1$ (s) .....	72



# Índice de Figuras

Figura 1 - Zonamento sísmico em Portugal [2] .....	6
Figura 2 – Forma do espectro de resposta elástica [2] .....	7
Figura 3 – Espectros de resposta elástica do tipo 1 e 2, para terrenos dos tipos A a E, com $\xi=5\%$ [2].....	7
Figura 4 - Espectro de resposta elástica de deslocamento [2] .....	8
Figura 5 – Dispositivos de dissipação de energia passivos com gráficos força-deslocamento sob ação harmónica [8] [9] [10] [11].....	9
Figura 6 – Corte de um dissipador viscoso [12] .....	10
Figura 7 - Dissipador viscoso representado pelo modelo de Maxwell (adaptado de [14] ) .....	11
Figura 8 - Relação força-velocidade para dissipadores viscosos com valores de $\alpha$ variável [14].....	11
Figura 9 - Relação força-deslocamento para dissipadores viscosos com valores de $\alpha$ variável.....	11
[14].....	11
Figura 10 – Rigidez total do dissipador com elementos auxiliares (adaptado de [17]).....	12
Figura 11 – Modelo da vibração longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos nos encontros (adaptado de [18] ) .....	13
Figura 12- Modelo da vibração longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos nos encontros, sem influência da componente elástica dos dissipadores (adaptado de [19] ).....	13
Figura 13 - Vista em alçado de uma ponte com dissipadores viscosos entre o tabuleiro e os encontros [20] .....	14
.....	14
Figura 14 – Dissipadores viscosos de compressão OTP 400/600 na ponte de Rion-Antirion, Grécia [4].	15
Figura 15 - Dissipadores viscosos na ponte de Orange County, Estados Unidos [18] .....	15
Figura 16 - Esquema dos dissipadores e apoios no viaduto do Loureiro com numeração dos pilares (P) e encontros (E) [22] .....	16
Figura 17 - Dissipador a ser testado em laboratório [22] .....	17
Figura 18 - Relação força-velocidade do dissipador obtida a partir do 1º teste [22].....	17
Figura 19 - Relação força-deslocamento do dissipador no 2º teste (em baixo) com gráfico da força aplicada e velocidade de deslocamento ao longo do tempo (em cima) [22].....	18
Figura 20 – Energia por unidade de massa ( $m^2/s^2$ ou J/kg) recebida por uma estrutura elástica de período fundamental $T=1(s)$ e coeficiente de amortecimento $\xi=5\%$ durante o sismo registado em El Centro, Estados Unidos, 1940 [23] .....	19
Figura 21 – Taxa de energia por unidade de massa ( $m^2/s^3$ ou W/kg) recebida por uma estrutura elástica de período fundamental $T=1(s)$ e coeficiente de amortecimento $\xi=5\%$ durante o sismo registado em El Centro, Estados Unidos, 1940 [23].....	19
Figura 22 – Dissipação de energia numa estrutura sem plastificação dos membros estruturais ( $EY = 0$ ) [5] .....	21
.....	21
Figura 23 – Dissipação de energia numa estrutura com plastificação dos membros estruturais [5].....	21
Figura 24 – relação força-deslocamento da estrutura com amortecimento não-linear (linha contínua) e equivalente (linha a tracejado) [6] .....	22
Figura 25 – Equações do método de Newmark considerando amortecimento não-linear [7] .....	24
Figura 27 - Acelerograma do sismo considerado.....	31





# Índice de Tabelas

Tabela 1 - Caraterísticas das 4 estruturas de pontes avaliadas .....	27
Tabela 2 – Caraterísticas do sismo considerado .....	31
Tabela 3 – Soma das constantes de amortecimento dos dissipadores.....	32
Tabela 4 – Soma das constantes de amortecimento dos dissipadores com amortecimento equivalente	32
Tabela 5 – Constante de amortecimento de cada ponte na direção longitudinal .....	33
Tabela 6 -Deslocamento relativo longitudinal máximo obtido no modelo com amortecimento não-linear	35
Tabela 7 – Deslocamento relativo longitudinal máximo obtido no modelo com amortecimento equivalente .....	35
Tabela 8 - Diferença percentual entre os deslocamentos obtidos com ambos os modelos.....	35
Tabela 9 – Velocidade relativa máxima obtida no modelo com amortecimento não-linear .....	36
Tabela 10 - Velocidade relativa máxima obtida no modelo com amortecimento equivalente .....	36
Tabela 11 - Diferença percentual entre as velocidades obtidas com ambos os modelos .....	37
Tabela 12 - Aceleração relativa máxima obtida com modelo com amortecimento não-linear.....	37
Tabela 13 - Aceleração relativa máxima obtida com modelo com amortecimento equivalente .....	38
Tabela 14 – Diferença percentual entre as acelerações obtidas com ambos os modelos.....	38
Tabela 15 – Força máxima dos dissipadores obtida com modelo com amortecimento não-linear .....	39
Tabela 16 – Força máxima dos dissipadores obtida com modelo com amortecimento equivalente.....	39
Tabela 17 - Diferença percentual das forças máximas dos dissipadores obtidas com ambos os modelos .....	39
Tabela 18 - Forças máximas nos dissipadores pelo método alternativo .....	40
Tabela 19 - Diferença percentual entre as forças máximas.....	40
Tabela A.1 - Valores de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A nas várias zonas sísmicas do país .....	49
Tabela A.2 - Parâmetros que descrevem os espectros de resposta elástica de tipo 1 .....	49
Tabela A.3 - Parâmetros que descrevem os espectros de resposta elástica de tipo 2 .....	49
Tabela A.4 – Coeficientes de importância de estruturas.....	50



# Índice de Símbolos

## Abreviaturas

OTP – tipo de dissipador viscoso comercializado pela empresa *FIPMEC*  
prEN 1998-1 – documento provisório do Eurocódigo 8, parte 1

## Letras maiúsculas latinas

$C_d$  constante de amortecimento de um dissipador viscoso não-linear  
 $C_{d,tot}$  soma das constantes de amortecimento de dissipadores viscosos não-lineares  
 $C_{eq}$  constante de amortecimento de um dissipador viscoso não-linear com amortecimento equivalente  
 $C_{eq,tot}$  soma das constantes de amortecimento de dissipadores viscosos não-lineares com amortecimento equivalente  
 $E_I$  energia recebida por uma estrutura durante um sismo  
 $E_Y$  energia dissipada por plastificação da estrutura durante um sismo  
 $E_D$  energia dissipada por uma estrutura por amortecimento viscoso durante um sismo  
 $E_S$  energia potencial elástica de uma estrutura durante um sismo  
 $E_K$  energia cinética de uma estrutura durante um sismo  
 $F_d$  força de amortecimento de um dissipador viscoso não-linear  
 $F_{d,eq}$  força de amortecimento de um dissipador viscoso não-linear com amortecimento equivalente  
 $F_{DV}$  força de amortecimento total dos dissipadores viscosos não-lineares  
 $F_{DV,eq}$  força de amortecimento total dos dissipadores viscosos não-lineares com amortecimento equivalente  
 $S_e$  valor do espectro de resposta elástica  
 $S_{De}$  valor do espectro de resposta elástica de deslocamento  
 $S$  coeficiente de solo  
 $T_1$  período de vibração longitudinal de uma ponte  
 $T_{p1}$  período de vibração longitudinal de uma ponte apenas elementos primários  
 $T$  período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade  
 $T_B$  limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante  
 $T_C$  limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante  
 $T_D$  valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante  
 $W_D$  energia dissipada para o deslocamento máximo do sistema no cálculo de  $\xi_{sd}$   
 $W_S$  energia elástica armazenada para o deslocamento máximo do sistema no cálculo de  $\xi_{sd}$

## Letras minúsculas latinas

$a_{gR}$  valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A  
 $a_g$  valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A

$c$  constante de amortecimento da expressão de amortecimento não-linear de uma estrutura  
 $c_{est}$  constante de amortecimento longitudinal de uma ponte sem dissipadores  
 $d_g$  valor de  $S_{De}$  para  $T > T_F$   
 $d_{roof}$  deslocamento de controlo máximo no cálculo de  $\xi_{sd1}$   
 $d_{roof\ 1e}$  deslocamento máximo longitudinal do tabuleiro de uma ponte com dissipadores no cálculo do coeficiente de amortecimento equivalente  
 $f$  cosseno do ângulo de cada dissipador com a horizontal no cálculo de  $\xi_{sd}$   
 $k$  rigidez de uma estrutura  
 $k_{est}$  rigidez longitudinal de uma ponte  
 $k_{bo}$  rigidez de elementos adicionais de um dissipador viscoso  
 $k_{bb}$  rigidez do elemento extensor de um dissipador viscoso  
 $k_b$  rigidez equivalente do conjunto dos elementos de um dissipador viscoso  
 $k_d$  rigidez da componente elástica de um dissipador viscoso no modelo de Maxwell  
 $m$  massa da estrutura considerada nos cálculos  
 $\ddot{u}_g$  aceleração do solo durante um sismo  
 $u$  : deslocamento relativo longitudinal do tabuleiro da ponte / deslocamento relativo dos extremos dos dissipadores  
 $\dot{u}$ : velocidade relativa longitudinal do tabuleiro da ponte / velocidade relativa dos extremos dos dissipadores  
 $\ddot{u}$ : aceleração relativa longitudinal do tabuleiro da ponte/ aceleração relativa dos extremos dos dissipadores  
 $v$  velocidade relativa dos extremos de um dissipador viscoso

### **Letras maiúsculas gregas**

$\Delta$  deformação total de um dissipador viscoso  
 $\Delta_k$  deformação da componente elástica do amortecedor  
 $\Delta_d$  deformação da componente viscosa do dissipador

### **Letras minúsculas gregas**

$\alpha$  parâmetro do dissipador viscoso, expoente da velocidade na expressão da força de amortecimento  
 $\eta$  coeficiente de correção do amortecimento  
 $\theta$  ângulo do dissipador com a horizontal  
 $\lambda$  coeficiente usado no cálculo de  $\xi_{sd1}$   
 $\mu_f$  coeficiente de ductilidade na expressão de cálculo de  $\xi_{ff1}$   
 $\xi$  coeficiente de amortecimento viscoso  
 $\xi_i$ : coeficiente de amortecimento intrínseco de uma estrutura  
 $\xi_{v1}$  coeficiente de amortecimento equivalente de um conjunto de dissipadores viscosos não-lineares  
 $\xi_{ff1}$  coeficiente de amortecimento equivalente na direção longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos não-lineares  
 $\xi_H$ : coeficiente de amortecimento adicional da estrutura devido ao comportamento histerético pós-

cedência dos membros estruturais

$\xi_{sd}$  coeficiente de amortecimento equivalente de uma estrutura

$\xi_{sd1}$  coeficiente de amortecimento equivalente de uma estrutura considerando o 1º modo de vibração

$\gamma_I$  coeficiente de importância de uma estrutura

$\phi_{rj1}$  deslocamento modal relativo dos extremos de um dissipador viscoso para o modo de vibração em análise

$\phi_{i1}$  deslocamento modal do grau de liberdade de uma estrutura para o modo de vibração em análise

$\omega$  frequência angular do modo de vibração longitudinal de uma ponte



# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

Os dissipadores viscosos são dispositivos de dissipação de energia passivos cuja aplicação permite diminuir a resposta vibratória de uma estrutura quando sujeita a ações sísmicas, tendo sido aplicados nos últimos anos em estruturas de engenharia civil, nomeadamente para amortecimento da vibração longitudinal em pontes.

Com o uso de dissipadores viscosos é possível obter níveis de amortecimento altos na vibração longitudinal de pontes, com valores do coeficiente de amortecimento equivalente  $\xi$  até 20-30 %, reduzindo bastante as deformações na estrutura, não havendo necessidade de haver deformações plásticas desta para conseguir dissipação de energia [3].

As características funcionais destes dispositivos são geralmente descritas por uma lei constitutiva do tipo  $F_d = C_d \times v^\alpha$ , sendo  $C_d$  e  $\alpha$  constantes que dependem do tipo de dissipador, podendo  $\alpha$  variar entre 0.1 e 2, sendo que dissipadores com  $\alpha < 1$  têm a vantagem de dissipar uma grande quantidade de energia para velocidades de vibração baixas.

Para ações sísmicas que duram apenas alguns segundos, mas requerem a dissipação de grandes quantidades de energia num curto espaço de tempo, dissipadores com baixo valor de  $\alpha$  têm um bom desempenho, sendo por este motivo aplicados dispositivos com estas características para diminuição de vibrações provenientes de ações sísmicas em pontes [4].

Para cálculo da resposta dinâmica longitudinal de pontes com dissipadores não-lineares de  $\alpha < 1$  nos encontros, pode ser usado o amortecimento equivalente, calculado a partir do coeficiente de amortecimento equivalente dado pelas expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1], documento provisório da próxima versão do NP EN 1998-1[2].

O amortecimento equivalente pode ser definido como o amortecimento linear que produz uma dissipação de energia equivalente ao amortecimento não-linear de uma estrutura [5] [6]. Sendo a energia dissipada equivalente para os dois tipos de amortecimento, a resposta dinâmica longitudinal de uma ponte com dissipadores deverá ser semelhante quando calculada usando ambas as alternativas

A utilização do amortecimento equivalente corresponde, em termos de cálculo, a utilizar dissipadores com expressão de amortecimento linear, com  $\alpha=1$ , que produzam uma dissipação de energia equivalente aos dissipadores não-lineares instalados, simulando o efeito dos mesmos.

## 1.2 Objetivos propostos

O objetivo desta dissertação é avaliar a resposta dinâmica longitudinal de pontes com dissipadores viscosos não-lineares nos encontros, sob ação sísmica, usando o amortecimento equivalente calculado com base nas expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1]. Os dissipadores viscosos não lineares com  $\alpha < 1$  são colocados na horizontal, na direção do eixo longitudinal do tabuleiro.

Com este objetivo, a resposta dinâmica longitudinal de 20 combinações diferentes de pontes com dissipadores viscosos não-lineares é obtida de 2 modos: com o amortecimento equivalente, e com o amortecimento não-linear, e os resultados são comparados. Sendo a energia dissipada equivalente para os dois tipos de amortecimento, a resposta dinâmica longitudinal de cada ponte com dissipadores calculada com ambos deverá ser semelhante.

São avaliadas 4 estruturas de pontes com períodos de vibração longitudinal diferentes, entre 1 e 4 segundos, uma vez que é nesta gama de valores que, para ações sísmicas, é possível obter uma maior redução do deslocamento máximo da vibração longitudinal aumentando o amortecimento. Para cada uma das 4 pontes é considerada a instalação de dissipadores viscosos não lineares com 5 valores diferentes do parâmetro  $\alpha$  variando entre 0.1 e 0.5, perfazendo deste modo no total 20 combinações de pontes com dissipadores viscosos não-lineares, como mencionado.

A resposta dinâmica longitudinal é obtida utilizando o software SAP2000, através de uma análise numérica no tempo (*time-history analysis*) com acelerograma representativo do sismo considerado, para ambos os tipos de amortecimento.

### 1.3 Organização do documento

No capítulo 2 é apresentado um resumo da informação existente sobre dissipadores viscosos, assim como da sua aplicação em pontes. São também descritas as formas de representar a ação sísmica, assim como os métodos de cálculo do amortecimento equivalente dos dissipadores.

No capítulo 3 é feito o cálculo das constantes de amortecimento dos dissipadores viscosos com os dois tipos de amortecimento mencionados, usando as expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1].

No capítulo 4 são mostrados os resultados da resposta dinâmica longitudinal das pontes com dissipadores obtidas com o programa SAP2000, para os dois tipos de amortecimento considerados, comparando os resultados.

Os resultados avaliados são o deslocamento, velocidade e aceleração longitudinal da ponte, assim como as forças nos dissipadores.

Verifica-se haver uma diferença grande nas forças de amortecimento dos dissipadores para as modelações com ambos os tipos de amortecimento. Deste modo, aquelas forças são calculadas por um método alternativo para o qual são obtidos resultados muito próximos aos obtidos com amortecimento não-linear, utilizando à mesma os resultados obtidos da análise com amortecimento equivalente, que são os resultados pretendidos.

No capítulo 5 são apresentadas conclusões finais sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros sobre este tema.

Em anexo são apresentados os gráficos obtidos, pela seguinte ordem:

- Deslocamento relativo de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Velocidade relativa de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Aceleração relativa de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Força total nos dissipadores



- Força total nos dissipadores pelo método alternativo
- Deslocamento relativo de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte - Força total nos dissipadores para a ponte com período de vibração longitudinal  $T= 1$  (s)



## 2. Estado de Arte

### 2.1 Ação Sísmica

#### 2.1.1 Espectro de Resposta Elástica

De acordo com a NP EN 1998-1 [2], para dimensionamento de uma estrutura sujeita a um sismo, a ação sísmica pode ser representada por um espectro de resposta elástica, cujos valores dependem do tipo de solo de fundação.

A ação sísmica horizontal é composta por duas componentes perpendiculares consideradas independentes e representadas pelo mesmo espectro de resposta.

Para as componentes horizontais da ação sísmica o espectro de resposta elástica  $S_e(T)$ , é definido pelas expressões (2.1) a (2.4):

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (2.1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (2.2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right] \quad (2.3)$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (2.4)$$

Em que:

$S_e(T)$  valor do espectro de resposta elástica

$T$  período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade

$a_g$  valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A ( $a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$ )

$T_B$  limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante

$T_C$  limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante

$T_D$  valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante

$S$  coeficiente do solo

$\eta$  coeficiente de correção do amortecimento, com o valor de referência  $\eta=1$  para 5% de amortecimento viscoso, dado pela expressão (2.5):

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (2.5)$$

Os valores de  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ , podem ser consultados nas tabelas em anexo, e os valores da aceleração máxima de referência para solo do tipo A,  $a_{gR}$ , devem ser obtidos dependendo da zona sísmica do país. O zonamento sísmico de Portugal, existente na NP EN 1998-1 [2], é mostrado na figura 1.

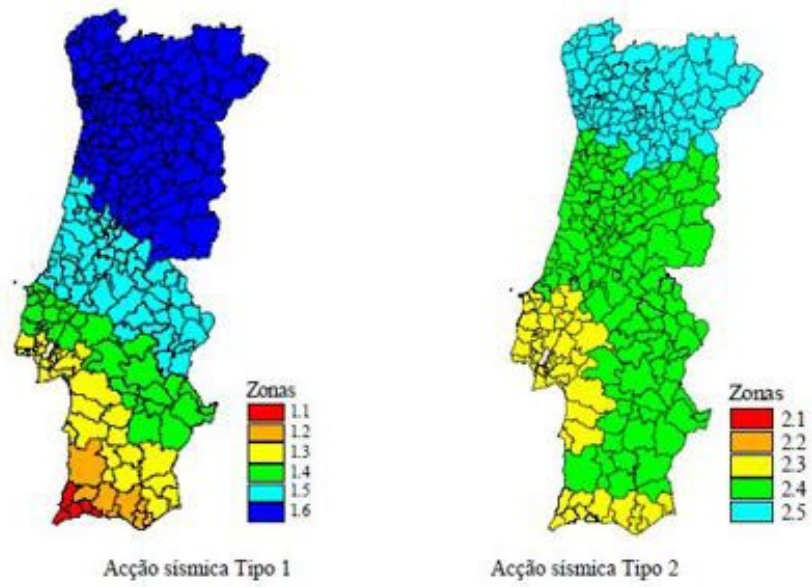


Figura NA.I – Zonamento sísmico em Portugal Continental

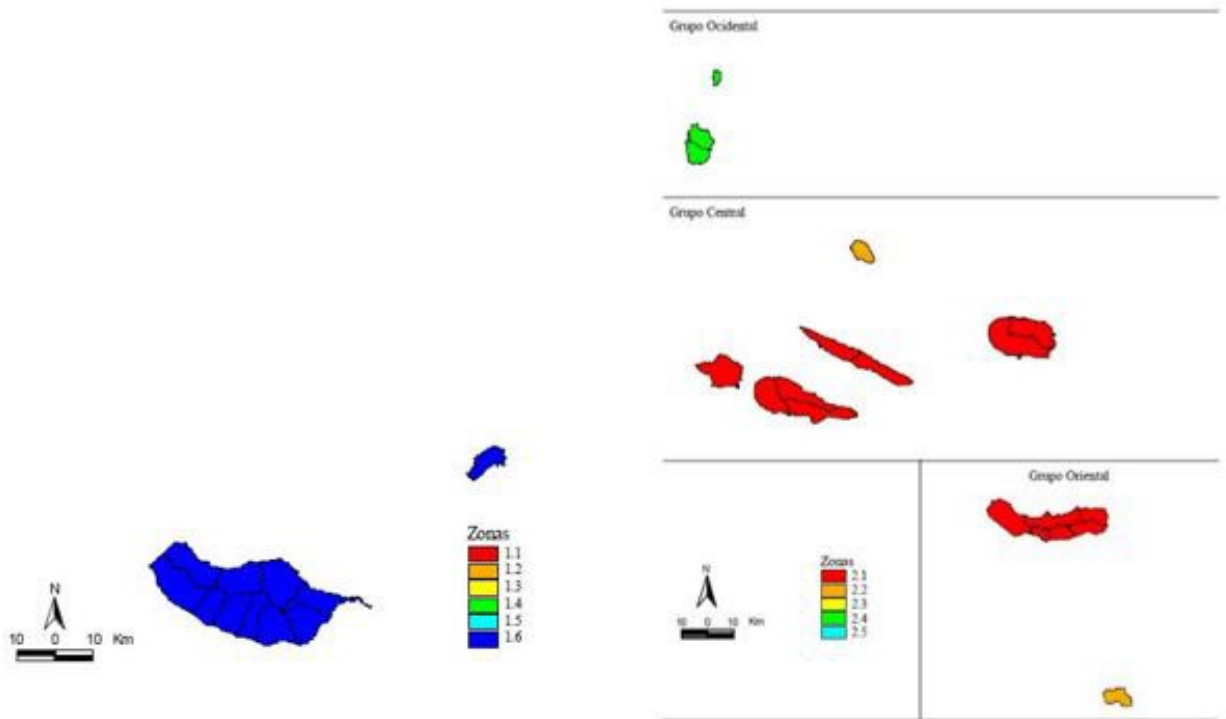


Figura NA.II – Zonamento sísmico no Arquipélago da Madeira (Acção sísmica Tipo 1)

Figura NA.III – Zonamento sísmico no Arquipélago dos Açores (Acção sísmica Tipo 2)

Figura 1 - Zonamento sísmico em Portugal [2]

O espectro de resposta elástica de aceleração presente na NP EN 1998-1 [2] tem a forma representada na figura 2:

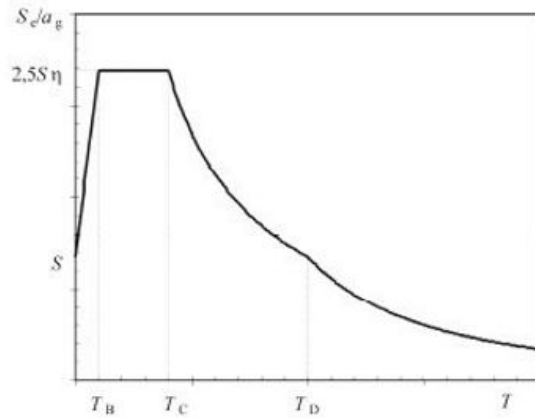


Figura 2 – Forma do espectro de resposta elástica [2]

Em Portugal é obrigatória a utilização de dois tipos de espectros de resposta elástica, tipo 1 e tipo 2, representados na figura 3, caracterizando os dois tipos de sismo consoante a sua génese: interplacas e intraplacas

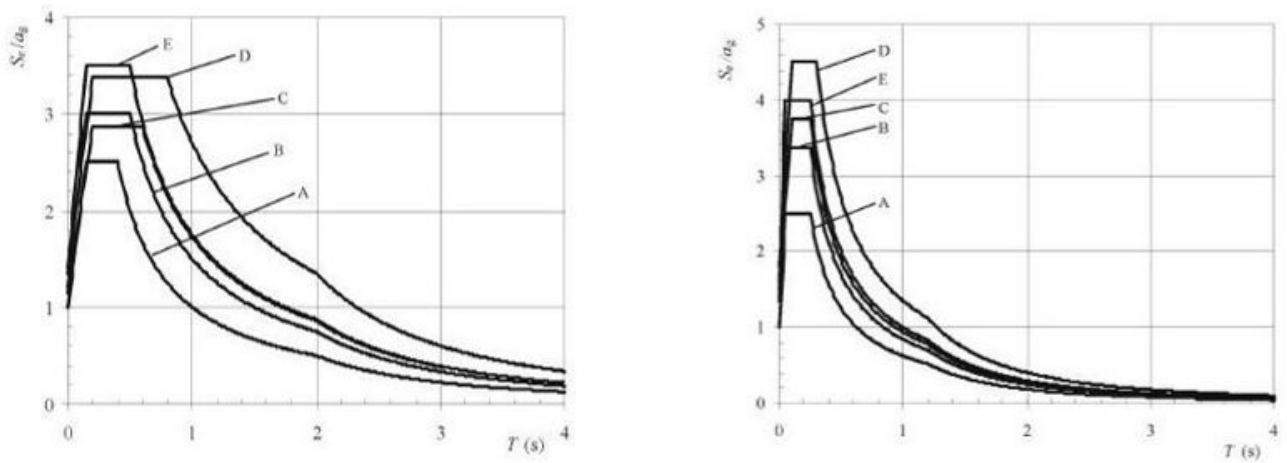
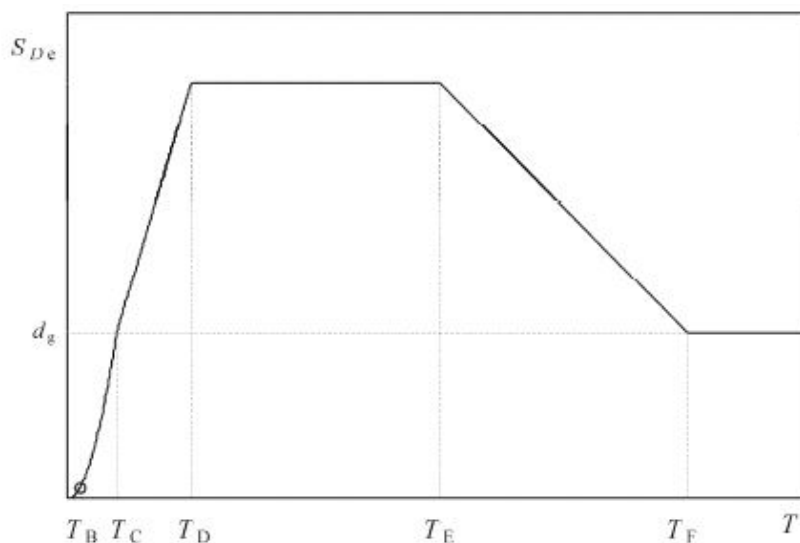


Figura 3 – Espectros de resposta elástica do tipo 1 e 2, para terrenos dos tipos A a E, com  $\xi=5\%$  [2]

## 2.1.2 Espectro de Resposta Elástica de Deslocamento

Para as estruturas de longo período de vibração a ação sísmica pode ser representada sob a forma de um espectro de resposta elástica de deslocamento,  $S_{De}(T)$ , calculado pela expressão (2.6) e representado na figura 4 [2]:

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left[ \frac{T}{2\pi} \right]^2 \quad (2.6)$$



$d_g$ : valor de  $S_{De}$  para  $T > T_F$

Figura 4 - Espectro de resposta elástica de deslocamento [2]

## 2.1.3 Representação Temporal da Ação Sísmica

Uma das formas de representar o movimento sísmico é através da variação da aceleração à superfície do terreno em função do tempo. Esta representação pode ser materializada através de acelerogramas reais ou artificiais.

Se forem usados acelerogramas artificiais, estes devem ser gerados de modo a corresponderem aos espectros de resposta elástica definidos na *NP EN 1998-1* [2] para 5% do coeficiente de amortecimento viscoso ( $\xi = 5\%$ ).

A duração dos acelerogramas deve ser compatível com a magnitude e com outras características do acontecimento sísmico relevantes para o estabelecimento do valor da aceleração do solo de  $a_g$ , sendo esta informação fornecida no anexo nacional ao Eurocódigo 8 [2].

É possível a utilização de acelerogramas registados, desde que as amostras utilizadas sejam devidamente qualificadas relativamente às características sismogénicas da fonte e às condições do terreno local, e que os seus valores sejam graduados em função do valor de  $a_g \cdot S$  da zona considerada, de acordo com o zonamento sísmico do território nacional, já apresentado anteriormente na figura 1.

## 2.2 Dispositivos de Proteção Sísmica

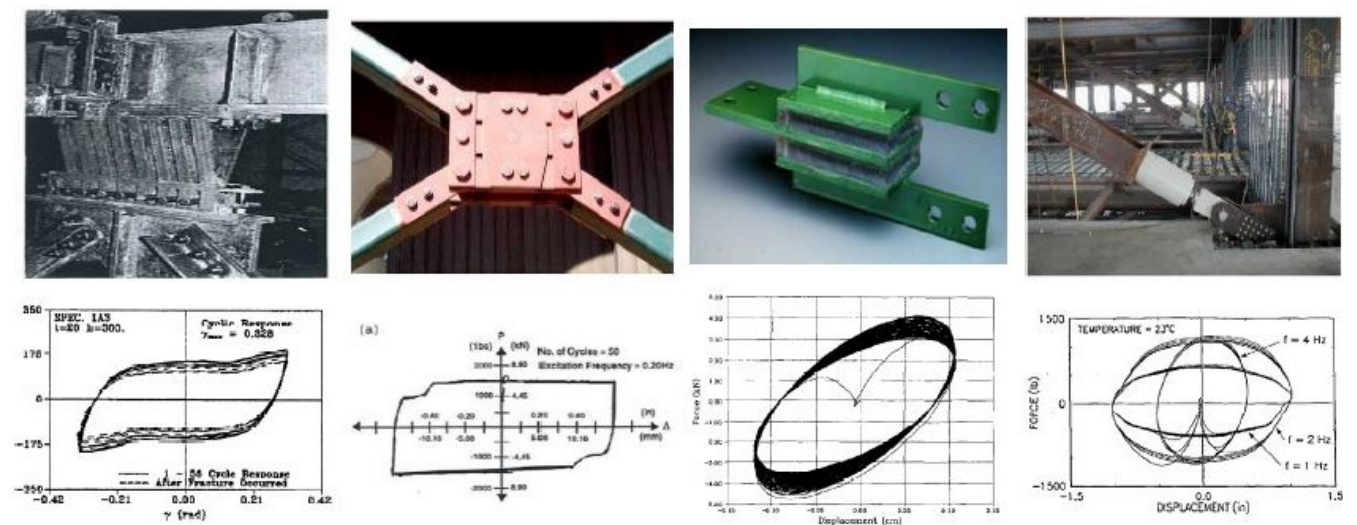
Os dispositivos de proteção sísmica têm como objetivo a dissipação de energia e a redução de vibrações em estruturas quando sujeitas a sismos, tendo sido aplicados nos últimos anos em estruturas novas e pré-existentes, podendo ser divididos em 3 grupos principais: dispositivos de isolamento sísmico, dispositivos de dissipação de energia ativos e dispositivos de dissipação de energia passivos [7].

Os dissipadores viscosos são dispositivos anti-sísmicos classificados como sistemas passivos de dissipação de energia, uma vez que, ao contrário dos sistemas ativos de dissipação de energia, funcionam sem uma fonte externa de energia.

Dentro da categoria de dispositivos de dissipação de energia passivos existem também os seguintes:

- Dissipadores viscoelásticos, que dissipam energia por amortecimento viscoso e que incluem uma componente elástica que atua em paralelo ;
- Dissipadores por atrito, que dissipam energia por fricção entre placas ;
- Dissipadores histeréticos, que dissipam energia por plastificação do material [3] .

Na figura 5 estão representados cada um dos dissipadores e respetivos gráficos de resposta em termos de força-deslocamento.



Da esquerda para a direita: dissipador histerético, por atrito, viscoelástico e viscoso

Figura 5 – Dispositivos de dissipação de energia passivos com gráficos força-deslocamento sob ação harmónica [8] [9] [10] [11]

## 2.3 Dissipadores Viscosos

### 2.3.1 Características Gerais

Os dissipadores viscosos são dispositivos hidráulicos compostos por um cilindro contendo um fluido de viscosidade adequada e um pistão. O pistão separa o fluido dentro do cilindro em duas câmaras, e a transferência de fluido de uma câmara para a outra provoca a força de amortecimento. O corte de um dissipador viscoso é representado na figura 6.

A resistência ao movimento é função tanto das características do fluido como da geometria dos elementos. Estes dispositivos podem produzir força de amortecimento atuando nos dois sentidos, ou apenas à compressão [7].

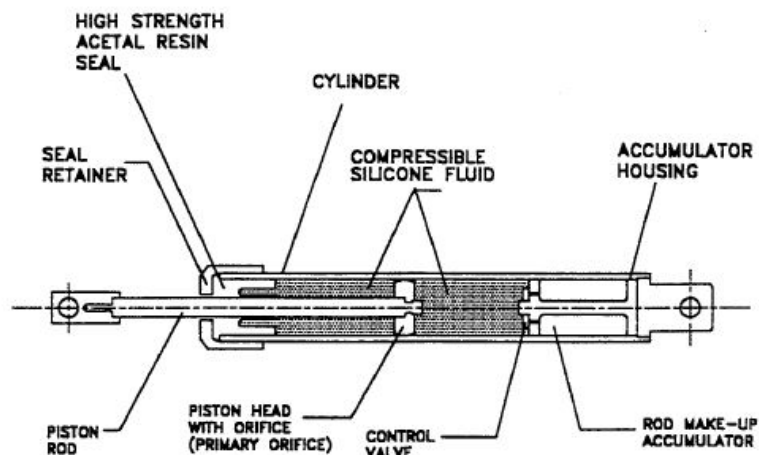


Figura 6 – Corte de um dissipador viscoso [12]

A força de amortecimento de um dissipador viscoso depende da velocidade relativa entre os extremos do dispositivo e é avaliada pela expressão (2.7) [7]:

$$F_d(t) = C_d \times \text{sgn}(v) \times |v|^\alpha \quad (2.7)$$

Em que  $C_d$  e  $\alpha$  são parâmetros do dissipador e  $v$  é a velocidade relativa dos extremos do dissipador.

