

**RESPOSTA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS COM SISTEMAS DE
ISOLAMENTO DE BASE**

NELSON ANDRÉS ORTIZ CANO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**RESPOSTA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS COM SISTEMAS DE
ISOLAMENTO DE BASE**

NELSON ANDRÉS ORTIZ CANO

ORIENTADOR: JOSÉ LUÍS VITAL DE BRITO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM – 003A/08

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2008

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**RESPOSTA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS COM SISTEMAS DE
ISOLAMENTO DE BASE**

NELSON ANDRÉS ORTIZ CANO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof. José Luís Vital de Brito, DSc. (UnB)
(Orientador)**

**Prof. William Taylor Matias Silva, Dr.Ing. (UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Carlos Magluta, DSc. (COPPE-UFRJ)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 17 DE MARÇO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

ORTIZ CANO, NELSON ANDRÉS

Resposta Sísmica de Edifícios com sistemas de Isolamento de Base.

xvii, 92p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. Sistemas de isolamento de base (BISS) | 2. Isoladores de base. |
| 3. Dinâmica estrutural | 4. Controle de vibrações. |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORTIZ CANO, Nelson Andrés. (2008). Resposta Sísmica de Edifícios com Sistemas de Isolamento de Base. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM-003A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Nelson Andrés Ortiz Cano.

TÍTULO: Resposta Sísmica de Edifícios com Sistemas de Isolamento de Base.

GRAU: Mestre em Ciências ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Nelson Andrés Ortiz Cano

SQN 404 Bloco C Apto. 108.

CEP 70.845-030 Brasília/DF, Brasil.

DEDICATÓRIA

**A minha mãe Tina Cano pela força
Aos meus irmãos Alejo e Nana pelo apoio
A Carol pelo amor e a companhia.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador o professor José Luís Vital de Brito, pela disposição, interesse e paciência durante este tempo de pesquisa.

Aos professores William Taylor Matias Silva e Carlos Magluta, pela disponibilidade e interesse em participarem da banca examinadora.

Aos meus amigos brasileiros e latinos, pela amizade, companhia e por todos os momentos inesquecíveis vividos durante minha estadia no Brasil.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos os que me ajudaram na conclusão satisfatória deste trabalho de dissertação.

RESPOSTA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS COM SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE

RESUMO

Este trabalho de dissertação apresenta um estudo comparativo dos parâmetros que controlam a efetividade dos principais sistemas de isolamento de base utilizados na proteção de edifícios submetidos a excitações sísmicas. É avaliada, também, a eficiência desses parâmetros, tais como: o coeficiente de atrito, o período do isolador, a razão de amortecimento, o coeficiente rigidez estrutural e o período da superestrutura por intermédio da comparação das respostas dinâmicas obtidas no domínio do tempo para edifícios com e sem isolamento de base. Simulações numéricas do sistema acoplado de equações diferenciais que governam o comportamento da superestrutura-isolador são realizadas utilizando o programa Simulink® de Matlab®. Para avaliar a influência dos modos de vibração mais altos no comportamento da superestrutura-isolador foram propostos modelos dinâmicos de edifícios de dois e seis graus de liberdade submetidos às componentes de aceleração sísmica dos terremotos de EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). Adicionalmente, é examinada a efetividade do isolador de Nova Zelândia (NZ) no controle das vibrações máximas de um edifício 3D. Finalmente são apresentadas as conclusões dos resultados encontrados neste estudo.

Palavras-chave: sistemas de isolamento de base (BISS), isoladores de base, dinâmica estrutural, controle de vibrações.

SEISMIC RESPONSE OF BASE-ISOLATED BUILDING

ABSTRACT

This dissertation work presents a comparative study of parameters that control the effectiveness of the main base isolation systems used in the building protection under a seismic excitation. Also, it is evaluated the efficiency of parameter as: friction coefficient, isolator period, damping coefficient, structural stiffness, and structural period by means of comparative dynamics response obtained in the time domain of isolated and non-isolated buildings. Numerical simulations of couple differential equations systems that govern the superstructure-isolators behavior are set up using the simulink® program of Matlab®. For evaluating the influence of higher vibration modes in the superstructure-isolator behavior are used two and six-degree-of-freedom building dynamics models under a seismic acceleration components of EL Centro (1940), Kobe (1995) and Loma Prieta (1989) earthquake. Additionally, isolator's effectiveness of New Zealand (NZ) is examined for controlling the maximum 3D building vibrations. Finally are presented the conclusions of the results found in this study.

Keywords: Base isolated seismic systems (BISS), rubber bearing isolated, structural dynamics, vibration control.

SUMÁRIO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. | ASPECTOS GERAIS..... | 1 |
| 1.2. | OBJETIVOS | 3 |
| 1.2.1. | Objetivos gerais | 3 |
| 1.2.2. | Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.3. | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 4 |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1. | SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE (BISS) | 5 |
| 2.1.1. | Bloco de neoprene reforçado - <i>Laminated Rubber Bearing (LRB)</i> | 5 |
| 2.2.2. | Sistema de atrito puro - <i>Pure friction system (P-F)</i> | 6 |
| 3.2.3. | Sistema de apoio pendular com atrito - <i>Friction pendulum system (FPS)</i> | 7 |
| 2.2.4. | Isolador elástico com atrito - <i>Resilient-friction base Isolator (R-FBI)</i> | 8 |
| 2.2.5. | Isolador “electricite de france” - <i>Electric de france system (EDF)</i> | 8 |
| 2.2.6. | Isolador de Nova Zelândia – <i>New zeland bearing system (NZ)</i> | 9 |
| 2.2.7. | Isolador deslizante elástico com atrito – <i>Sliding resilient-friction (SR-F)</i> | 10 |
| 2.2. | BIBLIOGRAFIA BÁSICA SOBRE BISS..... | 11 |
| 2.3. | APLICAÇÕES DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE | 14 |
| 3. | FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 18 |
| 3.1. | FORMULAÇÃO MATEMÁTICA SUPERESTRUTURA-ISOLADOR | 18 |
| 3.2. | FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS ISOLADORES | 21 |
| 3.2.1. | Bloco de neoprene reforçado - <i>Laminated Rubber Bearing (LRB)</i> | 21 |
| 3.2.2. | Sistema de atrito puro - <i>Pure friction system (P-F)</i> | 23 |
| 3.2.3. | Sistema de apoio pendular com atrito - <i>Friction pendulum system (FPS)</i> | 23 |
| 3.2.4. | Isolador elástico com atrito - <i>Resilient-friction base Isolator (R-FBI)</i> .. | 24 |
| 3.2.5. | Isolador de Nova Zelândia – <i>New zeland bearing system (NZ)</i> | 24 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.3. | CARACTERÍSTICAS DA EXCITAÇÃO SÍSMICA | 26 |
| 3.4. | MÉTODOS DE SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MOVIMENTO | 29 |
| 3.4.1. | Técnicas de integração numérica | 29 |
| 3.4.2. | Equações diferenciais <i>rígidas</i> | 30 |
| 4. | ESTUDO NUMÉRICO | 32 |
| 4.1. | SISTEMA DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE -2GDL | 32 |
| 4.1.1. | Variação do período natural da superestrutura T_s | 33 |
| 4.1.2. | Variação do período natural do isolador T_b | 37 |
| 4.1.3. | Variação da razão de amortecimento ξ_b | 41 |
| 4.1.4. | Variação do coeficiente de atrito μ | 44 |
| 4.1.5. | Efetividade do isolador no controle da resposta sísmica | 47 |
| 4.2. | SISTEMA DE SEIS GRAUS DE LIBERDADE -6GDL..... | 56 |
| 4.2.1. | Resposta em função do tempo do edifício com o sistema P-F..... | 57 |
| 4.2.2. | Resposta em função do tempo do edifício com o sistema FPS..... | 61 |
| 4.2.3. | Resposta em função do tempo do edifício com o sistema R-FBI..... | 64 |
| 4.2.4. | Resposta em função do tempo do edifício com o sistema LRB..... | 67 |
| 4.2.5. | Resposta em função do tempo do edifício com o sistema NZ | 70 |
| 5. | ANÁLISES TRIDIMENSIONAL DE UM EDIFÍCIO COM 6 PAVIMENTOS | 73 |
| 6. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 78 |
| 6.1. | CONCLUSÕES..... | 78 |
| 6.2. | SUGESTÕES | 80 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 82 |
| | APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO DINÂMICO EM SIMULINK® EM AMBIENTE MATLAB® | 87 |
| A.1. | INTRODUÇÃO AO SIMULINK..... | 87 |
| A.2. | IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA..... | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Aplicações dos sistemas de isolamento em escala real | 16 |
| Tabela 3.1 – Força restauradora $f_b(t)$ dos sistemas de isolamento | 25 |
| Tabela 3.2 - Características dos acelerogramas usados nesta dissertação..... | 26 |
| Tabela 3.3 - Integradores de ODE em Matlab®..... | 31 |
| Tabela 4.1 - Características dos isoladores de base..... | 32 |
| Tabela 4.2 - Deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 2GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos..... | 49 |
| Tabela 4.3 - Eficiência no controle dos deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 2GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos..... | 55 |
| Tabela 4.4 - Massa, rigidez e amortecimento da superestrutura | 56 |
| Tabela 4.5 - Deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 6GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos..... | 57 |
| Tabela 4.6 - Eficiência no controle dos deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 6GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos..... | 59 |
| Tabela 4.7 - Propriedades do sistema de isolamento de base NZ para o exemplo do edifício tridimensional com 6 pavimentos. | 75 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Terremoto Bhuj, Índia 2001. | 2 |
| Figura 2.1 - Bloco de neoprene reforçado com placas de aço (LRB). | 5 |
| Figura 2.2 - Sistema de atrito puro (P-F). | 6 |
| Figura 2.3 - Sistema de apoio pendular com atrito (FPS). | 7 |
| Figura 2.4 - Isolador elástico com atrito (R-FBI). | 8 |
| Figura 2.5 - Isolador “electricite de france” (EDF) | 9 |
| Figura 2.6 - O sistema de isolamento de Nova Zelândia (NZ)..... | 10 |
| Figura 2.7 - (a) Edifício comercial <i>TOD`S Omotesando</i> , Japão (2004) (b) Edifício tipo <i>high-rise Park city Suginami Tóquio</i> , Japão (2000). | 15 |
| Figura 2.8 - (a) Condomínio residencial <i>house building on subway sub</i> em escala reduzida (b) Quadro ilustrativo do condomínio residencial..... | 16 |
| Figura 3.1 - Modelo dinâmico do <i>shear building</i> com isolamento de base. | 18 |
| Figura 3.2 - Esquema ilustrativo, modelo dinâmico e força x deslocamento dos isoladores de base. | 22 |
| Figura 3.3 - Espectros de deslocamento e aceleração NS (b) Espectros de deslocamento e aceleração EW | 27 |
| Figura 3.4 - (a) Acelerograma para o sismo de EL Centro (1940) (b) Acelerograma para o sismo de Kobe (1995) (c) Acelerograma para o sismo de Loma Prieta (1989) | 28 |
| Figura 3.5 - Métodos numéricos utilizados em dinâmica estrutural..... | 29 |
| Figura 4.1 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do período natural T_s para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 34 |
| Figura 4.2 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da base com a variação do período natural T_s para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 36 |
| Figura 4.3 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do período natural T_b para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da base com a variação do período natural T_b para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 40 |
| Figura 4.5 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do período natural ξ_b para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 42 |
| Figura 4.6 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da base com a variação do período natural ξ_b para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 43 |
| Figura 4.7 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do coeficiente de atrito μ para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 45 |
| Figura 4.8 - Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da base com a variação do coeficiente de atrito μ para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). | 46 |
| Figura 4.9 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema P-F ($\mu = 0,05$) | 48 |
| Figura 4.10 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema FPS ($\mu = 0,05$; $T_b = 2,5s$). | 50 |
| Figura 4.11 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema R-FBI ($\mu = 0,04$; $T_b = 4,0$; $\xi_b = 0,10$). | 52 |
| Figura 4.12 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema LRB ($T_b = 2,0$; $\xi_b = 0,10$) | 53 |
| Figura 4.13 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema NZ ($T_b = 2,5$; $\xi_b = 0,10$; $F_y/W = 0,05$)..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.14 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema P- F ($\mu = 0,01$)..... | 58 |
| Figura 4.15 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força restauradora do sistema de isolamento de base P-F ($\mu = 0,01$). | 60 |
| Figura 4.16 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema FPS ($\mu = 0,01$; $T_b = 2,5s$). | 62 |
| Figura 4.17 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força restauradora do sistema de isolamento de base FPS ($\mu = 0,01$; $T_b = 2,5s$) | 63 |
| Figura 4.18 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema R-FBI ($\mu = 0,01$; $T_b = 4,0$; $\xi_b = 0,10$). | 65 |
| Figura 4.19 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força restauradora do sistema de isolamento de base R-FBI ($\mu = 0,01$; $T_b = 4,0$; $\xi_b = 0,10$)..... | 66 |
| Figura 4.20 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema LRB ($T_b = 2,0$; $\xi_b = 0,10$). | 68 |
| Figura 4.21 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força restauradora do sistema de isolamento de base LRB ($T_b = 2,0$; $\xi_b = 0,10$) | 69 |
| Figura 4.22 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema NZ ($T_b = 2,5$; $\xi_b = 0,10$; $F_y/W = 0,05$) | 71 |
| Figura 4.23 - Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força restauradora do sistema de isolamento de base NZ ($T_b = 2,5$; $\xi_b = 0,10$; $F_y/W = 0,05$)..... | 72 |
| Figura 4.24 - Vista em planta e frontal do edifício com 6 pavimentos, unidades em cm | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.25 - Espectros de resposta dos deslocamentos e acelerações da superestrutura na direção x para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989) | 76 |
| Figura 4.26 - Espectros de resposta dos deslocamentos e acelerações da superestrutura na direção y para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989) | 77 |
| Figura A.1 - Modelo dinâmico do edifício com isolador P-F | 88 |
| Figura A.2 - Modelo dinâmico do edifício com isolador FPS | 89 |
| Figura A.3 - Modelo dinâmico do edifício com isolador R-FBI..... | 89 |
| Figura A.4 - Modelo dinâmico do edifício com isolador LRB | 90 |
| Figura A.5 - Modelo dinâmico do edifício com isolador NZ..... | 90 |
| Figura A.6 - Modelo dinâmico do edifício de base fixa BF. | 91 |

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

| | |
|-----------|---|
| A | constante da função de histereses z; |
| a_m | aceleração máxima do sismo; |
| B | matriz quadrada arbitraria na redução de ordem; |
| C | matriz de amortecimento; |
| d_m | deslocamento máximo do sismo; |
| EDF | <i>electric de france system;</i> |
| FPS | <i>friction pendulum system;</i> |
| $f(t)$ | excitação dinâmica; |
| $f_b(t)$ | força restauradora do isolador; |
| F_y | força de fluência do sistema NZ; |
| F_y/W | força de fluência normalizada; |
| g | aceleração da gravidade; |
| H | altura do sistema NZ; |
| HDRB | <i>high damping rubber bearing;</i> |
| K | matriz de rigidez; |
| k_b | coeficiente de rigidez do isolador; |
| K_e | rigidez efetiva do sistema NZ; |
| K_o | rigidez inicial do sistema NZ; |
| K_p | razão de rigidez da força de pos-fluência e a pré-fluência; |
| k_{sij} | coeficientes de rigidez da superestrutura; |
| K_v | rigidez vertical do sistema NZ; |
| LRB | <i>laminated Rubber Bearing ;</i> |
| LRBD | <i>lead damping rubber bearing;</i> |
| M | matriz de massa; |
| m_b | massa do isolador; |

| | |
|----------------------|--|
| m_s | massa da superestrutura; |
| m_{si} | massa do pavimento i ; |
| M_t | massa total do sistema superestrutura-isolador; |
| NZ | <i>new zeland bearing system</i> ; |
| P | Constante da função de histereses z ; |
| P | Carregamento vertical do edifício; |
| P–F | <i>pure friction system</i> ; |
| PTFE | <i>Polytetrafluoroethylene</i> ; |
| $Q_i(t)$ | Força externa; |
| R–FBI | <i>resilient-friction base isolator</i> ; |
| Sa - Base | acelerações máximas da base; |
| Sd - Base | deslocamentos máximos da base; |
| Sa - Superestrutura | acelerações máximas da superestrutura; |
| Sd - Superestrutura | Deslocamentos máximos da superestrutura; |
| Sax - Superestrutura | Espectro de acelerações da superestrutura na direção x ; |
| Say - Superestrutura | Espectro de acelerações da superestrutura na direção y ; |
| Sdx - Superestrutura | Espectro de deslocamentos da superestrutura na direção x ; |
| Sdy - Superestrutura | Espectro de deslocamentos da superestrutura na direção y ; |
| S–RF | <i>sliding resilient-friction</i> ; |
| $\text{sign}(\cdot)$ | função sinal; |
| T | Energia cinética; |
| T_d | tempo de duração do sismo; |
| T_s | período natural da superestrutura; |
| $u(t)$ | resposta do deslocamento; |
| u_b | deslocamento da base ; |
| u_s | vetor de deslocamentos ; |
| u_{si} | deslocamento da massa do pavimento i ; |

| | |
|------------------|--|
| u_{st} | vetor de deslocamentos totais; |
| $\dot{u}(t)$ | resposta da velocidade; |
| $\ddot{u}(t)$ | resposta da aceleração; |
| \ddot{u}_g | aceleração da excitação sísmica; |
| V | energia potencial; |
| v_m | velocidade máxima do sismo; |
| W | Peso total da superestrutura; |
| Y | deslocamento de fluência do isolador NZ; |
| z | função de histereses; |
| $[\alpha_n]$ | coeficiente do problema de autovalores; |
| α | constante da função de histereses z ; |
| β | constante da função de histereses z ; |
| λ | constante da função de histereses z ; |
| ω_b | frequência natural do isolador; |
| \mathfrak{S} | função de dissipação de energia de Rayleigh; |
| $[c_s]$ | matriz de amortecimento da superestrutura; |
| $[\omega_s]$ | matriz de frequência da superestrutura; |
| $[M_s]$ | matriz de massa da superestrutura; |
| \hat{A} | matriz quadrada singular arbitraria na redução de ordem; |
| ξ_b | razão de amortecimento do isolador; |
| ξ_{si} | razão de amortecimento do pavimento i da superestrutura; |
| $[\gamma]$ | razão de massa; |
| $\{\mathbf{R}\}$ | vetor unitário de ordem n ; |
| Δt | passo de tempo do operador de integração; |
| Φ | diâmetro do sistema NZ; |
| υ | deformação de corte; |
| μ | coeficiente de atrito; |

1. INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS GERAIS

Nas duas últimas décadas, o uso da técnica de isolamento sísmico de base em estruturas civis, para a proteção de edifícios contra eventuais terremotos, tem-se desenvolvido rapidamente e tem alcançado ampla aceitação na engenharia sísmica. As vantagens que esta tecnologia fornece no comportamento dinâmico de estruturas submetidas à ação sísmica fazem desta técnica uma alternativa diferente dos métodos convencionais para combater terremotos, que são baseados somente na resistência estrutural e na capacidade de dissipação de energia.

Esta nova estratégia tecnológica tem como principal objetivo a prevenção de danos dos elementos estruturais e não estruturais dos edifícios, os quais podem conter pessoas, equipamentos valiosos, ou material perigoso. Desta maneira os edifícios isolados, fornecem mais segurança do que edifícios não isolados. Na Figura 1.1. São apresentados dois edifícios construídos convencionalmente que foram danificados pelo terremoto Bhuj ocorrido na Índia no ano de 2001.

Segundo Naeim e Kelly (1999), o conceito de isolamento de base consiste em desacoplar o edifício ou a superestrutura das componentes horizontais do movimento do solo, pela interposição de elementos estruturais de baixa rigidez horizontal, entre a superestrutura e a fundação. Isto permite que a frequência fundamental do edifício com isolamento de base seja inferior à frequência fundamental deste, se executado com base fixa, bem como à frequência predominante da excitação sísmica.

Outra característica importante dos sistemas de isolamento é a transformação do primeiro modo dinâmico do edifício em deslocamento apenas do isolador, mantendo assim seu comportamento de corpo rígido. Os modos mais altos, os quais também produzem deslocamentos na estrutura, são ortogonais ao primeiro modo de vibração e, conseqüentemente, à excitação sísmica. Assim, os modos de vibração mais altos não irão participar do movimento do edifício, e a energia da excitação sísmica, para estas frequências altas, não será transmitida à estrutura. Com isto, verifica-se uma redução significativa da resposta dinâmica do edifício, ou seja, os deslocamentos, acelerações e

velocidades no topo do edifício serão menores do que aqueles verificados para edifícios com base fixa.

Com a evolução de materiais como o neoprene, os sistemas de isolamento de base estão sendo melhorados a cada dia. Países como Japão, Estados Unidos, Itália e Nova Zelândia, estão implementando aprimoramentos nas normas técnicas de dimensionamento de edifícios equipados com estes dispositivos. O uso dos sistemas de isolamento de base esta aumentando. Deste modo, é necessário que os engenheiros estruturais conheçam as ferramentas de análise computacional utilizadas neste tipo de estrutura.



Figura 1.1 – Terremoto Bhuj, Índia 2001.