O modelo de amortecimento viscoso é baseado no modelo viscoelástico de Maxwell, que é constituído por um amortecedor em série com uma mola, como representado na figura 7. [13]



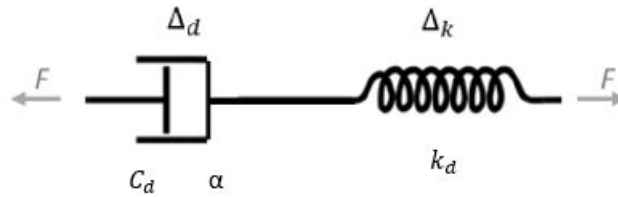


Figura 7 - Dissipador viscoso representado pelo modelo de Maxwell (adaptado de [14])

A lei não-linear de força-deformação no modelo de Maxwell não-linear é dada pela expressão (2.8). Para o caso de  $\alpha=1$  este modelo é idêntico ao caso do modelo de Maxwell com amortecimento linear.

$$F_d = k_d \times \Delta k = C_d \times v^\alpha \quad (2.8)$$

Nesta expressão  $k_d$  é a rigidez da mola,  $C_d$  é a constante de amortecimento do dissipador,  $\alpha$  é o expoente da velocidade,  $\Delta k$  é o alongamento da mola e  $v$  é a velocidade relativa dos extremos do dispositivo.

A deformação total do elemento resulta, portanto, da soma do deslocamento da componente elástica,  $\Delta k$ , e do deslocamento da componente viscosa,  $\Delta d$ , como mostrado na expressão (2.9):

$$\Delta = \Delta k + \Delta d \quad (2.9)$$

Para um amortecedor puro o efeito da componente elástica pode ser ignorado se tiver rigidez suficientemente alta para se considerar como infinita.

As figuras 8 e 9 mostram 2 gráficos com a relação força-velocidade e força-deslocamento de dissipadores viscosos não lineares para diferentes valores de  $\alpha$ , respetivamente.

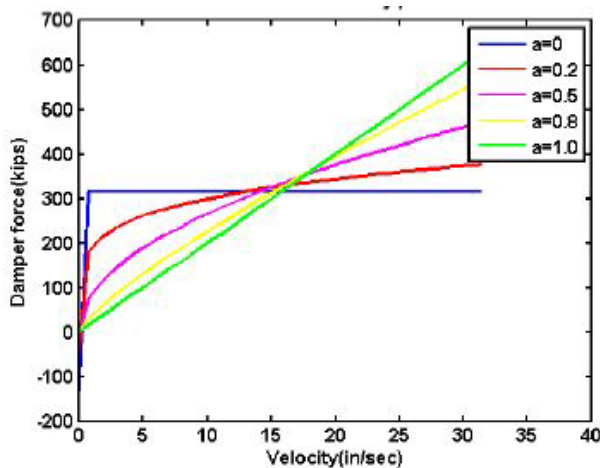


Figura 8 - Relação força-velocidade para dissipadores viscosos com valores de  $\alpha$  variável

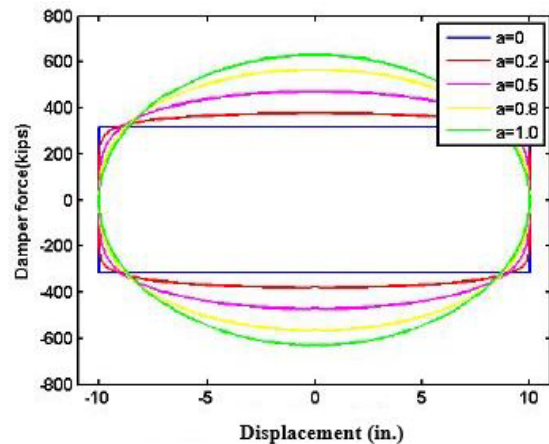
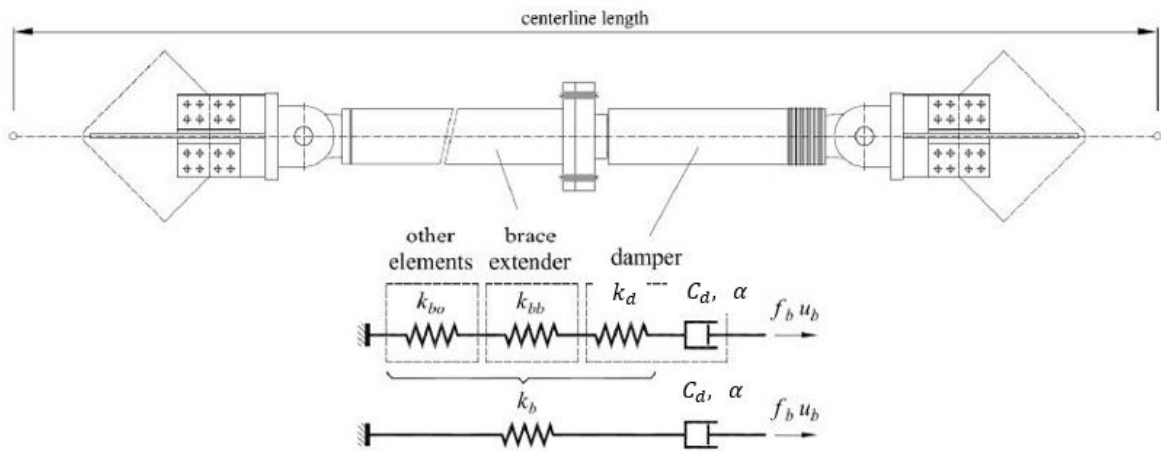


Figura 9 - Relação força-deslocamento para dissipadores viscosos com valores de  $\alpha$  variável

Uma vantagem dos dissipadores viscosos não-lineares com  $\alpha < 1$  é que a força pode ser controlada para evitar a sobrecarga do amortecedor ou do sistema ao qual está ligado na presença de um grande aumento de velocidade. No entanto, uma eventual desvantagem é que para valores baixos de  $\alpha$  a força dos dissipadores para deslocamentos do tabuleiro próximos do máximo pode ser bastante alta uma vez que a relação força-deslocamento se aproxima de um retângulo para este tipo de dissipadores não-lineares. [16] Ligados ao dissipador podem existir outros elementos auxiliares com o objetivo de fazer a ligação deste à estrutura e que podem alterar a rigidez equivalente do conjunto, como esquematizado na figura 10. [17]



( $k_{bb}$ : rigidez do elemento extensor;  $k_{bo}$ : rigidez de elementos adicionais;  $k_b$ : rigidez equivalente do conjunto)

Figura 10 – Rigidez total do dissipador com elementos auxiliares (adaptado de [17])

Nesta dissertação o efeito da deformação elástica dos dissipadores ou da deformação dos elementos a eles conectados não é considerada, uma vez que se considera terem rigidez suficiente para não terem efeito nos resultados. No entanto, na modelação de dissipadores não-lineares no programa SAP2000 é necessário atribuir valores para a rigidez  $k_d$  da componente elástica dos dissipadores, tal como é explicado no capítulo 3.3 .

Esta aproximação é razoável uma vez que há dissipadores viscosos que são comercializados para os quais a rigidez da componente elástica é suficientemente alta para se considerar este efeito, e a ligação dos dissipadores pode ser dimensionada para ter rigidez alta.

É importante distinguir entre a rigidez da componente elástica do próprio dissipador e a dos elementos adicionais. A rigidez da componente elástica do próprio dissipador pode ser fornecida diretamente pela empresa que vende os dissipadores, enquanto que a rigidez da componente elástica dos elementos adicionais, caso hajam, deve ser dimensionada para ser rígida o suficiente de modo a que não altere a rigidez equivalente total.

## 2.3.2 Modelação

As figuras 11 e 12 representam duas formas possíveis de fazer a modelação da vibração longitudinal da mesma ponte com dissipadores viscosos colocados nos encontros, na direção do eixo longitudinal do tabuleiro. Ao contrário do modelo da figura 11, no modelo da figura 12 não é representada a componente elástica dos dissipadores, pois esta é considerada suficientemente rígida para não afetar os resultados. Nestes modelos representados,  $c_{est}$  é a constante de amortecimento da ponte na direção longitudinal, a massa  $m$  inclui a massa do tabuleiro e parte da massa dos pilares, e a rigidez da estrutura na direção longitudinal da ponte,  $k_{est}$ , depende da rigidez dos pilares e das fundações. O valor da constante de amortecimento total dos dissipadores,  $C_{d,tot}$ , apresentado na figura 12, é igual à soma das constantes de amortecimento  $C_d$  de cada um dos dissipadores instalados com o mesmo  $\alpha$ . Esta última simplificação é explicada no capítulo 3.1.

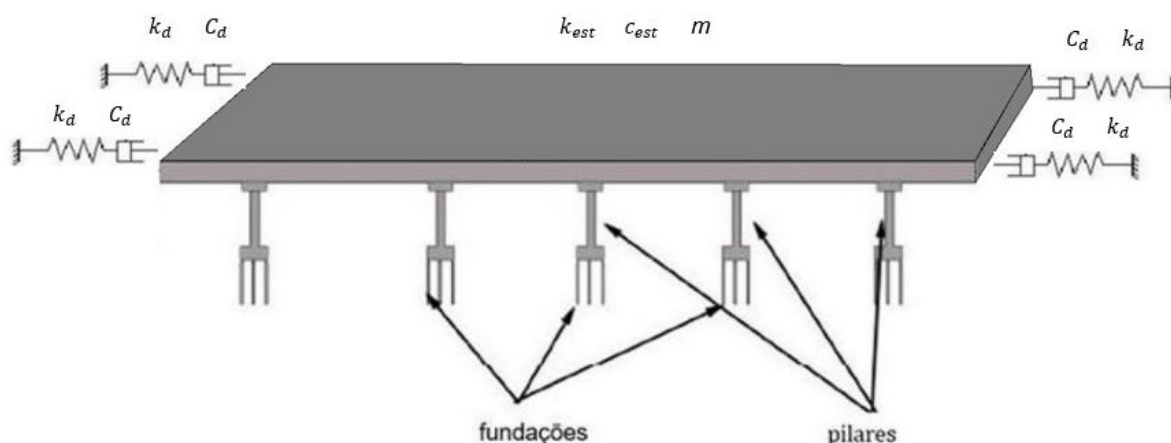


Figura 11 – Modelo da vibração longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos nos encontros (adaptado de [18])

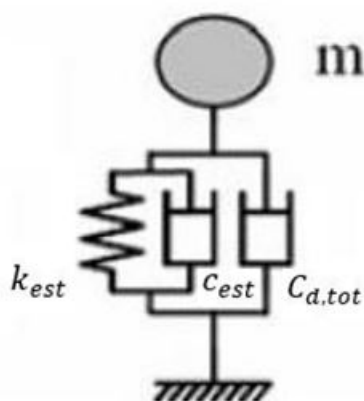
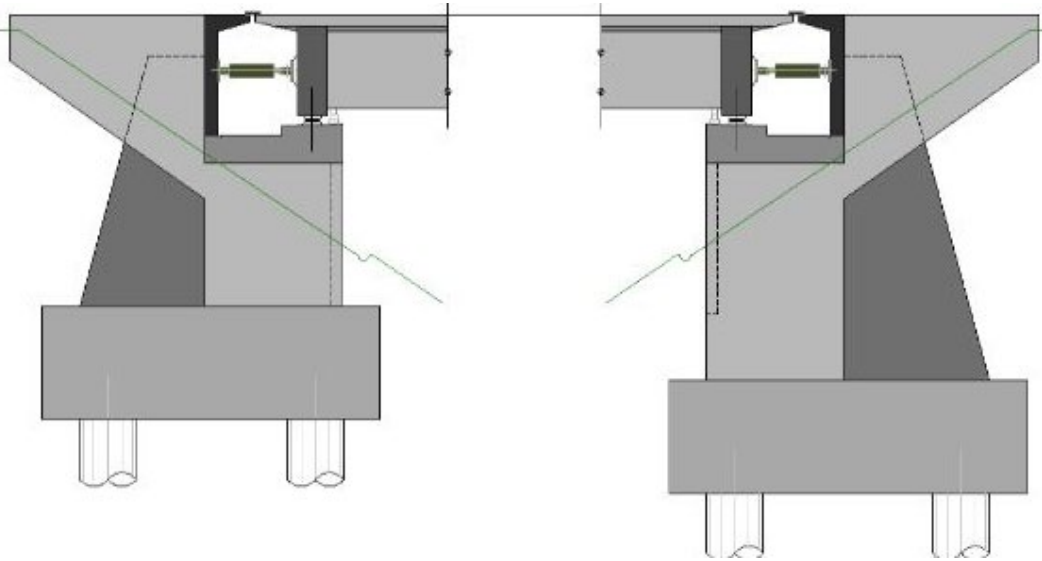


Figura 12- Modelo da vibração longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos nos encontros, sem influência da componente elástica dos dissipadores (adaptado de [19])

Os dissipadores são colocados na horizontal como mostrado na figura 13.



*Figura 13 - Vista em alçado de uma ponte com dissipadores viscosos entre o tabuleiro e os encontros [20]*

A contribuição da força elástica está fora de fase com as forças transmitidas pelos dispositivos, isto é, o valor das forças máximas ocorrem para instantes de tempo diferentes, o que significa que numa solução deste tipo há sempre uma força a restringir o movimento do tabuleiro. [21]

### 2.3.3 Pontes Existentes com Dissipadores Viscosos

Alguns exemplos de pontes em que foram instalados dissipadores viscosos são:

Na Europa a ponte de Rion-Antirion (Grécia), a ponte de Corinth (Grécia), a ponte de Isap (Grécia), o viaduto do Loureiro (Portugal), o viaduto de Carboj (Itália), a ponte de Guadalfeo (Espanha) [4] e nos Estados Unidos, a ponte de Orange County. [18]

Nas figuras 14 e 15 são mostradas duas formas possíveis de instalação dos dissipadores: entre o tabuleiro e os encontros, paralelamente ao eixo longitudinal da ponte, e sob o tabuleiro com ligação aos encontros, respetivamente.

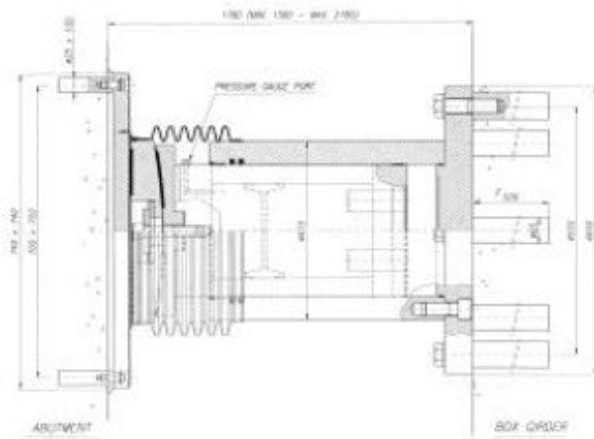


Figura 14 – Dissipadores viscosos de compressão OTP 400/600 na ponte de Rion-Antirion, Grécia [4]



Figura 15 - Dissipadores viscosos na ponte de Orange County, Estados Unidos [18]

### 2.3.4 Viaduto do Loureiro

O viaduto do Loureiro foi dimensionado para resistir a ações sísmicas com dissipadores viscosos, que foram dispostos em paralelo em ambos os encontros, num total de 8 dispositivos, como mostrado na figura 16 [22]. Este viaduto situa-se na autoestrada A10 Bucelas-Carregado e foi construído em betão armado, tendo duas vias com 16 vãos contínuos, suportados em 15 pilares e 2 encontros. O comprimento total do viaduto é de 1050 (m), e em ambos os encontros foram colocadas juntas de dilatação com capacidade total de movimento de 600 (mm).

A ponte está localizada numa região caracterizada por uma aceleração máxima do solo de 0.17(g), sendo que o atual NP EN 1998-1 [2] dá 0.153(g) para o valor de referência da aceleração espectral máxima,  $a_{gR}$ , para essa zona (1.3).

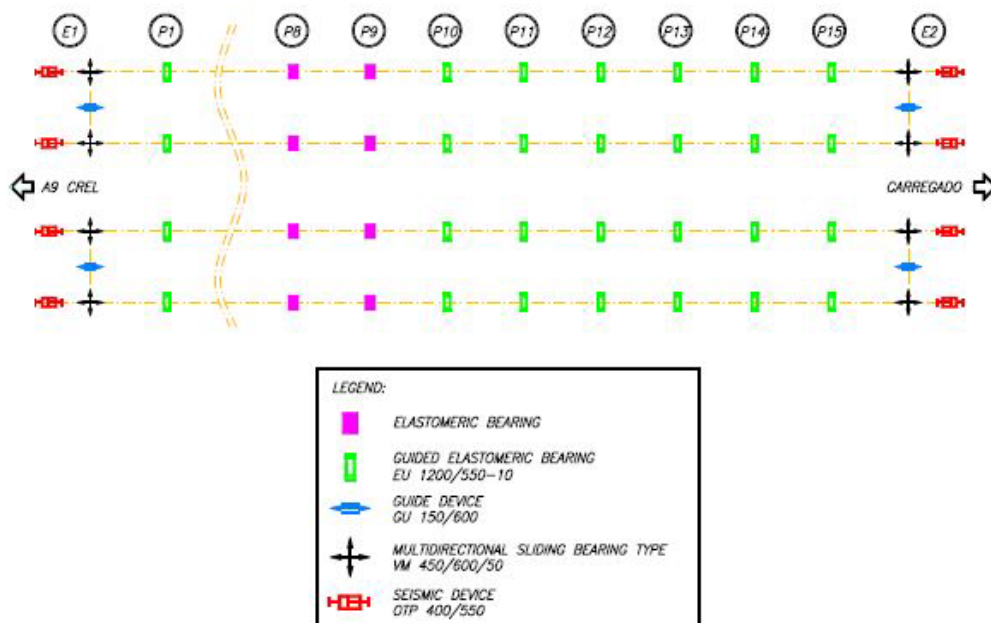


Figura 16 - Esquema dos dissipadores e apoios no viaduto do Loureiro com numeração dos pilares (P) e encontros (E) [22]

Os dispositivos viscosos (FIP series OTP 400/550) colocados têm as seguintes características [22]:

- máxima força sísmica ( $F_{max}$ ):  $\pm 4000$  (kN)
- máxima velocidade:  $\pm 500$  (mm/s)
- máximo deslocamento para ações sísmicas:  $\pm 75$  (mm)
- máximo deslocamento total:  $\pm 275$  (mm)
- expoente de velocidade do dissipador ( $\alpha$ ): 0.15
- temperatura de funcionamento:  $-10 \div +40$  °C

Foram efetuados testes para avaliar as características de desempenho dos dispositivos antes de serem instalados na ponte [22].

No 1º teste foi avaliada a correlação entre a relação força-velocidade do dissipador testada e a declarada, impondo o máximo deslocamento para ações sísmicas (+/- 75 mm) a velocidade constante, com valores variáveis de 1, 2, 5, 10, 40, 60, 80 e 100 % da velocidade máxima.

A figura 17 mostra um destes dispositivos a ser testado em laboratório.

Os resultados do 1º teste, mostrados na figura 18, indicam que os valores da força máxima à velocidade máxima de 500 mm/s é de 3818 kN.



Figura 17 - Dissipador a ser testado em laboratório [22]

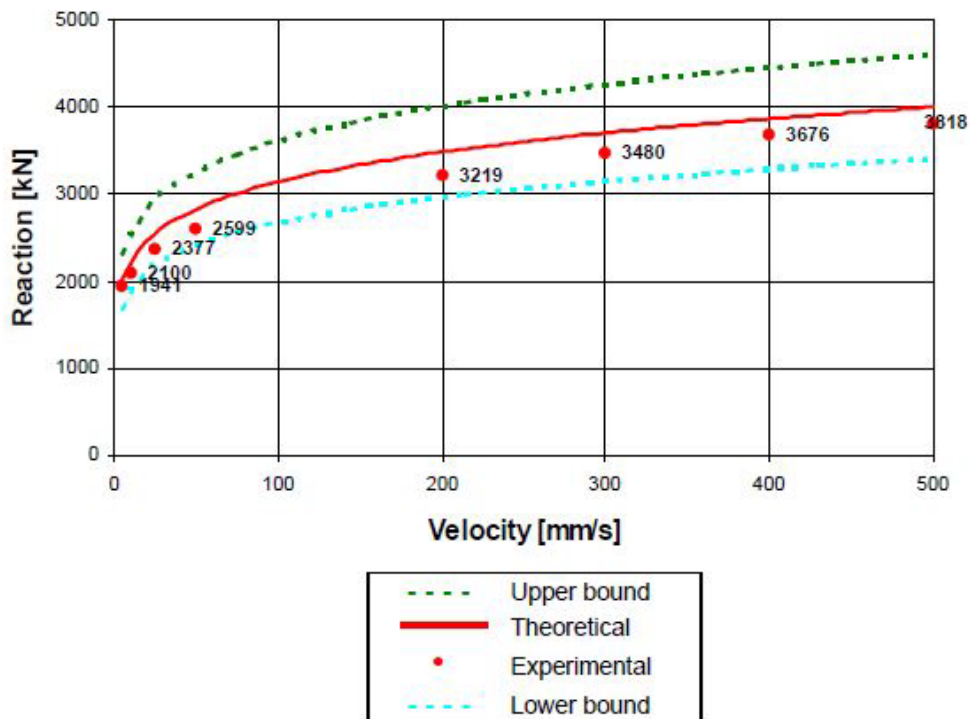


Figura 18 - Relação força-velocidade do dissipador obtida a partir do 1º teste [22]

No 2º teste foi avaliada a relação força-deslocamento impondo o máximo deslocamento para ações sísmicas (+/- 75 mm) de forma cíclica.

Os resultados do 2º teste, evidenciados na figura 19, mostram que a dissipação de energia por cada ciclo com duração de aproximadamente um segundo é constante com o valor de 1030000 (kN.mm), ou 1.03 (MJ), demonstrando que é possível obter uma grande dissipação de energia com estes dispositivos.

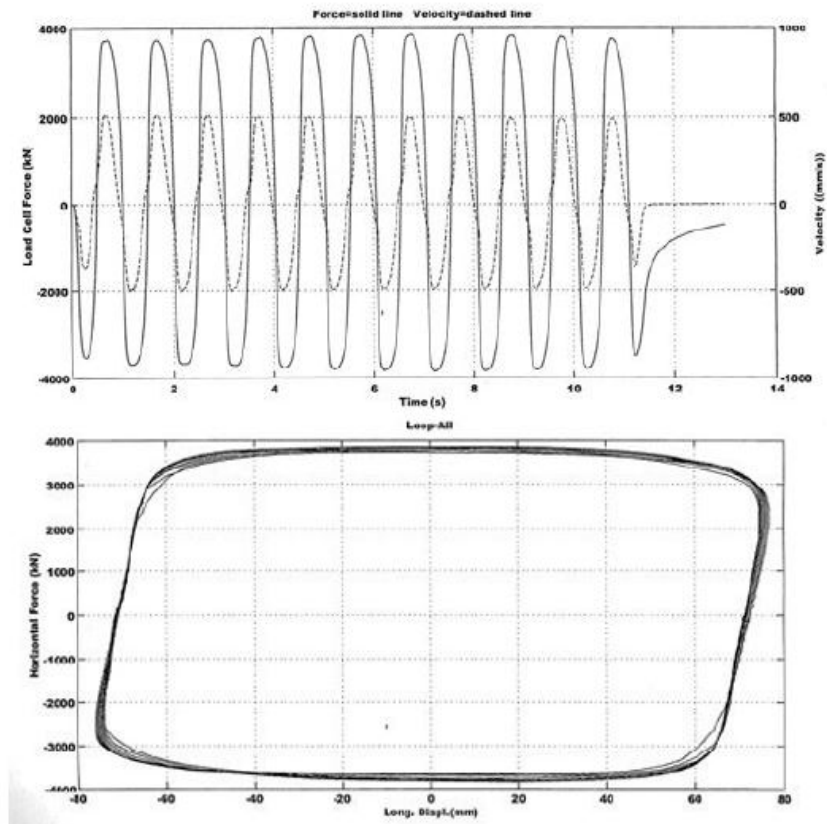


Figura 19 - Relação força-deslocamento do dissipador no 2º teste (em baixo) com gráfico da força aplicada e velocidade de deslocamento ao longo do tempo (em cima) [22]

No 3º teste foi avaliada a força de reação do dissipador para baixa velocidade, inferior a 0.01 (mm/s), equivalente a deformações térmicas, tendo-se obtido uma força máxima de 300 (kN), correspondente a 7.5% da máxima força sísmica de 4000 kN.

Para ter uma ideia das quantidades de energia dissipadas por estes elementos é estimada a quantidade de energia que seria fornecida por um sismo que foi registado em El Centro, nos Estados Unidos, em 1940, a uma estrutura elástica de 1 grau de liberdade com período fundamental  $T=1(s)$  e 5000 toneladas de massa [23].

Se a vibração longitudinal de uma ponte com a massa e período de vibração longitudinal mencionados puder ser avaliada através de um modelo simplificado de um grau de liberdade, como mencionado no capítulo 2.3.2, a energia correspondente ao modo de vibração longitudinal que seria recebida pela ponte durante este sismo pode ser calculada a partir dos valores mostrados nos gráficos das figuras 20 e 21.



O valor da energia fornecida seria aproximadamente 2.5 (MJ) para a primeira fase inicial do sismo na qual se registam as maiores acelerações do solo (primeiros 6 segundos aproximadamente, com valor  $E_I \approx 0.5 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ ). Este valor corresponde à energia dissipada em dois ciclos e meio de um dissipador *FIP series OTP 400/550* com o máximo deslocamento sísmico imposto de +/- 75 (mm).

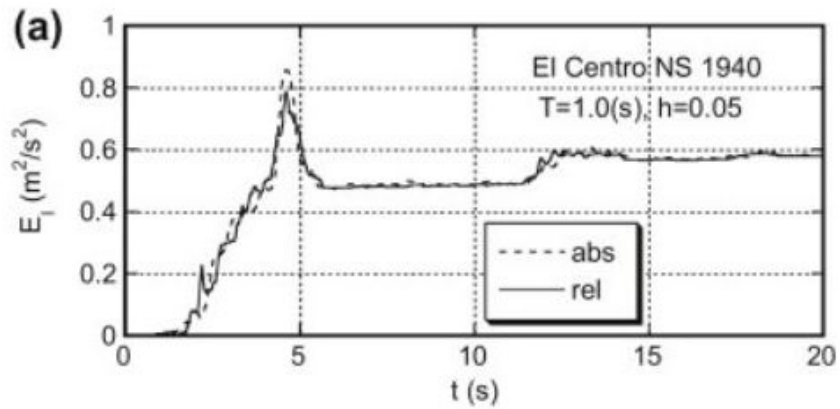


Figura 20 – Energia por unidade de massa ( $\text{m}^2/\text{s}^2$  ou  $\text{J/kg}$ ) recebida por uma estrutura elástica de período fundamental  $T=1(\text{s})$  e coeficiente de amortecimento  $\xi=5\%$  durante o sismo registado em El Centro, Estados Unidos, 1940 [23]

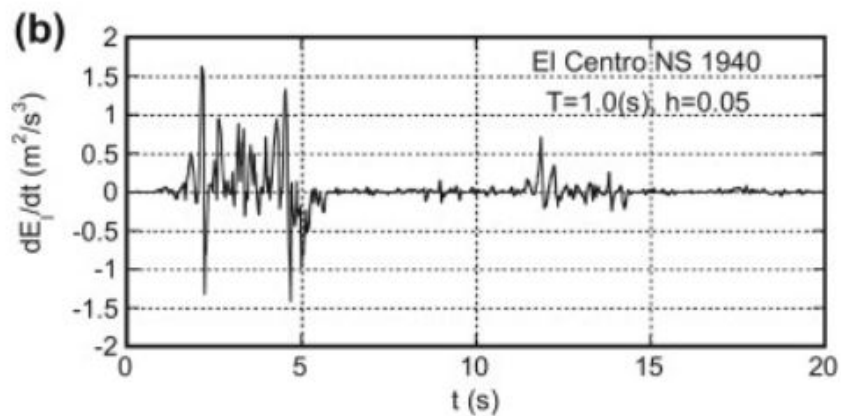


Figura 21 – Taxa de energia por unidade de massa ( $\text{m}^2/\text{s}^3$  ou  $\text{W/kg}$ ) recebida por uma estrutura elástica de período fundamental  $T=1(\text{s})$  e coeficiente de amortecimento  $\xi=5\%$  durante o sismo registado em El Centro, Estados Unidos, 1940 [23]

### 2.3.5 Dissipação de Energia em Estruturas com Dissipadores Viscosos

Os vários termos da equação de energia podem ser definidos calculando o trabalho de cada força da equação de equilíbrio no deslocamento, fazendo o integral de cada força pelo deslocamento  $du$ , como mostrado na expressão (2.10) [5]:

$$\int_0^u m\ddot{u}(t) du + \int_0^u c\dot{u}(t) du + \int_0^u f_s(u) du = - \int_0^u m\ddot{u}_g(t) du \quad (2.10)$$

A parte direita da equação é a energia fornecida pela ação sísmica à estrutura,  $E_I$  [5], definida pela expressão (2.11):

$$E_I(t) = - \int_0^u m\ddot{u}_g(t) du \quad (2.11)$$

O 1º termo da parte esquerda da equação é a energia cinética da massa associada ao movimento da estrutura,  $E_K$ , definida pela expressão (2.12):

$$E_K(t) = \int_0^u m\dot{u}(t) du = \int_0^u m\dot{u}(t)d\dot{u} = \frac{m\dot{u}^2}{2} \quad (2.12)$$

O 2º termo da parte esquerda da equação é a energia dissipada pelo amortecimento viscoso, definida pela expressão (2.13):

$$E_D(t) = \int_0^u f_D(t) du = \int_0^u c\dot{u}(t) du \quad (2.13)$$

A equação de  $E_D$  deve ser alterada no caso de se incluir amortecimento de dissipadores não-lineares na estrutura, como na expressão (2.14) [16]:

$$E_D(t) = \oint f_D(t) du = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} f_D(t) \dot{u}(t) dt = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} c_\alpha |\dot{u}(t)|^{1+\alpha} dt \quad (2.14)$$

O 3º termo da parte esquerda da equação é a soma da energia dissipada pela plastificação da estrutura,  $E_Y$ , e da energia potencial elástica,  $E_S$ , totalmente recuperável, cujos valores são definidos pelas expressões (2.15) e (2.16) respetivamente:

$$E_Y(t) = \int_0^u f_s(u) du - E_S(t) \quad (2.15)$$

$$E_S(t) = \frac{[f_s(t)]^2}{2k} \quad (2.16)$$

O termo  $E_Y$  é nulo no caso de não haver plastificação da estrutura.

Deste modo obtêm-se a equação de energia da estrutura, dada pela expressão (2.17):

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_S(t) + E_Y(t) \quad (2.17)$$

As figuras 22 e 23 mostram dois gráficos em que é possível ver os valores de energia recebidos por uma estrutura durante um sismo ( $E_I$ ) e dissipados através de amortecimento viscoso ( $E_D$ ) e plastificação do material ( $E_Y$ ). No gráfico da figura 22 a energia é dissipada apenas pelo amortecimento viscoso da própria estrutura sem plastificação dos membros estruturais, e no gráfico da figura 23 a energia é dissipada pelo amortecimento viscoso da própria estrutura e ainda pela plastificação dos membros estruturais. Nestas figuras a energia total da estrutura em cada instante de tempo é dada pela soma das parcelas da energia potencial elástica  $E_S(t)$  e da energia cinética  $E_K(t)$ .