Na literatura técnica se conhecem vários tipos de sistemas de isolamento de base, também chamados na literatura inglesa, de *Base isolation systems* (BISS). Segundo Acar (2006), estes sistemas são classificados em dois grupos, ou sejam:

1. Isoladores de base de neoprene
2. Isoladores de base deslizante

No primeiro grupo estão incluídos os isoladores de bloco de neoprene reforçado com placas de aço-*Laminated rubber bearing* (LRB), e os isoladores que apresentam um componente histerético, como o sistema da Nova Zelândia (NZ).

No segundo grupo pertencem os sistemas que usam a força de atrito como mecanismo de isolamento, estes sistemas são: o sistema de apoio de atrito puro -*Pure friction* (P-F) o sistema de apoio pendular com atrito -*Friction pendular systems* (FPS), o sistema elástico com atrito -*Resilient-friction base Isolator* (R-FBI), o sistema “Electricite de France” (EDF) e o deslizante elástico com atrito (SR-F). Estes três últimos isoladores usam a ação dupla da força de atrito e força elástica como meio de separação da excitação sísmica da estrutura principal do edifício.

1.2. OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO

1.2.1. Objetivos gerais

O objetivo principal desta dissertação é a realização de um estudo comparativo da efetividade dos sistemas de isolamentos de base, - Base isolation systems (BISS) na proteção de edifícios submetidos à ação sísmica.

1.2.2. Objetivos específicos

Avaliar a influencia dos parâmetros que controlam o comportamento dinâmico de edifícios com BISS submetidos a excitações sísmicas.

Obter espectros de resposta em função do período da superestrutura, do período do isolador, da razão de amortecimento e do coeficiente de atrito, para avaliar o efeito destes parâmetros na resposta sísmica da superestrutura-isolador.

Determinar a resposta ao longo do tempo de edifícios isolados e não isolados para avaliar a eficiência dos sistemas de isolamento de base na redução da resposta dinâmica.

Análise de edifícios em escala real modelados por intermédio de programas comerciais como o SAP2000, onde é examinada a efetividade dos sistemas de isolamento no controle dos deslocamentos e acelerações do topo do edifício.

1.3. ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de dissertação é composto de seis capítulos apresentados a seguir:

O capítulo 1 apresenta o contexto geral dos sistemas de isolamento de base, bem como, os objetivos e a estrutura desta dissertação.

O capítulo 2 revisa o estado da arte dos sistemas de isolamento de base na proteção de edifícios submetidos a excitações sísmicas. Conceitos essenciais a respeito deste assunto são desenvolvidos ao longo do capítulo. Adicionalmente é apresentada uma síntese dos estudos numéricos concernentes com os tópicos deste trabalho de dissertação. Por último, são descritos exemplos de aplicação de edifícios em escala real, equipados com dispositivos de isolamento sísmico.

O capítulo 3 descreve os fundamentos teóricos, assim como os modelos dinâmicos e as formulações matemáticas considerados neste estudo numérico. A seguir, é realizada uma breve descrição dos carregamentos sísmicos utilizados nas simulações numéricas e em seguida é abordada uma introdução dos métodos numéricos utilizados na solução das equações de movimento que controlam a resposta dinâmica deste tipo de estruturas.

No capítulo 4 se discute o foco principal desta dissertação, que são os sistemas de isolamento de base escolhidos para este estudo. Uma avaliação dos espectros de resposta e efetividade no controle das vibrações de edifícios isolados e não isolados é realizada de acordo com os resultados obtidos da solução das equações de movimento que governam o problema.

O capítulo 5 apresenta o estudo de um edifício em escala real equipado com o sistema de isolamento de base da Nova Zelândia. A análise do edifício é realizada no domínio do tempo. Para isso foi utilizado o programa computacional SAP2000 para modelar os elementos da estrutura principal do edifício.

Por último, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca dos resultados obtidos neste estudo, como também algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE (BISS)

Encontra-se disponível na atualidade uma grande variedade de sistemas de isolamento de base para utilização na indústria da construção. Materiais, como o neoprene, estão sendo desenvolvidos e aperfeiçoados para serem empregados na proteção de edifícios, pontes, e outros tipos de estruturas civis, buscando evitar os efeitos danosos advindos dos terremotos. Para tal, empresas de tecnologia da construção disponibilizam catálogos completos com diferentes dispositivos de isolamento de base nos quais é possível verificar suas principais propriedades, vantagens, bem como os procedimentos para sua instalação. Por terem vasta aplicação prática e grande aceitação na engenharia civil, os dispositivos apresentados por *Bozzo* (1996) serão considerados neste estudo.

2.1.1. – Bloco de neoprene reforçado - *Laminated Rubber Bearing* (LRB)

Os isoladores de bloco de elástomero são compostos basicamente de camadas alternadas de aço e neoprene vulcanizado, tendo como principal característica à ação paralela da força elástica e de amortecimento. Em geral, o sistema (LRB) apresenta boa capacidade de amortecimento, flexibilidade horizontal, além de alta rigidez vertical, apresentando ainda alta resistência à ambientes agressivos. Sua capacidade de carregamento vertical varia na faixa de 100 a 2.000 ton/unidade, sendo que os parâmetros que controlam o seu dimensionamento são a razão de amortecimento (ξ_b) e a frequência natural (ω_b).

A Figura 2.1 mostra os formatos cilíndricos e retangulares, que são os mais utilizados, e a distribuição dos materiais componentes do sistema (LRB).

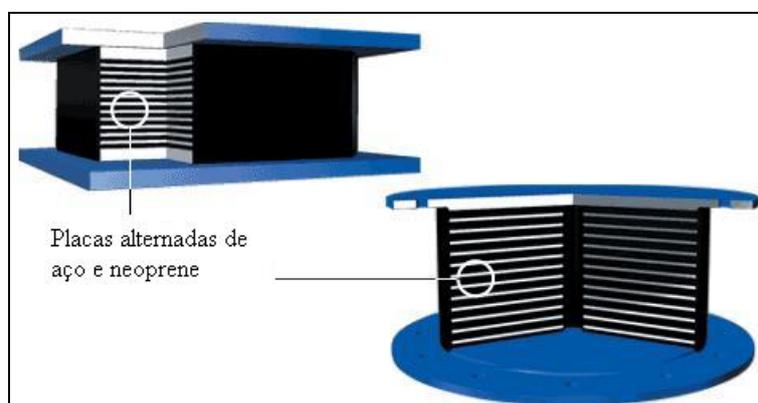


Figura 2.1 – Bloco de neoprene reforçado com placas de aço (LRB)

As placas de aço evitam a excessiva deformação lateral do bloco de neoprene, obtendo-se com isto um incremento da rigidez vertical e estabilidade para incrementos de cargas de compressão. A rigidez lateral do bloco não é influenciada pelas placas, podendo-se considerar o material como elástico-linear, com deformação de corte (ν) na faixa de 100 a 150% (Suy - 2005). Geralmente o isolador é conectado à base do edifício e da fundação, por meio de montantes metálicos ou placas de ancoragem. O comportamento não histerético deste tipo de isolador permite que este seja utilizado como complemento de outros tipos de isoladores.

2.1.2 – Sistema de atrito puro - *Pure friction system (P-F)*

Este é um dos sistemas de isolamento mais simples, o qual usa o mecanismo de atrito como meio de separação da excitação sísmica e a superestrutura. O sistema é formado basicamente por placas deslizantes que limitam os picos máximos de aceleração transmitidos pela subestrutura, em relação ao valor do coeficiente de atrito. A Figura 2.2 apresenta os componentes básicos do sistema P-F

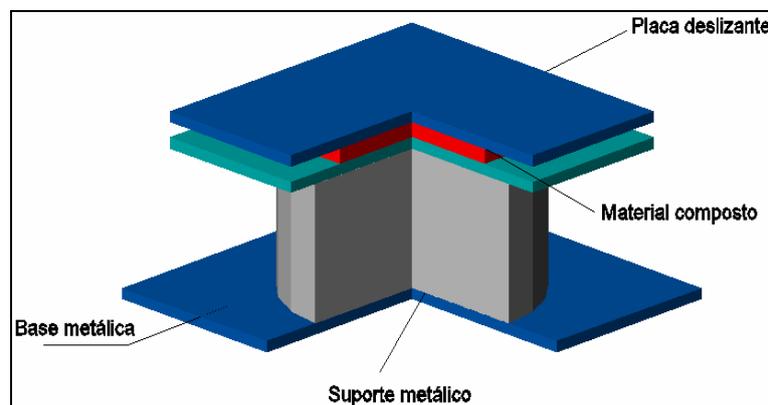


Figura 2.2 – Sistema de atrito puro (P-F)

Comparativamente com o sistema anterior, LRB, os sistemas “P-F” apresentam como vantagens o fato de ser efetivo para um amplo intervalo de entradas de frequências, terem grande capacidade de isolamento, devido ao fato da força de atrito ser gerada na base, tendo, portanto, magnitude proporcional à massa do edifício, além de fazerem com que o centro de massa e o centro de resistência do suporte deslizante coincidam. Como consequência, os efeitos de torção produzidos em edifícios assimétricos são reduzidos (Jangid e Datta, 1995).

Em condições normais de vibração ambiental e terremotos moderados, o sistema reage como um edifício de base fixa, devido ao coeficiente de atrito estático, mas para ações sísmicas maiores, o valor do coeficiente de atrito estático é superado e o sistema aciona o mecanismo de deslizamento, obtendo-se assim uma redução das acelerações transmitidas da subestrutura para o edifício. Autores como *Jangid* (1996), *Park* (2002), *Su* (1988), *Ordoñez* (2003) e *Younis e Tadjbakhsh* (1984) têm desenvolvido pesquisas sobre os métodos de análise deste tipo de isolador.

2.1.3. – Sistema de apoio pendular com atrito - *Friction pendulum system* (FPS)

O sistema de apoio pendular (FPS) é um isolador de atrito que combina a ação deslizante e a força do isolador, devido à gravidade, para obter o isolamento. O sistema é composto por duas placas metálicas esféricas (uma no topo, e outra na base) e um núcleo central que desliza entre as duas superfícies metálicas. Tanto o topo como a base do núcleo, estão protegidos por um material composto de baixo coeficiente de atrito (ver Figura 3.2). O movimento do sistema é análogo ao movimento de um pêndulo simples, portanto, o período (T_b) que depende da curvatura das superfícies e o coeficiente de atrito (μ) são os parâmetros que caracterizam este isolador. A Figura 2.3 mostra o esquema de funcionamento deste sistema.

Coefficientes de atrito ótimos do sistema pendular submetido à excitações sísmicas fortes, são propostos por *Jangid*.(2004). Respostas sísmicas no domínio da frequência de edifícios com FPS foram encontradas por *Calìò et al* (2003). De outra parte, respostas inelásticas foram obtidas pelos autores *Ordoñez et al* (2003).

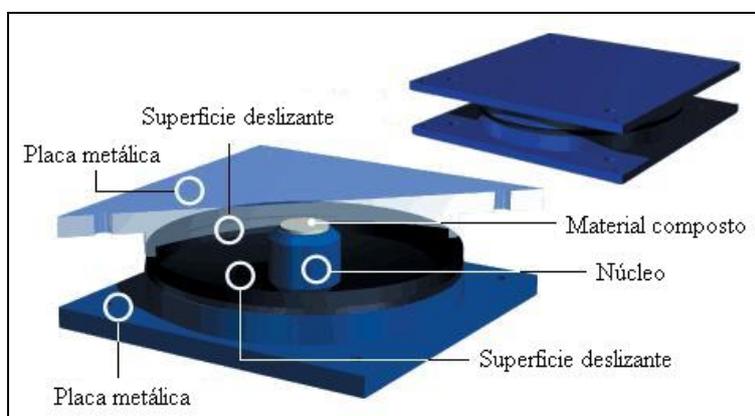


Figura 2.3 – Sistema de apoio pendular com atrito (FPS)

2.1.4. – Isolador elástico com atrito - *Resilient-friction base Isolator (R-FBI)*

O sistema elástico com atrito R-FBI proposto por *Mostaghel* (1986) é composto basicamente de camadas de anéis planos de material teflon, que deslizam entre si, e um núcleo central de neoprene que fornece a força do isolador. Na Figura 2.4 mostra-se o esquema deste tipo de isolador. O sistema combina os efeitos benéficos do amortecimento da força de atrito no teflon, com a resiliência do neoprene. O deslocamento e a velocidade do deslizamento são distribuídos ao longo da altura do R-FBI e o sistema de isolamento é fornecido pela ação paralela do atrito, do amortecimento e da força do isolador. As características principais deste isolador são: o período do isolador (T_b), a razão de amortecimento (ξ_b), e coeficiente de atrito (μ).

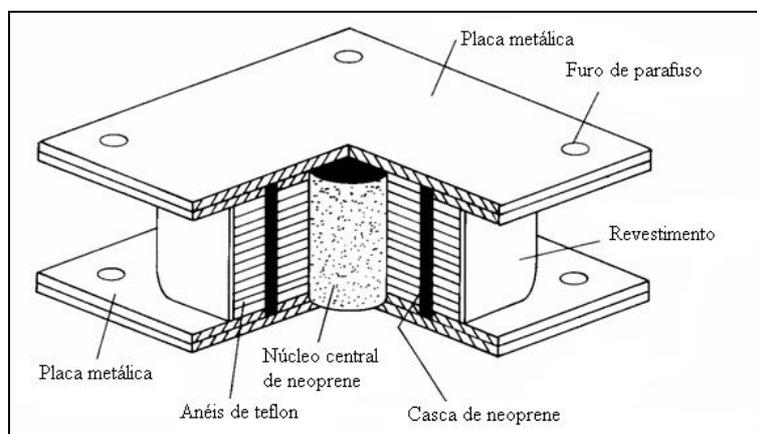


Figura 2.4 – Isolador elástico com atrito (R-FBI)

Trabalhos específicos sobre o R-FBI, foram publicados por *Su et al* (1989), onde foi avaliada a efetividade deste sistema. Outros autores como *Mostaghel e Khodaverdian* (1986) apresentam resultados experimentais e estudos computacionais deste sistema.

2.1.5. – Isolador “electricite de france” - *Electric de france system (EDF)*

Este sistema foi desenvolvido pela empresa francesa Framatome, para aplicação direta em usinas de energia nuclear localizadas em regiões de alta sismicidade. O EDF, Figura 2.5, é composto por duas placas deslizantes, uma camada de teflon, e lâminas de neoprene reforçado. A primeira placa se localiza no topo do isolador, sendo composta por uma liga de chumbo e bronze. Seqüencialmente à primeira placa, localiza-se a segunda placa, que é feita de aço inoxidável. Em seguida têm-se a camada de teflon e o

neoprene. Segundo Naeim e Kelly (1999), as placas deslizantes são dimensionadas para atender a um coeficiente de atrito de 0,2 durante a vida útil do isolador. Para amplitudes moderadas da excitação sísmica, o neoprene desloca-se no intervalo de ± 5 cm. Superado este valor, as placas deslizantes são acionadas e o isolamento de base passa a ser controlado pela força de atrito gerada entre as placas. O sistema não inclui nenhuma força do isolador, podendo assim apresentar deslocamentos permanentes. O sistema é caracterizado pelos seguintes parâmetros: período do isolador (T_b), razão de amortecimento (ξ_b) e coeficiente de atrito entre as placas deslizantes (μ_1).

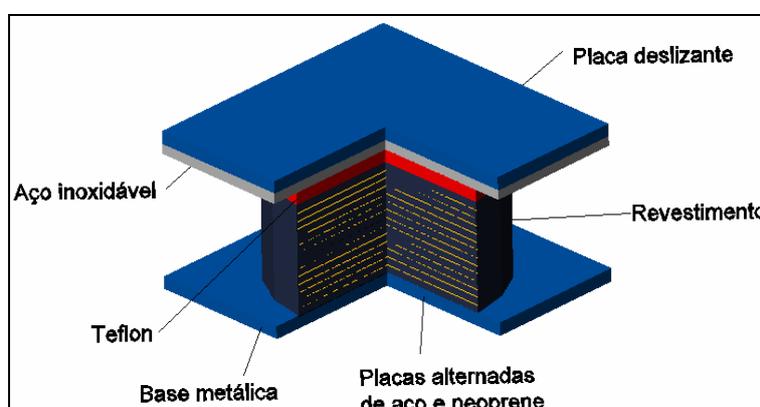


Figura 2.5 – Isolador “electricite de france” (EDF)

Tajirian et al (1990), têm desenvolvido o estado da arte do EDF, Uma aplicação importante deste sistema é a usina de energia nuclear de Koeberg localizada em África do Sul.

2.1.6 – Isolador de Nova Zelândia – *New zeland bearing system* (NZ)

O sistema de isolamento NZ é similar ao LRB. A diferença se encontra na adição de um núcleo de chumbo no centro do LRB. A função do núcleo é a dissipação de energia, enquanto que a flexibilidade lateral é fornecida pelas camadas de neoprene. A Figura 2.6 mostra o esquema deste sistema. O sistema NZ fornece uma componente de amortecimento histerético através da fluência do núcleo central. O comportamento da trajetória força-deformação do NZ é geralmente representado por equações diferenciais não-lineares acopladas. Na literatura técnica se encontram diagramas histeréticos típicos, tais como, elastoplásticos, bi-lineares, atrito-rigido e suave, nesta pesquisa será considerado o modelo histerético proposto por Wen (1976).

Trajelórias histeréticas diferentes foram estudadas por Malagoene e *Ferraioli* (1998). Nesse estudo, a efetividade do sistema e a performance das análises foram avaliadas. O NZ se caracteriza pelos seguintes parâmetros: O período do isolador (T_b), a razão de amortecimento (ξ_b) e a força de fluência normalizada (f_y/W), onde W é o peso total do edifício. Aplicações importantes deste sistema de isolamento têm sido implementadas na Nova Zelândia, Japão, Itália e Estados Unidos.

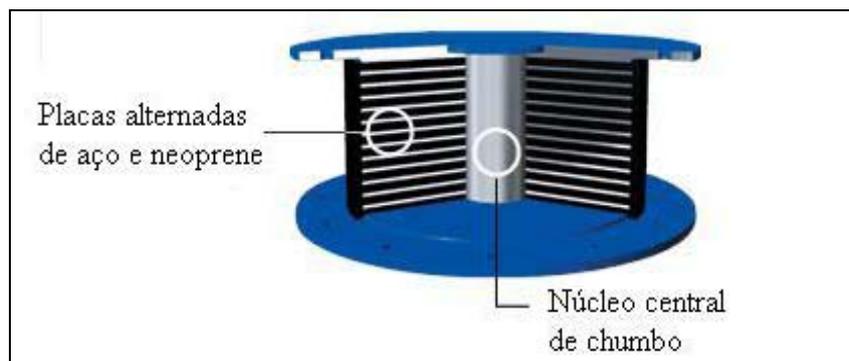


Figura 2.6 – O sistema de isolamento de Nova Zelândia (NZ)

2.1.7 – Isolador deslizante elástico com atrito – *Sliding resilient-friction* (SR-F)

O sistema proposto por *Sue et al* (1989) usa a ação combinada dos sistemas RFB-I e EDF. O sistema RFB-I é modificado com adição de duas placas deslizantes, em lugar das placas metálicas localizadas no topo. Desta forma, para movimentos gerados por sismos moderados, o sistema se comporta como uma base elástica com atrito RFB-I. Devido ao alto coeficiente de atrito das placas, o deslizamento só acontece em níveis elevados de acelerações do solo, fornecendo desta forma, um fator de segurança maior do que outros sistemas para situações de terremotos extremos não esperados.

O período do isolador (T_b), a razão de amortecimento (ξ_b), o coeficiente de atrito entre as placas (μ_1) e o coeficiente de atrito do isolador (μ) definem o comportamento deste sistema.

2.2. – BIBLIOGRAFIA BÁSICA SOBRE BISS

Um grande número de estudos numéricos têm sido publicados confirmando a efetividade dos sistemas de isolamento de base para a proteção de edifícios submetidos à excitações sísmicas. Autores como *Bozzo* (1996), *Nagarajaiah et al*(1991) e *Deb* (1997) apresentaram uma extensa revisão das técnicas de simulação numérica de edifícios equipados com BISS, incluindo os principais sistemas de isolamento propostos e as respectivas equações de movimento. Para estudos comparativos dos BISS, foram obtidas pelo autor respostas sísmicas de sistemas com um grau e vários graus de liberdade. Esquemas de integração passo a passo monolíticos, de condensação estática, e blocos iterativos foram mostrados em detalhes.

Barbat et al (1996) estudaram a eficiência das performances computacionais na solução das equações de movimento que governam a resposta sísmica de edifícios com isolamento de base não-linear. Exemplos adequados foram propostos para avaliar a velocidade de convergência do esquema de blocos iterativos e integração monolítica passo a passo.

Nagarajaiah et al (1991) apresentaram o modelo analítico e o algoritmo de solução para análises dinâmicas 3D não-linear de edifícios com BISS histeréticos e de atrito. Modelos uniaxiais e biaxiais dos isoladores histeréticos e de atrito foram considerados. A vantagem do método pseudoforça com iteração na solução de sistemas de equações diferenciais com alta não-linearidade foi conferida. Respostas dinâmicas para acelerogramas artificiais foram obtidas, tendo sido apresentados, também, comparações dos resultados da simulação numérica com os resultados experimentais a fim de validar o método proposto.