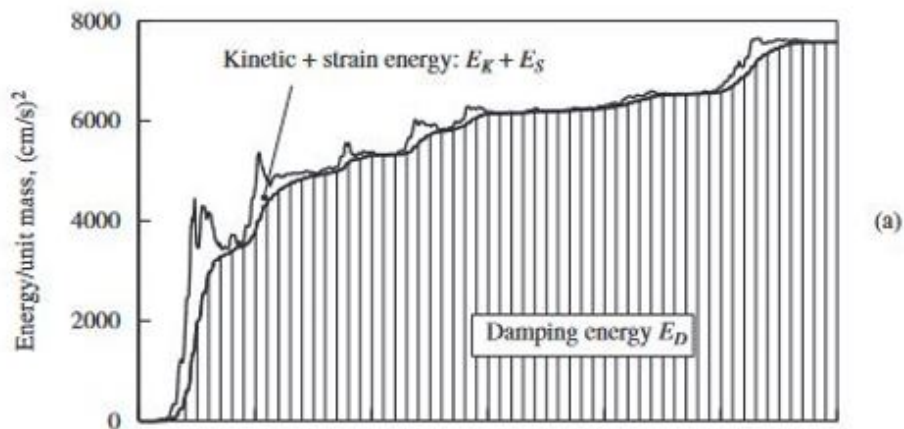


Figura 22 – Dissipação de energia numa estrutura sem plastificação dos membros estruturais ( $E_Y = 0$ ) [5]

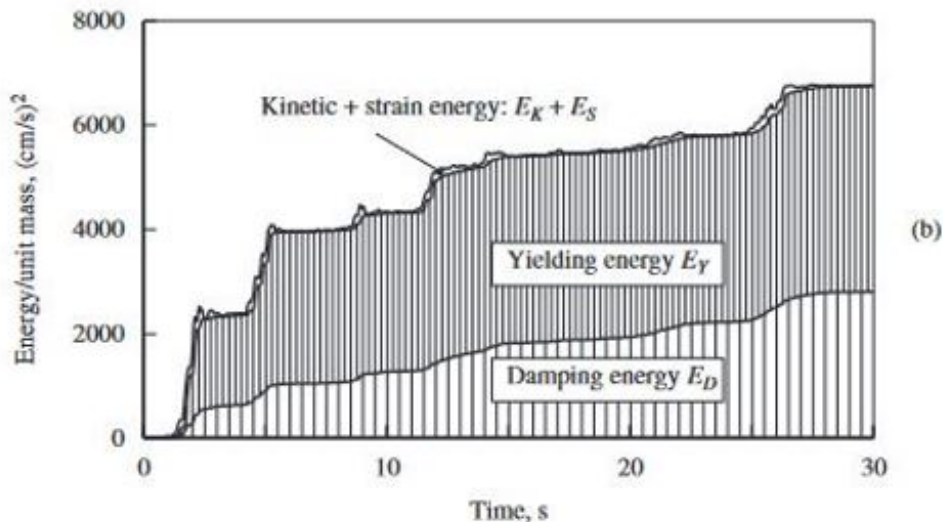


Figura 23 – Dissipação de energia numa estrutura com plastificação dos membros estruturais [5]

### 2.3.6 Cálculo do Coeficiente de Amortecimento Equivalente

Uma forma comum de definir amortecimento equivalente é defini-lo como o amortecimento linear que produz uma dissipação de energia equivalente ao amortecimento não-linear de uma estrutura [5] [6].

A figura 24 mostra as relações força-deslocamento de uma estrutura com amortecimento não-linear e da mesma estrutura com o amortecimento equivalente correspondente, sendo a energia dissipada igual à área dentro de cada curva, que deve ser igual para ambos os casos.

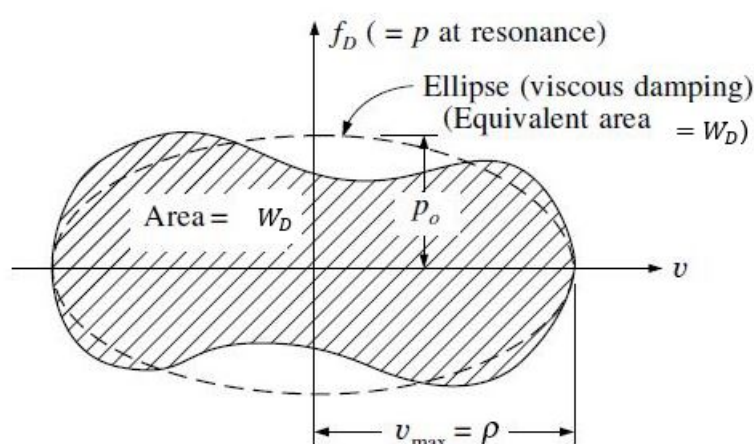


Figura 24 – relação força-deslocamento da estrutura com amortecimento não-linear (linha contínua) e equivalente (linha a tracejado) [6]

O valor do coeficiente de amortecimento equivalente de uma estrutura com amortecimento não-linear pode ser avaliado utilizando a expressão (2.18) [5], [16]:

$$\xi_{sd} = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (2.18)$$

$W_D$ : energia dissipada para o deslocamento máximo do sistema

$W_S$ : energia elástica armazenada para o deslocamento máximo do sistema

A expressão tem melhores resultados, para uma força atuante com frequência igual à frequência fundamental da estrutura, embora possa ser utilizada para outras frequências [5]. Neste contexto “melhores resultados” significa que utilizando o coeficiente de amortecimento equivalente calculado dessa forma a dissipação de energia será mais semelhante à da estrutura com amortecimento não-linear.

Para o 1º modo de vibração de uma estrutura, a expressão anterior pode ser utilizada para obter o valor do coeficiente de amortecimento equivalente fornecido por um conjunto de dissipadores viscosos com igual valor de  $\alpha < 1$ , dado pela expressão (2.19) [16]:

$$\xi_{sd1} = \frac{\sum_{j=1}^{N_D} (2\pi)^{\alpha_j} T_1^{2-\alpha_j} \lambda_j C_{dj} f_j^{1+\alpha_j} d_{roof}^{\alpha_j-1} \phi_{rj1}^{1+\alpha_j}}{8 \pi^3 \sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}^2} \quad (2.19)$$

Em que:

$d_{roof}$ : deslocamento de controlo máximo (nesta dissertação será o deslocamento longitudinal do tabuleiro)

$C_{dj}$ : constante de amortecimento de cada dissipador j instalado

$\alpha$ : expoente da velocidade da lei de amortecimento dos dissipadores instalados

$T_1$ : período fundamental da estrutura (nesta dissertação é considerado como o período de vibração longitudinal de cada ponte pois só é avaliada a resposta dinâmica longitudinal)

$f_j$ :  $\cos \theta_j$ , sendo  $\theta_j$  o ângulo de cada dissipador j com a horizontal

$\phi_{rj1}$ : deslocamento modal relativo dos extremos de cada dissipador j para o 1º modo de vibração

$\phi_{i1}$ : deslocamento modal de cada massa concentrada no grau de liberdade i, para o 1º modo de vibração

$m_i$ : massa concentrada da estrutura no grau de liberdade i

$\lambda_j = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)}$ , para cada dissipador j, em que  $\Gamma$  é a função Euler Gamma

i: número de cada massa

j: número do dissipador

### 2.3.7 Resposta da Estrutura com Representação Temporal da Ação Sísmica

Para ações sísmicas a aceleração do solo varia aleatoriamente no tempo. Deste modo não é possível obter uma solução analítica para a resposta da estrutura e são usados métodos de integração numérica no domínio do tempo para calcular a resposta dinâmica de estruturas.

Um dos métodos de integração numérica no tempo utilizados é o método de Newmark, o qual pode ser usado com amortecimento linear ou não linear. Para o cálculo da resposta dinâmica com amortecimento não-linear os efeitos não-lineares são assumidos como constantes para cada instante de tempo. As equações linearizadas são resolvidas e as propriedades do sistema são recalculadas para o instante de tempo seguinte. Os incrementos de tempo devem ser pequenos de forma a assegurar convergência. [17]

O método de cálculo mostrado na figura 25 pode ser utilizado para obter a resposta dinâmica de estruturas com amortecimento não-linear [7] :

$$\begin{aligned}
 m\ddot{u}(t) + c \operatorname{sgn}[\dot{u}(t)]|\dot{u}(t)|^\alpha + ku(t) &= p(t) \\
 u_{k+1} &= u_k + \Delta t \dot{u}_k + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{u}_k \\
 \dot{u}_{k+1}^1 &= \dot{u}_k + \ddot{u}_k \Delta t \\
 \ddot{u}_{k+1}^1 &= m^{-1} [p_{k+1} - c \operatorname{sgn}(\dot{u}_{k+1}^1) |\dot{u}_{k+1}^1|^\alpha - ku_{k+1}] \\
 i = 1, n \quad \left\{ \begin{aligned}
 \dot{u}_{k+1}^{i+1} &= \dot{u}_k + \frac{1}{2} (\ddot{u}_k + \ddot{u}_{k+1}^i) \Delta t \\
 \ddot{u}_{k+1}^{i+1} &= m^{-1} [p_{k+1} - c \operatorname{sgn}(\dot{u}_{k+1}^{i+1}) |\dot{u}_{k+1}^{i+1}|^\alpha - ku_{k+1}] \\
 \varepsilon^{i+1} &= |\ddot{u}_{k+1}^{i+1} - \ddot{u}_{k+1}^i|
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Figura 25 – Equações do método de Newmark considerando amortecimento não-linear [7]

Em que:

m: massa da estrutura

c: constante do amortecimento na expressão de amortecimento não-linear

$\alpha$ : expoente da velocidade na expressão de amortecimento não-linear

k: rigidez da estrutura

i: número da iteração

$u_k$ : deslocamento da estrutura no step k

$\dot{u}_k$ : velocidade da estrutura no step k

$\ddot{u}_k$ : aceleração da estrutura no step k

$p_k$ : forças aplicadas no step k

$\varepsilon$ : erro da iteração

$\Delta t$ : incremento de tempo de cada step

n: número máximo de iterações

## 3. Cálculo das Constantes de Amortecimento

### 3.1 Introdução

A força de amortecimento de um dissipador viscoso não-linear é dada pela expressão (2.7) já mencionada no subcapítulo (2.3.1).

A força de amortecimento de um dissipador viscoso não-linear com amortecimento equivalente é calculada de acordo com a expressão (3.1):

$$F_{d,eq}(t) = C_{eq} \times v = (2 \times \xi_{V1} \times m \times \omega) \times v \quad (3.1)$$

Em que:

$F_{d,eq}$ : força de amortecimento do dissipador viscoso não-linear com amortecimento equivalente

$C_{eq}$ : constante de amortecimento equivalente do dissipador viscoso não-linear

$\xi_{V1}$ : coeficiente de amortecimento equivalente do dissipador viscoso não-linear, calculado pela expressão (D.5) do prEN 1998-1 [1]

$\omega$ : frequência angular do modo de vibração longitudinal da ponte

Para vários dissipadores não-lineares com valor de  $\alpha$  igual, e constantes de amortecimento  $C_{d1}, C_{d2}, C_{d3}, \dots, C_{dn}$ , atuando em paralelo na direção do eixo longitudinal da ponte, a força total de amortecimento pode ser calculada de acordo com a expressão (3.2):

$$F_{DV}(t) = (C_{d1} + C_{d2} + C_{d3} + C_{dn}) \times \text{sgn}(v) \times |v|^\alpha = C_{d,tot} \times \text{sgn}(v) \times |v|^\alpha \quad (3.2)$$

Em que:

$C_{d1}, C_{d2}, C_{d3}, \dots, C_{dn}$  são as constantes de amortecimento dos dissipadores não-lineares com igual  $\alpha$

$C_{d,tot}$  é a soma das constantes de amortecimento dos dissipadores não-lineares com igual  $\alpha$

Da mesma forma a força total de amortecimento dos dissipadores não-lineares com amortecimento equivalente é dada pela expressão (3.3):

$$F_{DV,eq}(t) = (C_{eq1} + C_{eq2} + C_{eq3} + C_{eqn}) \times v = C_{eq,tot} \times v = (2 \times \xi_{V1} \times m \times \omega) \times v \quad (3.3)$$

Em que:

$C_{eq1}, C_{eq2}, C_{eq3}, C_{eqn}$  são as constantes de amortecimento dos dissipadores não-lineares com amortecimento equivalente

$C_{eq,tot}$  é a soma das constantes de amortecimento dos dissipadores não-lineares com amortecimento equivalente



A resposta dinâmica longitudinal das pontes com dissipadores analisadas foi calculada com o programa SAP2000 considerando uma modelação simplificada, equivalente à mostrada na figura 12, com um oscilador com um grau de liberdade correspondente ao deslocamento longitudinal do tabuleiro. A rigidez  $k_{est}$  deste modelo corresponde à rigidez longitudinal de cada ponte,  $c_{est}$  à constante de amortecimento longitudinal de cada ponte, e  $m$  à massa do tabuleiro de cada ponte e parte da massa dos pilares.

Os dissipadores viscosos não-lineares são modelados considerando para a soma das constantes de amortecimento dos mesmos  $C_{d,tot}$  ou  $C_{eq,tot}$ , para as modelações com amortecimento não-linear ou amortecimento equivalente, respetivamente. Os dissipadores viscosos não-lineares são colocados na horizontal, paralelamente ao eixo longitudinal da ponte, na zona dos encontros. Os encontros são considerados como indeformáveis.

Foram considerados cinco valores diferentes de  $\alpha$  dos dissipadores variando entre 0.1 e 0.5, e quatro estruturas de pontes com períodos de vibração fundamental diferentes, variando entre 1(s) a 4(s), com características mostradas na tabela 1. Cada ponte é avaliada com cada um dos 5 dissipadores não-lineares. Como mencionado anteriormente, a escolha dos períodos fundamentais das pontes entre 1(s) e 4(s) justifica-se uma vez que é nesta gama de valores que é possível obter uma redução maior do deslocamento máximo da vibração longitudinal das pontes adicionando amortecimento à estrutura. A escolha dos valores de  $\alpha$  entre 0.1 e 0.5 deve-se ao facto de ser com esta gama de valores mais baixos de  $\alpha$  que geralmente os dissipadores viscosos para aplicação em pontes são adotados.

*Tabela 1 - Características das 4 estruturas de pontes avaliadas*

Modelo	P1	P2	P3	P4
T (s)	1.0	2.0	3.0	4.0
m (ton)	5000	5000	5000	5000
$k_{est}$ (kN/m)	197392	49348	21932	12337

## 3.2 Cálculo do Coeficiente de Amortecimento Equivalente

A equação de equilíbrio dinâmico da vibração longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos é definida pela expressão (3.4):

$$m \times \ddot{u}(t) + C_{d,tot} \times \text{sgn}(\dot{u}) \times |\dot{u}|^\alpha + c_{est} \times \dot{u}(t) + k_{est} \times u(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.4)$$

$u$  : deslocamento relativo longitudinal do tabuleiro da ponte / deslocamento relativo dos extremos dos dissipadores

$\dot{u}$ : velocidade relativa longitudinal do tabuleiro da ponte / velocidade relativa dos extremos dos dissipadores

$\ddot{u}$ : aceleração relativa longitudinal do tabuleiro da ponte/ aceleração relativa dos extremos dos dissipadores

$\ddot{u}_g$ : aceleração do solo

O valor do coeficiente de amortecimento equivalente na direção longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos não-lineares,  $\xi_{eff1}$ , pode incluir o efeito da plastificação dos membros estruturais durante a ação sísmica. No entanto, como nesta dissertação o objetivo é obter um dimensionamento da estrutura em regime elástico, esse efeito não é considerado.

Os valores do coeficiente de amortecimento equivalente na direção longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos não-lineares,  $\xi_{eff1}$  (expressão D.4), e do coeficiente de amortecimento equivalente desses dissipadores isoladamente,  $\xi_{V1}$  (expressão D.5), são dados pelas expressões (3.5) e (3.6) respetivamente [1]:

$$\xi_{eff1} = \xi_I \frac{\left(\frac{T_1}{T_{p1}}\right)}{\sqrt{1 + (\mu_f - 1) \frac{2\xi_{V1}}{\eta_{loss}}}} + \xi_{V1} \left[ \frac{\mu_f}{1 + (\mu_f - 1) \left(\frac{2\xi_{V1}}{\eta_{loss}}\right)} \right]^{1-0.5\alpha} + \xi_H \quad (3.5)$$

$$\xi_{V1} = \frac{\sum j (2\pi)^\alpha T_1^{2-\alpha} C_{dj} (2,1 + 1,9 e^{-0.6\alpha}) (\cos \theta_j \phi_{rj1}) (\cos \theta_j \phi_{rj1})^{1+\alpha} d_{roof1e}^{\alpha-1}}{8 \pi^3 \sum i (m_i \phi_{i1}^2)} \quad (3.6)$$

Em que:

$d_{roof1e}$ : deslocamento longitudinal máximo do tabuleiro da ponte para a ação sísmica atuante

$\xi_I$ : coeficiente de amortecimento intrínseco da ponte sem plastificação dos membros estruturais

$\xi_H$ : coeficiente de amortecimento adicional da ponte devido ao comportamento hysterético pós-cedência dos membros estruturais

$\xi_{V1}$ : coeficiente de amortecimento equivalente do conjunto de dissipadores viscosos não-lineares

$\xi_{eff1}$ : coeficiente de amortecimento equivalente na direção longitudinal de uma ponte com dissipadores viscosos não-lineares

$\phi_{i1}$ : deslocamento modal do modo de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte

$\phi_{rj1}$ : deslocamento modal relativo dos extremos de cada dissipador j associado ao modo de vibração longitudinal da ponte

$\mu_f$ : coeficiente de ductilidade

$\theta_j$ : ângulo de cada dissipador j com a horizontal

$\eta_{loss}$ : fator que depende do amortecimento da estrutura

$T_1$ : período da vibração longitudinal da ponte

$T_{p1}$ : período da vibração longitudinal da ponte só com elementos primários

$C_{dj}$ : constante de amortecimento de cada dissipador j

$m_i$ : massa concentrada correspondente ao grau de liberdade i

i: número de cada massa concentrada correspondente ao grau de liberdade i

j: número do dissipador

Como o modelo utilizado só tem um grau de liberdade e os encontros foram considerados indeformáveis, então:

$$\phi_{i1} = \phi_{rj1} = 1$$

No modelo foi assumido que os dissipadores estavam colocados na horizontal pelo que o termo  $\cos\theta_j$  resulta igual à unidade.

O valor do coeficiente de amortecimento equivalente do conjunto de dissipadores viscosos não-lineares para estas condições foi, portanto, calculado pela expressão (3.7):

$$\xi_{v1} = \frac{(2\pi)^\alpha T^{2-\alpha} C_{d,tot} (2,1 + 1,9e^{-0,6\alpha}) d_{roof\ 1e}^{\alpha-1}}{8 \pi^3 m} \quad (3.7)$$

Esta expressão não tem em conta o efeito da componente elástica dos dissipadores,  $k_d$ , pois a sua rigidez é considerada infinita.

Considera-se ainda que:

$\mu_f = 1$  e  $\xi_H = 0$ , uma vez que a estrutura fica em regime elástico,

e que  $T_1 = T_{p1}$

O valor do coeficiente de amortecimento equivalente na direção longitudinal de uma ponte com dissipadores não-lineares para estas condições foi calculado pela expressão (3.8):

$$\xi_{eff1} = \xi_I + \xi_{v1} \quad (3.8)$$

O coeficiente de amortecimento equivalente intrínseco da estrutura  $\xi_I$ , que depende do material da estrutura, é neste caso considerado igual a 2% para uma ponte em betão armado, como aproximação, valor reduzido em relação aos 5% geralmente usados uma vez que se considera que há fendilhação do betão durante o sismo.

Definindo-se qual o valor do coeficiente de amortecimento equivalente da ponte com dissipadores,  $\xi_{eff1}$ , que se pretende obter, o valor do coeficiente de amortecimento equivalente do conjunto dos dissipadores instalados necessário foi calculado pela expressão (3.9):

$$\xi_{v1} = \xi_{eff1} - \xi_I \quad (3.9)$$

Após obter  $\xi_{v1}$  foram calculados os valores  $C_{d,tot}$  e  $C_{eq,tot}$  dos dissipadores, utilizados nas modelações com amortecimento não linear e amortecimento equivalente, respetivamente.

O valor da deformação longitudinal máxima do tabuleiro,  $d_{roof\ 1e}$ , que é necessário para calcular  $C_{d,tot}$ , foi obtido com o software *SAP2000* para cada caso, através de integração numérica no tempo (*time-history analysis*) com o método de Newmark, para uma ação sísmica definida através de um acelerograma representativo de um sismo atuante na zona considerada (1.3), com características descritas no capítulo 3.4.

### 3.3 Modelação da Estrutura

Para a modelação das pontes com dissipadores com amortecimento não-linear no programa *SAP 2000* foi usado um elemento do tipo *link* designado por “*Damper-Exponential*”, constituído por uma mola e um amortecedor viscoso em série. [24]

A rigidez da mola deve ser suficientemente alta para poder ser considerada infinita e não afetar os resultados, podendo o valor necessário desta rigidez ser obtido aumentando-se o mesmo até que a diferença de resultados seja nula. Neste caso foi usado um valor de rigidez da mola 10 vezes superior ao da rigidez lateral da estrutura. Este valor não deve ser demasiado alto uma vez que pode causar problemas numéricos. [24]

Nas modelações simplificadas com 1 grau de liberdade foi utilizado um único elemento *link* “*Damper-Exponential*”, com constante de amortecimento igual à soma das constantes de amortecimento dos dissipadores instalados,  $C_{d,tot}$ , para cada caso considerado.

Para a modelação das pontes com dissipadores com amortecimento equivalente foi usado um elemento do tipo *link*, designado por “*Linear*”, constituído por uma mola e um amortecedor em paralelo, com valor da rigidez da mola, igual a zero.

Nas modelações simplificadas com 1 grau de liberdade foi utilizado um único elemento *link* “*Linear*” com constante de amortecimento igual à soma das constantes de amortecimento dos dissipadores instalados com amortecimento equivalente,  $C_{eq,tot}$ , para cada caso considerado.

### 3.4 Representação da Ação Sísmica

A ação sísmica foi representada através de um acelerograma gerado artificialmente, fornecido pelo professor Luís Guerreiro, e mostrado na figura 27, correspondente a um sismo na zona 1.3 do país, para uma estrutura de classe de importância II ( $\gamma_I = 1$ ), fundada em solo do tipo C. O sismo condicionante é do tipo 1 para os quatro períodos da estrutura da ponte considerados.

O valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A,  $a_{gR}$ , tem o valor de 1.5 ( $m/s^2$ ) para aquela zona do país, e o valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A tem o valor  $a_g = a_{gR} \times \gamma_I = 1.5 (m/s^2)$ .

O valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo C tem o valor  $a_g \times S = 2.25 (m/s^2)$ , sendo os valores utilizados para este cálculo mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Características do sismo considerado

Sismo tipo 1, zona 1.3, solo C	
$a_{gR}$ (m/s <sup>2</sup> )	1.5
$\gamma_I$	1
$a_g$ (m/s <sup>2</sup> )	1.5
S	1.5
$S_{m\acute{a}x}$	1.6
$a_g$ m\acute{a}x (m/s <sup>2</sup> )	2.250

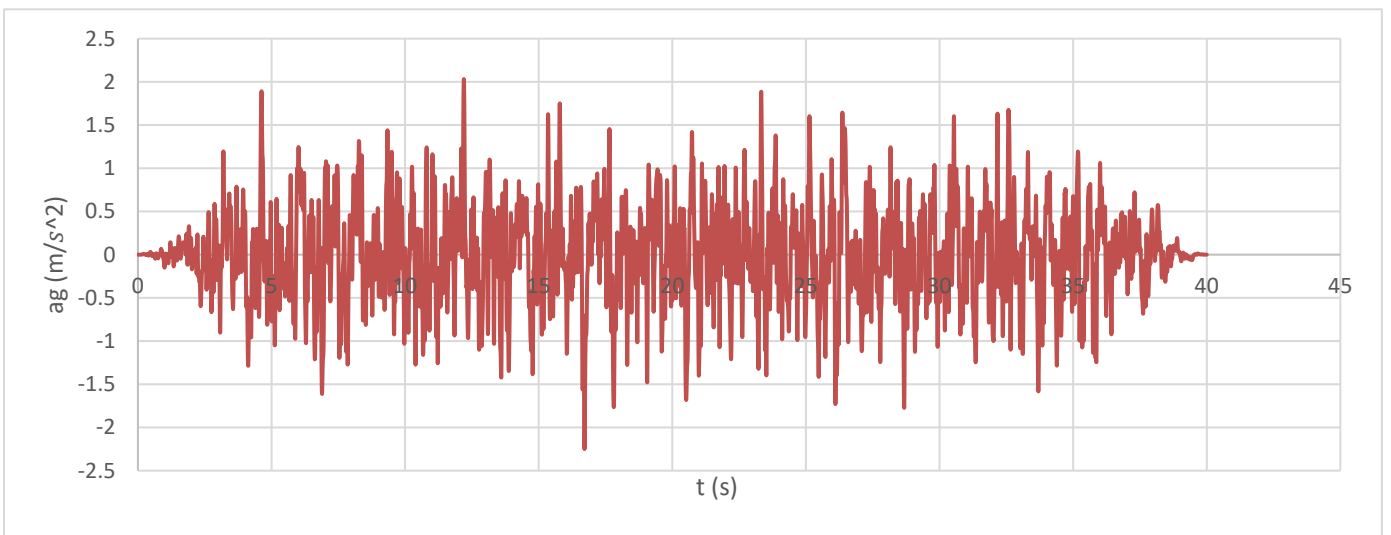


Figura 27 - Acelerograma do sismo considerado

### 3.5 Constantes de Amortecimento

Para testar a metodologia estabeleceu-se como objetivo atingir um valor de 20% para o coeficiente de amortecimento equivalente na direção longitudinal,  $\xi_{eff1}$ , das pontes com dissipadores.

Sendo o coeficiente de amortecimento intrínseco das 4 pontes em betão armado,  $\xi_I$ , igual a 2%, é necessário obter um valor de 18% para o coeficiente de amortecimento equivalente do conjunto dos dissipadores,  $\xi_{V1}$ .

Deste modo são calculados os valores da soma das constantes de amortecimento dos dissipadores com a modelação de amortecimento não-linear,  $C_{d,tot}$ , e os valores da soma das constantes de amortecimento dos dissipadores com a modelação de amortecimento equivalente,  $C_{eq,tot}$ , pela forma mencionada nos capítulos anteriores, valores estes que são mostrados nas tabelas 3 e 4, respetivamente.

São ainda mostrados na tabela 5 os valores das constantes de amortecimento,  $c_{est}$ , de cada ponte na direção longitudinal.

*Tabela 3 – Soma das constantes de amortecimento dos dissipadores sem amortecimento equivalente*

$C_{d,tot} \text{ (kN. (s/m) }^\alpha\text{)}$					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	2060	2550	3150	3850	4680
2	880	1120	1400	1720	2140
3	670	840	1040	1250	1510
4	410	510	650	790	980

*Tabela 4 – Soma das constantes de amortecimento dos dissipadores com amortecimento equivalente*

$C_{eq,tot} \text{ (kN. (s/m) }^\alpha\text{)}$					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	11379	11352	11284	11331	11379
2	5783	5858	5740	5708	5713
3	3866	3858	3903	3847	3773
4	2901	2873	2944	2867	2844

Tabela 5 – Constante de amortecimento de cada ponte na direção longitudinal

$c_{est}$ (kN.s/m)	
T(s)	
1	1256,64
2	628,32
3	418,88
4	314,16

## 4. Avaliação da Resposta Estrutural

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos com o programa *SAP2000* da resposta dinâmica longitudinal das pontes com dissipadores viscosos não-lineares sob ação sísmica, utilizando as duas modelações para o amortecimentos mencionadas. A vibração longitudinal de cada ponte com dissipadores viscosos não-lineares para as duas modelações de amortecimento consideradas deve ser semelhante uma vez que há dissipação de energia equivalente.

Na modelação com amortecimento equivalente os dissipadores, modelados com elementos *link* “*Linear*”, têm  $\alpha=1$ , pois o amortecimento é linear.

Uma vez que se verifica haver uma diferença grande nas forças máximas dos dissipadores para os dois modelos de amortecimento considerados, estas são calculadas por um método alternativo. Neste método considera-se a expressão da força de amortecimento não-linear total dos dissipadores (3.2) com a velocidade obtida nos modelos com amortecimento equivalente. Deste modo, são obtidos resultados muito próximos aos obtidos com os modelos de amortecimento não-linear, usando à mesma apenas os resultados de uma análise dinâmica linear, como é o objetivo das expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1].

São avaliadas as seguintes grandezas:

- Deslocamento relativo máximo de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Velocidade relativa máxima de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Aceleração relativa máxima de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Força total máxima nos dissipadores

Os modelos de cada ponte com dissipadores foram calibrados para um coeficiente de amortecimento equivalente,  $\xi_{eff1}$  de 20%, considerando um amortecimento intrínseco da estrutura,  $\xi_I$ , de 2%.

Os resultados para cada uma das 4 grandezas avaliadas são apresentados da seguinte forma:

1ª tabela – resultados do modelo com amortecimento não-linear

2ª tabela – resultados do modelo com amortecimento equivalente

3ª tabela – diferença de resultados

Para cada grandeza avaliada são comparados os resultados, e no final do capítulo é feito um resumo dos resultados com algumas conclusões relevantes.



## 4.2 Comparação do Deslocamento Relativo Máximo de Vibração Longitudinal

Na Tabela 6 são indicados os valores do deslocamento relativo longitudinal máximo do tabuleiro de cada ponte obtidos através do modelo com amortecimento não-linear e na Tabela 7 são indicados os valores obtidos para as mesmas grandezas, mas desta vez através do modelo com amortecimento equivalente. Ambos os modelos foram calibrados para um coeficiente de amortecimento equivalente de cada ponte com dissipadores,  $\xi_{eff1}$ , de 20%, considerando um amortecimento intrínseco de cada ponte,  $\xi_I$ , de 2%. Na Tabela 8 são apresentadas as diferenças percentuais entre os resultados obtidos com os dois modelos.

*Tabela 6 -Deslocamento relativo longitudinal máximo obtido no modelo com amortecimento não-linear*

$u_{max}$ (mm)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	30,2	31,1	32,3	33,0	33,6
2	49,8	50,8	53,3	54,0	55,7
3	86,3	89,6	90,7	91,8	95,3
4	91,8	92,6	92,5	93,0	94,3

*Tabela 7 – Deslocamento relativo longitudinal máximo obtido no modelo com amortecimento equivalente*

$u_{max}$ (mm)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	36,2	36,3	36,2	36,2	36,2
2	60,6	60,8	60,8	61,0	61,2
3	98,0	97,5	97,0	97,0	97,9
4	95,0	95,3	94,7	95,0	95,2

*Tabela 8 - Diferença percentual entre os deslocamentos obtidos com ambos os modelos*

diferença $u_{max}$ (%)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	16,59	14,31	10,59	8,85	7,24
2	17,79	16,49	12,29	11,54	9,05
3	11,88	8,08	6,49	5,36	2,66
4	3,34	2,85	2,35	2,06	1,01

Para as 4 pontes a menor diferença percentual do deslocamento relativo longitudinal máximo do tabuleiro para ambos os modelos ocorre para  $\alpha=0.5$ , e a maior ocorre para  $\alpha=0.1$ , havendo um crescimento contínuo da diferença entre estes dois valores.

Avaliando as diferenças de resultados em termos do período de vibração longitudinal das pontes as maiores

diferenças obtêm-se para a estrutura de ponte com  $T=2(s)$  e as menores para a estrutura de ponte com  $T=4(s)$ .

Os gráficos com o deslocamento relativo longitudinal do tabuleiro de cada ponte com dissipadores ao longo do tempo para os dois tipos de amortecimento são mostrados no anexo.

Avaliando os valores absolutos do deslocamento longitudinal para a modelação com amortecimento não linear observa-se que há valores crescentes deste valor com o aumento do valor de  $\alpha$ , o que se justifica por haver menor dissipação de energia para maiores valores de  $\alpha$  quando se calcula a soma das constantes de amortecimento com base no valor do amortecimento equivalente das expressões D.4 e D.5. .

### 4.3 Comparação da Velocidade Relativa Máxima de Vibração Longitudinal

Na Tabela 9 são indicados os valores da velocidade relativa longitudinal máxima do tabuleiro de cada ponte obtidas através do modelo com amortecimento não-linear e na Tabela 10 são indicados os valores obtidos para as mesmas grandezas, mas desta vez através do modelo com amortecimento equivalente. Ambos os modelos foram calibrados para um coeficiente de amortecimento equivalente de cada ponte com dissipadores,  $\xi_{eff1}$ , de 20%, considerando um amortecimento intrínseco de cada ponte,  $\xi_I$ , de 2%. Na Tabela 11 são apresentadas as diferenças percentuais entre os resultados obtidos com os dois modelos.

Tabela 9 – Velocidade relativa máxima obtida no modelo com amortecimento não-linear

$\dot{u}_{max} (m/s)$					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	0,1787	0,1782	0,1814	0,1862	0,1914
2	0,2486	0,2446	0,2477	0,252	0,2537
3	0,2709	0,2752	0,2808	0,2889	0,2947
4	0,2874	0,2883	0,2884	0,2874	0,2903

Tabela 10 - Velocidade relativa máxima obtida no modelo com amortecimento equivalente

$\dot{u}_{max} (m/s)$					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	0,2211	0,2214	0,2208	0,2209	0,221
2	0,2613	0,2623	0,2621	0,2627	0,2626
3	0,3095	0,3097	0,3085	0,31	0,312
4	0,2857	0,2861	0,2852	0,2862	0,2865

Tabela 11 - Diferença percentual entre as velocidades obtidas com ambos os modelos

diferença $\dot{u}_{max}$ (%)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$
1	-23,727	-24,242	-21,720	-18,636	-15,465
2	-5,109	-7,236	-5,813	-4,246	-3,508
3	-14,249	-12,536	-9,865	-7,304	-5,870
4	0,592	0,763	1,110	0,418	1,309

Para as pontes com T= 1, 2 e 3 (s) a menor diferença da velocidade relativa máxima para ambas as expressões de amortecimento ocorre para  $\alpha=0.5$ . Para a estrutura da ponte com T= 4 (s) a menor diferença da velocidade máxima para ambas as expressões de amortecimento ocorre para  $\alpha=0.4$ .

Avaliando as diferenças de resultados em termos do período de vibração longitudinal das pontes as maiores diferenças obtêm-se para a estrutura de ponte com T=1(s) e as menores para a estrutura de ponte com T=4(s), não havendo uma variação uniforme da diferença de resultados com o aumento do período de vibração longitudinal das pontes.

Os gráficos com a velocidade relativa longitudinal do tabuleiro de cada ponte com dissipadores ao longo do tempo para os dois tipos de amortecimento são mostrados em anexo.