Su et al (1990) apresentaram um estudo comparativo da efetividade de vários isoladores de base, tendo sido incluídos neste estudo os sistemas LRB, NZ, R-FBI, e SR-F. A estrutura foi modelada como uma massa rígida, utilizando-se as componentes de aceleração sísmica, EL Centro (1940) e Cidade de México (1985), sendo avaliados e comparados o comportamento de diferentes dispositivos de isoladores. Pela primeira vez o sistema deslizante elástico com atrito (SR-F) foi proposto, sendo que este foi

desenvolvido da combinação das principais características dos sistemas de isolamento de base EDF e R-FBI.

Lin et al (1990) realizaram comparações entre as performances de três diferentes sistemas de isolamento (LBR, NZ, e R-FBI) utilizando o modelo espectral de Clough e Penzien, chegando a conclusões referentes aos intervalos de aplicabilidade dos sistemas de isolamento de base BISS para três magnitudes diferentes de sismos (M 6,0; 6,7; e 7,3). Respostas aleatórias de edifícios de um e cinco andares com BISS foram determinadas usando a técnica de linearização equivalente para resolver as equações de movimento que governam estes sistemas não-lineares. Conclusões importantes acerca do coeficiente de atrito na dissipação de energia foram apresentadas.

Malangone e Ferraioli (1998) propuseram o procedimento modal para análises sísmica de edifícios com sistemas de isolamento de base não-linear, considerando para tal dois dispositivos diferentes: NZ de alto amortecimento e NZ. Foram apresentadas caracterizações dos sistemas para os modelos analíticos visco-elástico, bi-linear histerético, além do modelo de Wen. Respostas modais e respostas sísmicas totais foram obtidas para sistemas amortecidos não-lineares e não-clássicos, usando uma extensão da técnica de Nigam-Jennings (1968). Foram feitas comparações do método proposto com o esquema de integração passo a passo, observando-se resultados muito próximos.

Ordoñez et al (2003) apresentaram um estudo numérico comparativo da resposta estrutural inelástica de edifícios com isolamento de base. Neste trabalho foram estudados os sistemas, LRB, NZ, P-F, FPS. O estudo foi feito em relação às repostas espectrais computadas de seis registros de sismos. Foram comparados diversos parâmetros, tais como: deslocamento da base; deslocamento relativo entre andares; deslocamentos totais; cortante na base e a demanda da ductilidade em estruturas com diferentes resistências.

Matsagar e Jagid (2003) investigaram a resposta sísmica de edifícios suportados sobre vários sistemas de isolamento de base, durante o impacto com estruturas adjacentes cuja modelagem foi representada por uma mola e um amortecedor. Equações diferenciais do movimento foram derivadas e resolvidas pelo o método de Newmark. A aceleração dos andares do edifício e o deslocamento do isolador durante as condições de impacto foram

computadas para diferentes excitações sísmicas. Estudos paramétricos foram executados para observar a influência das características de edifícios com isolamento de base, na resposta de impacto. Em particular foram estudados os parâmetros: flexibilidade e número de andares da superestrutura.

Park et al (2002) realizaram análises de sensibilidade dos sistemas de isolamento de base, P-F, LRB, R-FBI, EDF, e NZ. Neste trabalho foram analisadas as performances de pontes com vários vãos contínuos. Por intermédio destas análises foram encontrados intervalos de valores ótimos do período natural e coeficiente de atrito de vários BISS submetidos a registros de acelerações sísmicas, El Centro (Componente N00W, 1940), San Fernando (Componente S16E, 1971) e Cidade de México (Componente N90W, 1985).

Bartta e Corbi (2004) propuseram um processo de otimização para edifícios com sistemas de isolamento de base BISS. Foi investigada a influencia das propriedades mecânicas do solo no comportamento dos sistemas. Respostas no domínio da frequência e do tempo foram determinadas para o sistema LRB.

Jangid (2006) investigou respostas sísmicas numéricas de edifícios de vários andares equipados com o sistema NZ em condições de movimentos extremos. O *shear building* foi considerado como modelo dinâmico para representar a superestrutura do edifício. O comportamento bi-linear da trajetória da força versus deformação foi adaptado para a análise. Foram avaliadas as respostas do sistema para a componente normal de seis registros de sismos usando o esquema de integração numérica passo a passo. A variação da aceleração do topo do edifício e o deslocamento do isolador foram graficados contra vários parâmetros do sistema, tais como: flexibilidade da superestrutura; período do isolador e força de fluência do neoprene. Valores ótimos da força de fluência (f_y) do isolador NZ foram computados, tanto para edifícios, como para pontes isoladas com o sistema. *Jangid* (2004) já tinha apresentado um estudo similar para o sistema FPS, encontrando, nesse caso, valores ótimos do coeficiente de atrito (μ).

No Brasil trabalhos numéricos em reservatórios de água, e edifícios protegidos com o sistema de isolamento de base NZ têm sido desenvolvidos (*Battista* 2004). *Amarante* (2004), e *Alvariño* (2005) estudaram o comportamento de reservatórios elevados

submetidos a ação sísmica. Em suas análises incluíram a interação fluido-estrutura-fundação-solo. Respostas sísmicas no domínio do tempo foram obtidas por Amarante, e Alvariño, usando os métodos numéricos de Runge-Kutta, e de Newmark respectivamente. Análises da estabilidade do sistema NZ foram estudadas por Alvariño. De outra parte, *Blandon* (2003) publicou uma extensa revisão dos dispositivos de dissipação de energia utilizados na proteção de edifícios submetidos às excitações sísmicas. Comparações da efetividade no controle de vibrações entre os diferentes dispositivos foram realizadas.

Carneiro (2001) desenvolveu modelagens de estruturas de um grau de liberdade e um pórtico plano, com mecanismo de isolamento de base no programa ANSYS. Para a simulação das excitações sísmicas foram usados acelerogramas artificiais. Análises comparativas das respostas dinâmicas de edifícios com base rígida e com isolamento de base foram obtidas.

2.3 – APLICAÇÕES DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE

Numerosas aplicações na engenharia civil vêm se desenvolvendo em países como Japão, Estados Unidos, França, Itália, China e Nova Zelândia. Sistemas de isolamento de base estão sendo implementados em usinas de energia nuclear, edifícios, pontes, e plataformas petroleo. Na Figura 2.7 são apresentados exemplos de edifícios isolados no Japão. O primeiro edifício corresponde ao edifício comercial *Tod's Omotesando* projetado com o sistema NZ e concluído em Tóquio no ano de 2004. Um segundo exemplo é o condomínio *Park City Suginami* inaugurado em 2000. Esse edifício de apartamentos com uma altura efetiva de 84.7 m foi à primeira aplicação no mundo, dos sistemas de isolamento de base em edifícios tipo *high-rise*, o sistema de isolamento é composto de dispositivos de N-Z e amortecedores de chumbo com seção U.

Alguns edifícios projetados com sistemas de isolamento de base BISS têm experimentado terremotos e apresentado comportamento satisfatório, um exemplo é o edifício *West Japan Postal*. O prédio experimentou acelerações no topo de 0,13g enquanto que na base se registravam acelerações de 0,41g durante o terremoto de Kobe em 1995.



(a)



(b)

Figura 2.7 –(a) Edifício comercial *TOD'S Omotesando*, Japão (2004) (b) Edifício tipo *high-rise Park city Suginami* Tóquio, Japão (2000).

Atualmente existem mais de 4000 edifícios equipados com sistemas de isolamento sísmico de base. Condomínios de prédios como o *house building on subway sub* na China estão sendo protegidos com isolamento sísmico. Esse condomínio residencial formado por 50 edifícios de sete a nove andares é isolado por meio de uma laje de fundação que une todos os edifícios. A Figura 2.8 o modelo em escala reduzida e o quadro ilustrativo deste projeto.



Figura 2.8 – (a) Condomínio residencial *house building on subway sub* em escala reduzida (b) Quadro ilustrativo do condomínio residencial

Informações de aplicações existentes em outros países, além das descritas anteriormente são resumidas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Aplicações dos sistemas de isolamento em escala real

| Nome do projeto | Cidade/País | Situação | Área do projeto [m ²] | Informação do projeto estrutural |
|---|--------------------|-----------------|-----------------------------------|--|
| Park City Suginami (87.4 m) | Tóquio, Japão | Concluído 2000 | 19.224 | 30 NZ de alta resistência com diâmetro médio $\phi = 130$ cm, e 99 amortecedores de chumbo em U. |
| Tod's Omotesando | Tóquio, Japão | Concluído 2004 | 2.546 | Sistema NZ |
| Complex of Twentyone building Sagamihara | Tóquio, Japão | Incompleto 2006 | 12.349 (Laje de fundação) | 48 NZ com diâmetro $\phi = 120$ cm cm. 109 R-FBI $\phi = 40-120$ cm mais 85 rolamentos |
| Umeda DT Tower (130 m) | Osaka, Japão | Concluído 2004 | 47608 | Sistema de isolamento híbrido LRB+Amortecedores de massa |
| West Japan Postal Computer | Sanda, Japão | Concluído 1986 | 47000 | 120 Blocos de neoprene |
| International Terminal San Francisco Airport | San Francisco, USA | Concluído 1999 | 28.000 | Sistema pendular com atrito |
| Hayward City Hall | Hayward, USA | Concluído 1999 | 14.000 | Sistema pendular com atrito |

| Nome do projeto | Cidade/País | Situação | Área do projeto [m2] | Informação do projeto estrutural |
|---|---------------------------|-----------------|-----------------------------|--|
| Building S-12 | Hughes, USA | Concluído 1995 | - | 24 NZ, 21 LRB e PTFE |
| Hawley Apartment | San Francisco, USA | Concluído 1995 | - | 31 Isoladores tipo FPS |
| Administration Center, National Telephone Company | Ancona, Italia | Concluído 1998 | 12000 | Isolado com o sistema HDRB |
| Emergency management center | Foligno, Italia | Concluído 2005 | 3019 | Domo circular de diâmetro $\phi = 31$ m suportando por 10 HDRB de radio $r = 0.50$ m. |
| Wing Gervasutta Hospital | Udine, Italia | Concluído 2005 | - | 52 HDRB |
| National Museum | Wellington, Nova Zelândia | Concluído 1992 | 160000 | 142 NZ + 36 Teflon Pads |
| Union Hause | Auckland, Nova Zelândia. | Concluído 1988 | 13600 | Protegido com o sistema LRB |
| The Mansoury School | Vanadzpor, Armênia | Concluído 2002 | - | Protegido com o sistema HLRB |
| Terminal of Antalaya International Airoport (18 m) | Antalaya, Turquia | Concluído 2002 | 55.000 | Aeroporto de três andares 500 NZ+SDs |
| LNG Storage Tanks | Aliaga-Izmir, Turquia | Concluído 2001 | 5027 | O Segundo maior reservatório de água no mundo com capacidade de 140.000 m ³ foi protegido com 112 LRBs na borda e 221 LRBD no interior do tanque. |
| House Building on Subway Hub | Beijing, China | Concluído 2005 | 480.000 | 50 edifícios residências isolados (7-9 andares), construídos sobre uma plataforma de piso. |

3.–FUNDAMENTOS TEORICOS

3.1 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA SUPERESTRUTURA-ISOLADOR

O modelo dinâmico da superestrutura-isolador considerado neste estudo é um pórtico plano tipo *shear building* com base elástica submetido a uma componente de aceleração sísmica na base (\ddot{u}_g). A superestrutura é um edifício de n graus de liberdade como se mostra na Figura 3.1. cujo comportamento dinâmico é considerado linear elástico e de razão de amortecimento ξ_i para $i=1,2,\dots,n$, enquanto as não-linearidades estarão concentradas apenas na base do edifício como consequência do tipo de sistema de isolamento usado, LRB, F-P, FPS, R-FBI, EDF, NZ.

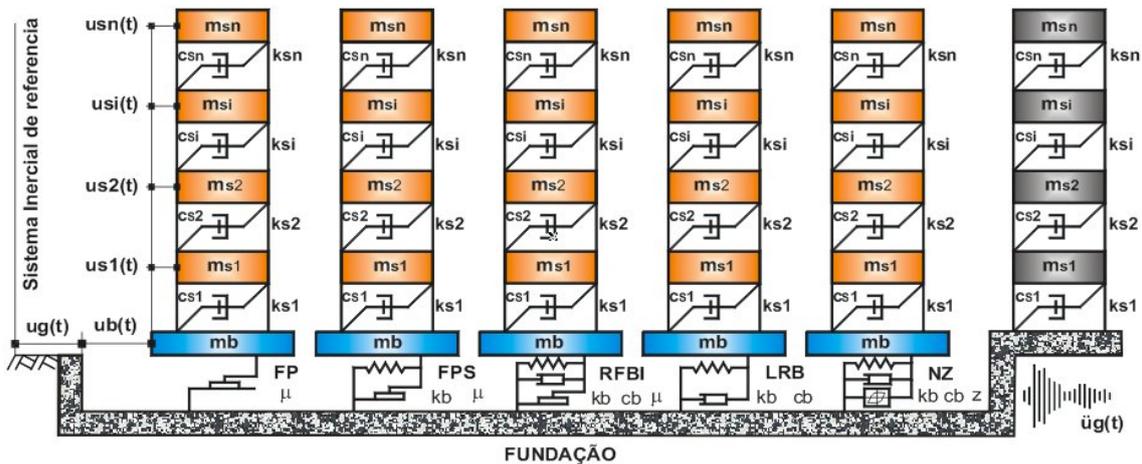


Figura 3.1 – Modelo dinâmico do *shear building* com isolamento de base

As seguintes suposições são feitas sobre o sistema estrutural em consideração:

1. O comportamento da superestrutura é considerado elástico linear durante a excitação sísmica. Esta hipótese é razoável já que o sistema de isolamento de base tende a reduzir a resposta sísmica e como consequência a superestrutura permanece dentro do regime elástico.
2. Os pavimentos e a base do sistema superestrutura-isolador são considerados rígidos em seu próprio plano e a massa (m_{s_i}) se supõe estar concentrada em cada nível de piso.
3. Os pilares são inextensíveis e de menor peso do que os pisos, fornecendo a rigidez lateral do sistema.

4. O sistema superestrutura-isolador está submetido à ação dinâmica da componente de aceleração sísmica na base (\ddot{u}_g), devido ao movimento do solo.
5. Os efeitos interação solo-estrutura não são levados em consideração.

Com base nessas hipóteses, as equações do movimento do sistema são obtidas por intermédio da equação da Lagrange, definida em termos da energia potencial, cinética e da função de dissipação de energia de Rayleigh.

Os deslocamentos relativos da superestrutura são agrupados em um vetor de deslocamentos $\mathbf{u}_s = \{u_{s_1} \dots u_{s_i} \dots u_{s_n}\}^T$ onde n representa o número de pavimentos da superestrutura. O deslocamento da base relativo ao solo é denotado por u_b .

Em coordenadas generalizadas os deslocamentos relativos da superestrutura e da base são expressos pelo vetor de deslocamentos totais \mathbf{u}_s^t como segue:

$$\mathbf{u}_s^t = \{u_{s_1}^t \dots u_{s_i}^t \dots u_{s_n}^t\}^T \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1) o deslocamento total da coordenada i é $u_{s_i}^t = u_{s_i} + u_b + u_g$ com $i=1, 2, \dots, n$. A energia cinética, T , e a energia potencial, V , do sistema são definidas respectivamente pelas Equações (3.2) e (3.3).

$$T = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n m_{s_i} (\dot{u}_{s_i}^t)^2 + m_b (\dot{u}_b^t)^2 \right] \quad (3.2)$$

$$V = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{s_{ij}} u_{s_i}^t u_{s_j}^t + k_b u_b^t \right] \quad (3.3)$$

Além das hipóteses mencionadas anteriormente o sistema estrutural é considerado não conservativo, portanto os efeitos das forças de amortecimento são levados em conta por meio da função de dissipação de energia de Rayleigh. Isto é:

$$\mathfrak{D} = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{s_{ij}} \dot{u}_{s_i}^t \dot{u}_{s_j}^t + c_b \dot{u}_b^t \right] \quad (3.4)$$

Definidas a energia potencial, a energia cinética e a função de dissipação de Rayleigh, a equação de movimento é obtida por intermédio da Equação de Lagrange (3.5).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(T-V)}{\partial \dot{u}_i} \right) - \frac{\partial(T-V)}{\partial u_i} + \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial \dot{u}_i} = Q_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

Neste estudo só serão consideradas as forças inerciais devidas à excitação sísmica, portanto, a força externa $Q_i(t)=0$. Substituindo as Equações (3.2), (3.3) e (3.4) na Equação (3.5), se obtém a Equação de movimento (3.6):

$$[M_s]\{\ddot{u}_s\} + [C_s]\{\dot{u}_s\} + [K_s]\{u_s\} = -[M_s]\{R\}(\ddot{u}_b + \ddot{u}_g) \quad (3.6)$$

Onde os termos $[M_s]$, $[K_s]$, $[C_s]$ são respectivamente as matrizes de massa, rigidez e amortecimento da superestrutura considerada como base fixa e $\{R\}$ é um vetor unitário que esta associado com os graus de liberdade considerados no *shear building*.

Nos casos de estruturas com graus de liberdade em diferentes direções, o termo R poderia ser uma matriz formada por zeros e uns. Neste estudo foi considerado somente um grau de liberdade por andar na direção x como é apresentado na Figura 3.1. portanto, neste caso, R é um vetor dado por $\{R\} = \{1 \ \dots \ 1\}_{1 \times n}^T$.

Para resolver a Equação diferencial (3.6) é necessário definir outra equação de modo a formar um sistema de $n+1$ equações diferenciais. Esta equação é obtida por intermédio da terceira lei de Newton, aplicada aos modelos dinâmicos de cada tipo de isolador. Desta maneira é determinado um sistema acoplado de equações diferenciais não-lineares que são resolvidas pelo método de *Runge Kutta* de quarta ordem.

3.2. – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS ISOLADORES

3.2.1. – Bloco de neoprene reforçado - *Laminated Rubber Bearing (LRB)*

De acordo com a Figura 3.2(a), o comportamento do sistema LRB é linear e se caracteriza pela rigidez lateral, k_b e o coeficiente de amortecimento c_b . Usualmente estes parâmetros são definidos em termos da frequência ω_b e a razão de amortecimento ξ_b , portanto, o sistema LRB é caracterizado por:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{M_t}} \quad (3.8)$$

$$\xi_b = \frac{c_b}{2M_t\omega_b} \quad (3.9)$$

Onde,

$$M_T = m_b + \{\mathbf{R}\}^T [\mathbf{M}_s] \{\mathbf{R}\} \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10) o termo $[\mathbf{M}_s]$ é a matriz de massa da superestrutura e o M_t é a massa total do sistema incluindo o isolador de massa m_b . A equação de movimento que relaciona os deslocamentos do isolador u_b com os deslocamentos da superestrutura u_s é definida de acordo com os parâmetros do sistema LRB, portanto:

$$\{\mathbf{R}\}^T [\gamma] \{\ddot{u}_s\} + \ddot{u}_b + \xi_b \dot{u}_b + \omega_b^2 u_b = -\ddot{u}_g \quad (3.11)$$

Onde a relação de massa γ esta definida pela Equação (3.12)

$$[\gamma] = \frac{[\mathbf{M}_s]}{M_T} = \frac{\begin{bmatrix} m_{s_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_{s_n} \end{bmatrix}}{M_T} \quad (3.12)$$

A Equação (3.11) junto à Equação (3.7) formam um sistema acoplado de equações diferenciais que governam o comportamento dinâmico do sistema LRB.

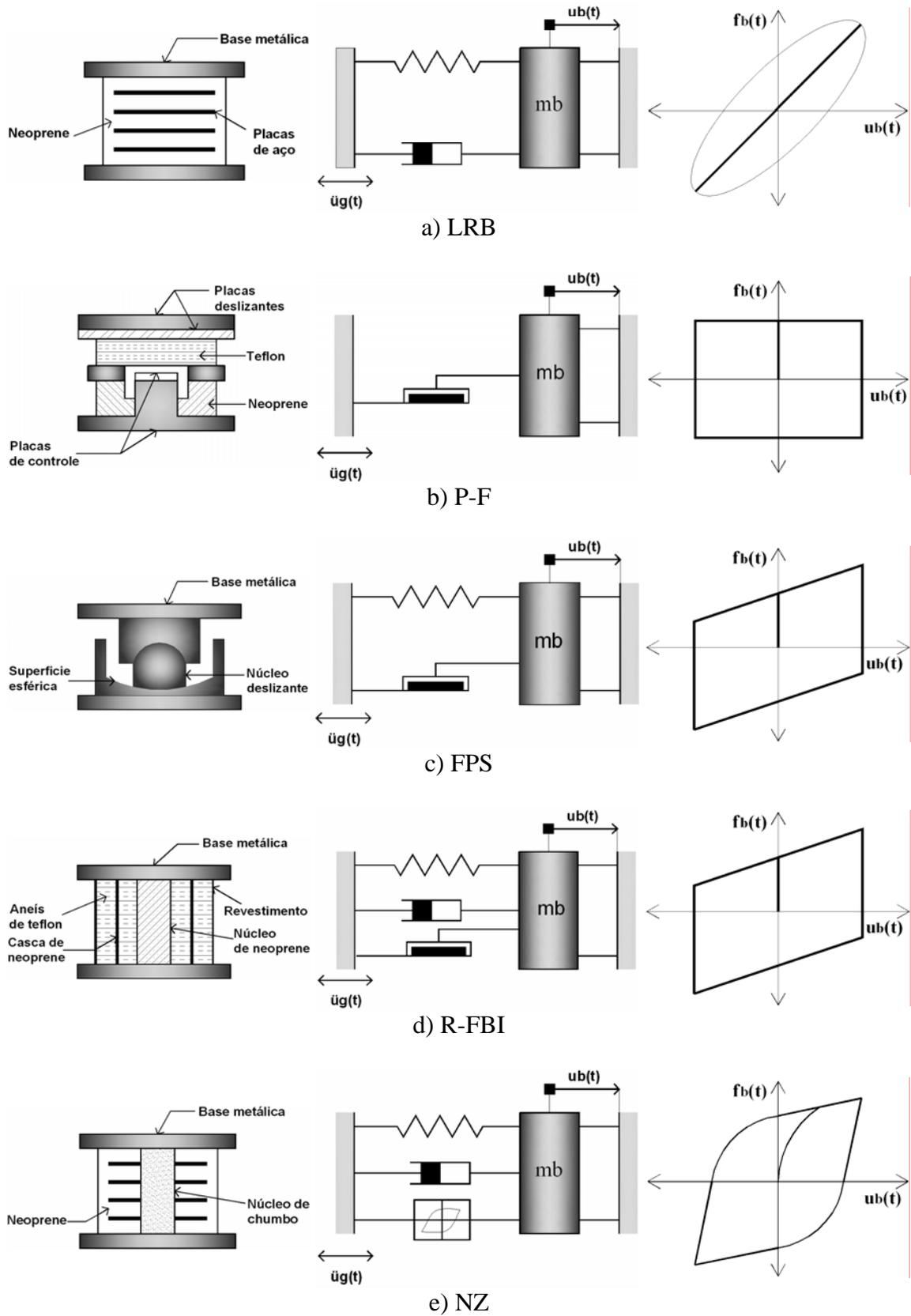


Figura 3.2 – Esquema ilustrativo, modelo dinâmico e força x deslocamento dos isoladores de base.