#### 4.4 Comparação da Aceleração Relativa Máxima de Vibração Longitudinal

Na Tabela 12 são indicados os valores da aceleração relativa longitudinal máxima do tabuleiro de cada ponte obtidas através do modelo com amortecimento não-linear e na Tabela 13 são indicados os valores obtidos para as mesmas grandezas, mas desta vez através do modelo com amortecimento equivalente. Ambos os modelos foram calibrados para um coeficiente de amortecimento equivalente da estrutura com dissipadores,  $\xi_{eff1}$ , de 20%, considerando um amortecimento intrínseco da estrutura,  $\xi_I$ , de 2%. Na Tabela 14 são apresentadas as diferenças percentuais entre os resultados obtidos com os dois modelos.

Tabela 12 - Aceleração relativa máxima obtida com modelo com amortecimento não-linear

$\ddot{u}_{max}$ (m/s <sup>2</sup> )					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$
1	2,23671	2,25287	2,28759	2,30324	2,3127
2	2,35665	2,35302	2,35703	2,36443	2,31806
3	2,24248	2,29857	2,27751	2,25288	2,26276
4	2,4392	2,42849	2,4176	2,36832	2,409

Tabela 13 - Aceleração relativa máxima obtida com modelo com amortecimento equivalente

$\ddot{u}_{max}$ (m/s <sup>2</sup> )					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	2,51809	2,51914	2,51662	2,51675	2,51722
2	2,33059	2,33312	2,3326	2,3341	2,33387
3	2,25841	2,25844	2,25831	2,25846	2,25863
4	2,36541	2,36662	2,36358	2,36687	2,36787

Tabela 14 – Diferença percentual entre as acelerações obtidas com ambos os modelos

diferença $\ddot{u}_{max}$ (%)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	12,580	11,819	10,012	9,270	8,843
2	-1,106	-0,846	-1,036	-1,283	0,682
3	0,710	-1,746	-0,843	0,248	-0,183
4	-3,025	-2,548	-2,234	-0,061	-1,707

Para as pontes com T= 1, 2 e 3 (s) a menor diferença da aceleração relativa máxima para ambas as expressões de amortecimento ocorre para  $\alpha=0.5$ . Para a estrutura da ponte com T= 4 (s) a menor diferença da velocidade máxima para ambas a expressões de amortecimento ocorre para  $\alpha=0.4$ .

Avaliando as diferenças de resultados em termos do período de vibração longitudinal das pontes as maiores diferenças obtêm-se para a ponte com T=1(s) e as menores para a ponte com T=3(s).

Os gráficos com a aceleração relativa longitudinal do tabuleiro de cada ponte com dissipadores ao longo do tempo para os dois tipos de amortecimento são mostrados em anexo.

## 4.5 Diferença de Força Máxima Nos Dissipadores

Na Tabela 15 são indicados os valores da força total máxima dos dissipadores obtidas através do modelo com amortecimento não-linear e na Tabela 16 são indicados os valores obtidos para as mesmas grandezas, mas desta vez através do modelo com amortecimento equivalente. Ambos os modelos foram calibrados para um coeficiente de amortecimento equivalente da estrutura com dissipadores,  $\xi_{eff1}$ , de 20%, considerando um amortecimento intrínseco da estrutura,  $\xi_I$ , de 2%. Na Tabela 17 são apresentadas as diferenças percentuais entre os resultados obtidos com os dois modelos.

Tabela 15 – Força máxima dos dissipadores obtida com modelo com amortecimento não-linear

$F_{DV\ máx}$ , dissipadores não-lineares (kN)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	1734,076	1805,992	1886,843	1965,225	2044,333
2	765,652	844,864	920,414	990,027	1077,649
3	587,959	648,884	710,326	760,666	818,801
4	361,917	397,61	447,396	479,695	527,399

Tabela 16 – Força máxima dos dissipadores obtida com modelo com amortecimento equivalente

$F_{DV\ máx}$ , dissipadores lineares (kN)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	2516,386	2513,642	2520,265	2519,923	2518,669
2	1511,076	1502,726	1504,431	1499,465	1500,242
3	1196,396	1194,754	1203,972	1192,494	1177,209
4	828,91	821,927	839,584	820,427	814,668

Tabela 17 - Diferença percentual das forças máximas dos dissipadores obtidas com ambos os modelos

diferença $F_{DV\ máx}$ (%)					
T(s) / $\alpha$	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha= 0.3$	$\alpha= 0.4$	$\alpha= 0.5$
1	-45,1	-39,2	-33,6	-28,2	-23,2
2	-97,4	-77,9	-63,5	-51,5	-39,2
3	-103,5	-84,1	-69,5	-56,8	-43,8
4	-129,0	-106,7	-87,7	-71,0	-54,5

Para as 4 pontes a diferença de força máxima nos dissipadores é menor para  $\alpha= 0.5$  e maior para  $\alpha=0.1$ , aumentado continuamente entre os dois valores.

Avaliando as diferenças de resultados em termos do período de vibração longitudinal das pontes as menores diferenças são para a ponte com período de vibração longitudinal  $T=1(s)$  e as maiores para  $T=4(s)$ , havendo uma variação uniforme da diferença de resultados com o aumento do período de vibração longitudinal das pontes.

Os gráficos com as forças nos dissipadores ao longo do tempo para os dois tipos de amortecimento são mostrados em anexo.

## 4.6 Diferença de Força Máxima Total Nos Dissipadores pelo método alternativo

Como referido no início do capítulo, foram calculadas adicionalmente as forças máximas nos dissipadores usando a expressão não-linear da força total dos dissipadores (3.2) com as velocidades obtidas nos modelos com amortecimento equivalente, mostradas na tabela 18. Na Tabela 19 são apresentadas as diferenças percentuais obtidas em relação aos valores obtidos nos modelos com amortecimento não-linear, da tabela 15.

Tabela 18 - Forças máximas nos dissipadores pelo método alternativo

$F_{DV\ máx}$ , método alternativo (kN)					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
T=1 (s)	1771,4	1886,1	2002,2	2104,5	2200,1
T=2 (s)	769,5	857,0	936,8	1007,7	1096,6
T= 3 (s)	595,9	664,5	730,8	782,4	843,4
T= 4 (s)	361,7	397,1	446,1	479,0	524,6

Tabela 19 - Diferença percentual entre as forças máximas

diferença $F_{DV\ máx}$ (%)					
	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,2$	$\alpha= 0,3$	$\alpha= 0,4$	$\alpha= 0,5$
T=1 (s)	-2,1	-4,2	-5,7	-6,6	-6,9
T=2 (s)	-0,5	-1,4	-1,7	-1,6	-1,7
T= 3 (s)	-1,3	-2,3	-2,8	-2,8	-2,8
T= 4 (s)	0,1	0,2	0,3	0,2	0,7

Conclui-se que a diferença de forças máximas dos dissipadores obtida desta forma alternativa é bastante mais baixa, podendo-se obter valores próximos das forças nos dissipadores nos modelos com amortecimento não-linear usando os resultados das modelações com amortecimento equivalente, como pretendido.

Os gráficos com as forças nos dissipadores calculadas por este método alternativo são mostrados no anexo.

## 4.7 Resumo dos Resultados

A diferença da resposta dinâmica longitudinal das pontes com dissipadores não-lineares modeladas com amortecimento não-linear e amortecimento equivalente, calculado a partir das expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1], depende do parâmetro  $\alpha$  dos dissipadores e do período de vibração longitudinal de cada

ponte, havendo no entanto resultados semelhantes para ambas as modelações nos casos avaliados. A menor diferença de resultados da resposta dinâmica longitudinal ocorre para os dissipadores com  $\alpha=0.5$ , com diferença de deslocamento máximo para as modelações com ambos os tipos de amortecimento entre 1.01 e 7.24 (%), e a maior diferença dos mesmos resultados ocorre para os dissipadores com  $\alpha=0.1$  com valores entre 3.34 e 16.59 (%). Estes resultados podem ser justificados uma vez que, tal como pode ser observado pelos gráficos de "Deslocamento relativo de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte - Força total nos dissipadores" para as modelações com amortecimento não-linear e amortecimento efetivo, que se apresentam no anexo, existe uma maior semelhança de áreas para ambas as curvas para valores altos de  $\alpha$ , e conseqüentemente, uma maior semelhança de dissipação de energia

Verifica-se também, para o sismo avaliado, que existe uma tendência para diminuir a diferença de deslocamento longitudinal máximo para ambas as modelações de amortecimento com o aumento do período de vibração longitudinal. Este resultado pode estar relacionado com o facto de a expressão (D.5) calcular o coeficiente de amortecimento efetivo dos dissipadores não-lineares para o ciclo de maior deslocamento e maior velocidade da estrutura, como mostrado no subcapítulo 2.3.6. Deste modo, se as amplitudes do deslocamento e velocidade da vibração longitudinal do tabuleiro ao longo do sismo tiverem em média valores afastados dos valores máximos considerados naquela expressão isso irá influenciar a semelhança de dissipação de energia quando este coeficiente de amortecimento efetivo é usado, sendo que a diferença média dos valores destas amplitudes em relação aos valores máximos considerados diminui com o aumento do período de vibração longitudinal. Esta diferença da dissipação de energia ao longo do sismo pode também afetar o valor do deslocamento relativo longitudinal máximo uma vez que este depende da energia acumulada pela estrutura previamente durante o sismo.

Ao contrário do deslocamento longitudinal máximo, a força máxima obtida utilizando o amortecimento efetivo aumenta com o aumento do período de vibração longitudinal de cada ponte. Novamente tal pode estar relacionado com a expressão (D.5) que considera, para cálculo do coeficiente de amortecimento efetivo, que a força atuante é do tipo sinusoidal com período de vibração igual ao do período fundamental da estrutura, como mencionado no subcapítulo 2.3.6. No entanto a aceleração do solo durante um sismo não é periódica e tem acelerações de maior intensidade com períodos entre 0.2 e 1 segundos aproximadamente, sendo portanto esta aproximação tanto mais afastada da realidade quanto mais afastado destes valores for o período de vibração longitudinal da ponte considerada

É importante ter em conta que alguns resultados podem ser dependentes do sismo atuante, uma vez que os valores máximos da aceleração do solo podem corresponder a períodos de vibração diferentes, dependendo do acelerograma do sismo utilizado, e que, portanto, para outros acelerogramas o período de vibração correspondente aos valores máximos da aceleração do solo poderá ser maior ou menor do que o do sismo considerado neste caso. Isto significa que, se for utilizado outro acelerograma artificial, os máximos ou mínimos da diferença do deslocamento máximo com amortecimento não-linear e efetivo podem não ocorrer para o mesmo período de vibração longitudinal. No entanto a tendência de diminuição desta diferença com o aumento do período de vibração longitudinal deve manter-se, assim como a maior semelhança de dissipação de energia para valores mais altos de  $\alpha$ .

A diferença de forças máximas nos dissipadores para ambos os modelos considerados é bastante grande. No entanto, avaliando as forças totais nos dissipadores utilizando a expressão de amortecimento não-linear

(3.2) com as velocidades de vibração obtidas nos modelos com amortecimento equivalente obtêm-se valores muito semelhantes aos dos modelos com amortecimento não-linear, que são os resultados pretendidos.

Face aos resultados sugere-se o método de 6 passos da figura 28 para cálculo da resposta dinâmica longitudinal de pontes com dissipadores não-lineares usando amortecimento equivalente.

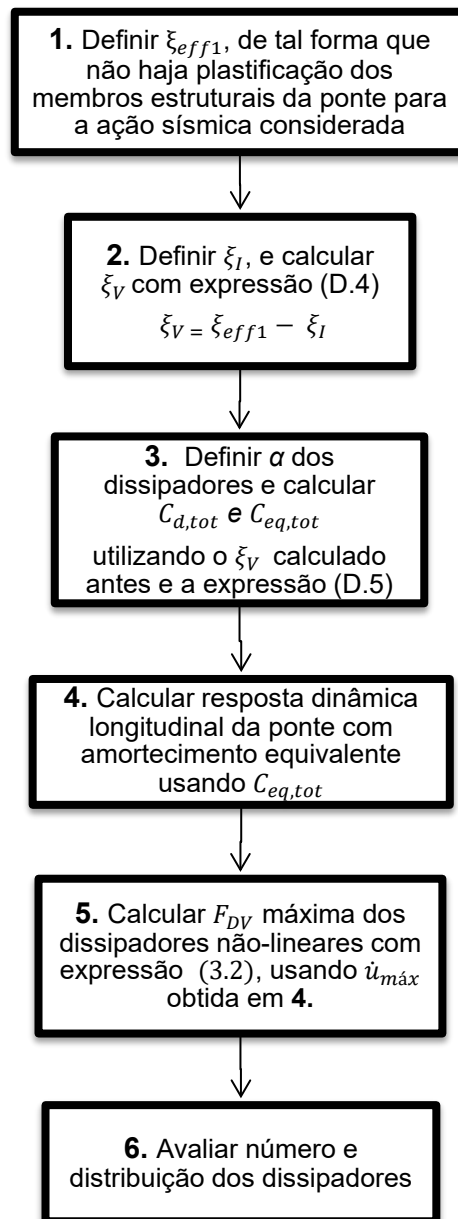


Figura 28 – Fluxograma com cálculo da resposta dinâmica longitudinal de pontes com dissipadores não-lineares usando amortecimento equivalente.





## 5. Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros

### 5.1 Considerações Finais

A diferença da resposta dinâmica longitudinal das pontes com dissipadores não-lineares modeladas com amortecimento não-linear e amortecimento equivalente, calculado a partir das expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1], depende do parâmetro  $\alpha$  dos dissipadores e do período de vibração longitudinal de cada ponte, havendo no entanto resultados semelhantes para ambas as modelações nos casos avaliados.

Deste modo, para os conjuntos de pontes com dissipadores não-lineares avaliados, conclui-se que são obtidos bons resultados utilizando os valores dos coeficientes de amortecimento equivalente  $\xi_{ff1}$  e  $\xi_{v1}$  calculados a partir das expressões (D.4) e (D.5) do prEN 1998-1 [1] para avaliar a resposta dinâmica longitudinal das mesmas.

A menor diferença de resultados da resposta dinâmica longitudinal ocorre para os dissipadores com  $\alpha=0.5$ , com diferença de deslocamento máximo para as modelações com ambos os tipos de amortecimento entre 1.01 e 7.24 (%), e a maior diferença dos mesmos resultados ocorre para os dissipadores com  $\alpha=0.1$  com valores entre 3.34 e 16.59 (%), sendo a razão, já mencionada antes, a existência de uma maior semelhança de dissipação de energia para valores altos de  $\alpha$ .

Deste modo, os esforços dependentes do deslocamento longitudinal máximo de cada ponte com dissipadores serão semelhantes para as modelações com ambos os amortecimentos, sendo a diferença tanto menor quanto maior for o valor de  $\alpha$ . Sendo o deslocamento longitudinal máximo obtido nos modelos com amortecimento não-linear sempre inferior ao obtido nos modelos com amortecimento equivalente, isto significa que é possível obter bons resultados com esta última modelação do amortecimento, calculado a partir das expressões (D.4) e (D.5), para fazer um dimensionamento de uma ponte com dissipadores não-lineares de  $\alpha < 1$  do lado da segurança, uma vez que os esforços dependentes do deslocamento longitudinal máximo da ponte serão maiores.

A força máxima dos dissipadores calculada nos modelos com amortecimento não-linear é sempre inferior à calculada nos modelos com amortecimento linear equivalente, o que significa que, utilizando-se na modelação com amortecimento linear equivalente dissipadores com  $\alpha=1$  com dissipação de energia equivalente, é possível obter uma diferença significativa da força total nos dissipadores usando valores de  $\alpha$  menores do que 1, entre 23.2 e 129 (%).

A diferença de forças máximas nos dissipadores para ambos os modelos considerados é bastante grande, no entanto, avaliando as forças nos dissipadores utilizando a expressão de amortecimento não-linear com as velocidades de vibração obtidas nos modelos com amortecimento equivalente obtêm-se valores muito semelhantes aos dos modelos com amortecimento não-linear, que são os resultados pretendidos.

## 5.2 Desenvolvimentos Futuros

Sugere-se como trabalhos futuros ser desenvolvida uma forma simplificada de avaliar os esforços máximos em pontes com dissipadores viscosos não lineares nos encontros, incluindo a zona do tabuleiro com ligação aos encontros. Podem ser consideradas outras condições diferentes das usadas nesta dissertação para o cálculo do amortecimento equivalente, tal como incluir deformação da componente elástica dos dissipadores ou da zona dos apoios como sendo diferente de zero.

Adicionalmente, podem ser avaliadas as expressões (D.4) e (D.5) quando aplicadas ao amortecimento da vibração de edifícios sujeitos a sismos. Nesta situação deve ser considerado o efeito dos modos de vibração superiores ao modo de vibração fundamental uma vez podem afetar bastante o cálculo da resposta dinâmica do edifício caso hajam vários graus de liberdade, nomeadamente os modos de vibração com período inferior a 0.5 segundos nos quais os dissipadores viscosos podem acrescentar rigidez à estrutura, devendo este efeito ser considerado na modelação.

## Referências

- [1] prEN 1998-1, Documento Provisório do Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, n.d
- [2] NP EN 1998-1, Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, 2010.
- [3] A. Hwang, Viscous Dampers: Practical Application Issues for the Structural Engineer, 1998, Dissertação de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology
- [4] S. Infanti, T. Tsiknias, M. Castellano, F. Tomaselli, Viscous dampers: Recent Major Applications In European Bridges, in: 6th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, 2006.
- [5] A. Chopra, Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, 5th ed., Pearson, 2020.
- [6] R. Clough, J. Penzien, Dynamics of Structures, 3rd ed., Computers & Structures, Inc., 1995.
- [7] G. Terenzi, Dynamics of SDOF Systems with Nonlinear Viscous Damping, Journal of Engineering Mechanics. 125-8 (1999).
- [8] K. Tsai, H. Chen, C. Hong, Y. Su, Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. Earthquake spectra, Earthquake Spectra. 9-3 (1993).
- [9] A. Filiatrault, S. Cherry, Seismic design spectra for friction-damped structures, Journal of Structural Engineering. 116-5 (1990).
- [10] K. Shen, T. Soong, Modeling of viscoelastic dampers for structural applications, Journal of Engineering Mechanics. 121-6 (1995).
- [11] M. Constantinou, M. Symans, Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers, 1992, National Center for Earthquake Engineering Research
- [12] A. Seleemah, M. Constantinou, Investigation of Seismic Response of Buildings With Linear and Nonlinear Fluid Viscous Dampers , 1997, National Center for Earthquake Engineering Research
- [13] Bandini L, [https://www.csi-italia.eu/academy/dissipazione\\_sismica/modellazione\\_ed\\_analisi\\_controventi\\_dissipativi/](https://www.csi-italia.eu/academy/dissipazione_sismica/modellazione_ed_analisi_controventi_dissipativi/) Add publication details, Dissipazione Supplementare Di Energia Ad Opera Di Controventi Dissipativi. (n.d.).
- [14] I. Brás, Otimização da distribuição de sistemas de dissipação de energia em edifícios altos, 2015, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- [15] S. Wang, Enhancing Seismic Performance of Tall Buildings by Optimal Design of Energy-Dissipation Devices, 2017, Tese de de Doutoramento, University of California
- [16] P. Diotallevi, L. Landi, A. Dellavalle, A Methodology For The Direct Assessment Of The Damping Ratio Of Structures Equipped With Nonlinear Viscous Dampers, Journal of Earthquake Engineering. 16-9 (2012).
- [17] J. Conde, Seismic Response of Structures Equipped With Passive Energy Dissipation Systems Using Simplified Methods Based on Equivalent Effective Properties, Tese de Doutoramento, Universidad Politécnica de Madrid, 2020.
- [18] A. Rustum, Evaluating the Retrofit of Highway Bridges Using Fluid Viscous Dampers, 2012,

- [19] M. Spizzuoco, G. Serino, C. Onorii, Seismic Protection Of Bridges Using Viscous Dampers, in: WIT Transactions on The Built Environment, WIT Press, 2005.
- [20] Quinhones A, Ponte Ferroviária Com Pré-esforço Extradorsal Projeto base e Estudos Especiais, 2014, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
- [21] F. Virtuoso, L. Guerreiro, J. Azevedo, Modelling The Seismic Behaviour Of Bridges With Viscous Dampers, in: Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (12WCEE2000), 2000.
- [22] F. Tomaselli, P. Baldo, F. Pimenta, Loureiro Viaduct Seismic Protection: Testing of Non-linear Viscous Dampers, in: 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, 2004.
- [23] Takewaki I., Critical Excitation for Earthquake Energy Input Rate, in: Critical Excitation Methods in Earthquake Engineering, 2nd ed., Butterworth Heinemann, 2013.
- [24] CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®, Computers & Structures, Inc, 2016.



# Anexos

## A.1 Tabelas

As tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 , apresentadas pela seguinte ordem, são retiradas da NP EN 1998-1 [2]:

- Valores de aceleração máxima de referência do solo para solo do tipo A as várias zonas sísmicas do país
- Parâmetros que descrevem os espectros de resposta elástica de tipo 1
- Parâmetros que descrevem os espectros de resposta elástica de tipo 2
- Coeficientes de importância de estruturas

*Tabela A.1 - Valores de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A nas várias zonas sísmicas do país*

Acção sísmica Tipo 1		Acção sísmica Tipo 2	
Zona Sísmica	$a_{gr}$ (m/s <sup>2</sup> )	Zona Sísmica	$a_{gr}$ (m/s <sup>2</sup> )
1.1	2,5	2.1	2,5
1.2	2,0	2.2	2,0
1.3	1,5	2.3	1,7
1.4	1,0	2.4	1,1
1.5	0,6	2.5	0,8
1.6	0,35	-	-

*Tabela A.2 - Parâmetros que descrevem os espectros de resposta elástica de tipo 1*

Tipo de terreno	$S_{max}$	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,0	0,1	0,6	2,0
B	1,35	0,1	0,6	2,0
C	1,6	0,1	0,6	2,0
D	2,0	0,1	0,8	2,0
E	1,8	0,1	0,6	2,0

*Tabela A.3 - Parâmetros que descrevem os espectros de resposta elástica de tipo 2*

Tipo de terreno	$S_{max}$	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,0	0,1	0,25	2,0
B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,3	2,0
E	1,8	0,1	0,25	2,0

*Tabela A.4 – Coeficientes de importância de estruturas*

Classe de Importância	Acção sísmica Tipo 1	Acção sísmica Tipo 2	
		Continente	Açores
I	0,65	0,75	0,85
II	1,00	1,00	1,00
III	1,45	1,25	1,15
IV	1,95	1,50	1,35

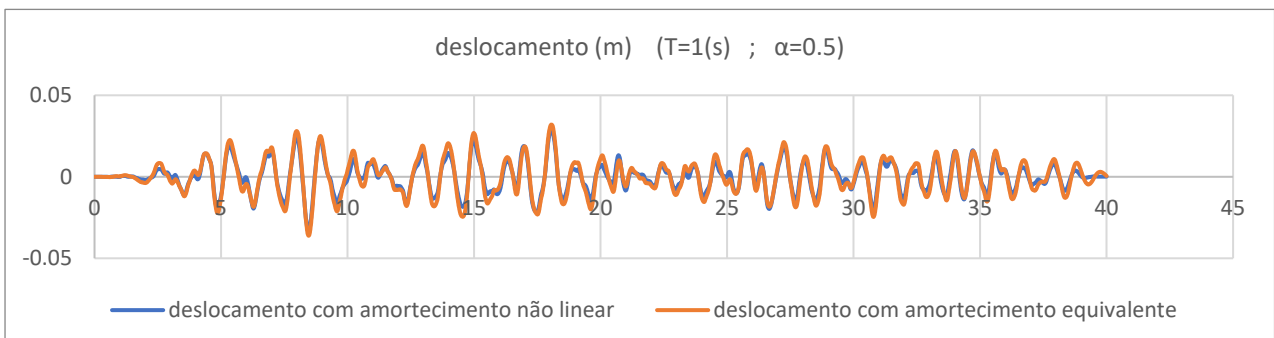
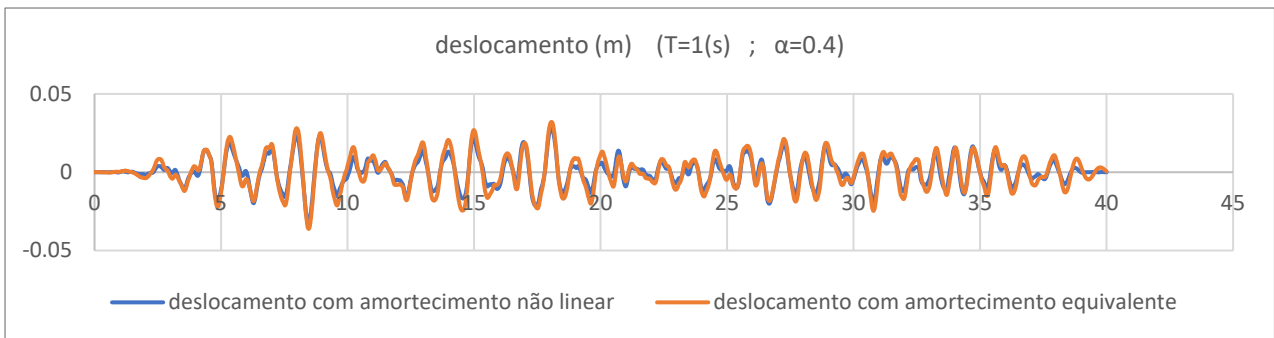
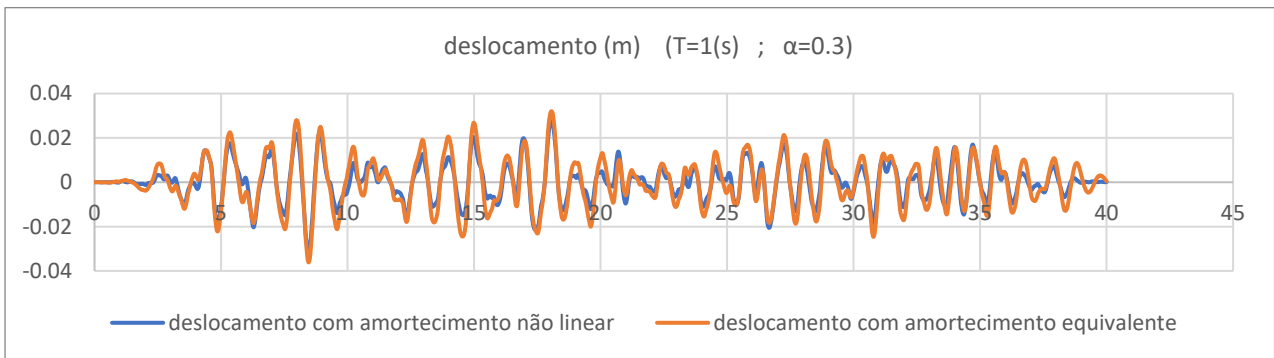
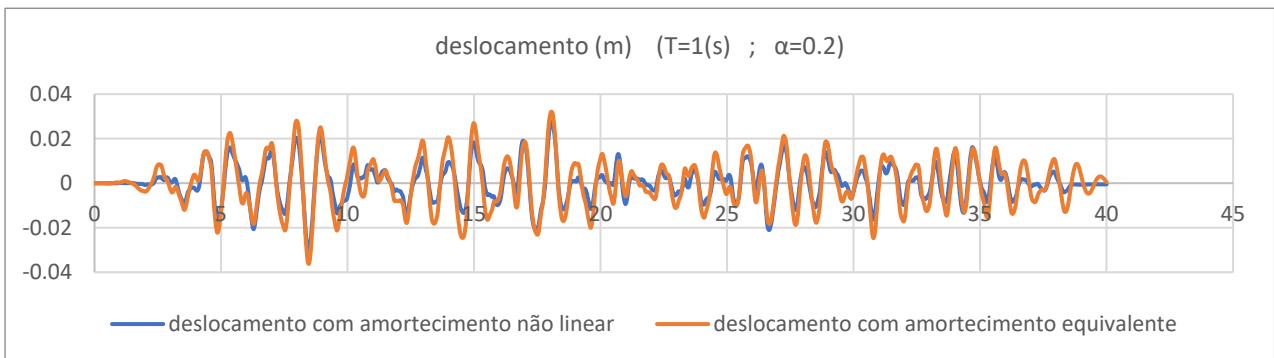
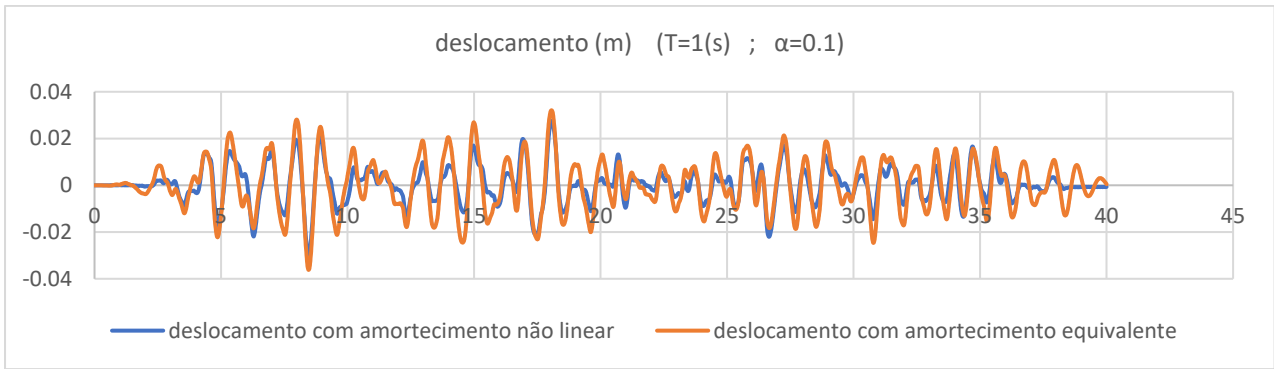


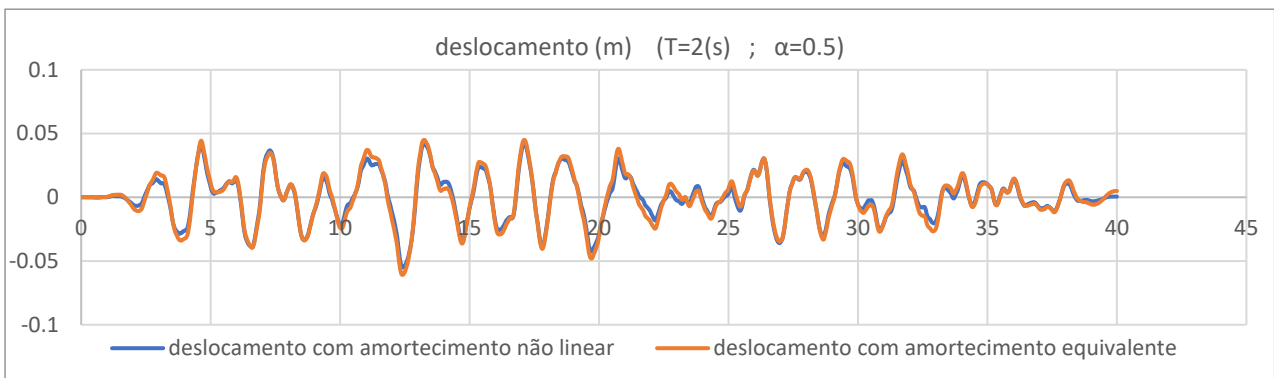
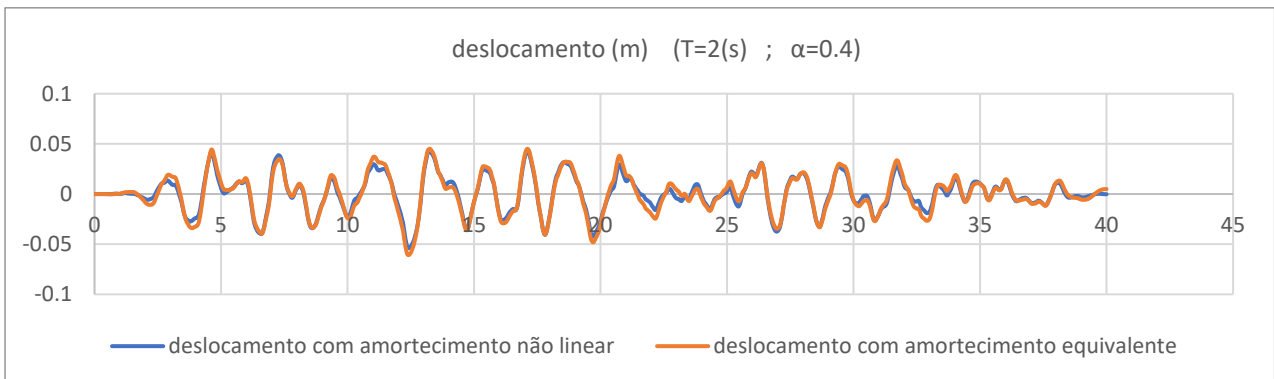
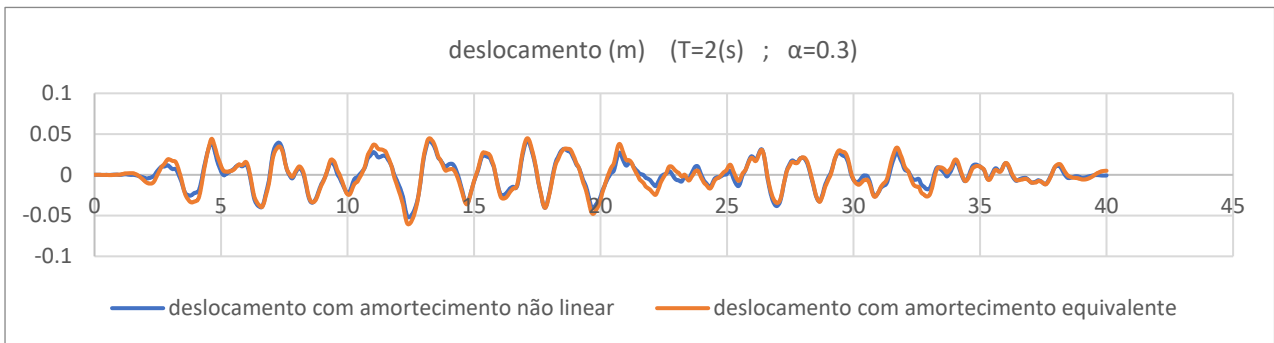
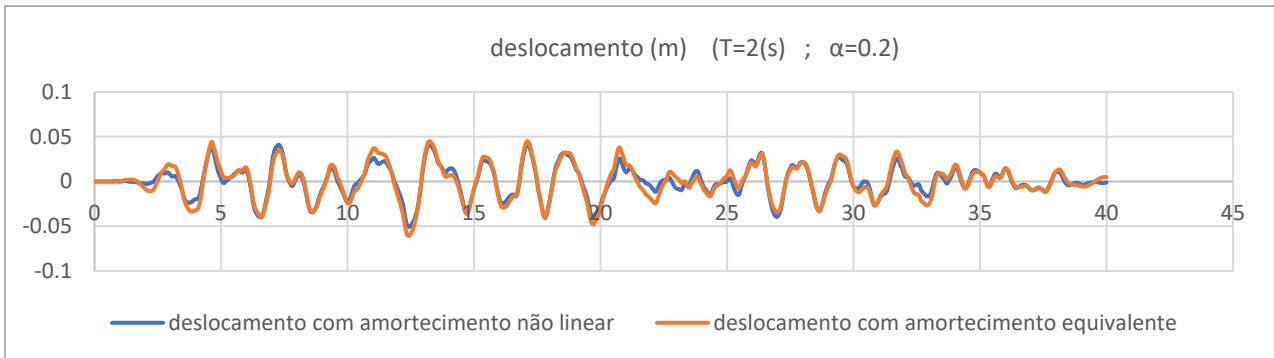
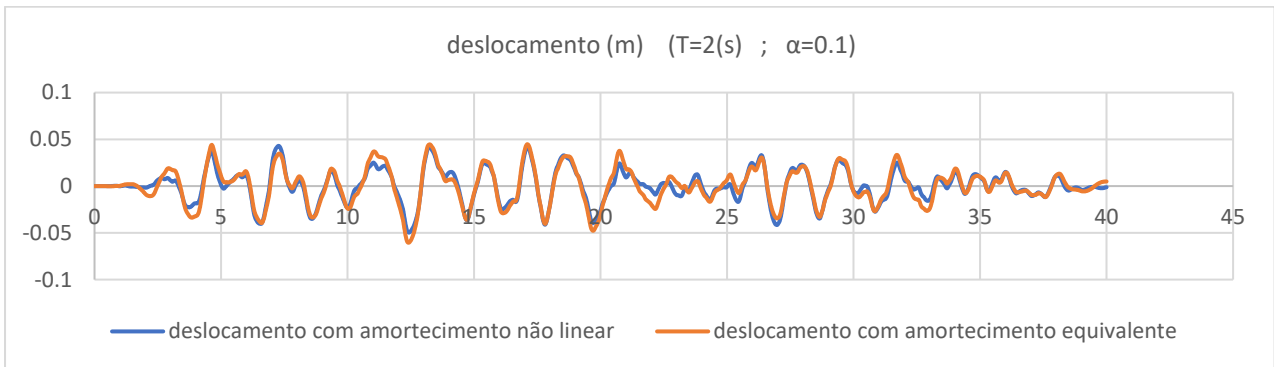
## A.2 Gráficos