3.2.2 – Sistema de atrito puro-*Pure friction system (P-F)*

Existem diferentes modelos para representar a força de atrito gerada pelo contato entre as duas superfícies que compõem o isolador P-F, Figura 3.2(b). Um modelo simples é admitir a formulação de Coulomb, onde a força de atrito depende do coeficiente de atrito, μ , e do peso total do sistema superestrutura-isolador, $W = M_t g$, sendo que g é a aceleração da gravidade. Deste modo, a expressão da força de atrito é dada pela Equação (3.13).

$$F_s = \mu M_t g \text{sing}(\dot{u}) \quad (3.13)$$

Onde a função sinal é:

$$\text{sing}(\dot{u}) = \begin{cases} 1, \text{ se } \dot{u} > 0 \\ -1, \text{ se } \dot{u} < 0 \\ 0, \text{ se } \dot{u} = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Com base nesta formulação se obtém do equilíbrio do isolador a segunda equação que governa o comportamento do sistema P-F. A Equação (3.15) junto com a Equação (3.7) compõem o sistema de equações de movimento do sistema com isolador P-F.

$$\{R\}^T [\gamma] \{\ddot{u}_s\} + \ddot{u}_b + \mu g \text{sing}(\dot{u}_b) = -\ddot{u}_g \quad (3.15)$$

3.2.3. – Sistema de apoio pendular com atrito-*Friction pendulum system (FPS)*

O sistema de apoio pendular FPS, Figura 3.2(c) incorpora a força de atrito considerada anteriormente com a força da base surgida pela curvatura de suas superfícies de contato. Por tanto, a equação do sistema FPS em termos da frequência ω_b do pendulo simples é:

$$\{R\}^T [\gamma] \{\ddot{u}_s\} + \ddot{u}_b + \omega_b^2 u_b + \mu g \text{sing}(\dot{u}_b) = -\ddot{u}_g \quad (3.16)$$

A Equação (3.16) junto à Equação (3.7) constituem um sistema acoplado de equações diferenciais que permitem descrever o movimento do sistema FPS. Os parâmetros principais deste sistema são o período do isolador $T_b = 1/\omega_b$ e o coeficiente de atrito μ .

3.2.4. – Isolador elástico com atrito - *Resilient-friction base Isolator (R-FBI)*.

O sistema R-FBI, Figura 3.2(d), além de incorporar uma força do isolador análogo ao sistema FPS, adiciona, também, uma força de amortecimento viscosa devido ao núcleo central de neoprene. Deste modo, os parâmetros principais do R-FBI são o período do isolador $T_b = 1/\omega_b$, a razão de amortecimento ξ_b e o coeficiente de atrito μ . A expressão que relaciona os deslocamentos do isolador u_b com os deslocamentos da superestrutura u_s vem dada pela Equação (3.17). Esta equação mais à Equação (3.7) constituem um sistema de equações que permite determinar a resposta sísmica da superestrutura-isolador.

$$\{\mathbf{R}\}^T [\gamma] \{\ddot{u}_s\} + \ddot{u}_b + \xi_b \dot{u}_b + \omega_b^2 u_b + \mu g \sin g(\dot{u}_b) = -\ddot{u}_g \quad (3.17)$$

3.2.5 – Isolador de Nova Zelândia – *New zeland bearing system (NZ)*

Com a plastificação do núcleo central de chumbo do sistema de NZ, Figura 3.2(e) este sistema incorpora uma função de histerese, (z) , que fornece um amortecimento adicional às características de amortecimento e rigidez do sistema LRB. Tipicamente as equações que relacionam a força e o deslocamento do isolador são apresentadas por intermédio de um sistema de equações diferenciais. Como se mencionou anteriormente, neste estudo foi considerado o modelo de Wen (1976) definido pelas Equações (3.18) e (3.19).

$$\{\mathbf{R}\}^T [\gamma] \{\ddot{u}_s\} + \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + \alpha \omega_b^2 u_b + (1-\alpha)g \frac{F_y}{W} z(t) = -\ddot{u}_g \quad (3.18)$$

$$Y\dot{z}(t) = A\dot{u}_b - \beta|\dot{u}_b||z(t)|^{p-1}z(t) - \lambda\dot{u}_b|z(t)|^p \quad (3.19)$$

O sistema de isolamento de NZ é caracterizado pelo período do isolador (T_b), a razão de amortecimento (ξ_b) e a força de fluência normalizada (F_y/W) devido à adição da função de histerese (z). Outros parâmetros secundários presentes nestas equações são definidos a seguir: g , aceleração da gravidade; Y , A , β , λ , α , p ; constantes que definem a função de histerese z .

Os valores adotados para essas constantes foram apresentados por Constantinou *et al* (1987), considerando um modelo visco-plástico. Neste caso particular o parâmetro Y representa o deslocamento de fluência e as outras constantes assumem os seguintes valores $A=1$, $\beta+\lambda=1.0$, $\alpha=0.157$ e $p=2$. Introduzindo estes valores na Equação (3.19) se obtém, após algumas manipulações algébricas, a seguinte equação:

$$\frac{dz}{dt} + z^2 \left(\frac{\dot{u}_b}{Y} \right) - \frac{\dot{u}_b}{Y} = 0 \quad (3.20)$$

Uma solução explícita da Equação (3.20) foi encontrada por Kamke (1959), portanto a função de histerese (z) se define como:

$$z = \tanh\left(\frac{u_b}{Y}\right) \quad (3.21)$$

As Equações (3.18) e (3.19) junto com a Equação (3.7) descrevem o modelo dinâmico do sistema de NZ, sendo a função de histerese definida pela Equação (3.21).

De acordo com o exposto nesta seção, a força desenvolvida na base do edifício isolado pode ser de natureza linear ou não linear dependendo do modelo dinâmico adotado para cada tipo de sistema de isolamento de base. A Figura 3.2 apresenta os modelos dinâmicos dos isoladores considerados neste estudo, enquanto a Tabela 3.1 mostra os valores efetivos da força do isolador de base $f_b(t)$.

Tabela 3.1 – Força do isolador de base $f_b(t)$

| Sistema de isolamento | Força do isolador $f_b(t)$ |
|-----------------------|---|
| LRB | $f_b(t) = \xi_b \dot{u}_b + \omega_b^2 u_b$ |
| P-F | $f_b(t) = \mu g \sin g(\dot{u}_b)$ |
| FPS | $f_b(t) = \omega_b^2 u_b + \mu g \sin g(\dot{u}_b)$ |
| R-FBI | $f_b(t) = \xi_b \dot{u}_b + \omega_b^2 u_b + \mu g \sin g(\dot{u}_b)$ |
| NZ | $f_b(t) = \xi_b \dot{u}_b + \alpha \omega_b^2 u_b + (1 - \alpha) g \frac{F_y}{w} z(t)$ |
| | $Y \dot{z}(t) = A \dot{u}_b - \beta \dot{u}_b z(t) ^{p-1} z(t) - \lambda \dot{u}_b z(t) ^p$ |

3.3 – CARACTERÍSTICAS DA EXCITAÇÃO SÍSMICA

As excitações sísmicas são caracterizadas pela relação entre a aceleração máxima (a_m) e a velocidade máxima (v_m) do movimento do solo, o que representa a frequência dominante e a energia contida na excitação. Movimentos do solo com pulsos de aceleração de longa duração correspondem a relações (a_m/v_m) baixas, o que se interpreta como excitações de baixas frequências. Por outro lado, pulsos de aceleração de curta duração apresentam altas relações (a_m/v_m) e são definidas como excitações de alta frequência.

Segundo Dicleli e Buddaram (2006) as repostas dinâmicas de sistemas estruturais submetidos à ação sísmica podem diferir de acordo a função da relação (a_m/v_m) do movimento do solo. Em engenharia de projetos seria necessário realizar procedimentos de análise com excitações sísmicas de diferentes relações de pico (a_p/v_p). No entanto, nesse estudo, por tratar-se da avaliação da efetividade dos sistemas de isolamento de base, serão considerados apenas três tipos de excitação sísmica, EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989). Algumas características mais relevantes destes registros sísmicos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 3.2 – Características dos acelerogramas usados nesta dissertação

| Excitação Sísmica | Pais/Ano | Estação | Ms | Cs | a_m [g] | v_m [m/s] | d_m [m] | a_m/v_m [s ⁻¹] | T_d [s] |
|-------------------|-----------------|-----------------------|-----|-----|----------------|------------------|----------------|----------------------------------|----------------|
| El Centro | USA (1940) | Array #9 | 7.0 | 180 | 0.3130 | 0.2980 | 0.1332 | 10,30 | 40 |
| | | | | 270 | 0.2150 | 0.3020 | 0.2391 | 6,98 | |
| Kobe | Japão (1995) | Kakogawa | 6.9 | 000 | 0.2510 | 0.1870 | 0.5830 | 13,17 | 40 |
| | | | | 090 | 0.3450 | 0.2760 | 0.0960 | 12,26 | |
| Loma Prieta | USA (1989) | Agnews State Hospital | 6.9 | 000 | 0.1720 | 0.260 | 0.1264 | 6,49 | 40 |
| | | | | 090 | 0.1590 | 0.1760 | 0.0975 | 8,86 | |

d_m : Deslocamento máximo

T_d : Tempo de duração do sismo

Ms: Magnitude do sismo

Cs: Componente do sismo

Além das características da Tabela 3.2 são apresentados na Figura 3.3 os espectros de resposta das acelerações (S_a) e deslocamentos (S_d) das excitações sísmicas escolhidas no presente estudo, onde a razão de amortecimento do extrato de solo foi de 2%.

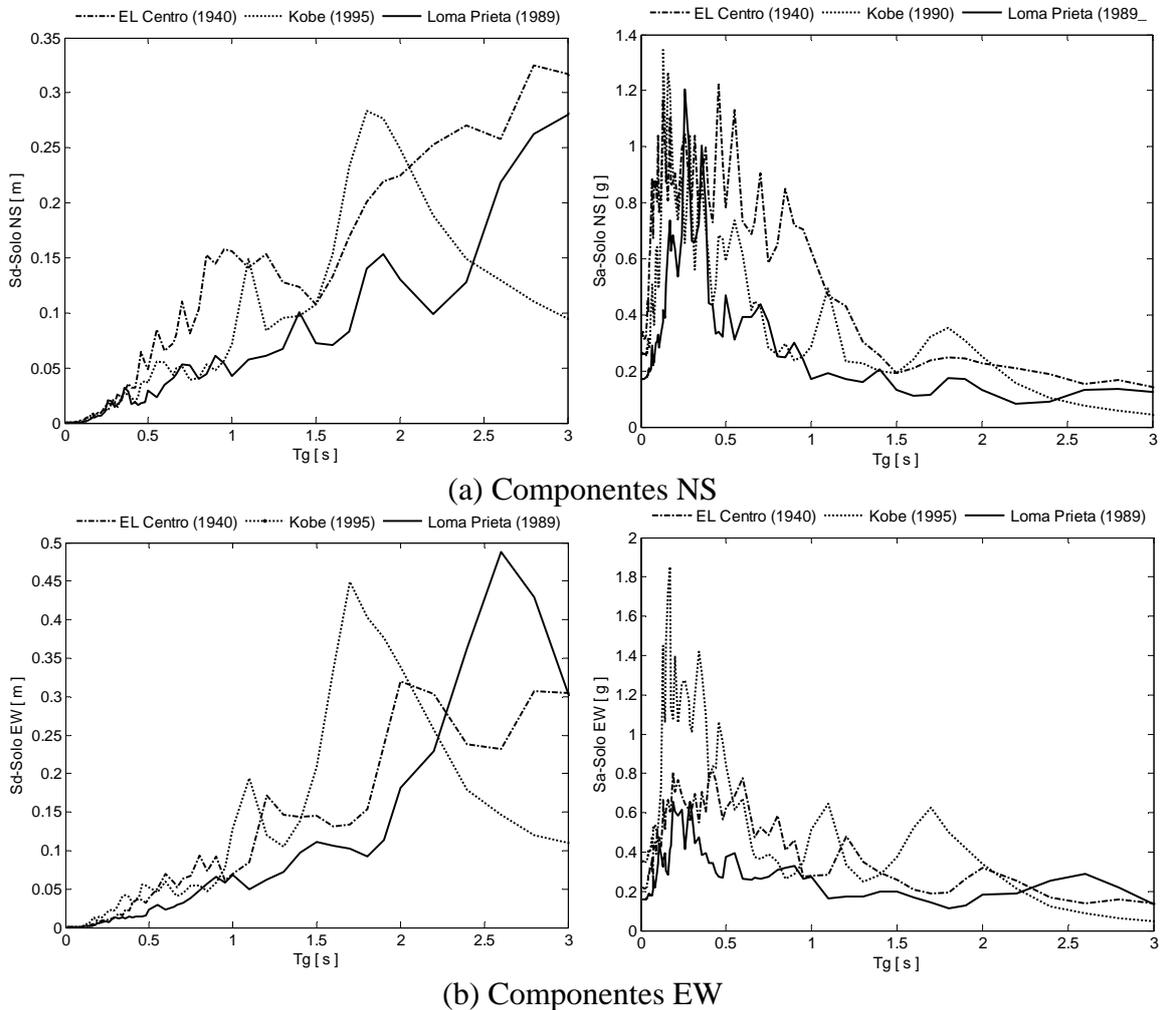
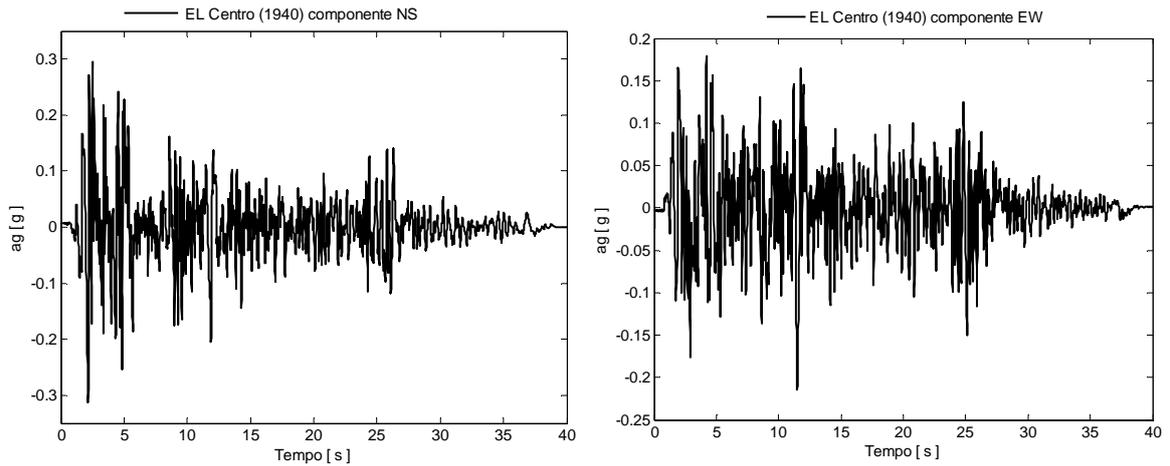
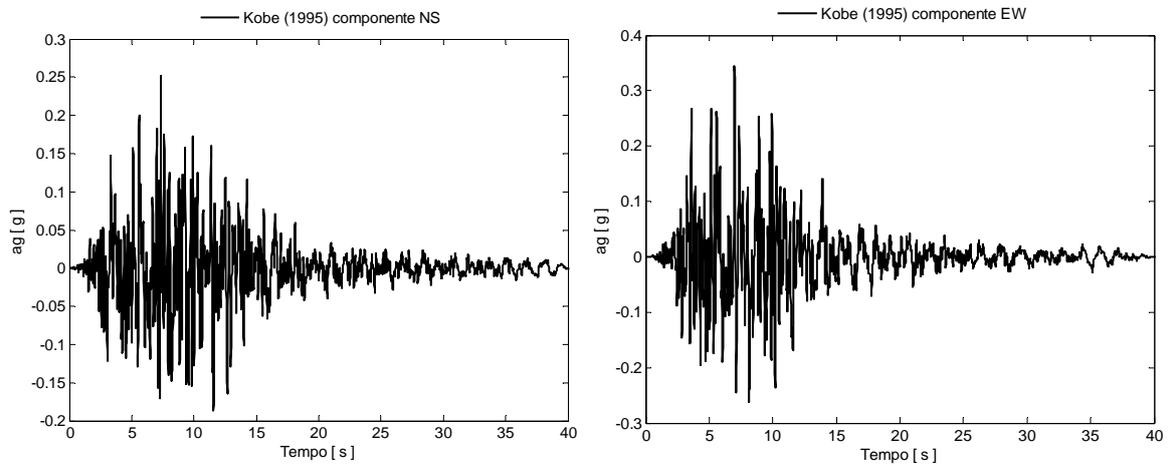


Figura 3.3 – (a) Espectros de deslocamento e aceleração NS (b) Espectros de deslocamento e aceleração EW

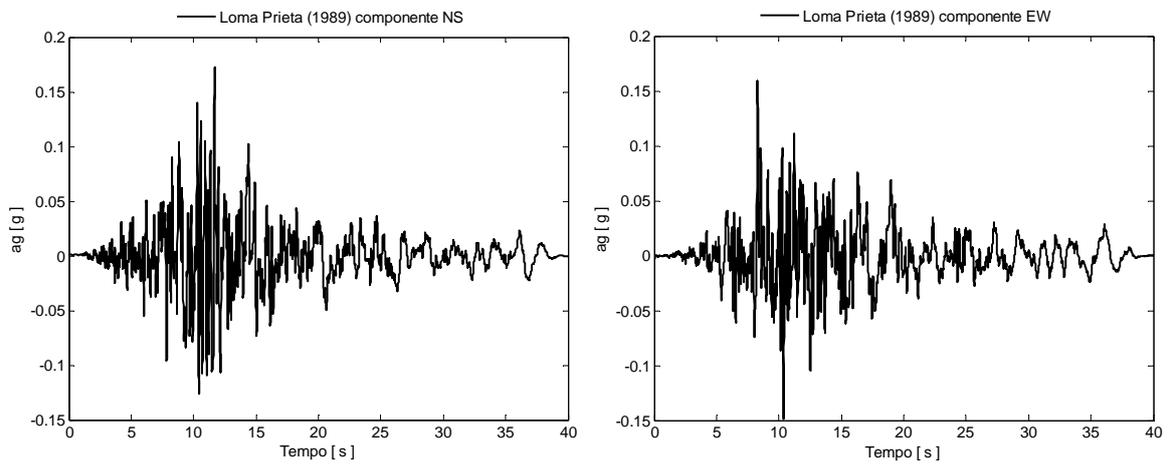
Os registros das três acelerações sísmicas foram obtidos da base de dados da PEER – *Pacific earthquake engineering research center* e os acelerogramas de cada sismo são apresentados nos gráficos da Figura 3.4 para as duas componentes de aceleração horizontal. É importante destacar que no caso dos edifícios submetidos a uma única componente de excitação sísmica foi usado a componente N-S ou 180° no caso do sismo EL Centro, e 000° para os sismos de Kobe e Loma Prieta. Na aplicação do edifício 3D foram usadas as duas componentes simultaneamente.



(a) EL Centro (1940)



(b) Kobe (1995)



(c) Loma Prieta (1989)

Figura 3.4 – (a) Acelerograma para o sismo de EL Centro (1940) (b) Acelerograma para o sismo de Kobe (1995) (c) Acelerograma para o sismo de Loma Prieta (1989)

3.4 – MÉTODOS DE SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

3.4.1. – Técnicas de integração numérica

De maneira geral existem duas técnicas de integração numérica das equações de movimento surgidas da dinâmica de estruturas. A primeira técnica são os métodos globais e a segunda são os métodos reduzidos. A solução das equações obtidas nesta dissertação é baseada nos métodos de integração no tempo. A Figura 3.5 apresenta um diagrama que mostra as principais técnicas de integração numérica utilizadas em dinâmica de estruturas.

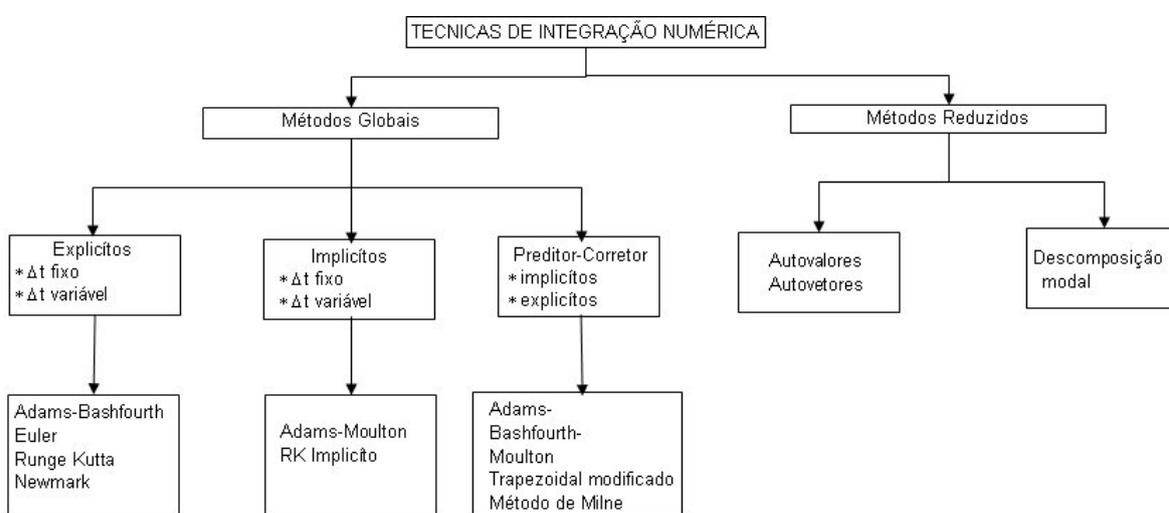


Figura 3.5 – Métodos numéricos utilizados em dinâmica estrutural

Os métodos de integração numérica no tempo se classificam em métodos explícitos, implícitos e preditor – corretor, a escolha do método depende do tipo de problema a resolver. Uma malha espacial muito refinada diminui o erro de aproximação enquanto que tempo computacional é maior. Segundo Bajer (2005) é importante na escolha do método ter em conta a tolerância admissível, a estabilidade do método, o custo computacional, o tipo de matrizes envolvidas e os esquemas de propagação da informação em problemas de ondas.

Os métodos explícitos e implícitos diferenciam-se pelo o modo de calculo das variáveis envolvidas nas equações diferenciais, assim, por exemplo, o método de integração explícita utiliza soluções no passo anterior para calcular a seguinte iteração, enquanto os métodos de integração implícita utilizam tanto o passo anterior como o atual para

aproximá-se a solução. Matematicamente, se $Y(t)$ é a solução atual da EDO e $Y(t + \Delta t)$ é uma solução em um passo de tempo Δt , logo os métodos explícitos e implícitos são definidos pelas Equações (3.22) e (3.23) respectivamente.

$$Y(t + \Delta t) = f(Y(t)) \quad (3.22)$$

$$G(Y(t), Y(t + \Delta t)) = 0 \quad (3.22)$$

De maneira geral os métodos implícitos requerem um maior custo computacional do que os métodos explícitos, mas em alguns sistemas de equações diferenciais os métodos explícitos requerem passos de tempo, Δt , muito pequenos para alcançar a convergência, neste tipo de EDO os métodos implícitos são mais adequados.

3.4.2. – Equações diferenciais *rígidas*

Para resolver as equações de movimento apresentadas no capítulo 2 vários métodos de integração no tempo têm sido propostos. Bozzo (1996) faz uma revisão dos métodos atuais usados em problemas que envolvem estruturas com isolamento de base. Nesta dissertação foi considerado o conceito de equações ríguas definidas por Hairer (1996) e Glover (2000). Uma equação diferencial ordinária (ODE) se diz *rígida* quando a estabilidade requer um operador de integração com incrementos de passo no tempo muito pequenos, isto acontece em sistemas acoplados de equações diferenciais, onde as variáveis independentes a serem integradas apresentam escalas diferentes.

Uma possível solução dos sistemas de equações ríguas é por meio dos métodos de integração implícita. Neste caso particular o Matlab® fornece um amplo número de *solvers*, desde o método clássico de Runge Kutta até os mais sofisticados métodos de integração implícita e de integração de passo no tempo variável.

Os *solvers* em Matlab® se classificam em dois tipos: integradores de problemas de ODE ríguas e problemas de ODE não ríguas. A Tabela 3.3 indica a possível rotina que deve ser usada de acordo ao tipo de equação a resolver. No entanto, a maneira correta de usar a tabela é tentar resolver o problema com o primeiro integrador, ode45, e se ele falhar ou se o tempo de integração for muito grande, considerar então uma outra opção.

Tabela 3.3 – Integradores de ODE em Matlab®

| Integrador | Tipo de equação | Ordem de precisão | Método matemático | Aplicação |
|-------------------|------------------------|--------------------------|---|--|
| ode45 | Não-rígido | Meio | Formulação explícita de Runge Kutta (4ª e 5ª ordem) | Este é o primeiro solver a testar |
| ode23 | Não-rígido | Baixo | Formulação explícita de Runge Kutta (2ª e 3ª ordem) | Usando tolerâncias absolutas ou resolvendo como problema moderado rígido. Este pode ser mais eficiente do que ode45 em tolerâncias absolutas. |
| ode113 | Não-rígido | Baixo à alto | Método de Adams-Bashforth-Moulton | Para uso de tolerâncias rigorosas ou resolvendo computação intensiva de ODE. Este integrador pode ser mais eficiente que ode45 em tolerâncias rigorosas. |
| ode15s | Rígido | Baixo a meio | Integrador baseado em formulas de integração numérica | Se a velocidade de ode45 é lenta, pode-se tentar este integrador. |
| ode23s | Rígido | Baixo | Formula modificada de Rosenbrock de ordem 2 | Este integrador pode ser empregado com tolerâncias brutas quando o ode45 falha. |
| ode23t | Moderado-rígido | Baixo | Regra trapezoidal usando interpolação livre | Se o problema é moderadamente rígido e precisa de uma solução sem amortecimento numérico. |
| ode23tb | Rígido | Baixo | Formulação implícita de Runge Kutta | Este integrador pode ser empregado com tolerâncias brutas quando ode45 falha. |

Para a implementação dos *sovers* foram desenvolvidos modelos dinâmicos representados por diagramas de blocos no programa Simulink® em ambiente Matlab®, de acordo com cada sistema de isolamento sísmico de base. No apêndice A se desenvolve com detalhe os diagramas básicos empregados na solução destes sistemas rígidos de equações diferenciais.

3. ESTUDO NUMÉRICO

Neste estudo é avaliada a resposta sísmica de edifícios *shear building* de um e cinco graus de liberdade (GDL) com isolamento de base, submetidos às três componentes de excitação sísmica: EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

Para realizar este estudo foi implementado um modelo dinâmico no programa Simulink® em ambiente Matlab® que resolverá as equações de movimento de edifícios com e sem isolamento de base. Dentre os diferentes operadores de integração, o método de Runge Kutta (RK) de 4ª ordem foi escolhido para integrar as equações de movimento que governam o comportamento do sistema superestrutura-isolador. Na implementação do RK, foi considerada uma tolerância máxima de 10^{-5} em todos os casos.

4.1 SISTEMA DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE -2GDL

Para avaliar a efetividade dos sistemas de isolamento de base, considere o sistema de dois graus de liberdade caracterizado pelas seguintes propriedades da superestrutura $T_s=0.5s$, $\xi_s=0.02$, e $m_b/m_s=0.40$. Adicionalmente, considere os valores dos parâmetros do isolador apresentados na Tabela 1 sugeridos por Bozzo(1996) e Jangid *et al*(2006).

O estudo deste primeiro exemplo é constituído por duas etapas. Inicialmente, analisa-se a sensibilidade dos parâmetros do sistema superestrutura-isolador, sendo posteriormente, avaliada a efetividade do isolador no controle das vibrações geradas pela excitação sísmica.

Tabela 4.1 – Características dos isoladores de base

| Isolador | Período Natural T_b [s] | Razão de Amortecimento ξ_b [%] | Coefficiente de Atrito μ [adim] | F_y/W |
|----------|--------------------------------|---|--|---------|
| P-F | ----- | ----- | 0.05 | ----- |
| FPS | 2.5 | ----- | 0.05 | ----- |
| R-FBI | 4.0 | 0.10 | 0.04 | ----- |
| LRB | 2.0 | 0.10 | ----- | ----- |
| NZ | 2.5 | 0.05 | ----- | 0.05 |

Para avaliar a influência de cada um dos parâmetros na resposta dinâmica do sistema superestrutura-isolador, foram determinadas as acelerações e deslocamentos máximos tanto da superestrutura, quanto da base, onde as acelerações representam o conforto e os deslocamentos o nível de tensão da superestrutura. Os espectros de resposta são obtidos através da variação dos parâmetros da superestrutura, mantendo-se constantes os parâmetros dos isoladores e vice-versa.

A resposta máxima de deslocamentos e de acelerações da superestrutura e da base foi obtida usando-se os registros de aceleração sísmica das componentes 180°, 000°, 000° dos terremotos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989), respectivamente.

4.1.1 Variação do período natural da superestrutura T_s

As Figuras 4.1(a)-(c) mostram os deslocamentos máximos da superestrutura versus seu período natural (T_s), para vários isoladores de base. Observa-se que a superestrutura equipada com o isolador de base, de maneira geral, apresenta um deslocamento pico menor, quando comparada com a superestrutura convencional, considerada de base fixa (BF). Observa-se ainda que os sistemas de isolamento de base NZ (com $T_b=2.5s$, $\xi_b=0.05$), R-FBI ($T_b=4s$, $\mu=0.04$) e LRB ($T_b=2s$, $\xi_b=0.1$) apresentam os menores deslocamentos máximos para os sismos de Kobe e Loma Prieta.

Dado que os esforços na superestrutura são proporcionais aos deslocamentos, pode-se dizer que os sistemas NZ, R-FBI e o LRB transmitem à superestrutura uma quantidade de esforço menor do que os sistemas F-P, FPS.

As Figuras 4.1(d)-(f) apresentam as acelerações máximas da superestrutura versus o período natural (T_s) para vários isoladores de base. Observa-se que a aceleração é reduzida por um fator de dois a seis, quando comparada com o sistema estrutural convencional, considerado de base fixa (BF). No restante, os isoladores baseados no mecanismo de atrito, (P-F, FPS e R-FBI) apresentam maiores acelerações do que os isoladores NZ, e o LRB. Embora estas acelerações sejam de curta duração, evidencia-se uma desvantagem dos isoladores de base deslizante frente aos isoladores do tipo neoprene no controle das acelerações da superestrutura.

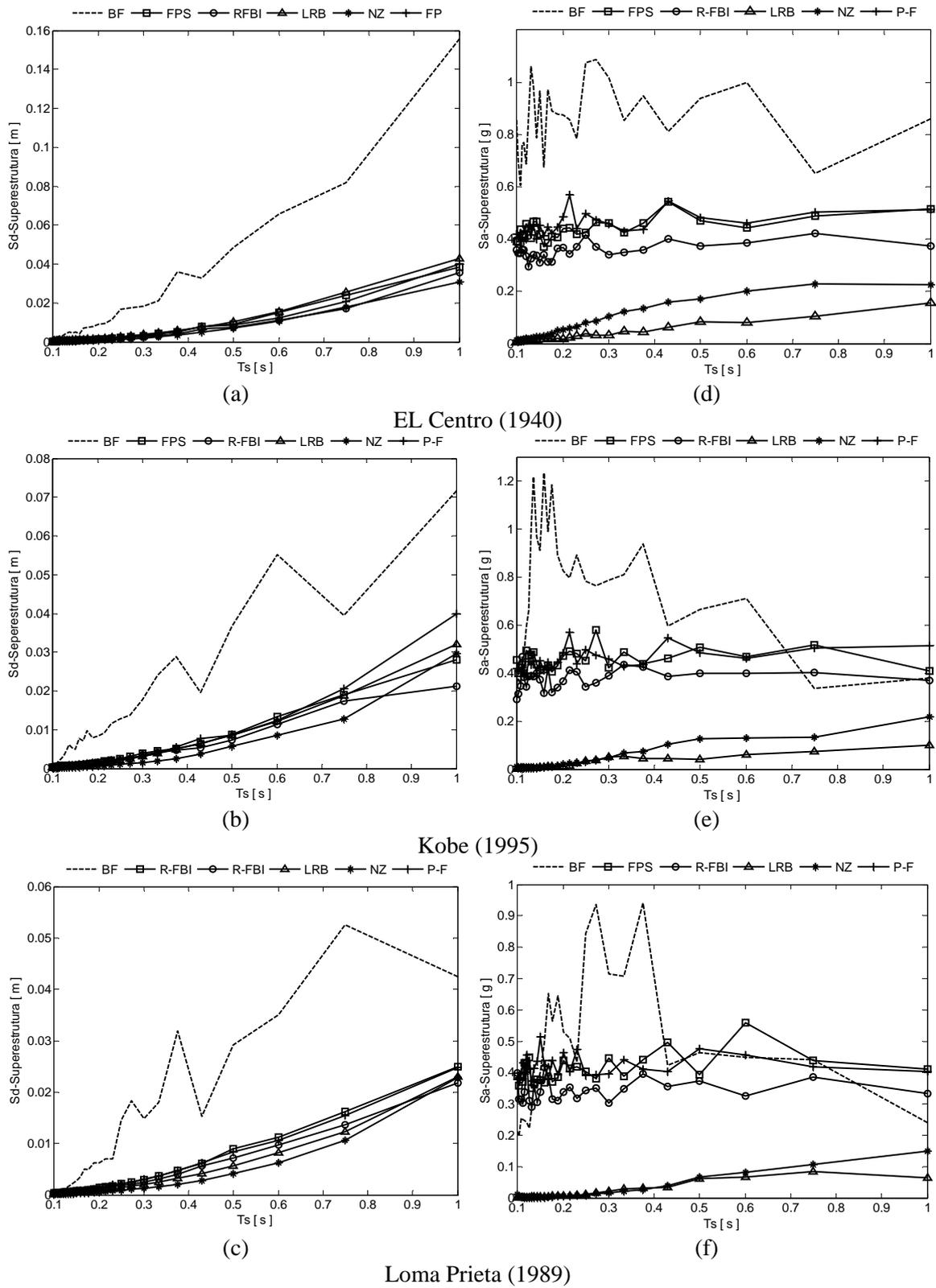


Figura 4.1 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do período natural T_s para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

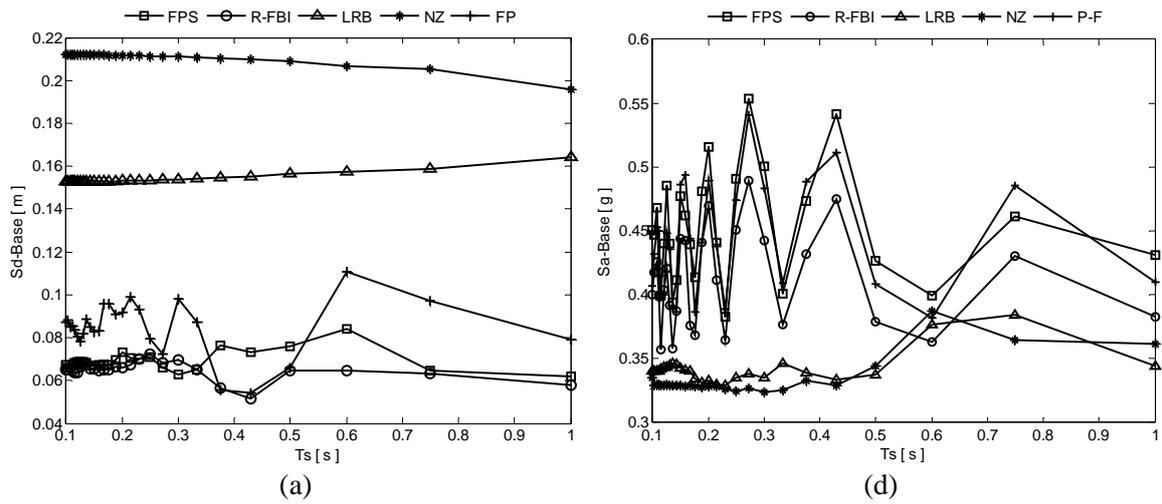
Avaliando o comportamento dos sistemas com base no mecanismo de atrito para o controle das acelerações, observa-se um funcionamento inadequado para períodos $T_s > 0.7s$ no terremoto de Kobe e para períodos $T_s > 0.4s$ no terremoto de Loma Prieta. Isto deve-se ao fato de que os parâmetros ótimos dos sistemas P-F, FPS e R-FBI para o terremoto EL Centro não seriam valores ótimos para os sismos de Kobe e Loma Prieta.

Uma maneira de evitar amplificações no controle das vibrações em edifícios é o uso da ação combinada de vários tipos de BISS ou a implementação de sistemas adaptáveis como no caso de sistemas de controle semi-ativo.

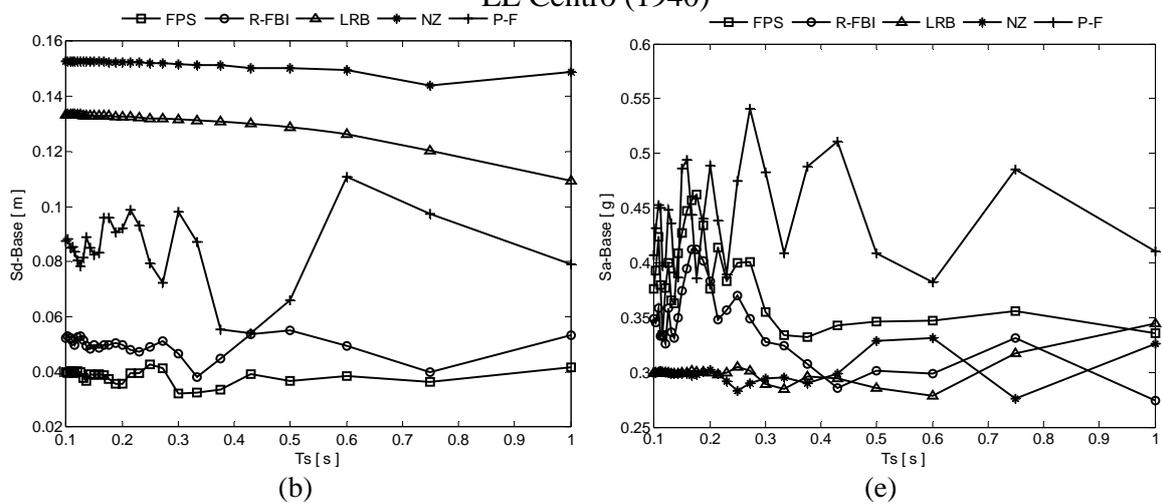
Um parâmetro importante em projetos de edifícios equipados com sistemas de isolamento de base é o deslocamento relativo entre a base e a fundação. O estudo de (ub), permite controlar deslocamentos excessivos da base, a fim de evitar possíveis impactos destes edifícios com estruturas adjacentes, bem com, manter intervalos de tolerância máximos dos deslocamentos admissíveis do isolador.

As Figuras 4.2(a)-(c) comparam os deslocamentos máximos da base da superestrutura, S_d -Base, produzidos por diferentes sistemas de isolamento. Nestas figuras é possível observar que nos sistemas NZ e LRB, os deslocamentos da base permanecem constantes ao longo do intervalo considerado de T_s , verificando assim, que aceleração do solo em edifícios com base de neoprene, propaga-se à superestrutura de forma suave. Nos sistemas de base deslizante, P-F, FPS e R-FBI, esta propagação se dá em forma brusca já que estes sistemas comportam-se tal qual um edifício de base fixa para determinados períodos da superestrutura.