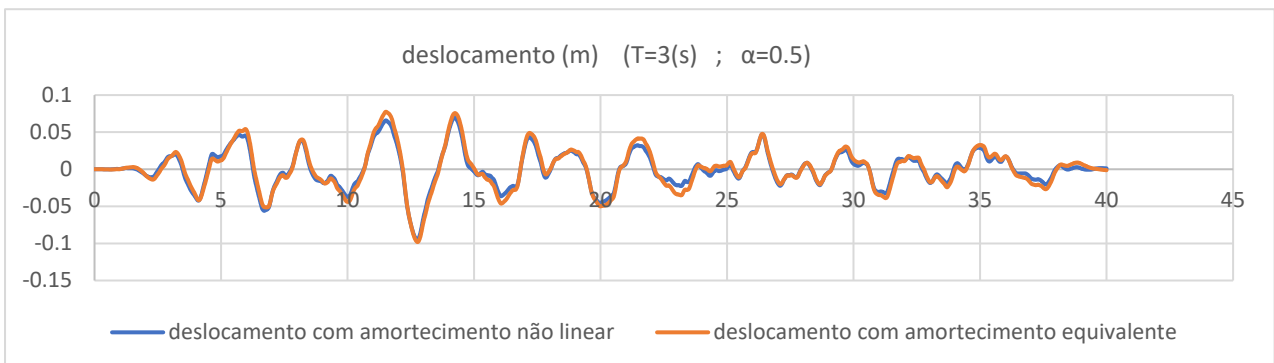
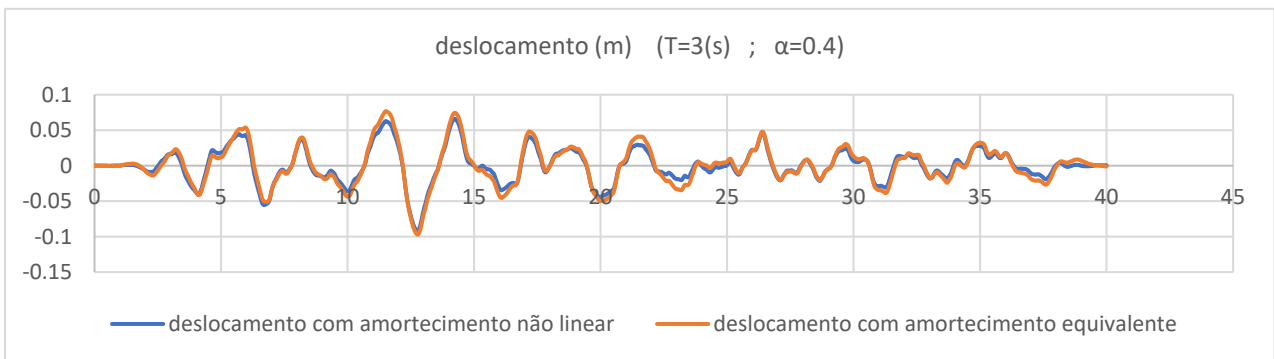
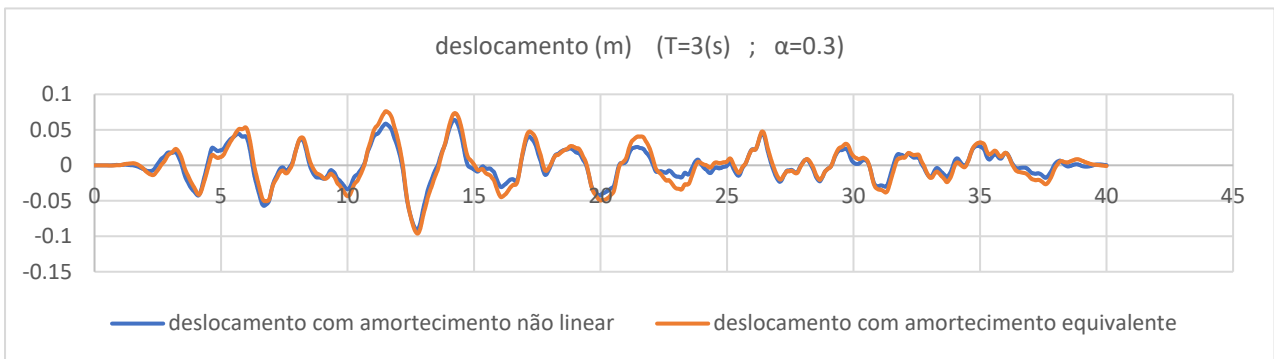
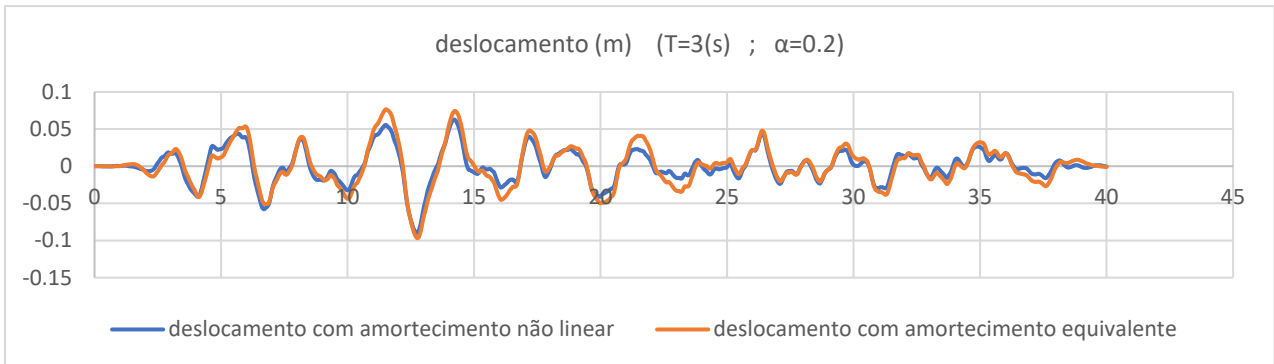
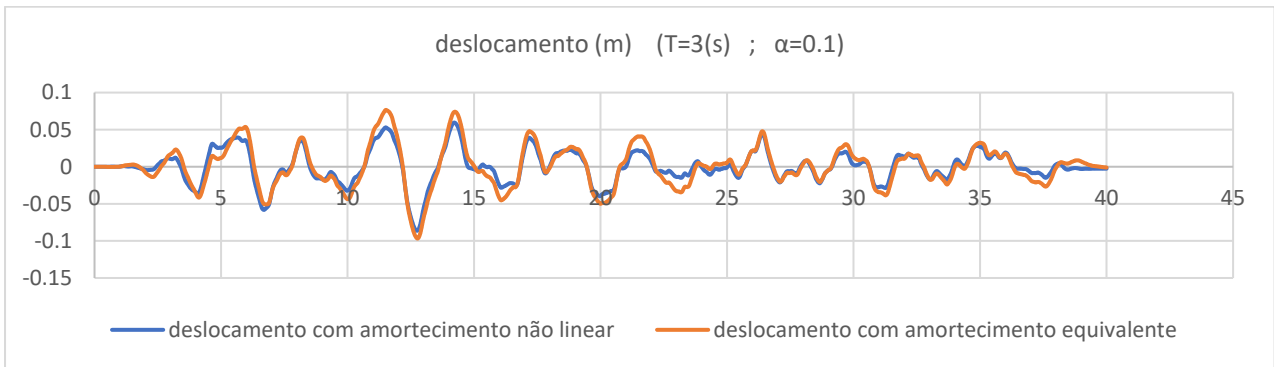
Os gráficos são apresentados pela ordem seguinte:

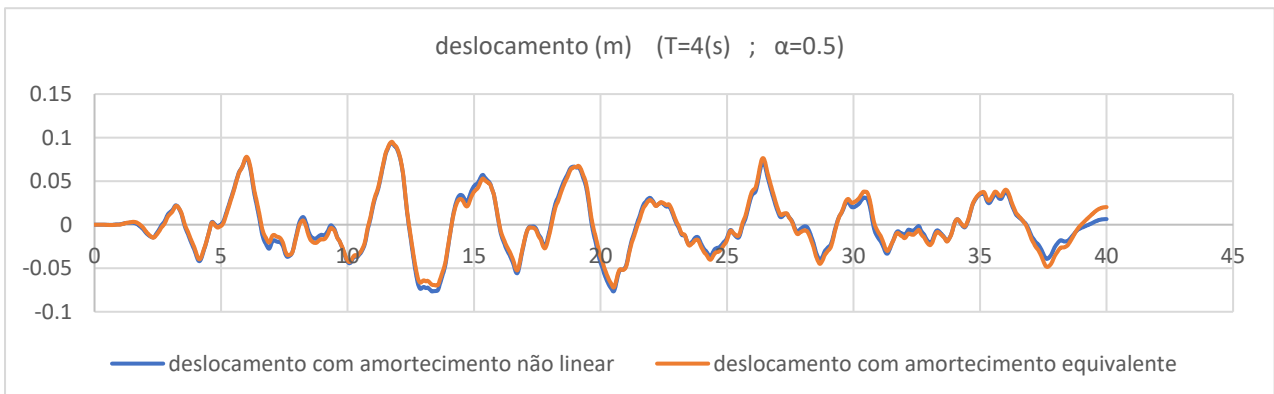
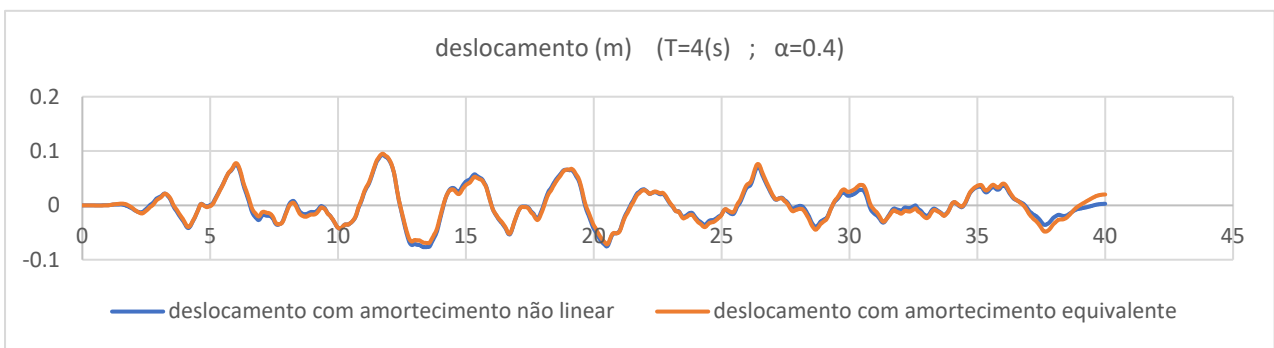
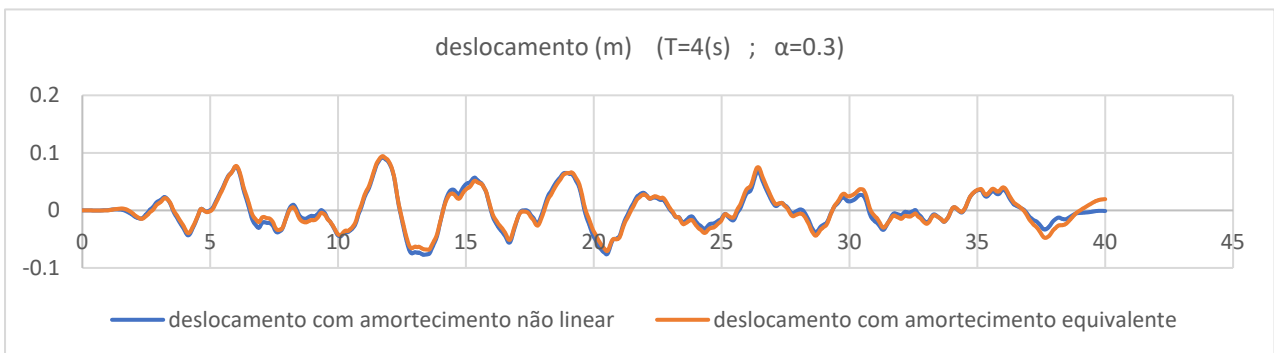
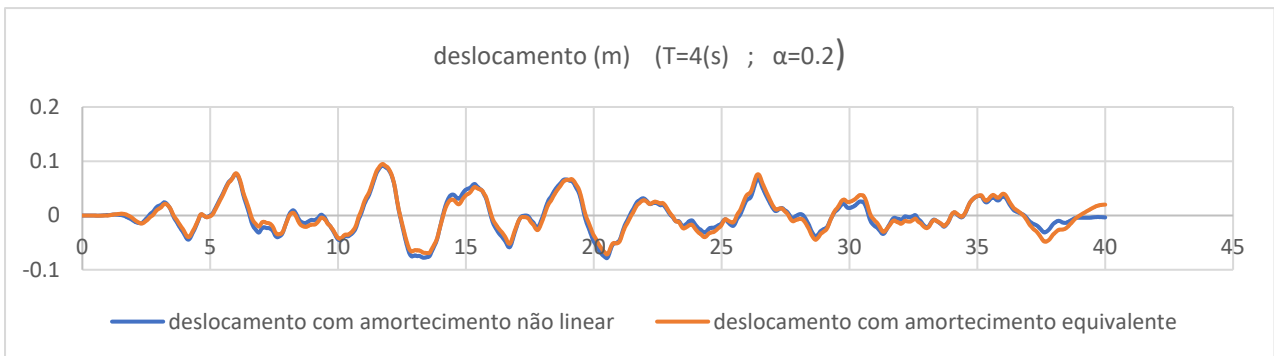
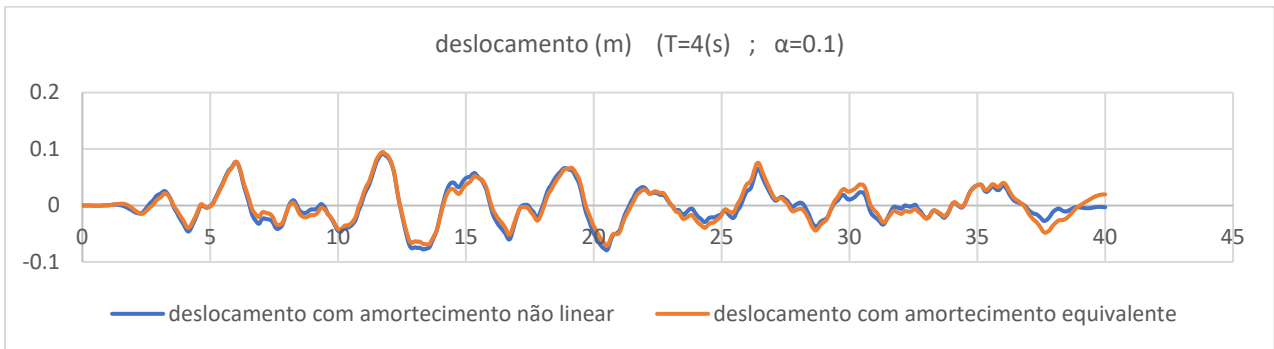
- Deslocamento relativo de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Velocidade relativa de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Aceleração relativa de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte
- Força total nos dissipadores
- Força total nos dissipadores pelo método alternativo
- Deslocamento relativo de vibração longitudinal do tabuleiro da ponte - Força total nos dissipadores para a ponte com período de vibração longitudinal  $T= 1$  (s)

### A.2.1 Deslocamento Relativo de Vibração Longitudinal do Tabuleiro da Ponte

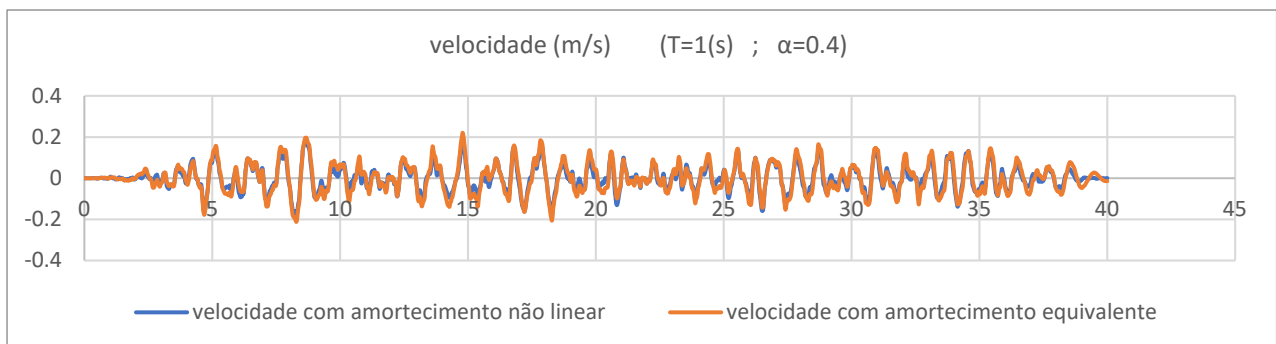
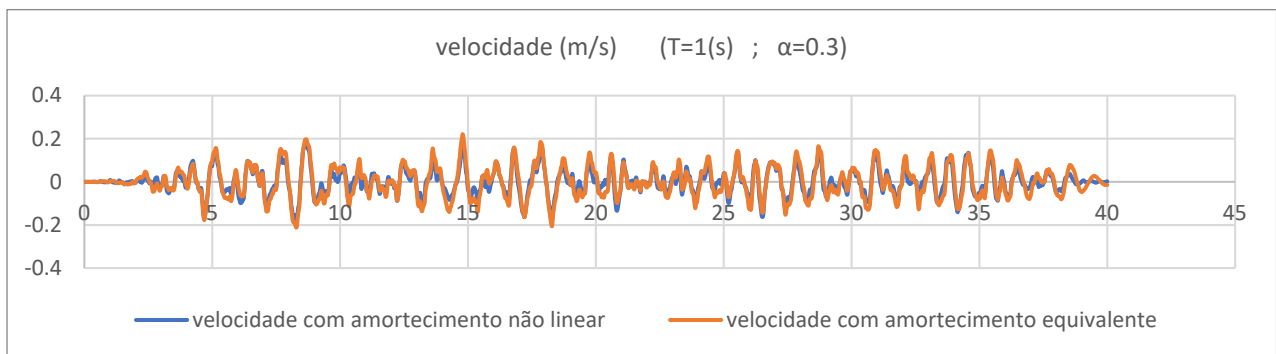
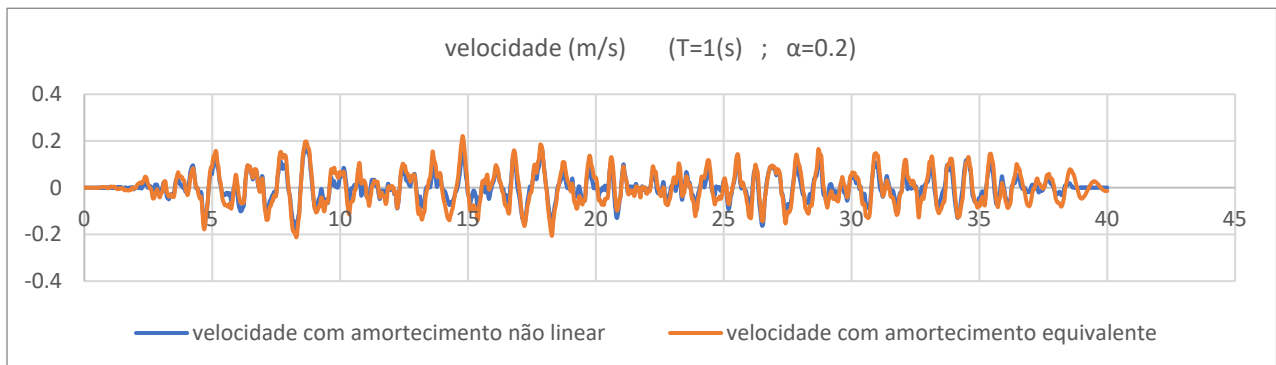
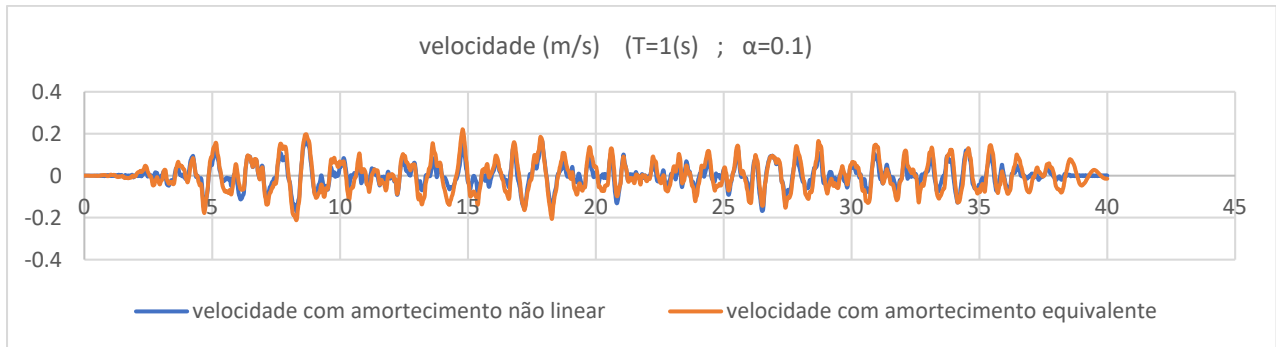


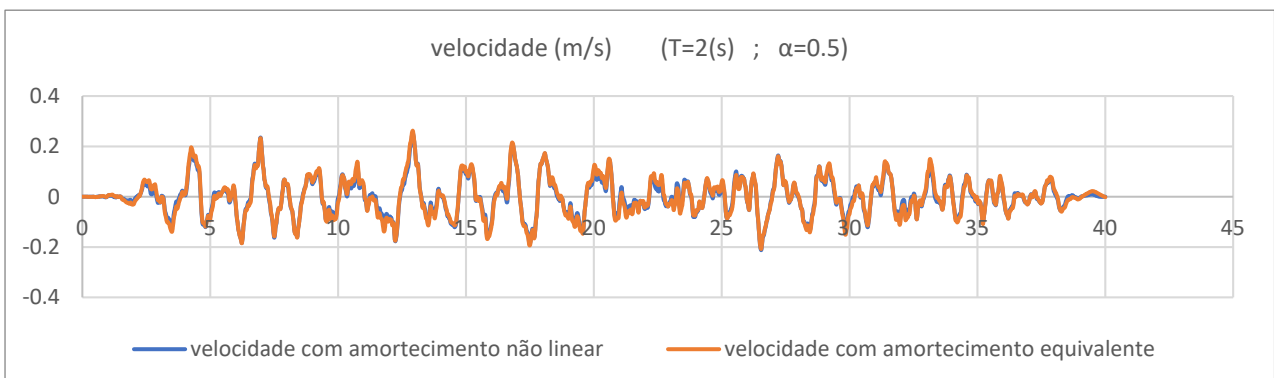
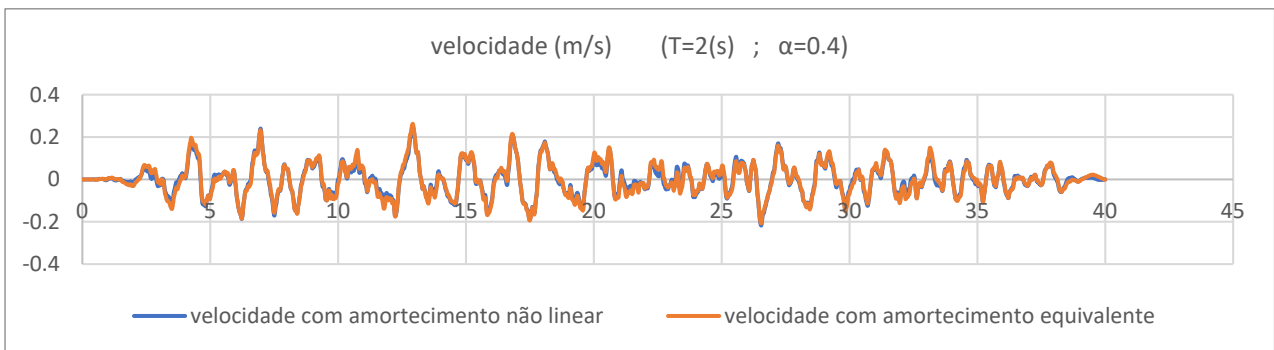
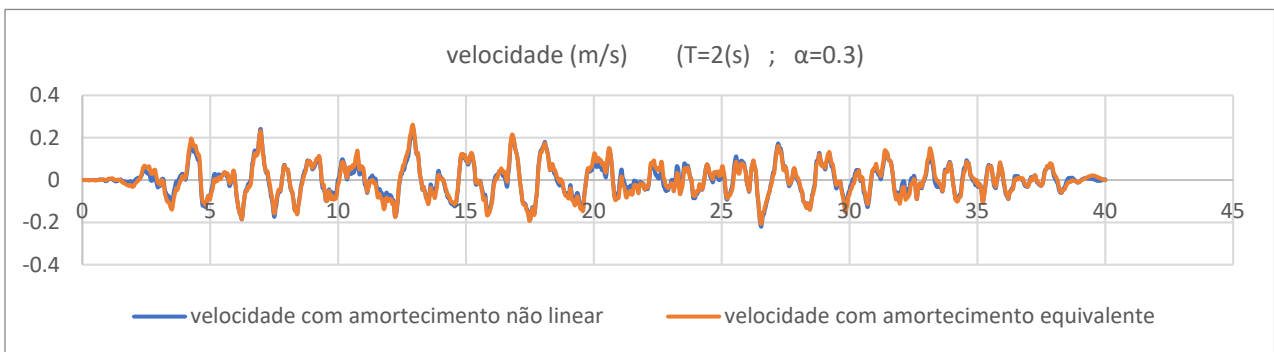
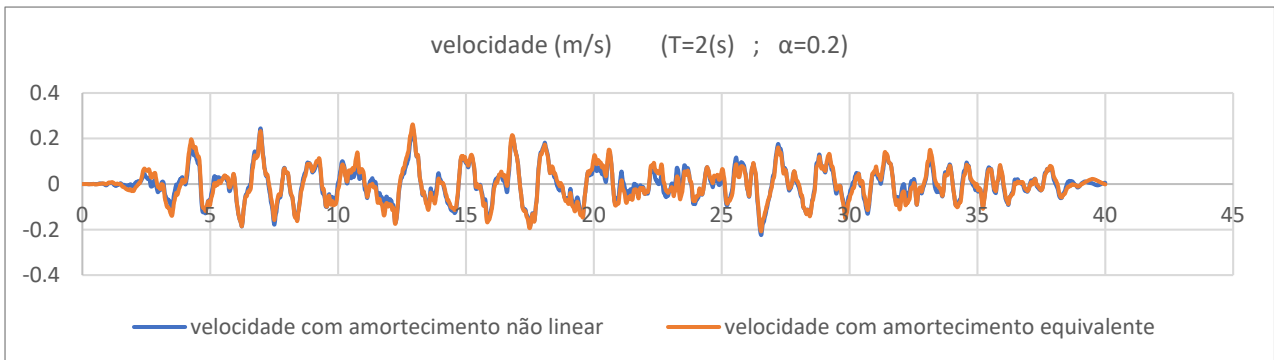
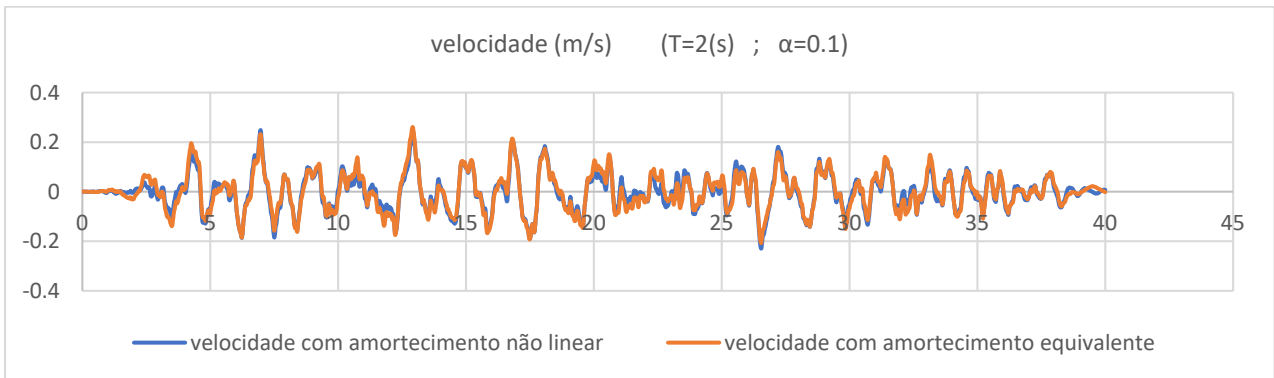


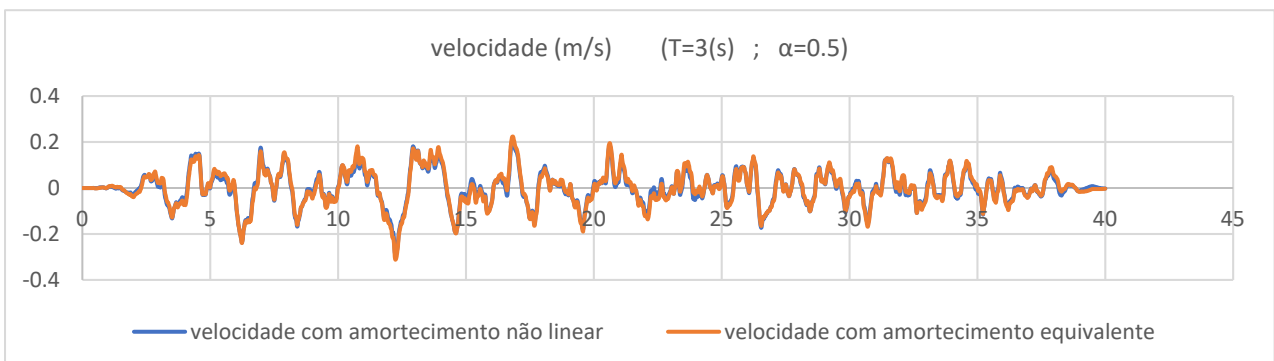
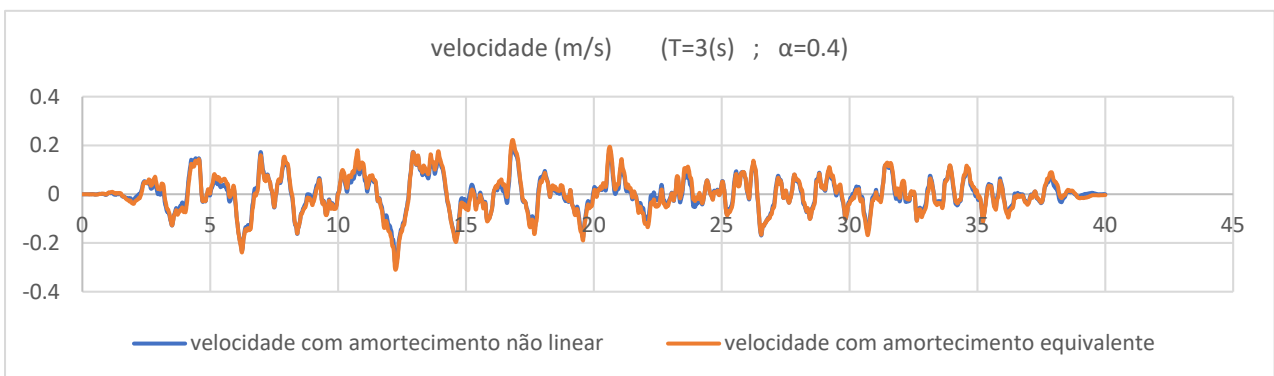
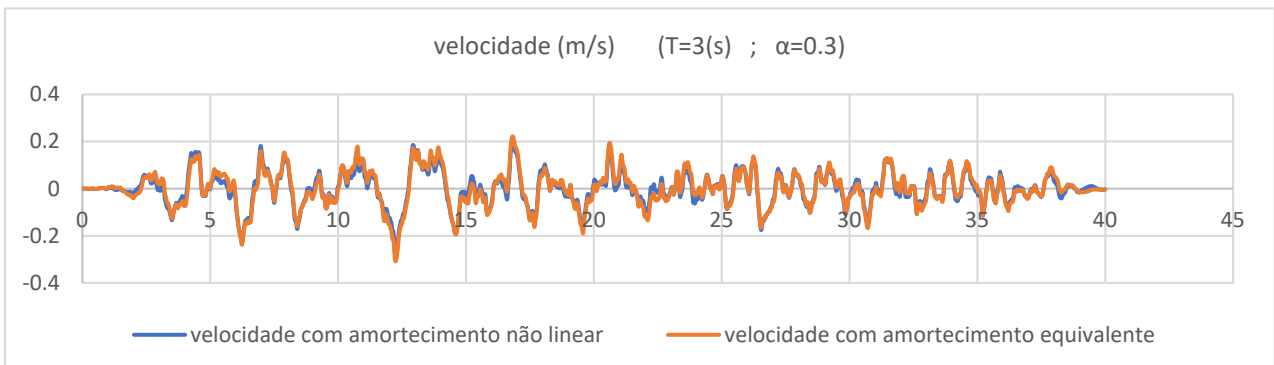
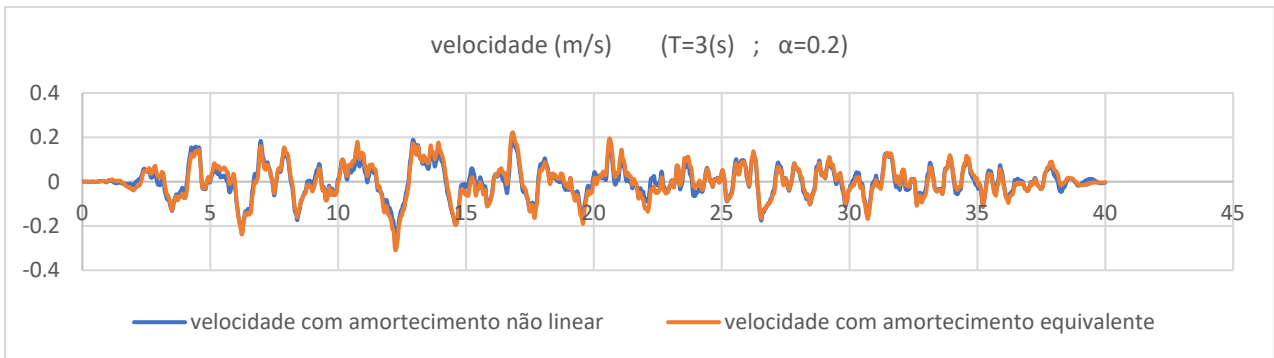
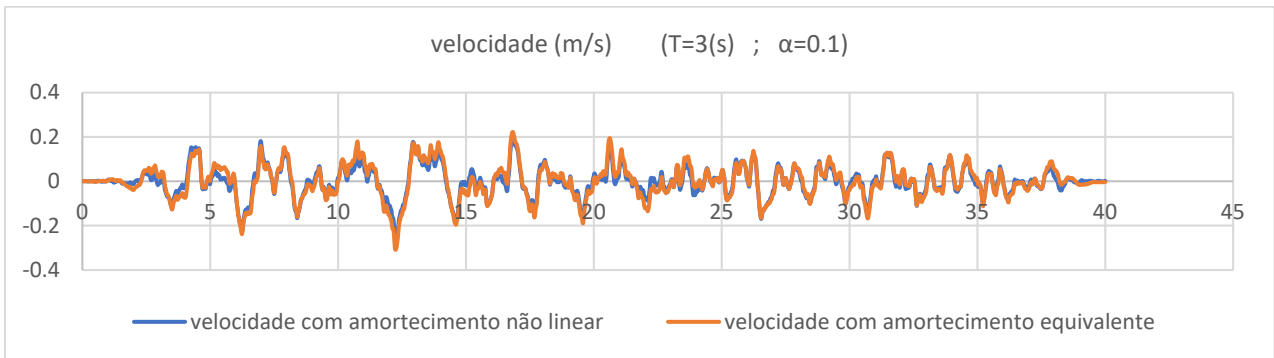




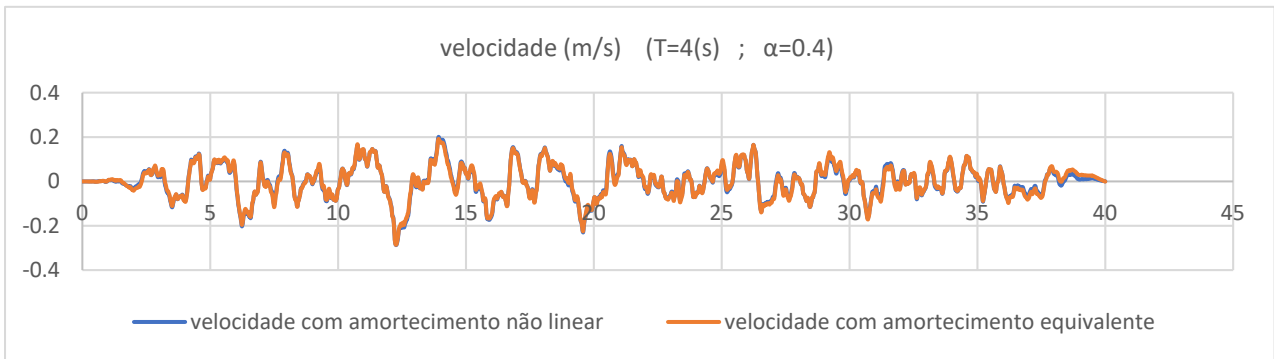
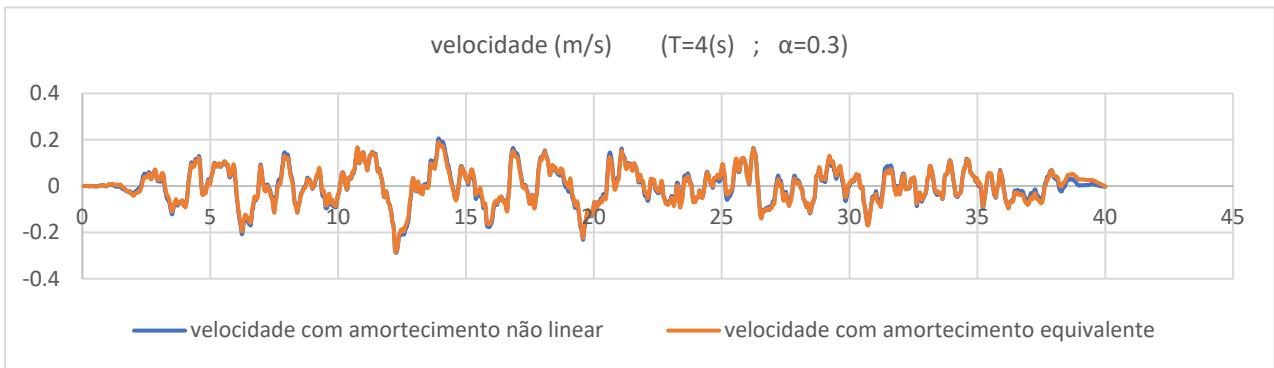
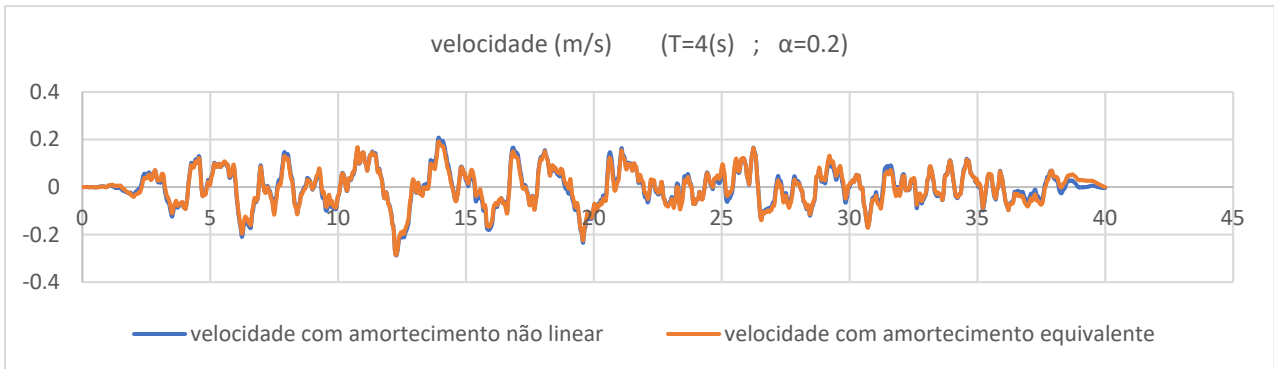
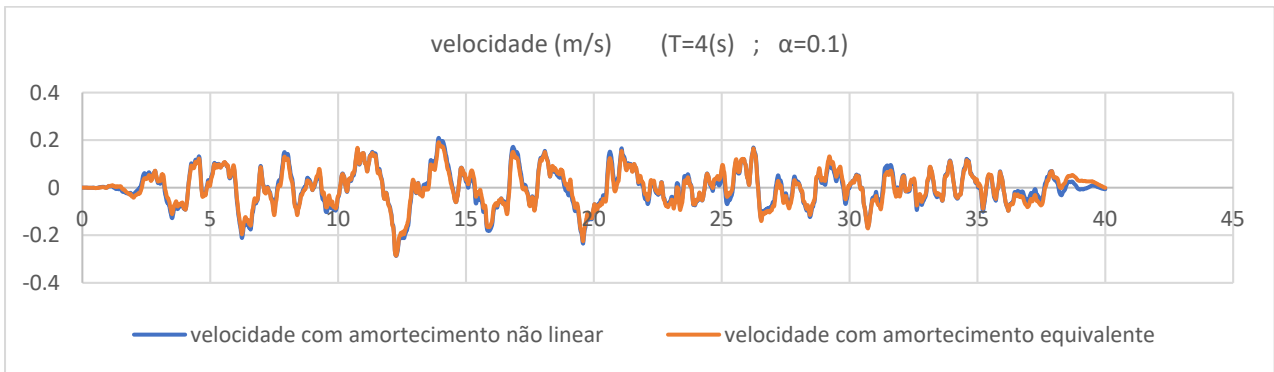
## A.2.2 Velocidade Relativa de Vibração Longitudinal do Tabuleiro da Ponte



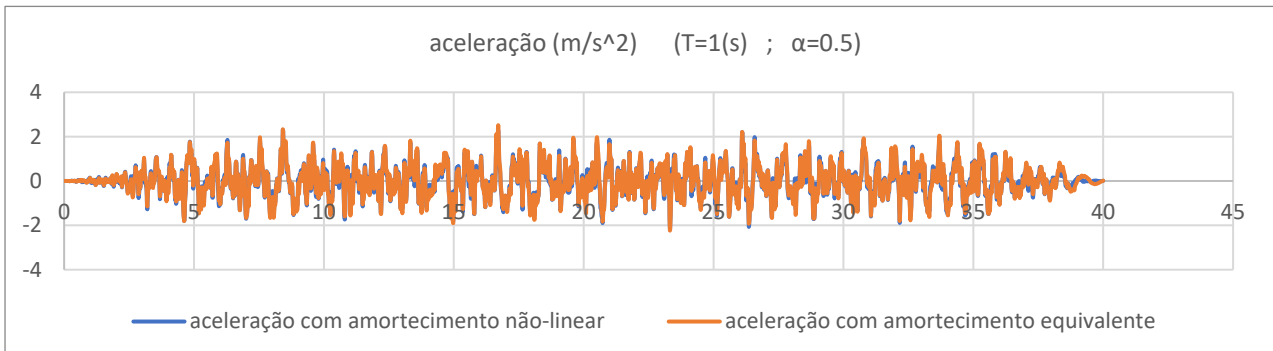
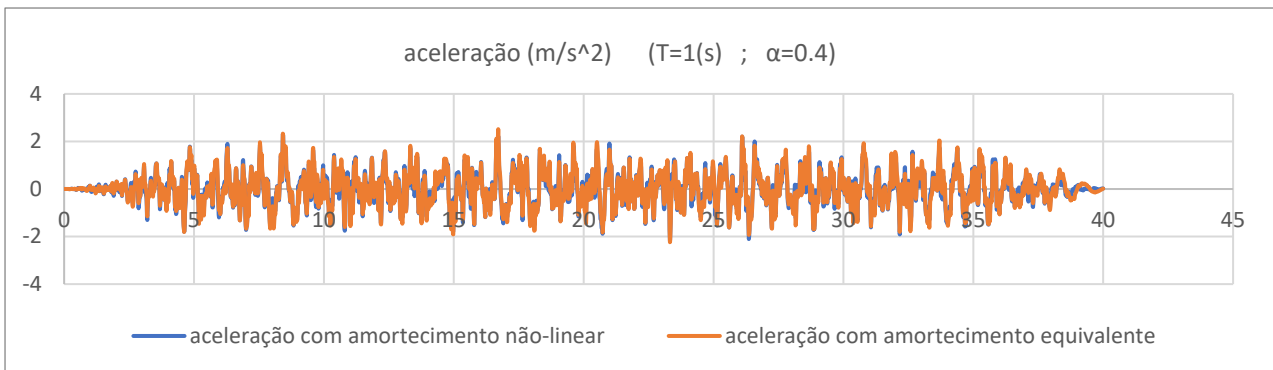
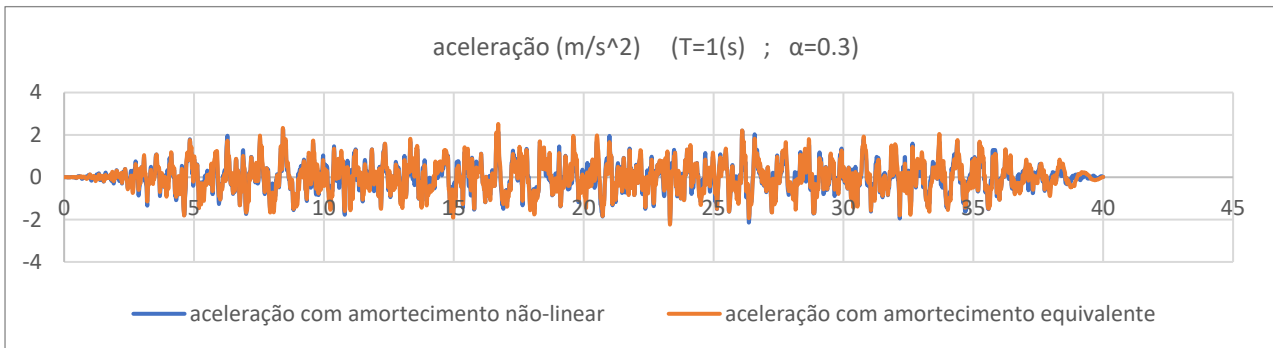
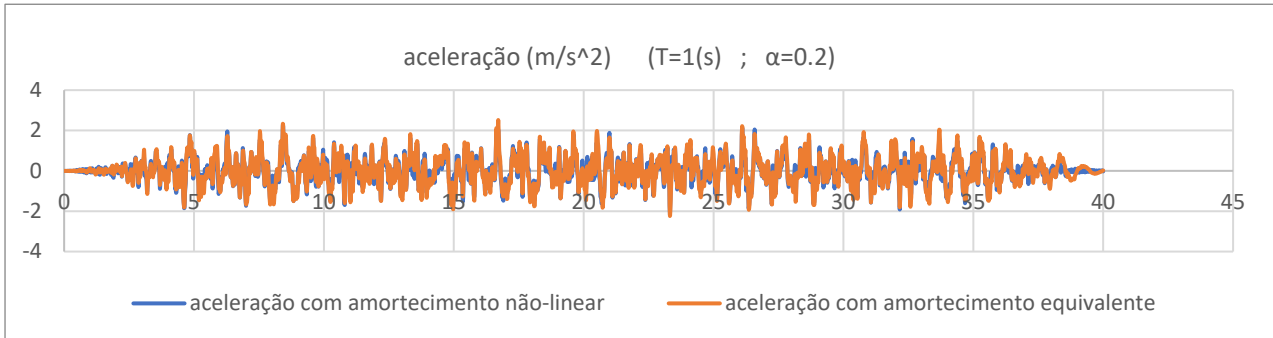
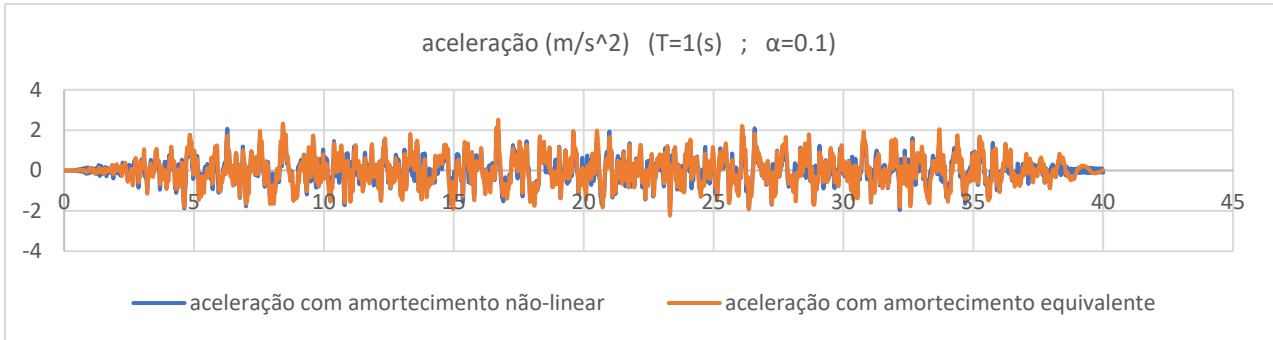


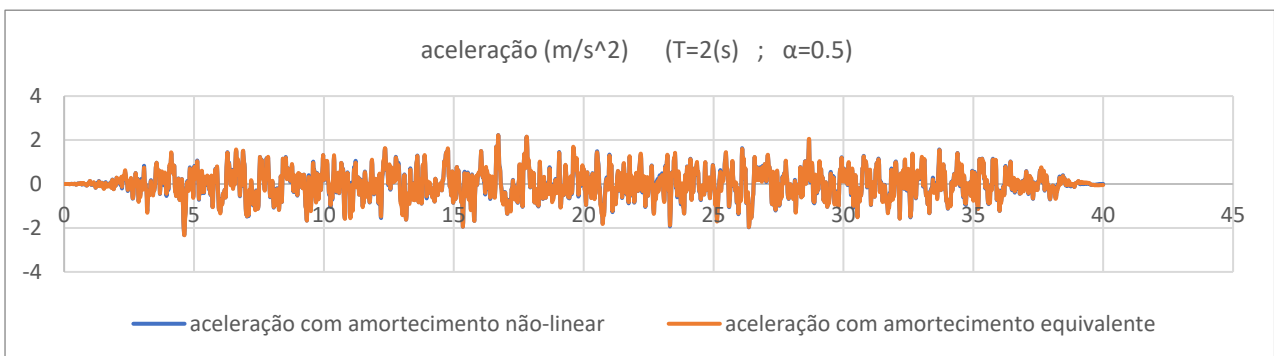
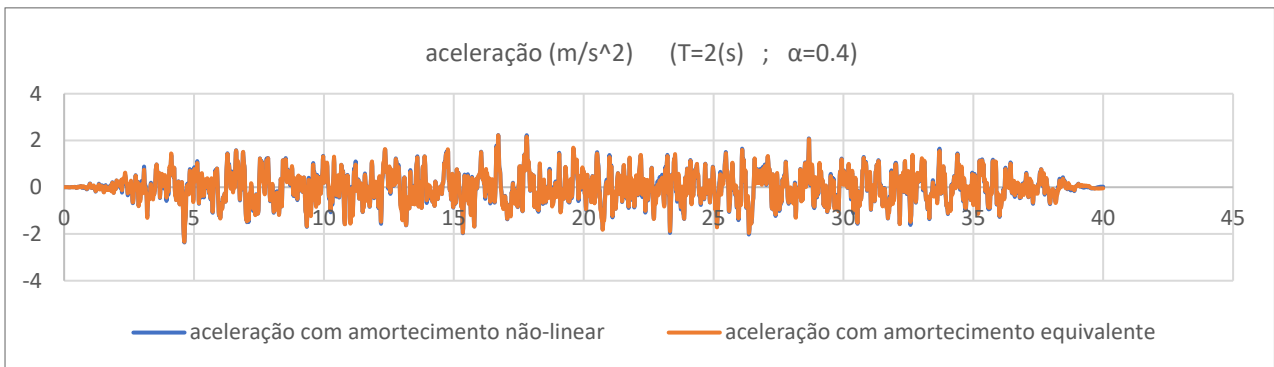
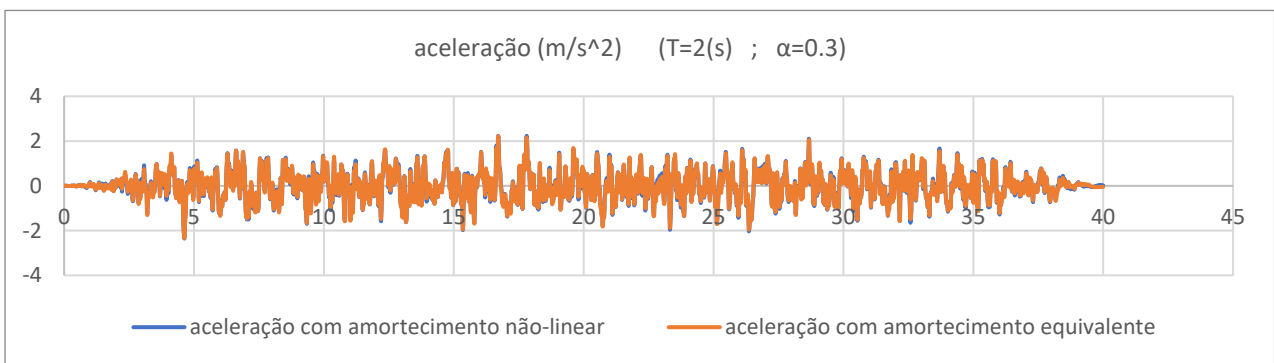
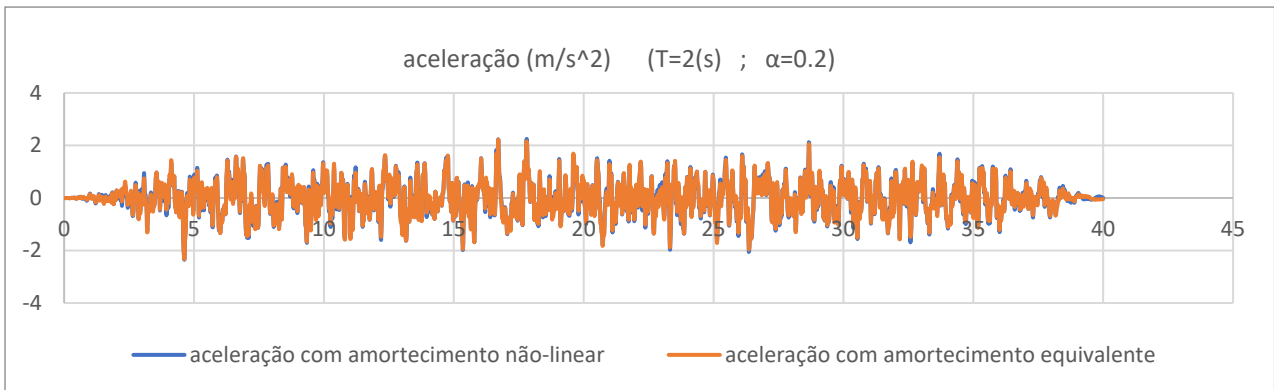
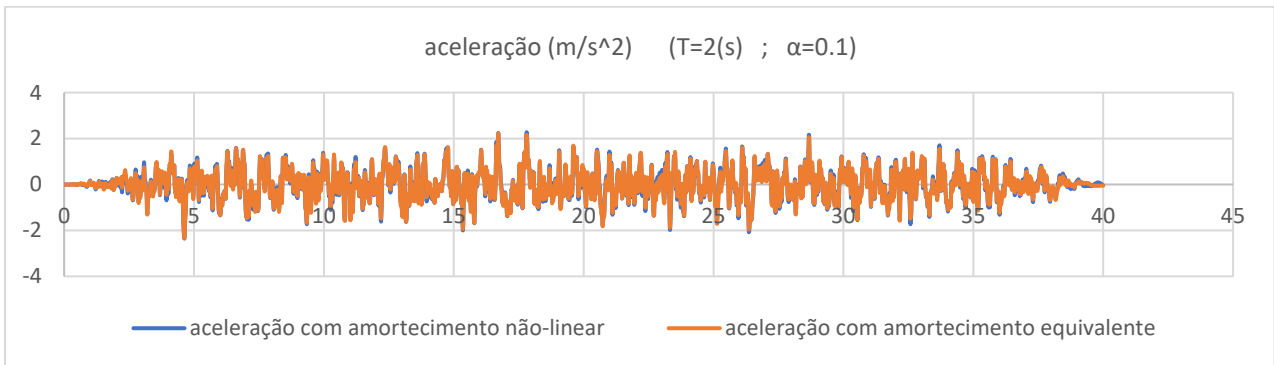


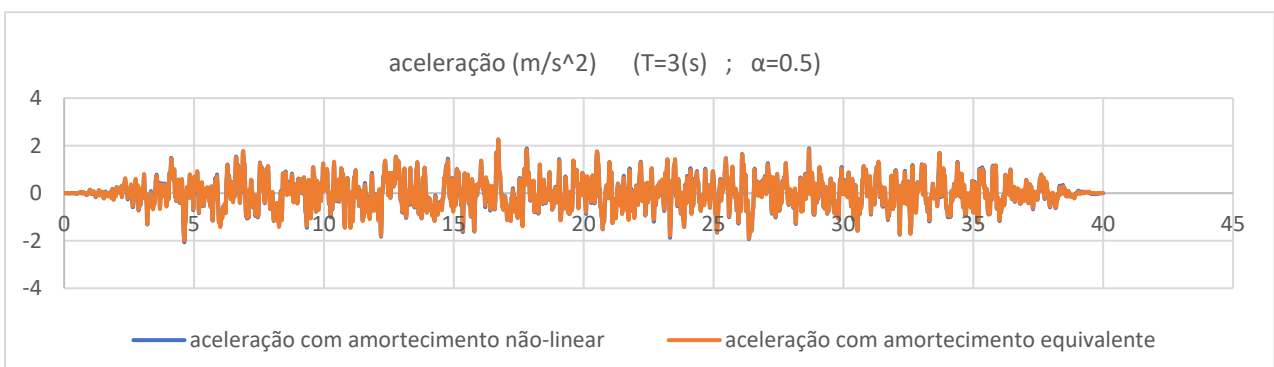
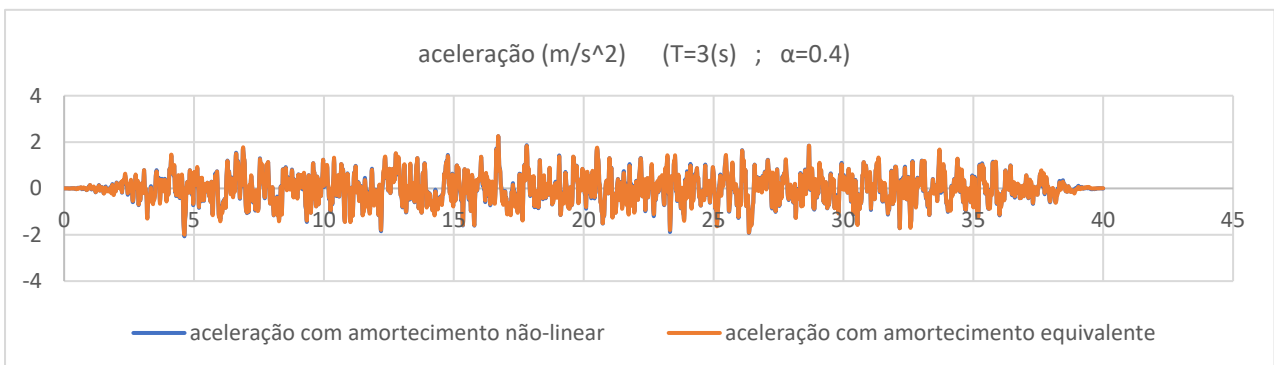
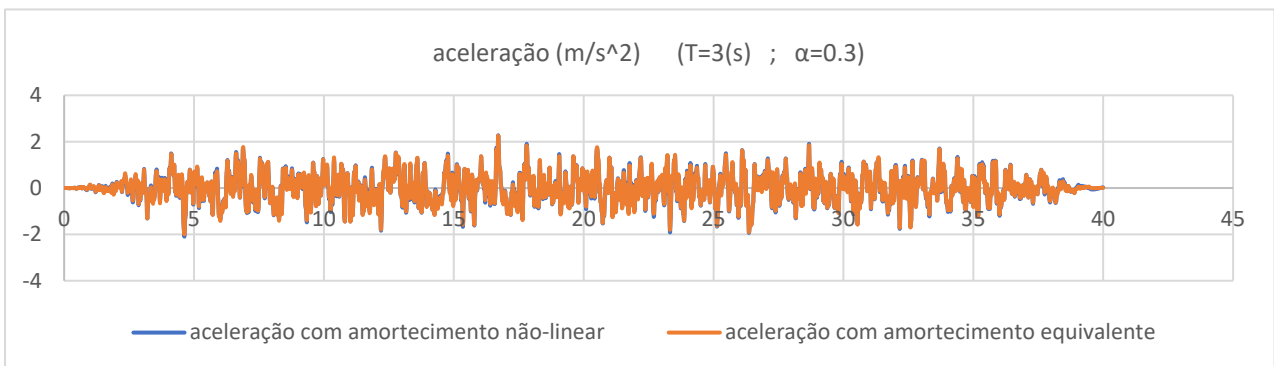
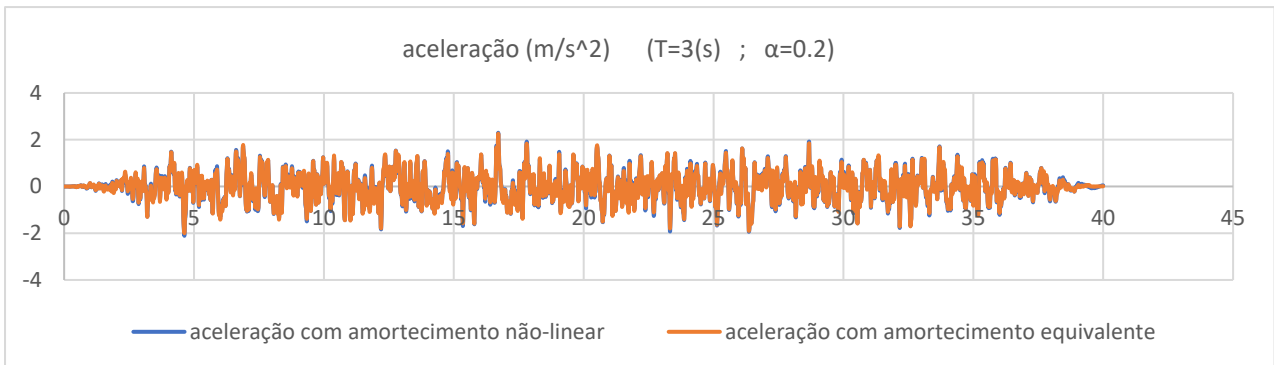
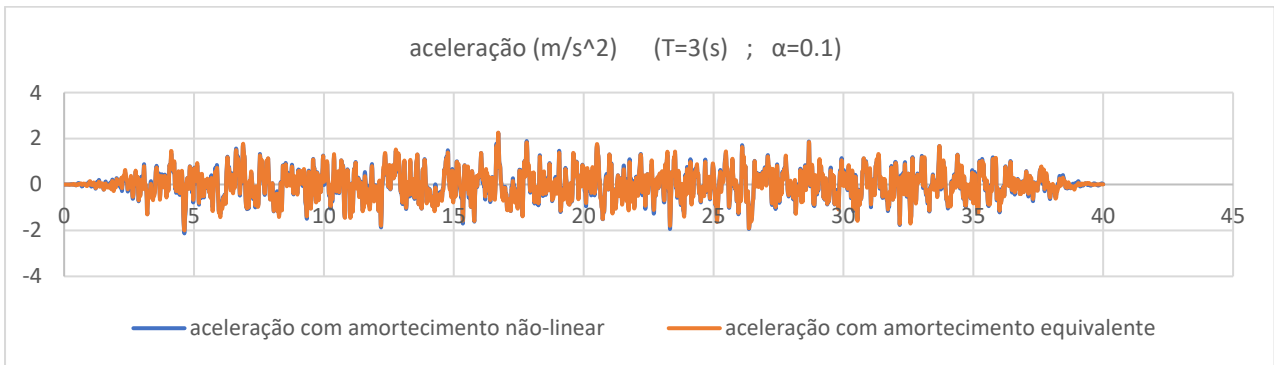