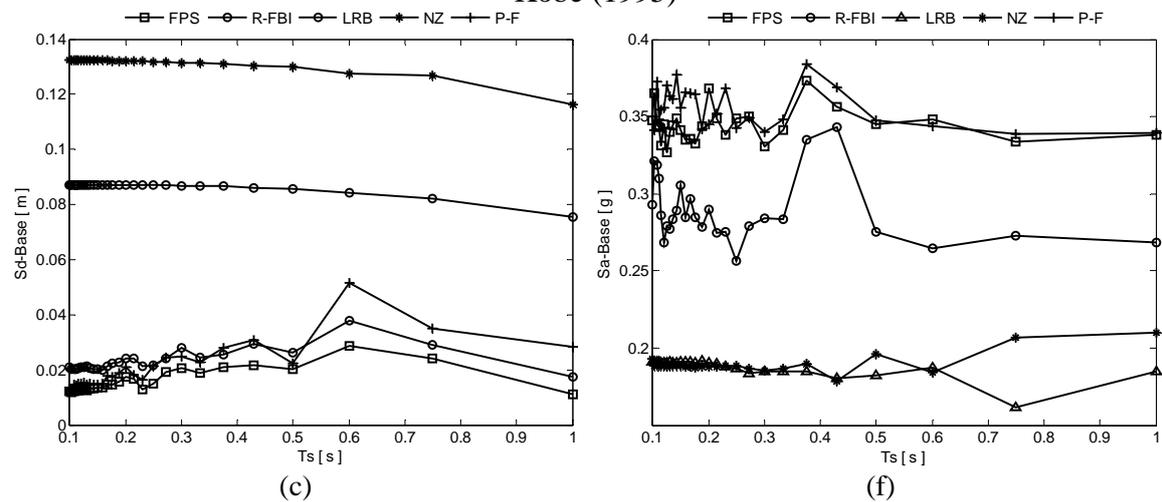
Os deslocamentos máximos da base foram observados para os sistemas NZ e LRB, com deslocamentos de 21 e 16 cm no terremoto EL Centro (1940), 13 e 15 cm no Kobe, 8,5 e 13 cm no Loma Prieta, respectivamente. Para os sistemas de base deslizante, verificam-se os menores deslocamentos da base, a qual oscilou num intervalo de 3 até 11 cm, sendo que os deslocamentos menores são verificados nos sistemas R-FBI e FPS.



EL Centro (1940)



Kobe (1995)



Loma Prieta (1989)

Figura 4.2 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da base com a variação do período natural T_s para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

O espectro de resposta da aceleração da base é apresentado nas Figuras 4.2(d)-(f) para vários isoladores. Para um período da superestrutura $T_s \leq 0,5$ s, confirma-se um comportamento de corpo rígido no sistema de 1GDL equipado com os isoladores NZ e LRB. Como consequência da pouca variação da aceleração da base em relação à T_s , verifica-se que a transmissão da aceleração é independente do período natural da superestrutura T_s nos sistemas NZ e LRB.

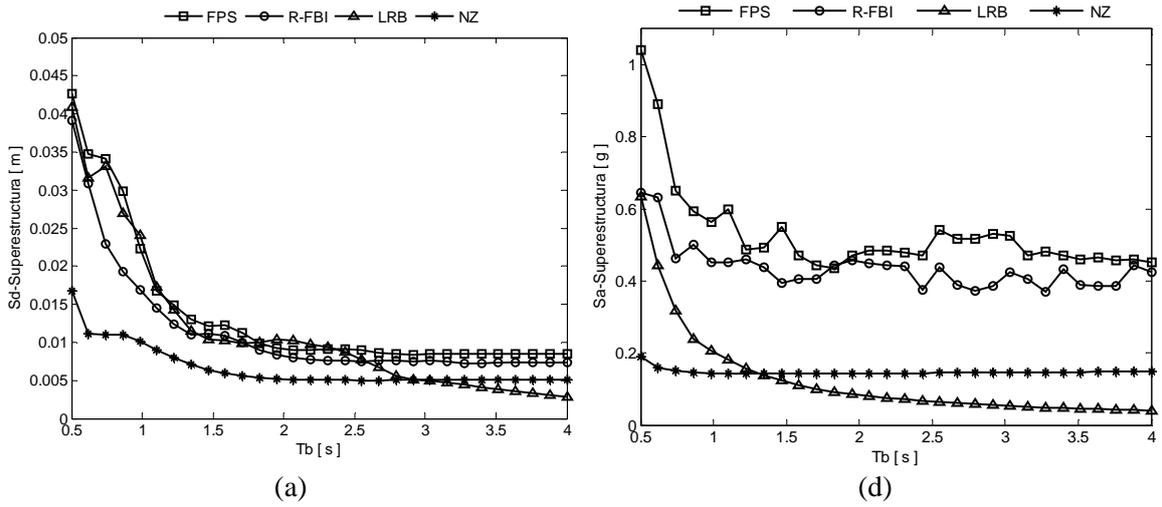
Pode-se observar nas Figuras 4.2(d)-(f) que os sistemas NZ e LRB apresentam menores valores de aceleração pico da base, quando comparados aos sistemas baseados no mecanismo de atrito FPS, P-F, e R-FBI.

4.1.2 Variação do período natural do isolador T_b

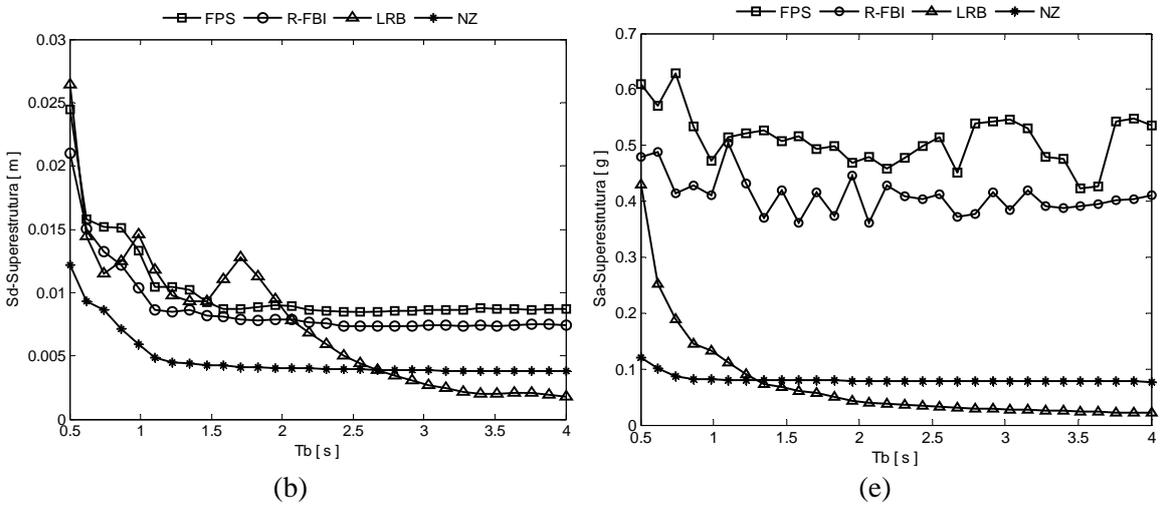
Uma das propriedades relevantes da maioria dos sistemas de isolamento de base é a mudança do período natural da superestrutura para valores mais elevados, distantes do intervalo da energia contida nas excitações sísmicas. Portanto, parâmetros dos diferentes sistemas de isolamento de base devem ser escolhidos cuidadosamente para alcançar este objetivo. Nesta seção será analisada a sensibilidade do período do isolador T_b na resposta sísmica do sistema superestrutura-isolador.

Nas Figuras 4.3(a)-(c) é analisada a influência do período natural do isolador na resposta pico dos deslocamentos e acelerações da superestrutura. Em particular, as Figuras 4.3(a)-(b) mostram que nos sistemas FPS, R-FBI e LRB os deslocamentos da superestrutura decresce rapidamente com o aumento do período natural (T_b) do isolador. Este comportamento também foi observado no sistema NZ, sendo que queda é mais suave do que nos sistemas FPS, R-FBI e LRB. Na Figura 4.3(c) este comportamento é ainda evidenciado nos sistemas LRB e NZ, Já nos sistemas FPS, e R-FBI esta redução não é tão acentuada, sendo isto consequência da pouca sensibilidade destes sistemas a excitações sísmicas de baixa frequência, como o terremoto de Loma Prieta.

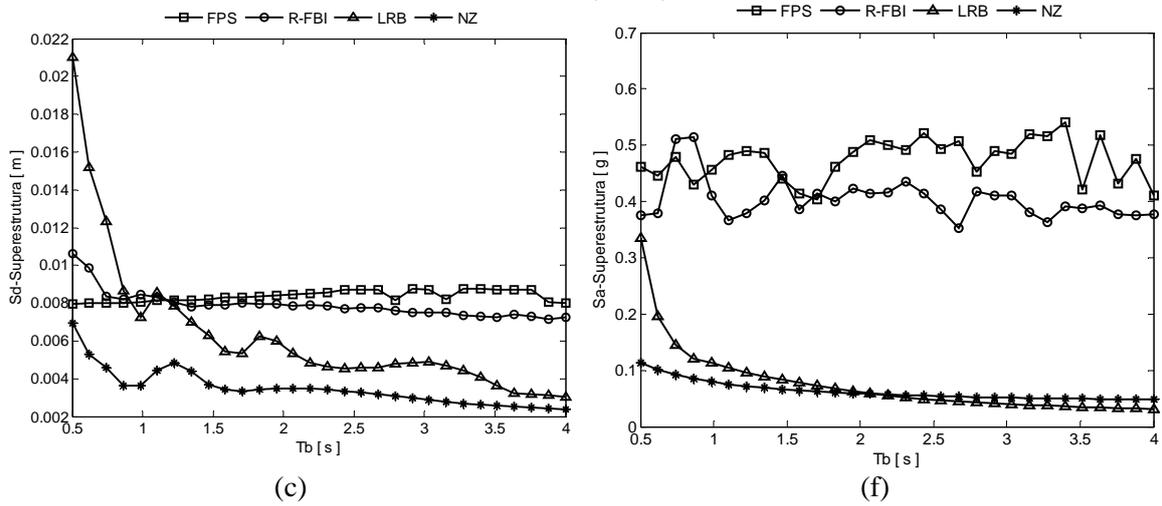
Em relação às acelerações da superestrutura apresentadas nas Figuras 4.3(d)-(f), observa-se que na presença de excitações de frequência intermédia, como o sismo de El Centro, ocorre uma redução significativa no espectro de resposta das acelerações com os sistemas FPS, R-FBI e LRB. Em situações de alta e baixa frequência da excitação, os



EL Centro (1940)



Kobe (1995)



Loma Prieta (1989)

Figura 4.3 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do período natural T_b para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

sistemas FPS, R-FBI não reduzem as acelerações, enquanto o sistema LRB continua apresentando este comportamento. Por outro lado, o sistema NZ apresenta uma redução pouco relevante da aceleração da superestrutura, nos três tipos de excitação sísmica. De fato, quando o valor de $T_b=0,7s$ é ultrapassado, a aceleração da superestrutura permanece constante.

A Figura 4.4(a)-(c) apresenta o deslocamento máximo da base para vários sistemas de isolamento quando há uma mudança no período do isolador. Em geral, observa-se alta variabilidade dos deslocamentos ao longo do período T_b e sua influência na resposta dinâmica depende muito da frequência da excitação sísmica.

Apesar da grande variabilidade, observa-se algumas tendências em determinados intervalos do período T_b . Por exemplo, para os sismos EL Centro e Kobe, verifica-se que para períodos $T_b < 1s$ o deslocamento da base aumenta em todos os BISS. Também se observa pouca variação no deslocamento da base com os sistemas FPS e R-FBI frente ao sismo de Loma Prieta.

Em relação aos deslocamentos da base, é possível dizer que os sistemas NZ e LRB são mais suscetíveis frente às mudanças do período natural T_b , sendo que o comportamento dos deslocamentos da base está limitado a determinados intervalos de T_b .

Na Figura 4.4(d)-(f) pode-se avaliar a sensibilidade da aceleração da base frente à variação do período do isolador. De maneira geral é possível verificar uma diminuição da aceleração da base em todos os sistemas de isolamento, FPS, R-FBI, LRB e NZ, em condições de alta a intermediária frequência. No restante para $T_b < 1s$, o comportamento é um pouco errático e depende do sistema de isolamento utilizado.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 foram analisados os espectros de resposta do sistema superestrutura-isolador frente a mudanças de T_b . Estas figuras mostram que de maneira geral os deslocamentos e as acelerações da superestrutura diminuem com o aumento do período T_b , enquanto que os deslocamentos da base são incrementados ou reduzidos para certos intervalos de T_b . No entanto, as acelerações da base são, em geral, reduzidas com o aumento de T_b , sendo que este comportamento é mais acentuado em sismos de frequência alta a intermediária.

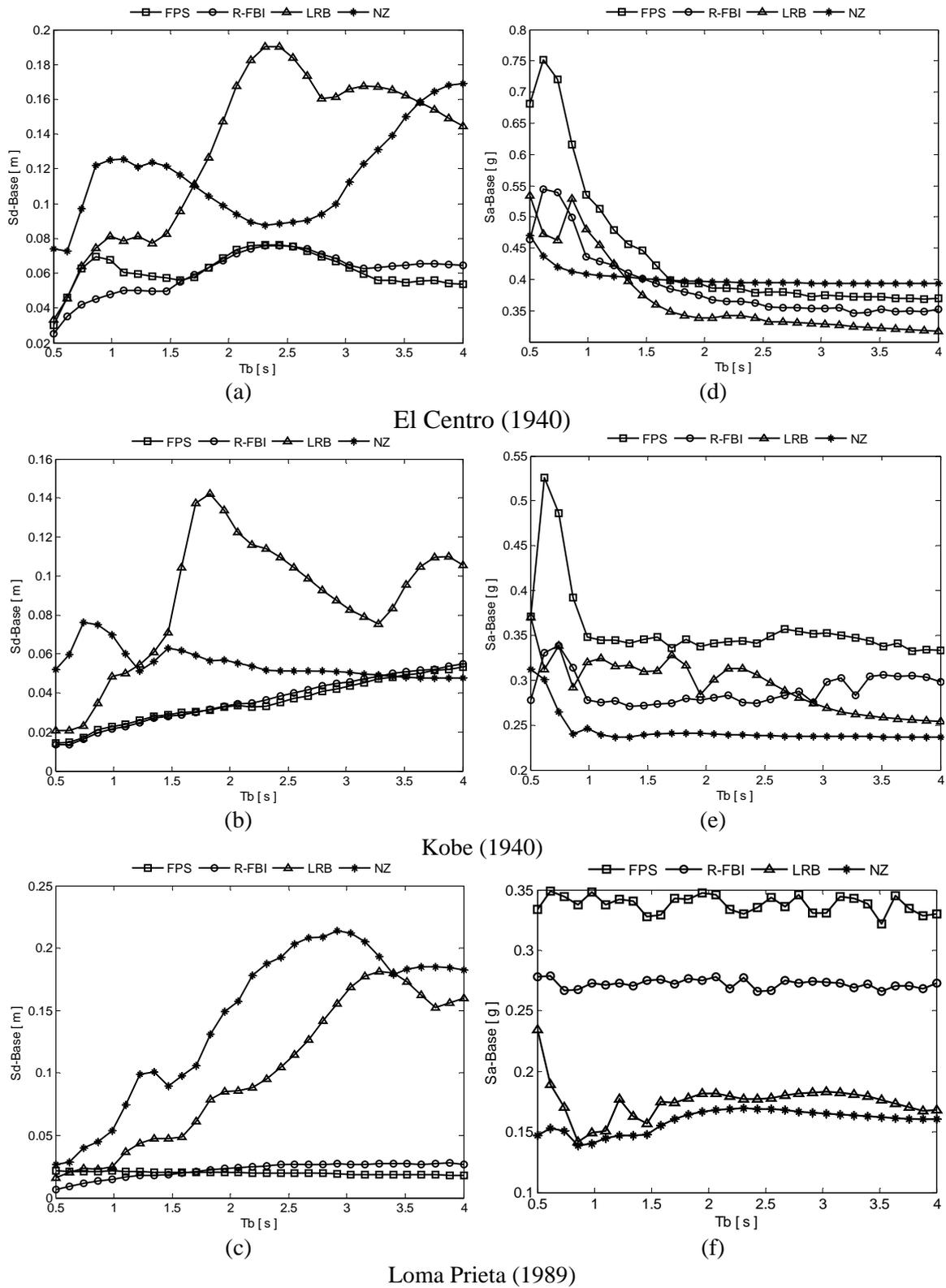


Figura 4.4 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da base com a variação do período natural T_b para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

Dependendo do tipo de excitação sísmica, a resposta máxima para vários isoladores poderia ser insensível frente a pequenas mudanças de T_b , mas para mudanças importantes este parâmetro pode afetar significativamente a resposta máxima do sistema superestrutura-isolador.

4.1.3 Variação da razão de amortecimento ξ_b

São apresentados nas Figuras 4.5(a)-(f) os espectros de resposta dos deslocamentos e acelerações do sistema superestrutura-isolador, com relação à razão de amortecimento da base no intervalo 0,04-0,2; para vários sistemas de isolamento. Nas Figuras 4.5(a)-(c) observa-se um decréscimo suave do deslocamento da superestrutura com a variação da razão de amortecimento (ξ_b) no sistema LRB e quase nenhuma variação dos deslocamentos (u_s) nos sistemas NZ e R-FBI.

As acelerações da superestrutura em relação ao razão de amortecimento (ξ_b) são mostradas nas Figuras 4.5(d)-(f). Nestas figuras observa-se uma variação pouco significativa da aceleração nos sistemas NZ e R-FBI. Já no sistema LRB, verifica-se um incremento da aceleração ao passar de 0,06g a 0,12g no sismo de EL Centro, de 0,04g a 0,10g no de Kobe e de 0,05g a 0,10g no de Loma Prieta, mas este incremento não é tão acentuado. Examinando esta mesma figura, observa-se que o sistema R-FBI (perto de 0,43g) apresenta maiores acelerações pico da superestrutura do que os sistemas NZ (perto de 0,18g) e LRB (perto de 0,12g) em relação ao razão de amortecimento (ξ_b).

No caso de excitações de frequência alta e intermediária, os deslocamentos máximos da superestrutura é similar em todos os três sistemas, R-FBI, LRB e NZ.

Nas Figuras 4.6(a)-(c) apresentam-se os deslocamentos da base ocasionados pelos diferentes sistemas de isolamento quando se produz uma variação de (ξ_b). Nesta figura é possível observar que os deslocamentos máximos da base decrescem com o aumento do razão de amortecimento (ξ_b) nos sistemas LRB e NZ. No sistema R-FBI esta variação é menos acentuada podendo-se dizer que os deslocamentos são quase invariáveis em relação à razão de amortecimento (ξ_b).

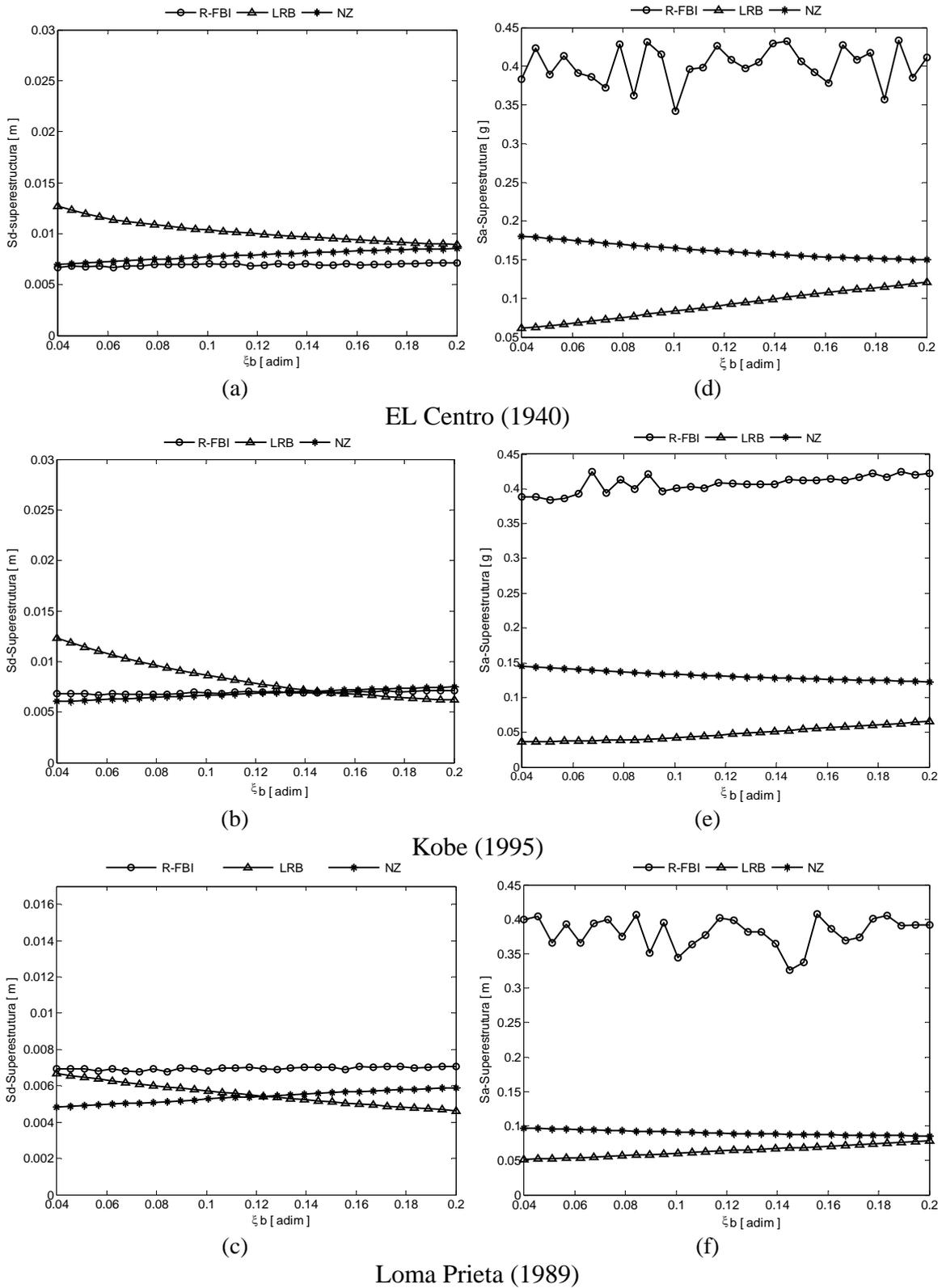


Figura 4.5 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do amortecimento da base ξ_b para os sismos EL Centro (1940),

Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

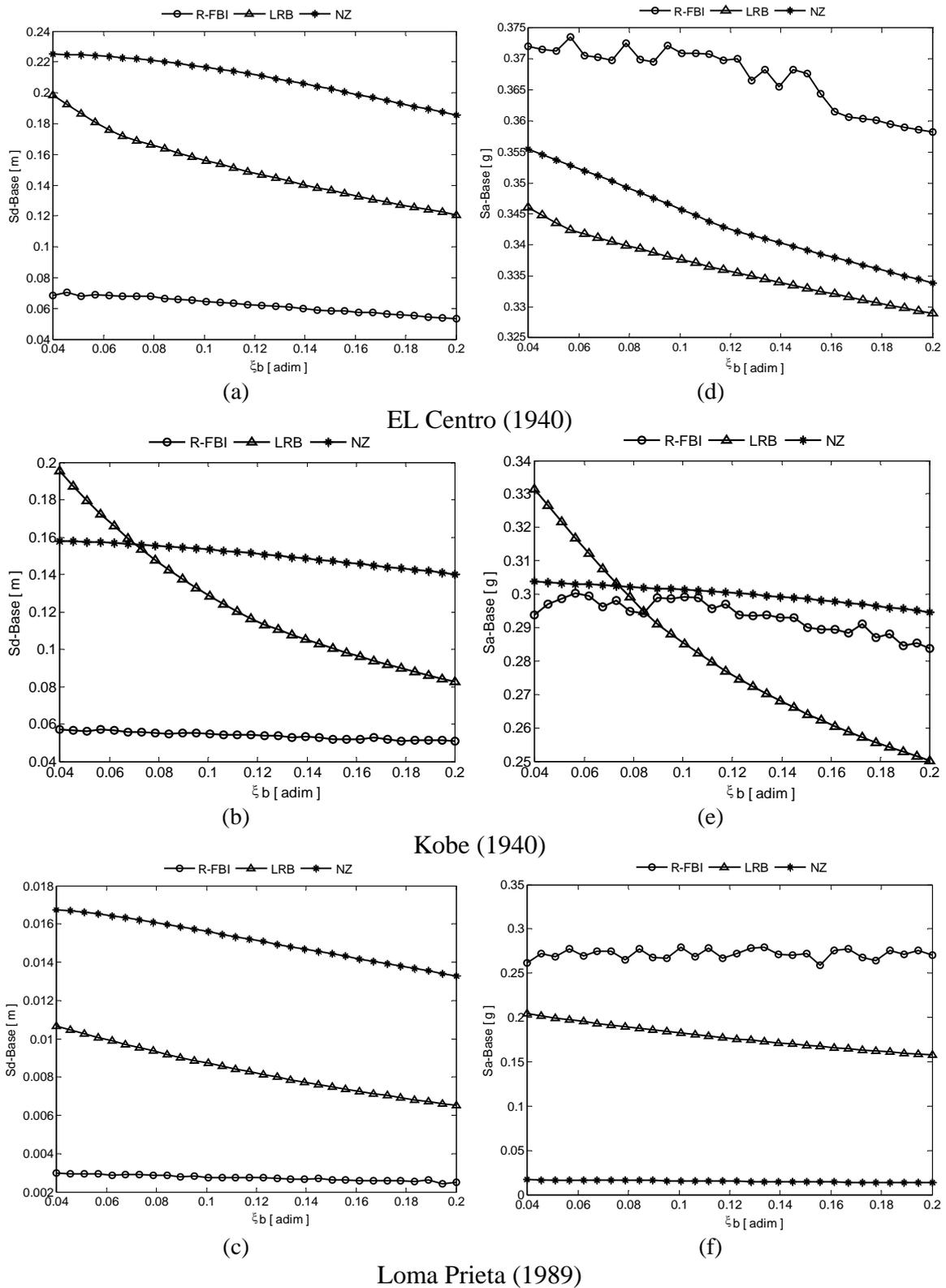


Figura 4.6 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações do isolador com a variação do amortecimento da base ξ_b para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

Outro aspecto de destaque mostrado nas Figuras 4.6(a)-(c) é que o sistema que possui mecanismo de atrito (R-FBI) apresenta deslocamentos máximos da base próximos de 8 cm, menores do que os deslocamentos ub apresentados pelos sistemas de LRB e NZ em situações de sismos alta frequência.

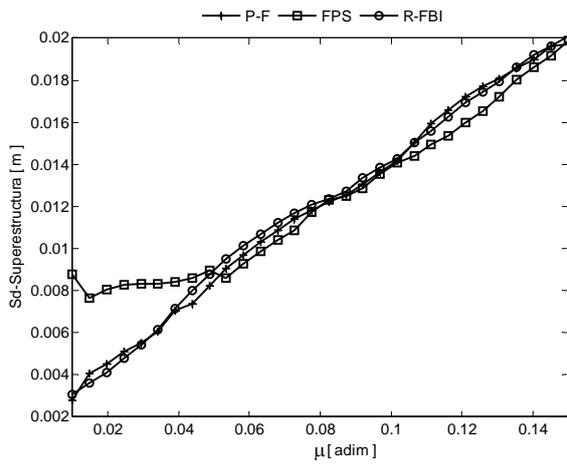
As Figuras 4.6(d)-(f) apresentam as acelerações da base quando há uma variação da razão de amortecimento (ξ_b). De acordo com as figuras, a aceleração da base é pouco suscetível à mudanças de (ξ_b), já que passa de 0,360g para 0,372g no sistema R-FBI, de 0,335g a 0,355g no sistema NZ e de 0,330g a 0,345g no sistema LRB, no caso do terremoto de EL Centro. Também são verificadas pequenas variações para as outras excitações sísmicas, no de Kobe, por exemplo, a aceleração varia de 0,380g a 0,430g no sistema R-FBI, 0,150g a 0,170g no sistema LRB e de 0,06 a 0,12 no sistema de NZ. No sismo de Loma Prieta as acelerações variam de 0,253g a 0,254g para o sistema R-FBI, de 0,150g a 0,200 no sistema LRB e a aceleração permanece constante e igual a 0,020g no sistema NZ.

4.1.4 Variação do coeficiente de atrito μ

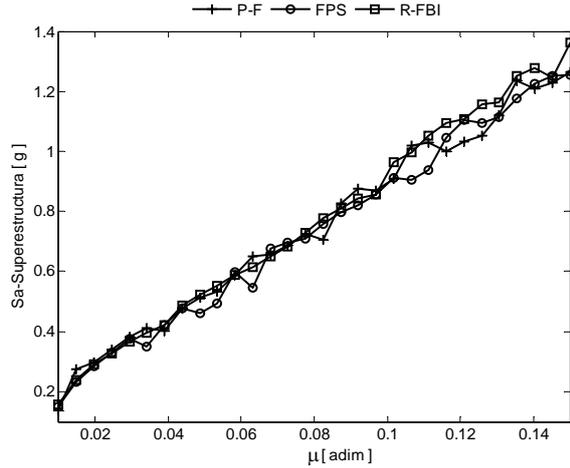
Nas Figuras 4.7 e 4.8 é apresentada uma análise de sensibilidade do coeficiente de atrito μ nas respostas máximas da superestrutura-isolador. Deste modo, é possível dizer que os sistemas de isolamento de base que usam o mecanismo de atrito, como meio de separação da excitação da base para a superestrutura, são muito sensíveis ao coeficiente de atrito μ .

Em particular nas Figuras 4.7(a)-(f) observa-se um aumento quase proporcional entre os deslocamentos e as acelerações da superestrutura com o aumento do coeficiente de atrito. Esta tendência se apresenta com uma taxa de incremento similar nos três sistemas de base deslizante, P-F, FPS e R-FBI para cada um dos três registros de excitação sísmica considerados, EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

Uma tendência evidente da resposta máxima dos deslocamentos da base, é mostrada na Figura 4.8(a)-(c). Nestas figuras verifica-se que os deslocamentos do isolador são reduzidos com o aumento do coeficiente de atrito, como conseqüência da fixação da base, ou seja, a base vai se aproximando do modelo convencional de base fixa.

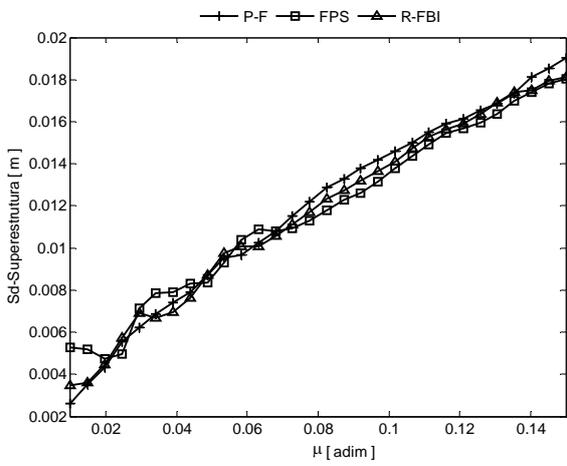


(a)

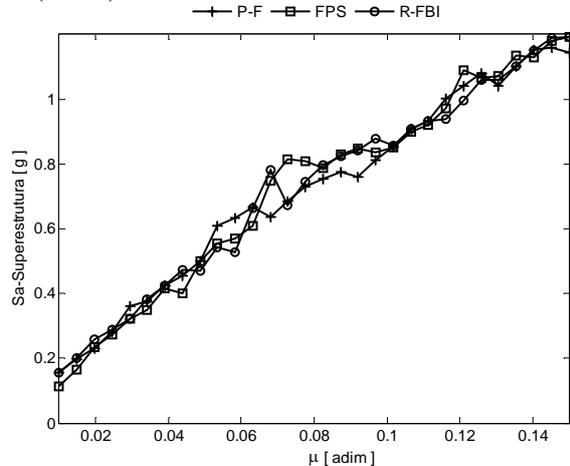


(d)

El Centro (1940)

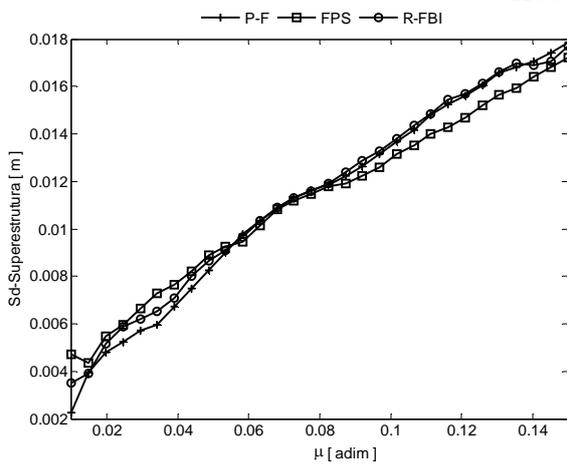


(b)

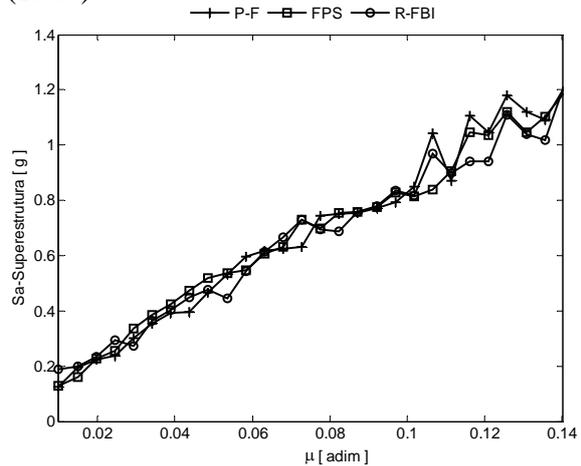


(e)

Kobe (1940)



(c)



(f)

Loma Prieta (1989)

Figura 4.7 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da superestrutura com a variação do coeficiente de atrito μ para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

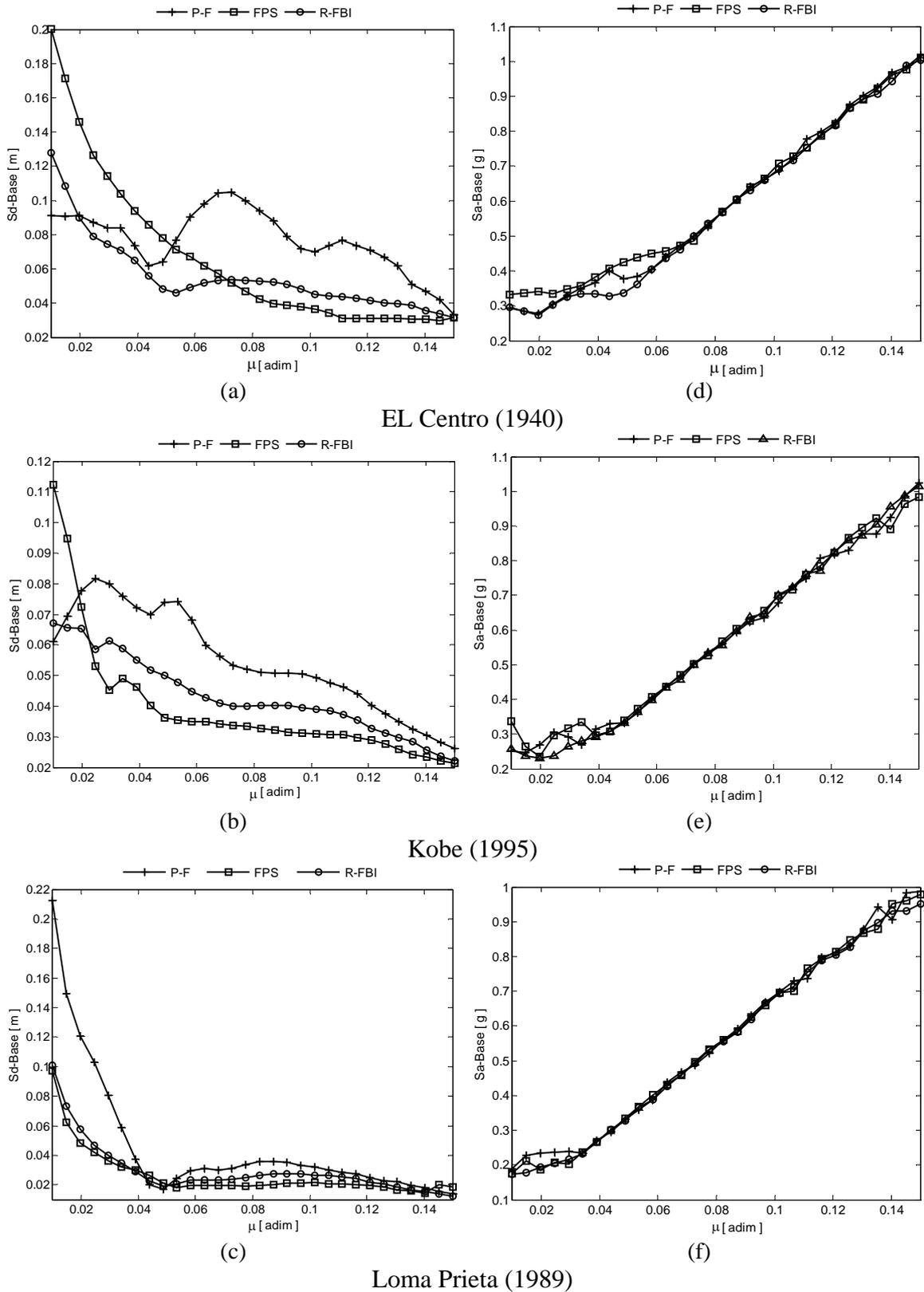


Figura 4.8 – Resposta máxima dos deslocamentos e acelerações da base com a variação do coeficiente de atrito μ para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

Observa-se ainda que antes que o coeficiente de atrito μ , chegue a 0,04; os sistemas R-FBI e FPS alcançam os valores máximos de deslocamento da base. Logo após verifica-se uma redução dos deslocamentos da base u_b , sendo que para a excitação sísmica de Loma Prieta (1989) esta redução é mais acentuada.

Comparando os valores máximos do deslocamento da base para as três componentes de excitação sísmica (EL Centro, Kobe e Loma Prieta), observa-se que os deslocamentos máximos dos sistemas FPS e R-FBI são maiores no terremoto de EL Centro, com valores que oscilam entre 13 cm e 20 cm.

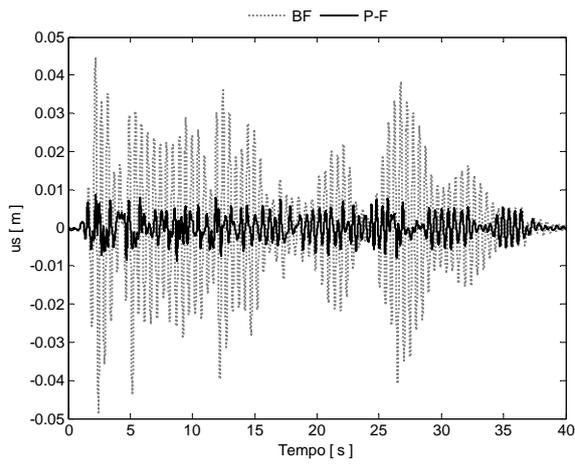
Embora os deslocamentos da base apresentados na Figura 4.8(a)-(c) sejam reduzidos, uma situação oposta é observada nas acelerações da base, Figura 4.8(d)-(f), onde se verifica um incremento das acelerações com o aumento do coeficiente μ .

4.1.5 Efetividade do isolador no controle da resposta dinâmica

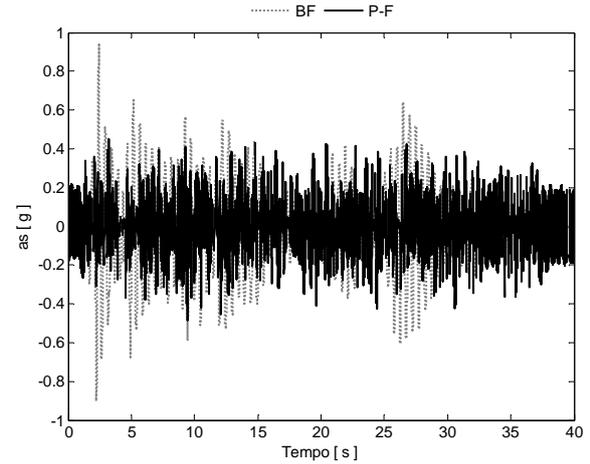
Nesta seção analisa-se a efetividade dos BISS no controle dos deslocamentos e acelerações do sistema de 1GDL de período fundamental $T_s=0.5s$. Este estudo é feito através da avaliação da resposta ao longo do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura isolada, quando comparada com a estrutura convencional. Nesta seção também são considerados os parâmetros dos BISS apresentados na tabela 4.1.

As Figuras 4.9(a)-(c) apresentam a evolução dos deslocamentos (u_s) para o sistema P-F quando submetido a três tipos diferentes de excitação sísmica, Nesta figura observa-se uma redução significativa dos deslocamentos da superestrutura isolada para as três excitações consideradas. Por outro lado, foi verificada uma perda de eficiência no controle das acelerações, conforme indicam as Figuras 4.9(d)-(f), sendo mais acentuada na excitação de Loma Prieta.

A amplificação das acelerações apresentada na Figura 4.9(f) se deve ao fato de que, nos sistemas baseados no mecanismo de atrito, as acelerações se transmitem em picos bruscos, sendo estes rapidamente amortecidos à medida que são propagados na superestrutura.