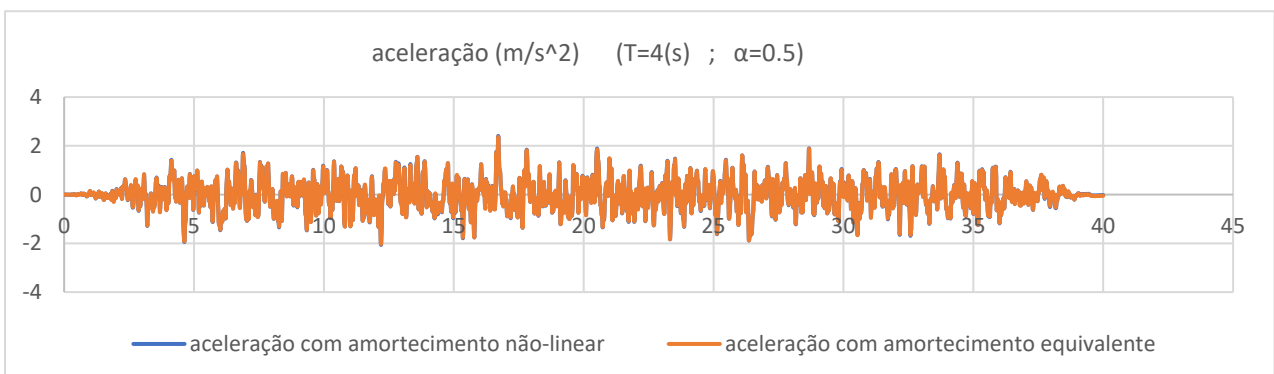
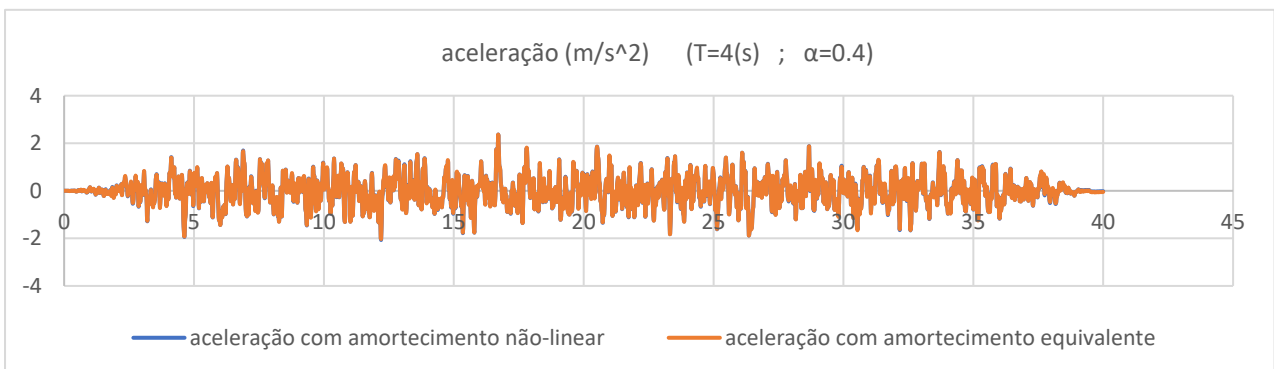
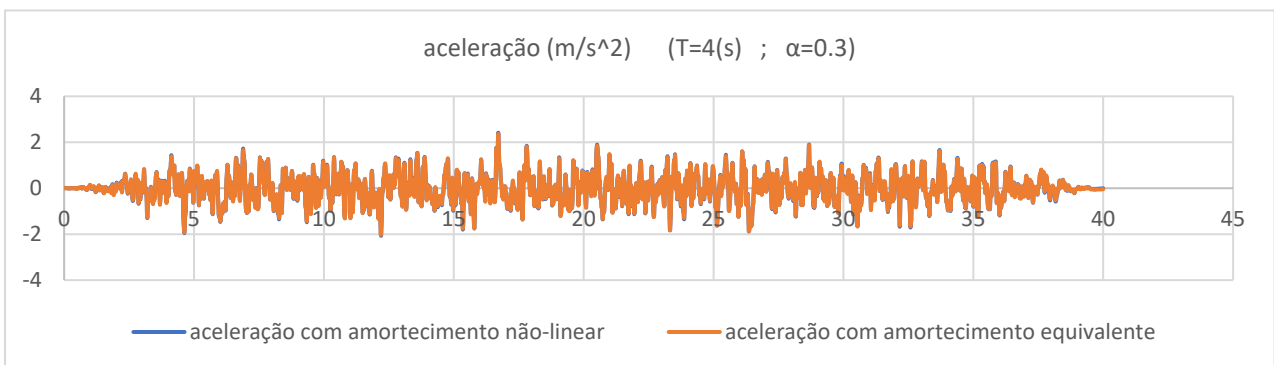
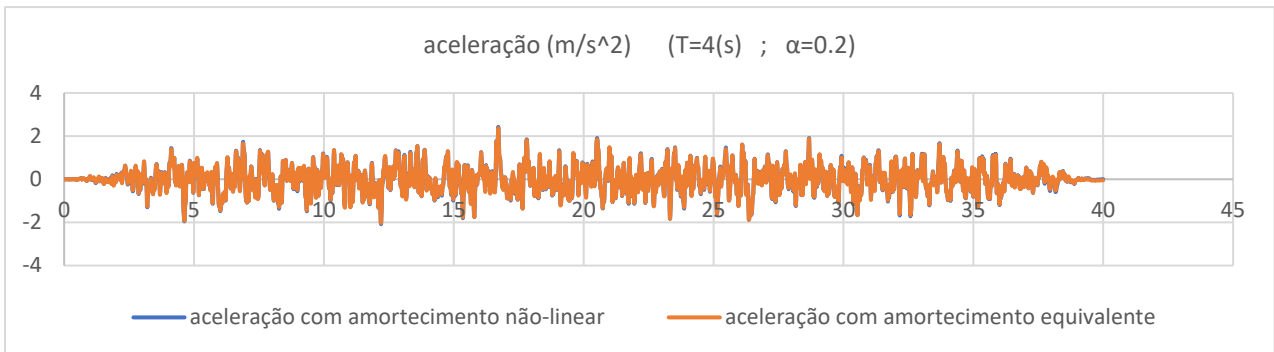
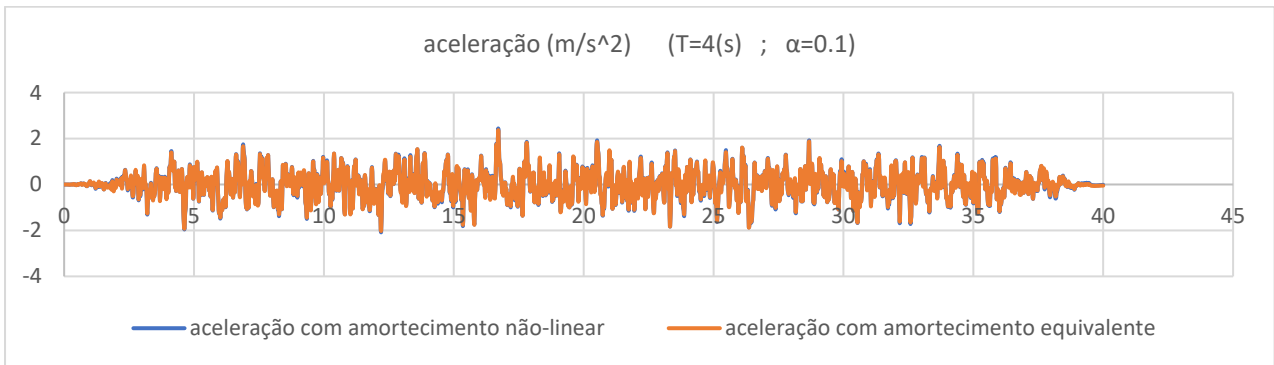


### A.2.3 Aceleração Relativa de Vibração Longitudinal do Tabuleiro da Ponte

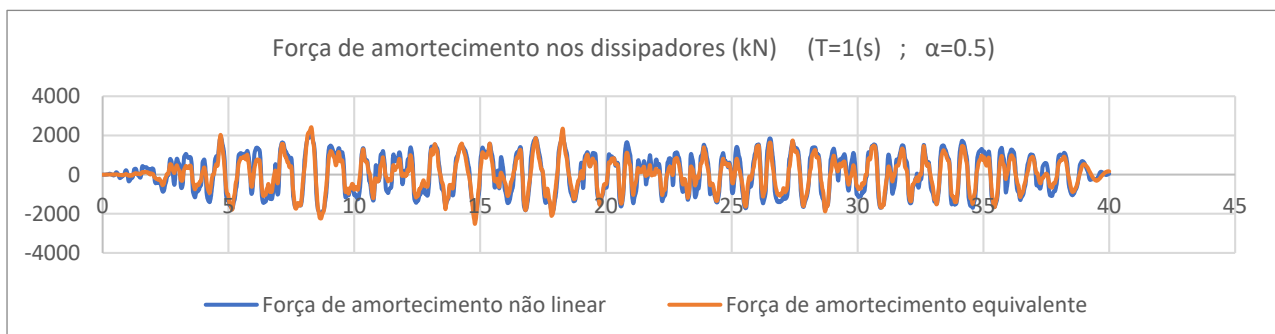
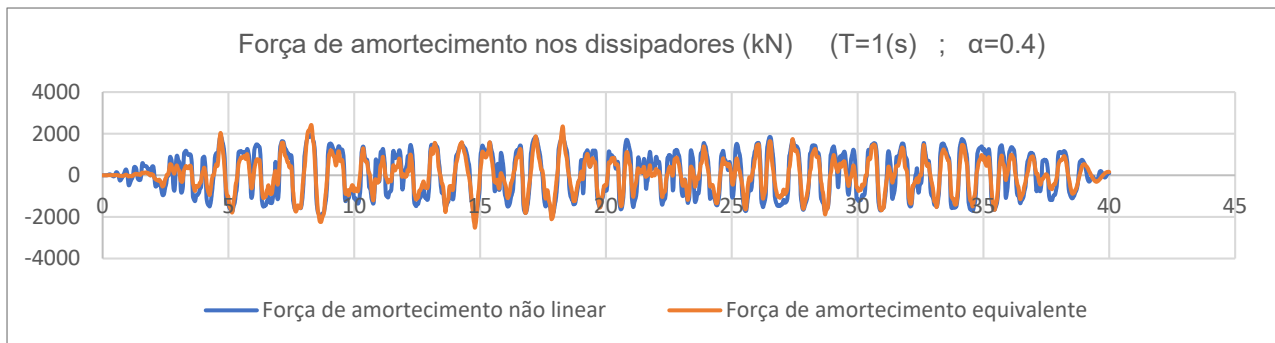
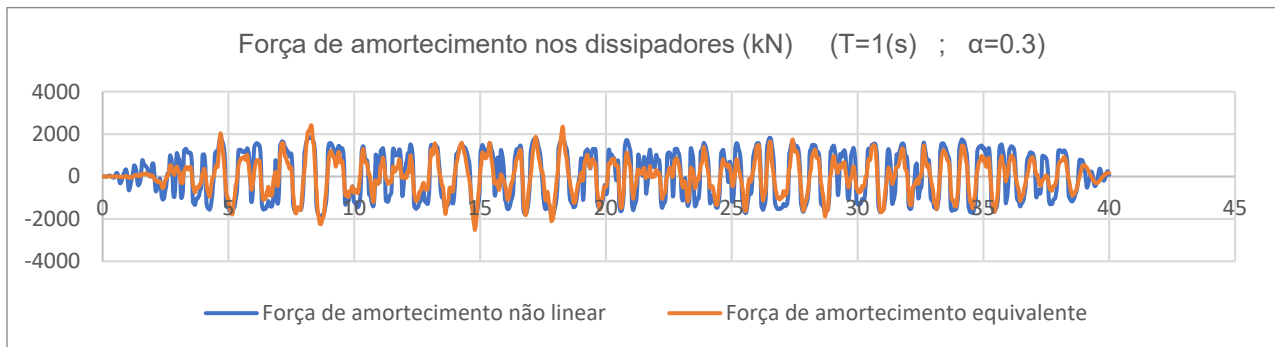
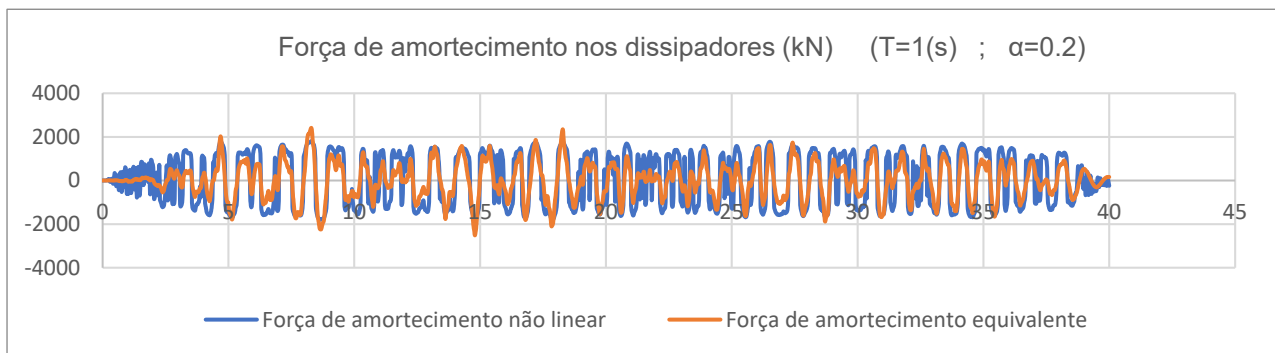
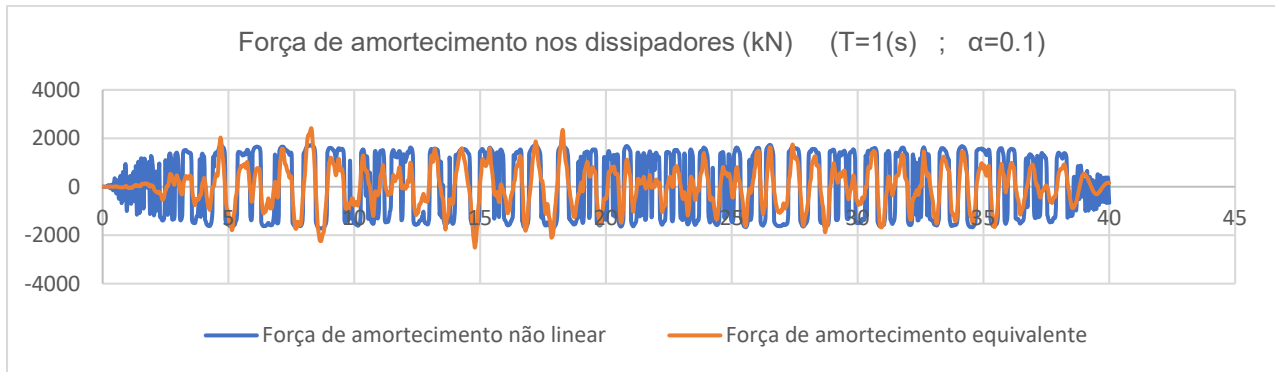


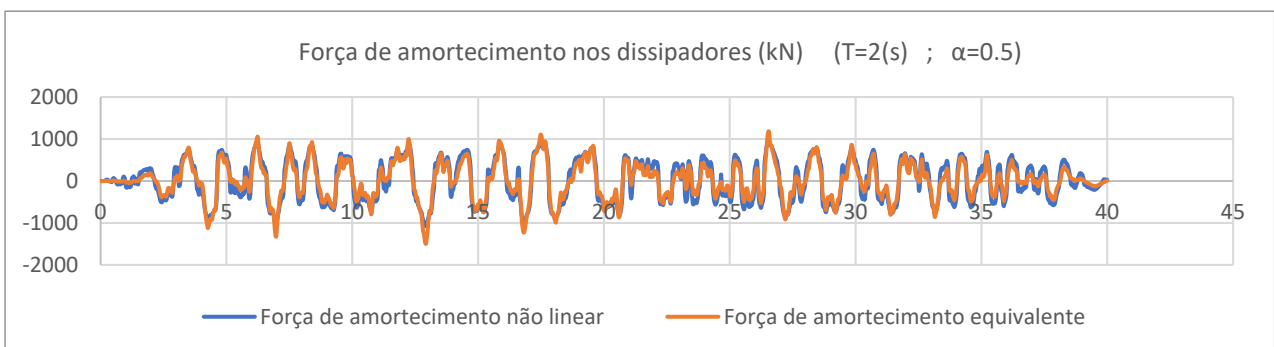
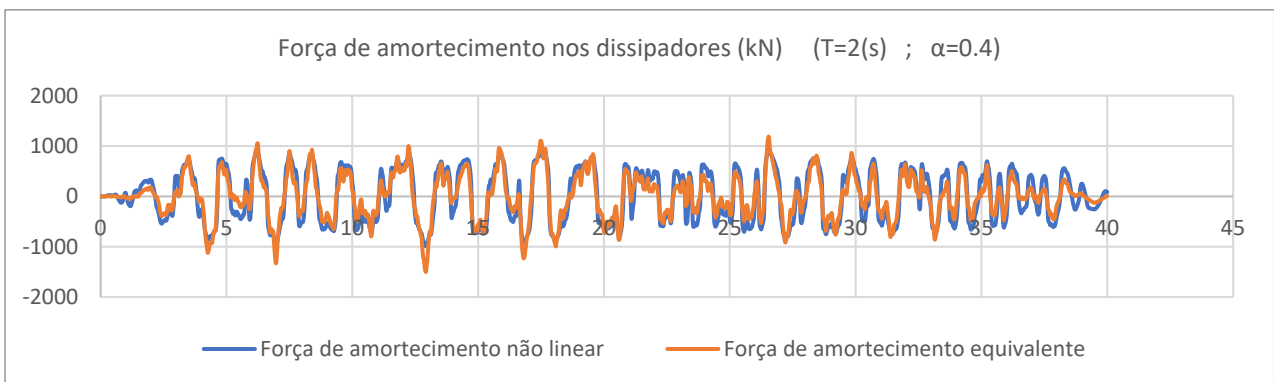
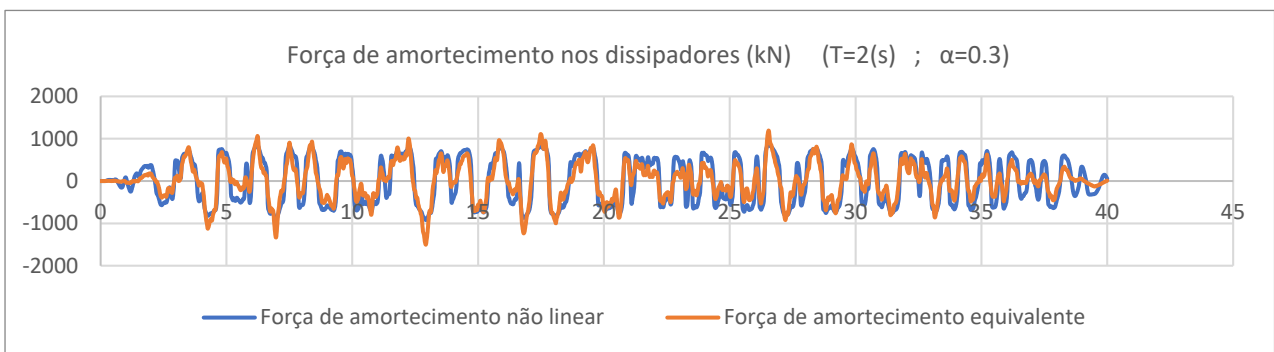
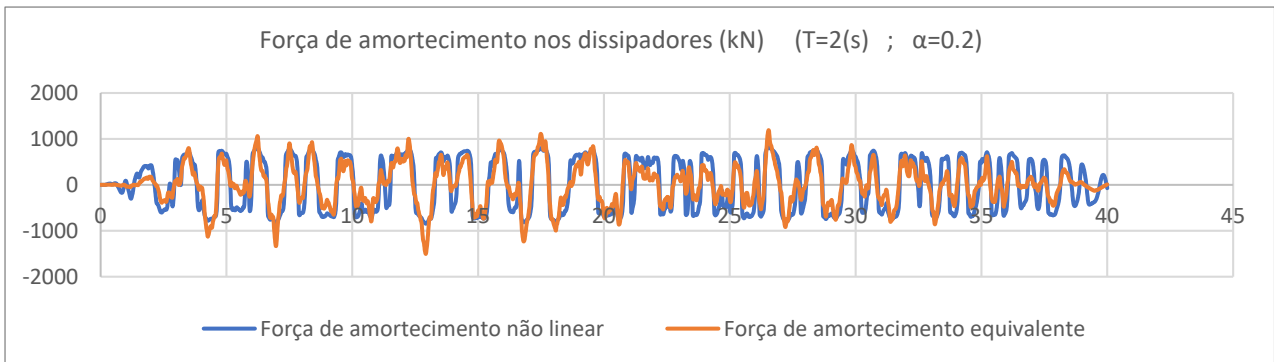
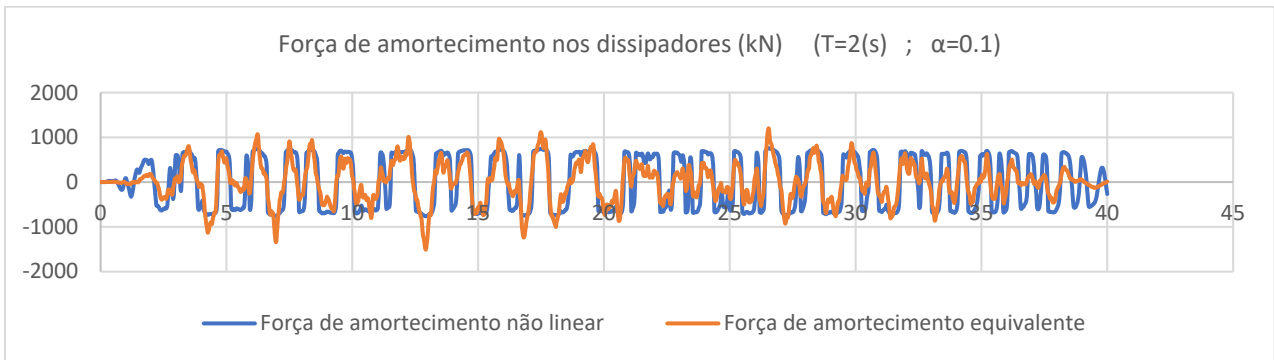


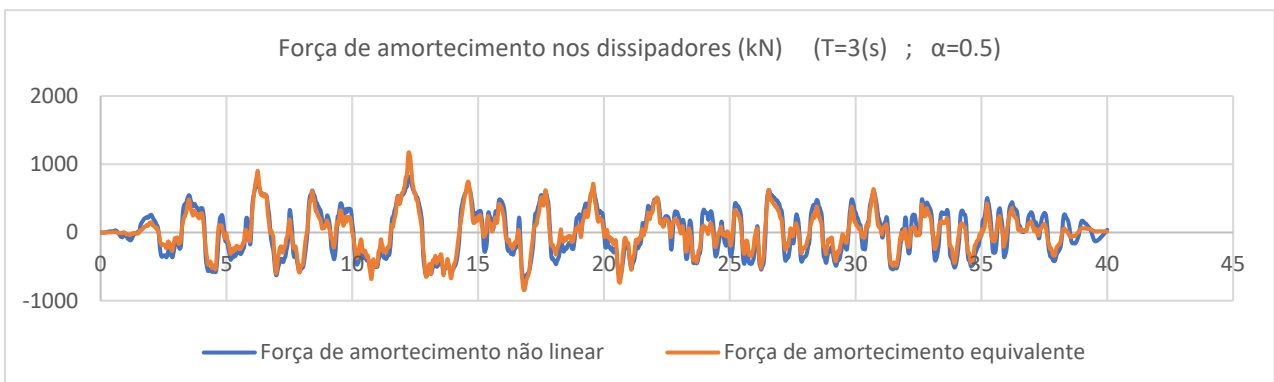
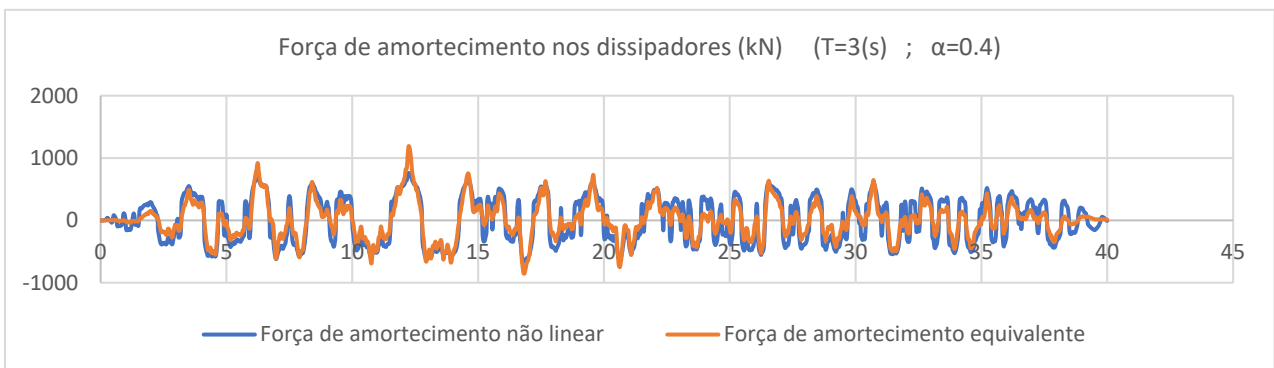
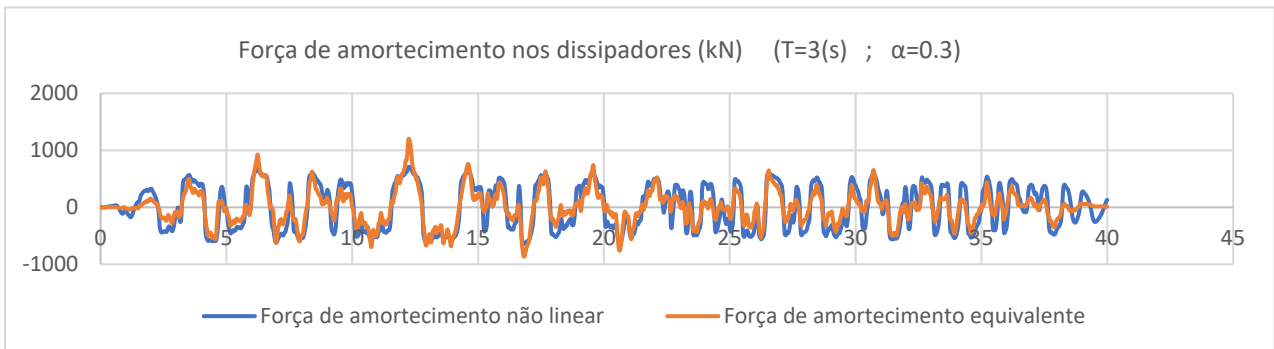
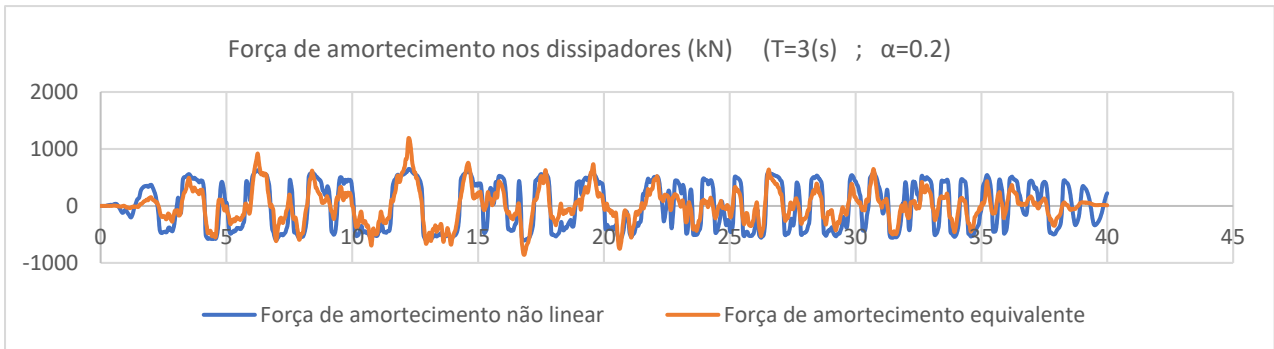
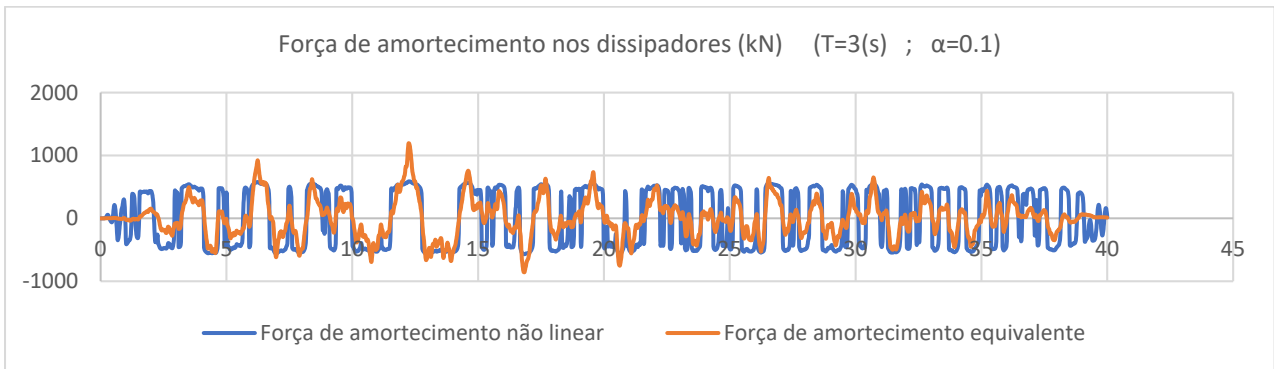




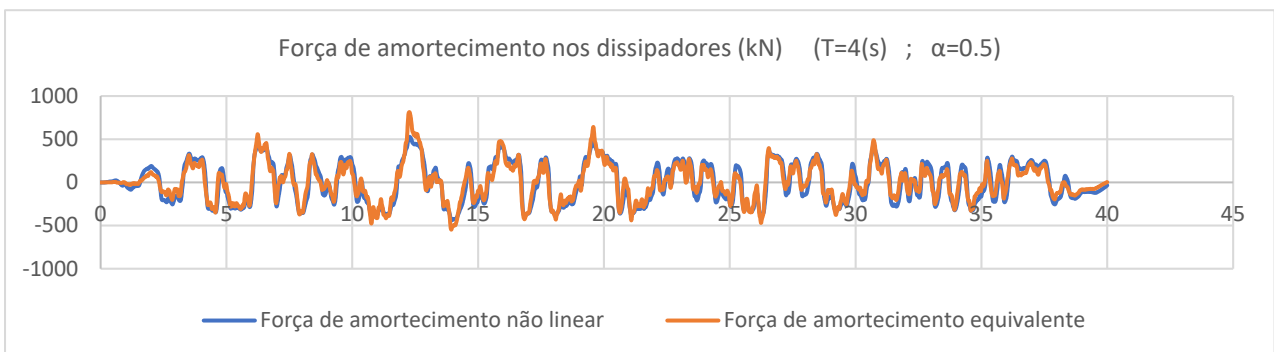
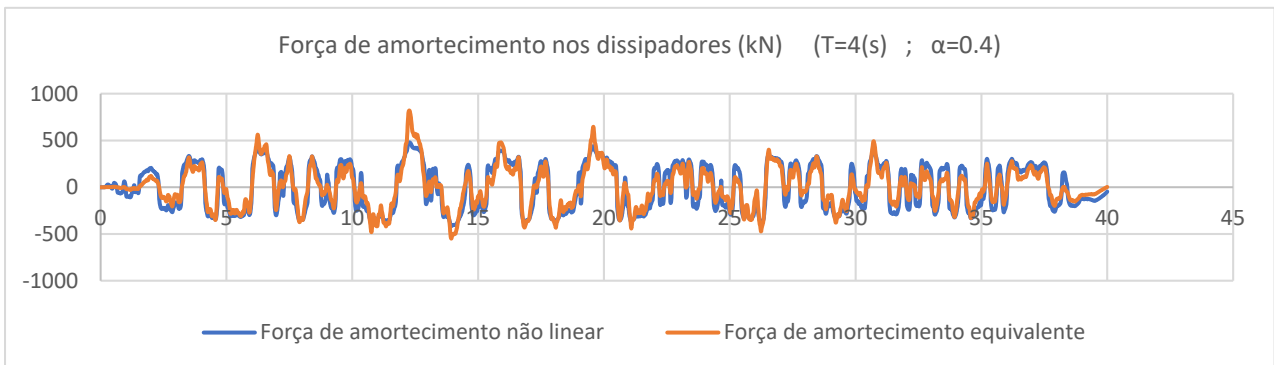
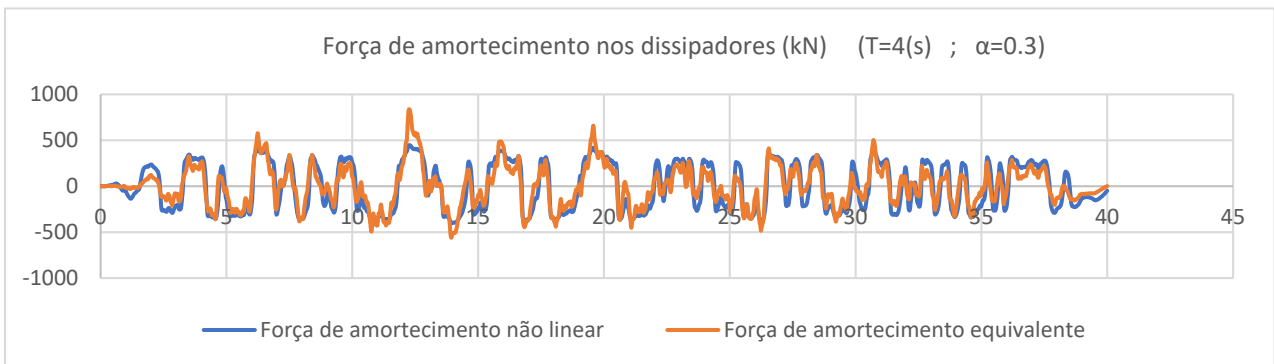
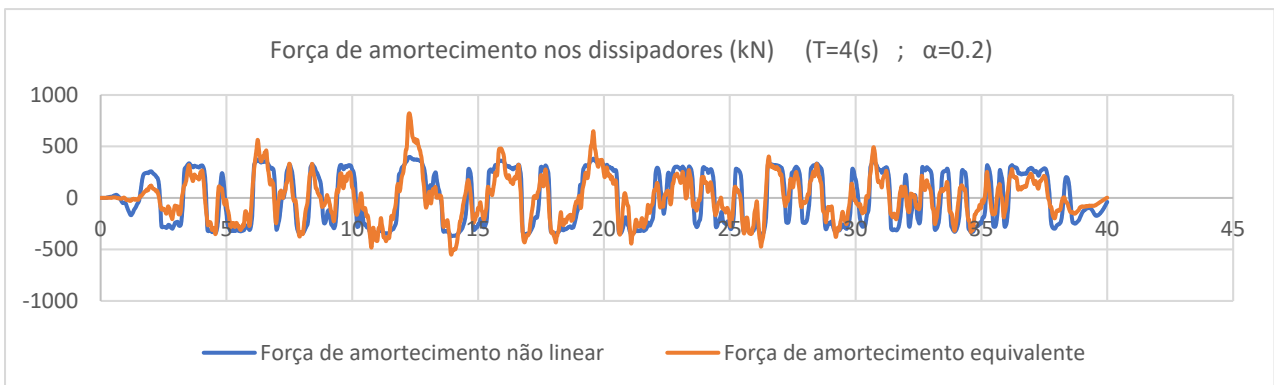
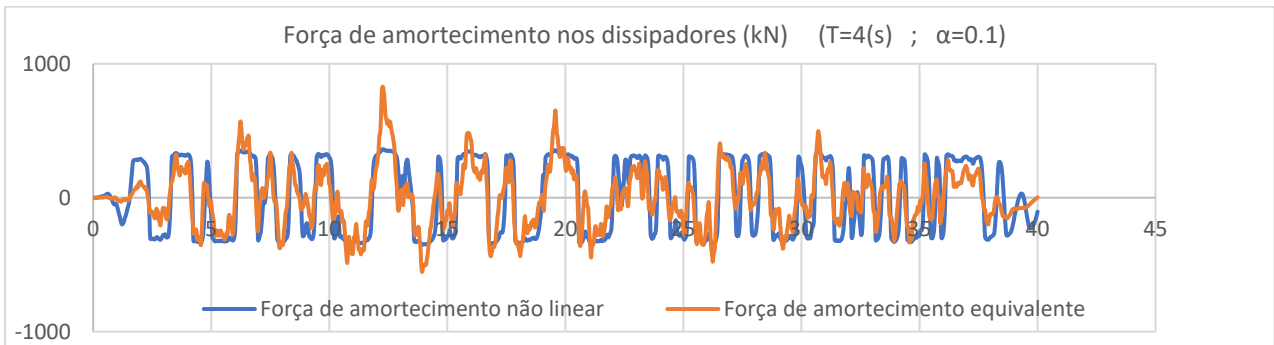
## A.2.4 Força Total nos Dissipadores



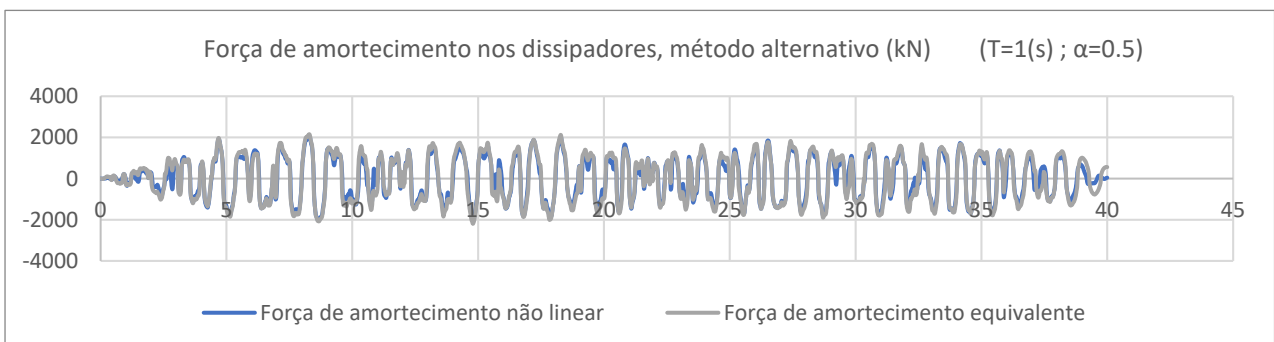
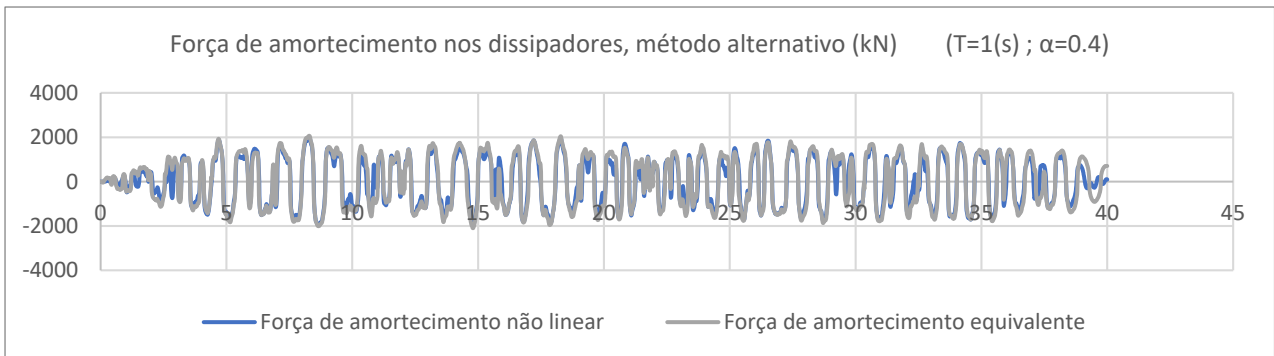
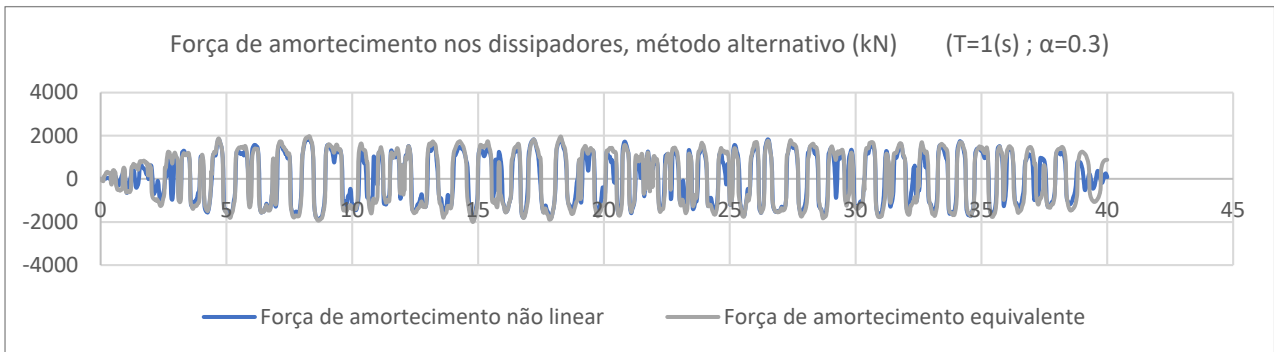
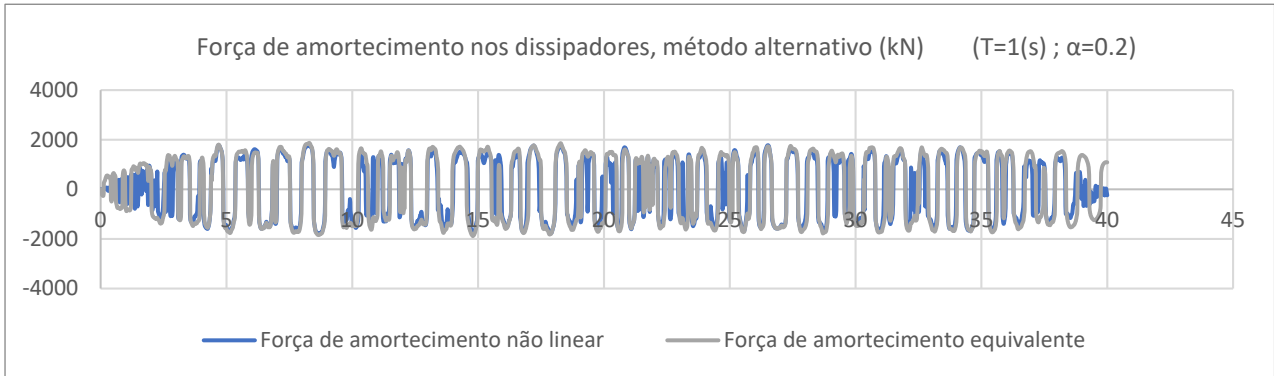
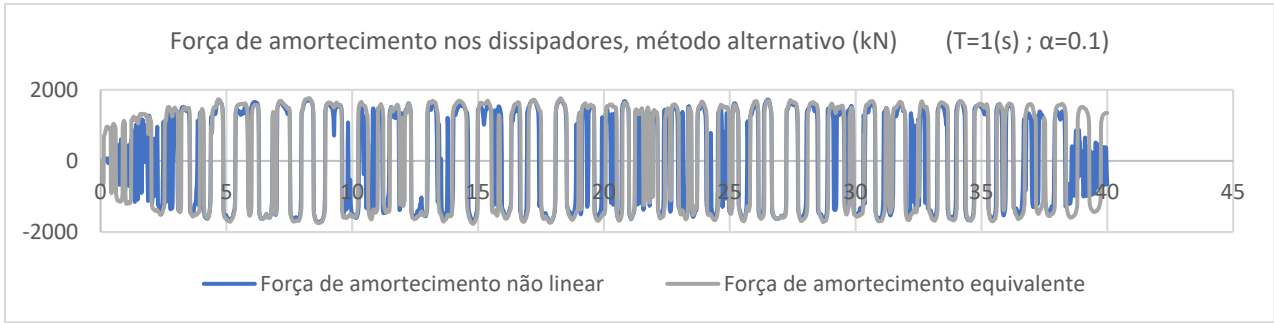


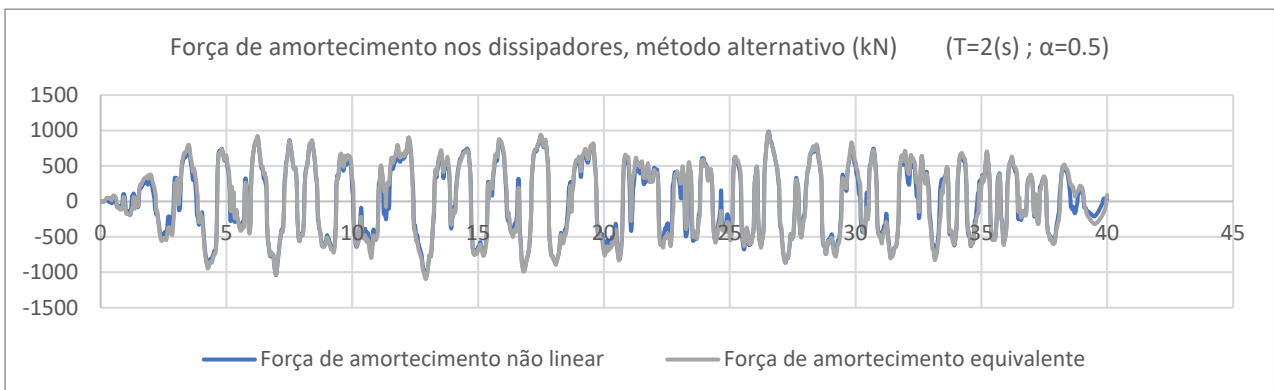
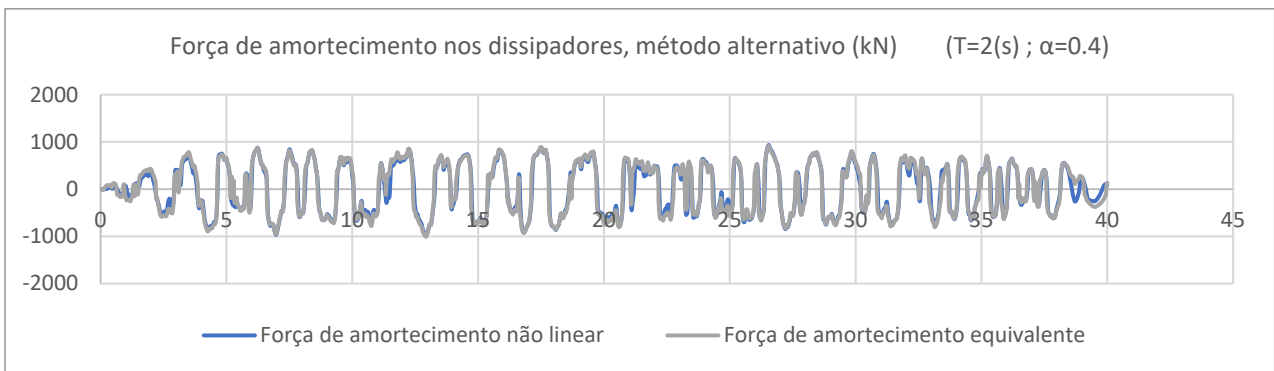
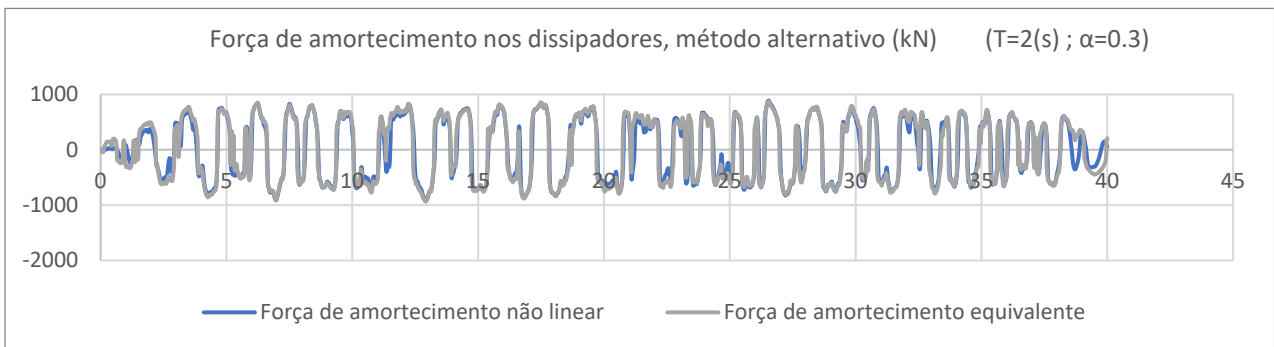
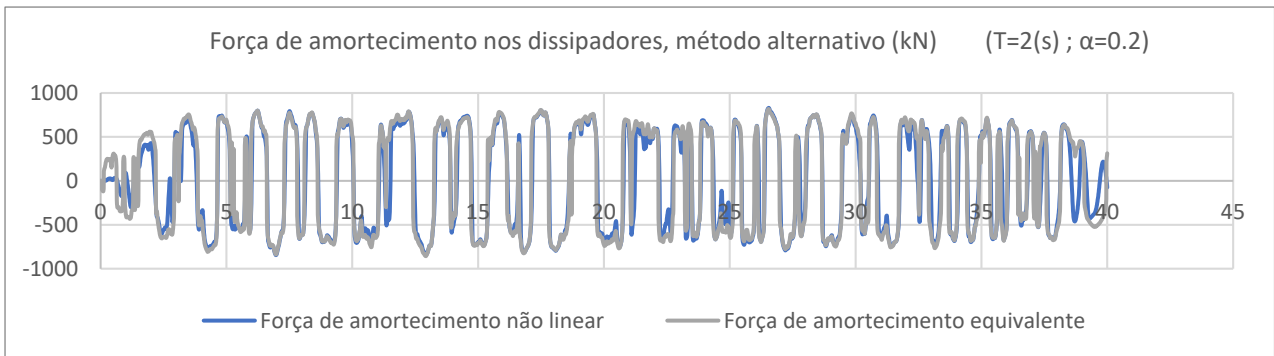


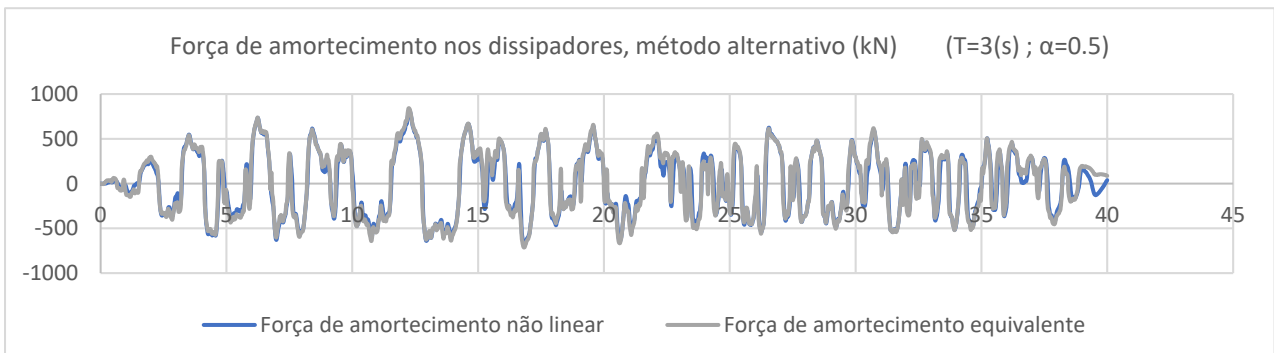
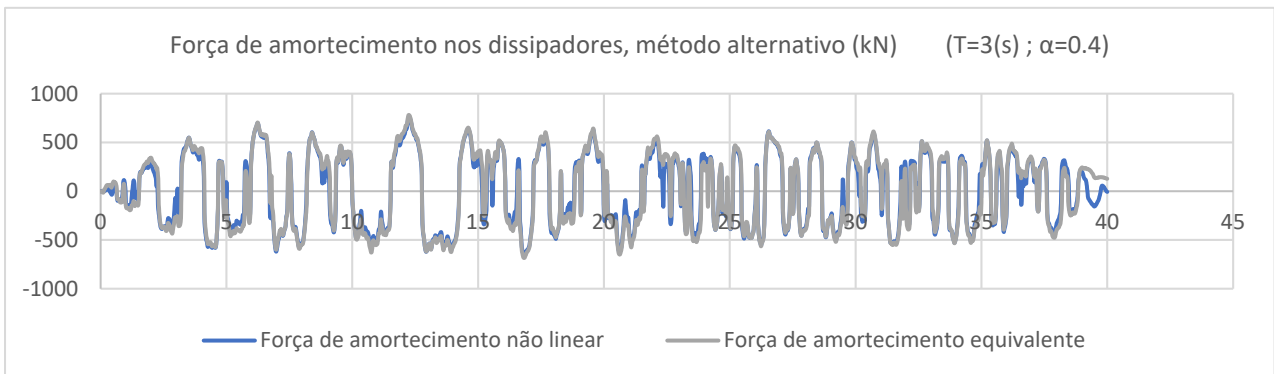
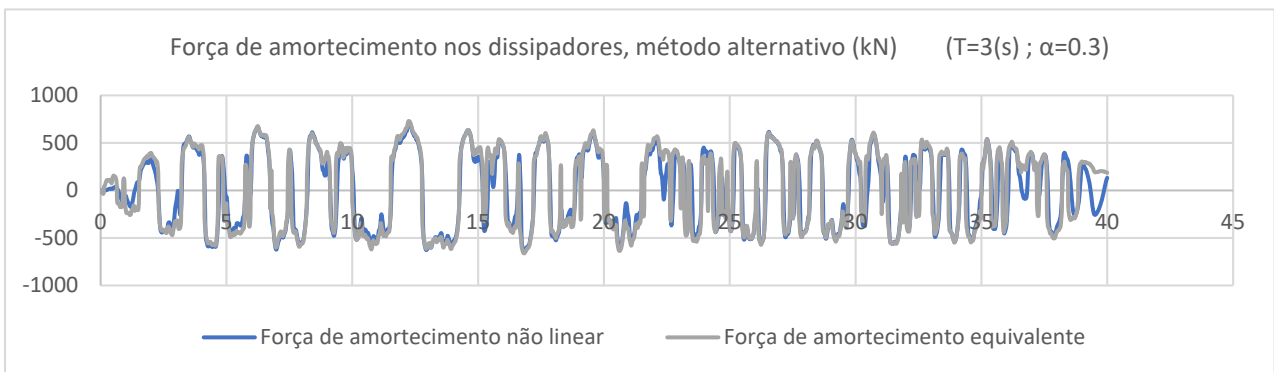
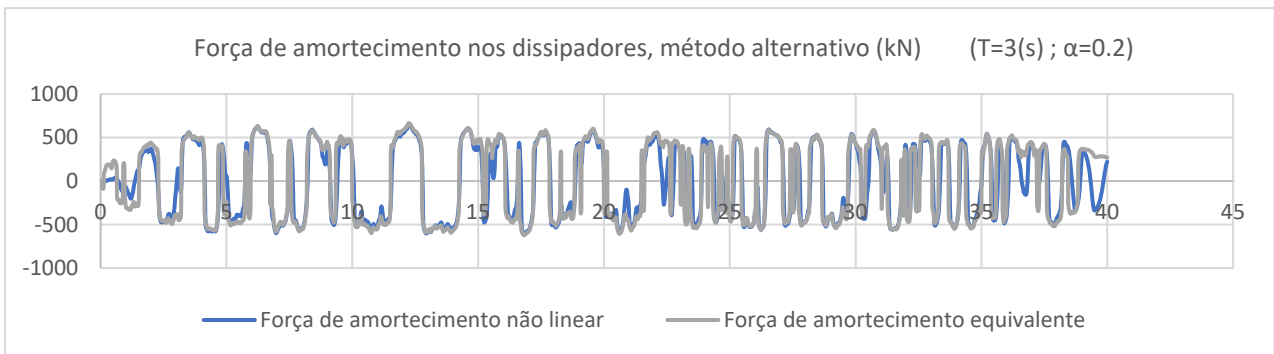
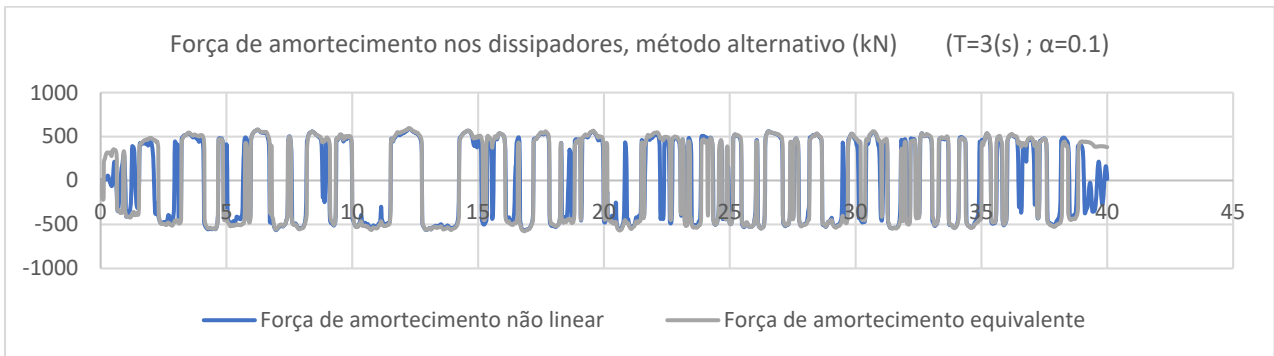


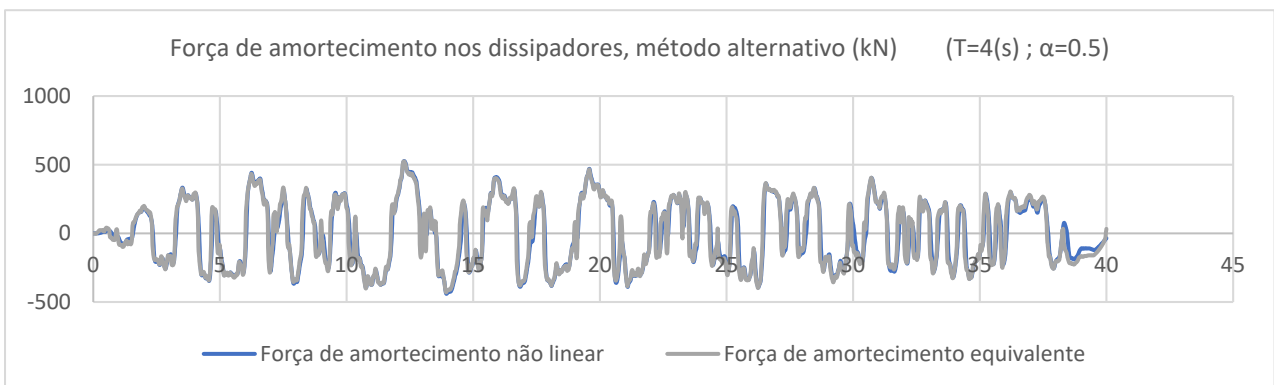
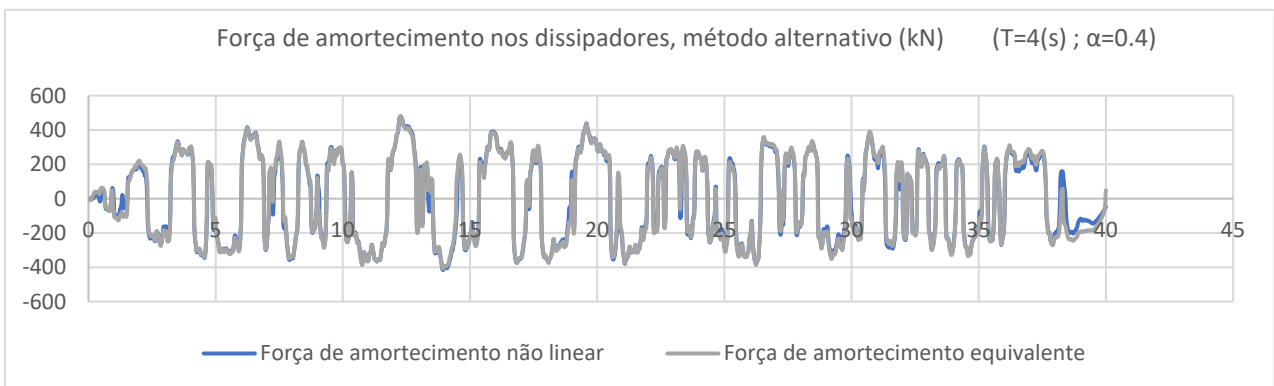
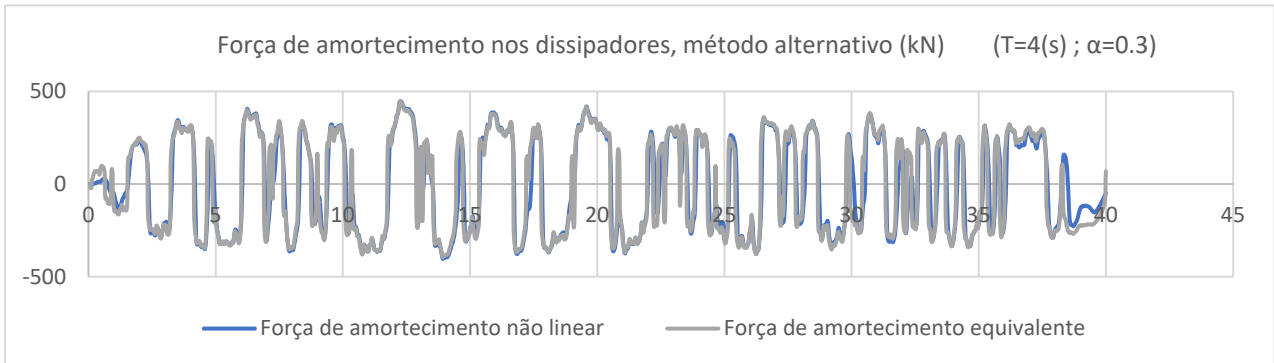
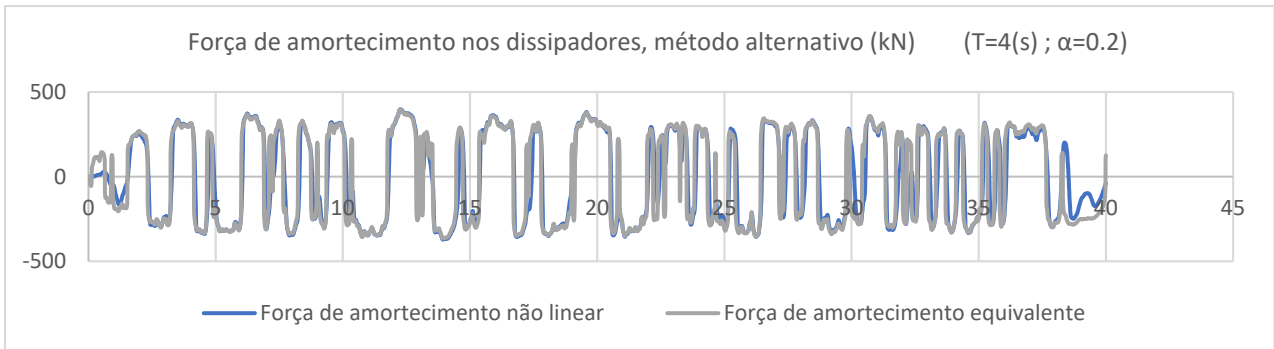
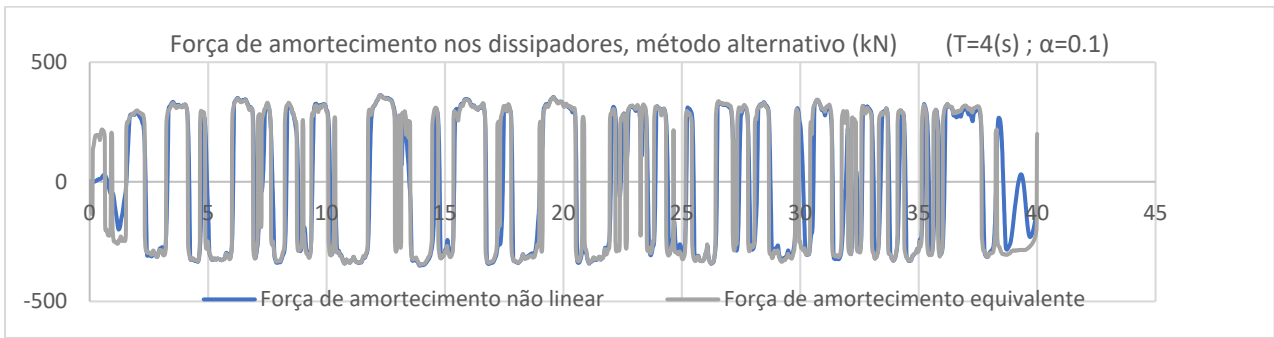


### A.2.5 Força Total nos Dissipadores Pelo Método Alternativo









### A.2.6 Deslocamento Relativo Longitudinal do Tabuleiro da Ponte - Força Total nos Dissipadores para a Ponte com Período de Vibração Longitudinal $T=1$ (s)