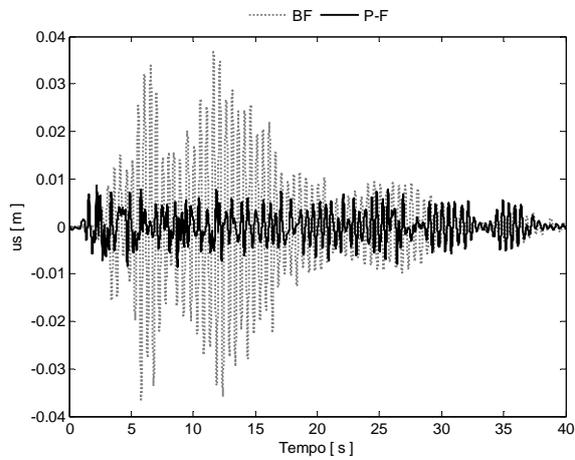


(a)

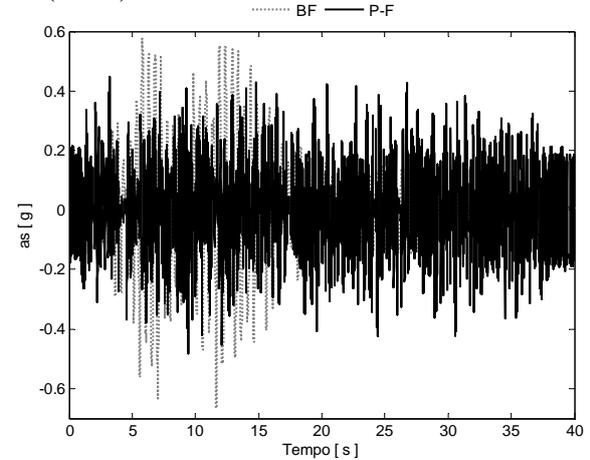


(d)

EL Centro (1940)

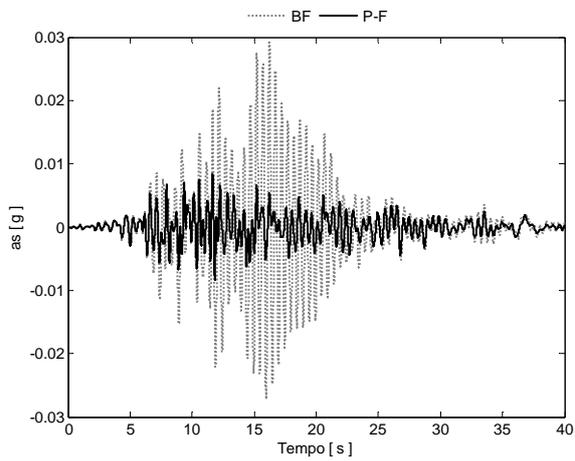


(b)

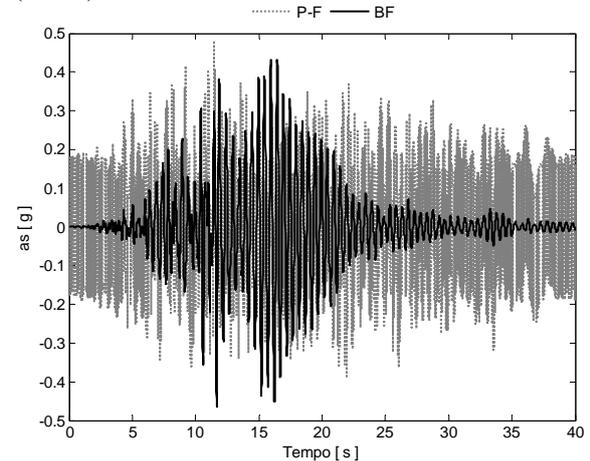


(e)

Kobe (1995)



(c)



(f)

Loma Prieta (1989)

Figura 4.9 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema P-F ($\mu = 0,05$).

Além disso, quando se trata do dimensionamento de sistemas de isolamento de base, os parâmetros de projeto ótimos para certo tipo de excitação sísmica não são ótimos para outras excitações sísmicas, portanto é necessária a realização de uma análise dinâmica em um amplo intervalo de frequências, com o objetivo de determinar os parâmetros ótimos dos BISS.

Nas Figuras 4.10(a)-(c) são apresentados os deslocamentos u_s , para o sistema FPS, enquanto as acelerações a_s são mostradas nas Figuras 4.10(d)-(f). Observando estas figuras, se verifica um comportamento similar ao caso do sistema P-F, isto é, redução dos deslocamentos com perda de eficiência no controle das acelerações.

Apesar dos sistemas P-F e FPS perderem eficiência no controle das acelerações, os picos máximos de aceleração são reduzidos em condições de terremotos de alta e intermediária frequência, como os sismos de EL Centro e Kobe. Observando a Tabela 4.2, vemos que se produz uma amplificação da aceleração pico no sistema P-F quando este é excitado pelo sismo de Loma Prieta. No sistema FPS se verifica uma redução do pico máximo, mas ao longo da resposta observam-se amplificações.

Tabela 4.2 – Deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 2GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos.

| Isolador de base | EL Centro, 1940 | | Kobe, 1995 | | Loma Prieta, 1989 | |
|------------------|-----------------|-------------|--------------|-------------|-------------------|-------------|
| | u_s [cm] | a_s [g] | u_s [cm] | a_s [g] | u_s [cm] | a_s [g] |
| P-F | 0,813 | 0,483 | 0,861 | 0,483 | 0,839 | 0,477 |
| FPS | 0,902 | 0,471 | 0,883 | 0,507 | 0,897 | 0,393 |
| R-FBI | 0,750 | 0,375 | 0,742 | 0,401 | 0,722 | 0,372 |
| LRB | 1,037 | 0,083 | 0,864 | 0,042 | 0,572 | 0,060 |
| NZ | 0,693 | 0,171 | 0,568 | 0,127 | 0,421 | 0,067 |
| BF | 4,849 | 0,940 | 3,670 | 0,666 | 2,916 | 0,463 |

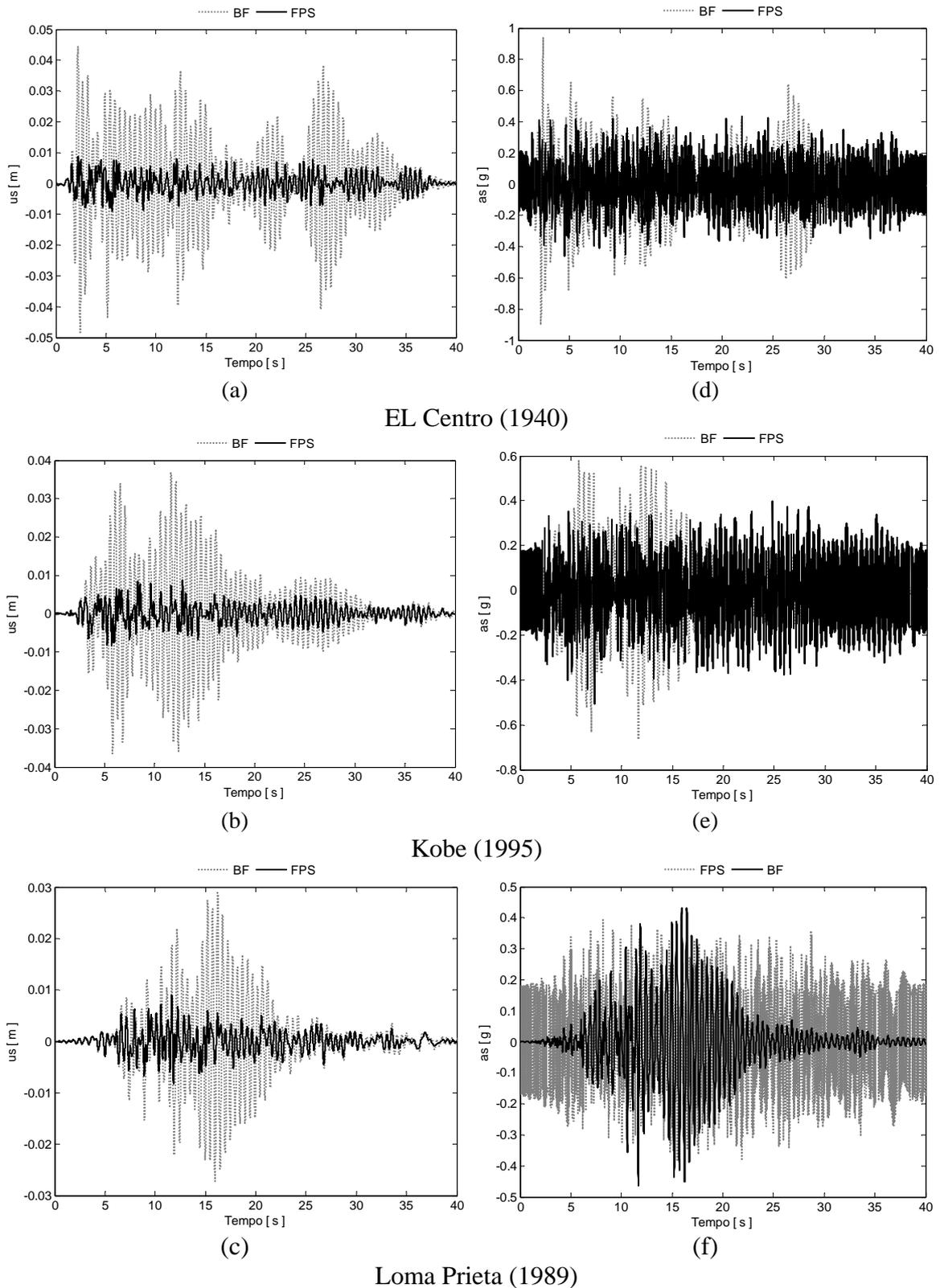


Figura 4.10 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema FPS ($\mu = 0,05$; $T_b = 2,5s$).

Como foi verificado na seção 4.1.4, o coeficiente de atrito μ é o parâmetro com maior influência na resposta dinâmica de sistemas de isolamento de base deslizante. Portanto, uma forma de melhorar o comportamento destes sistemas, em condições de excitação de baixa frequência, é a diminuição do valor deste coeficiente.

Uma deficiência dos sistemas P-F, FPS e R-FBI, em condições de sismos de baixa frequência, também foi verificado por Su (1989) em estruturas do tipo “*shear beam*” com isolamento de base. Portanto, é importante na hora de dimensionar sistemas de base deslizante selecionar adequadamente seus parâmetros.

A resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 1GDL para o sistema R-FBI é apresentada na Figura 4.11. Embora o comportamento seja semelhante aos sistemas P-F e FPS, neste sistema verificam-se menores deslocamentos e acelerações da superestrutura do que os apresentados pelos sistemas P-F e FPS. Isto se explica pelo amortecimento alcançado com a adição do núcleo central de neoprene.

Outro indicador que avalia a eficiência do isolador é apresentado na Tabela 4.3. A porcentagem de redução R em relação à base fixa foi calculada segundo os valores dos deslocamentos e acelerações máximas indicados na Tabela 4.2. Na Tabela 4.3 observa-se que os sistemas LRB e de NZ são os isoladores que apresentam melhor desempenho nas três excitações sísmicas consideradas. Adicionalmente, verifica-se que o sistema LRB tem pior desempenho quanto ao controle dos deslocamentos do que o sistema NZ, enquanto que as acelerações da superestrutura são melhor controladas no sistema LRB.

Em relação aos sistemas de base deslizante P-F, FPS e R-FBI, na Tabela 4.3 se observa que o R-FBI é o sistema de base deslizante com melhor desempenho. De maneira geral verifica-se que estes sistemas perdem capacidade de controle das acelerações em condições de excitações de baixa frequência.

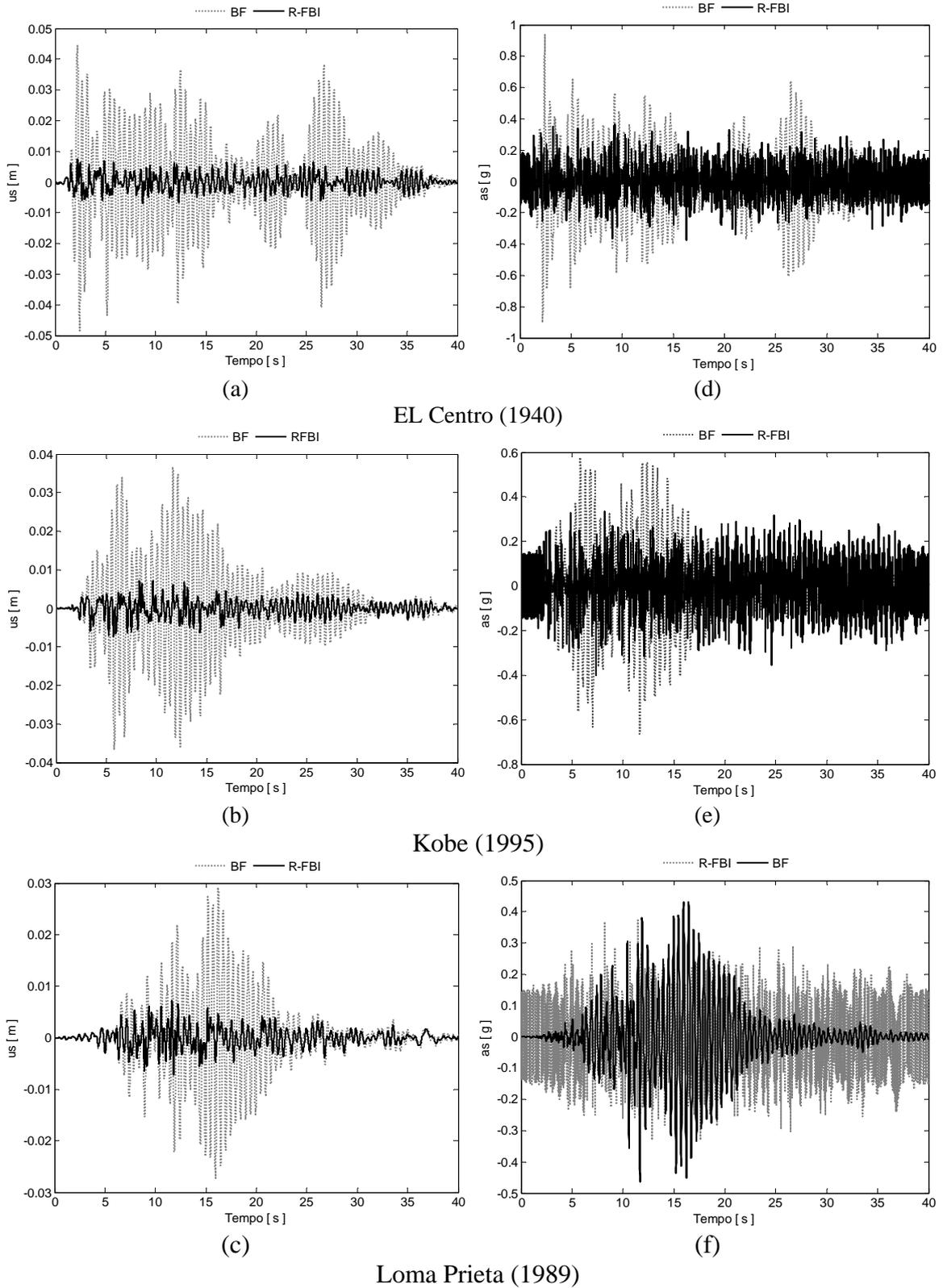


Figura 4.11 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema R-FBI

($\mu = 0,04$; $T_b = 4,0$; $\xi_b = 0,10$).

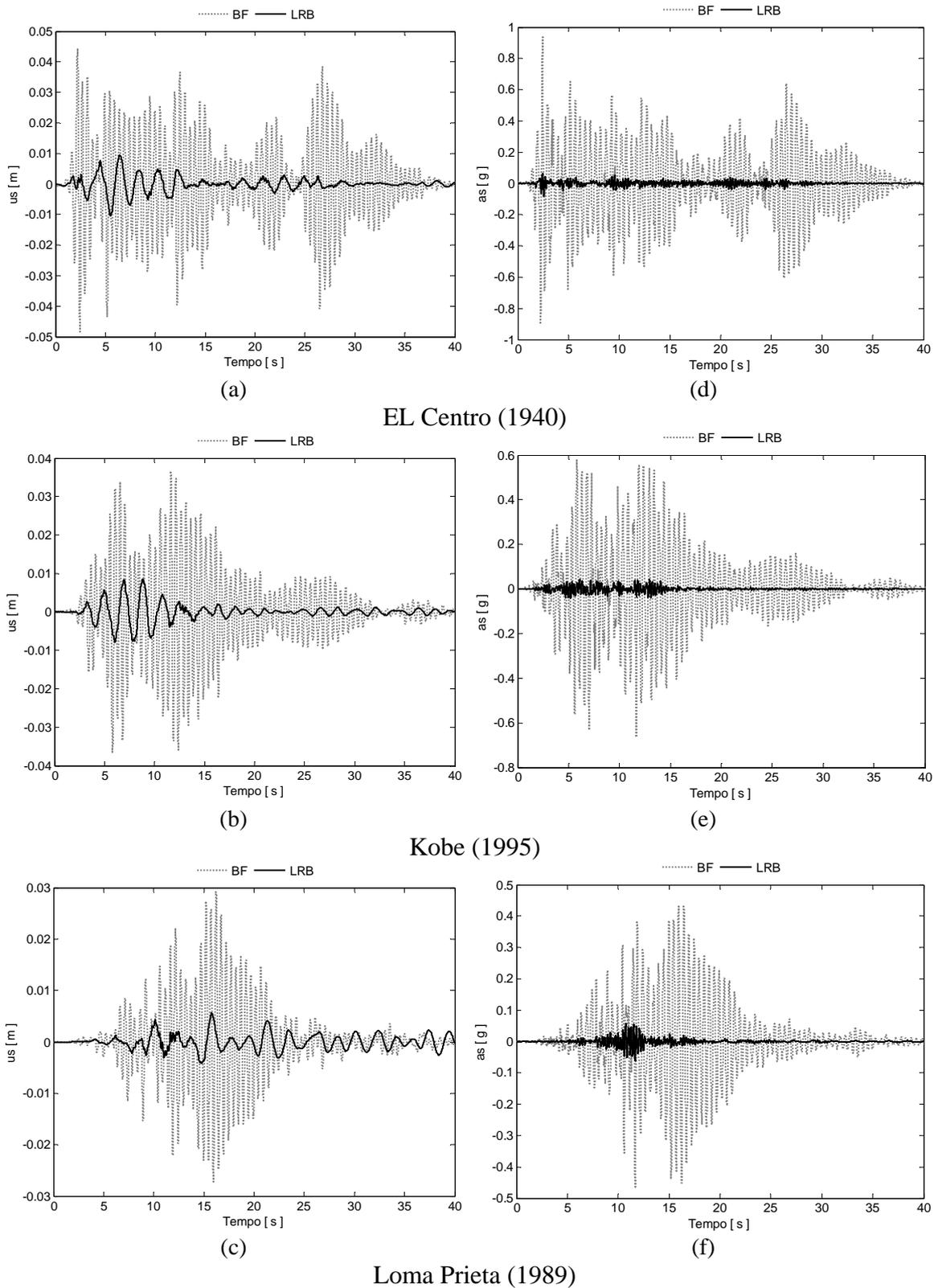
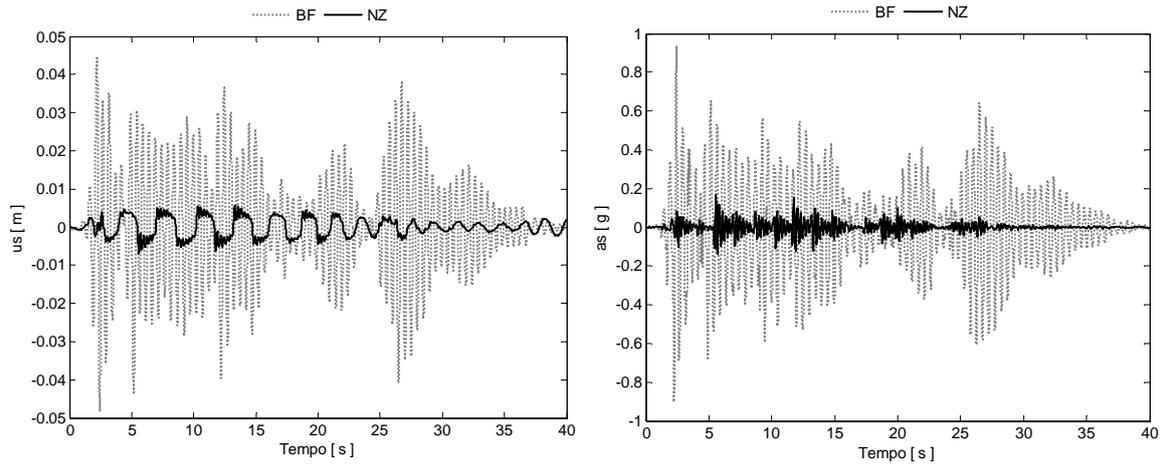


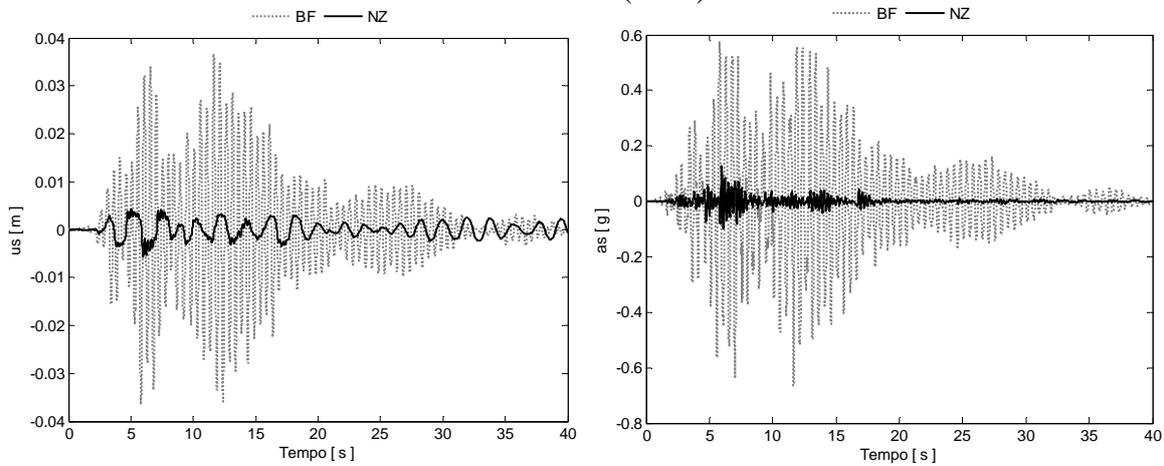
Figura 4.12 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema LRB ($T_b = 2,0$; $\xi_b = 0,10$).



(a)

(b)

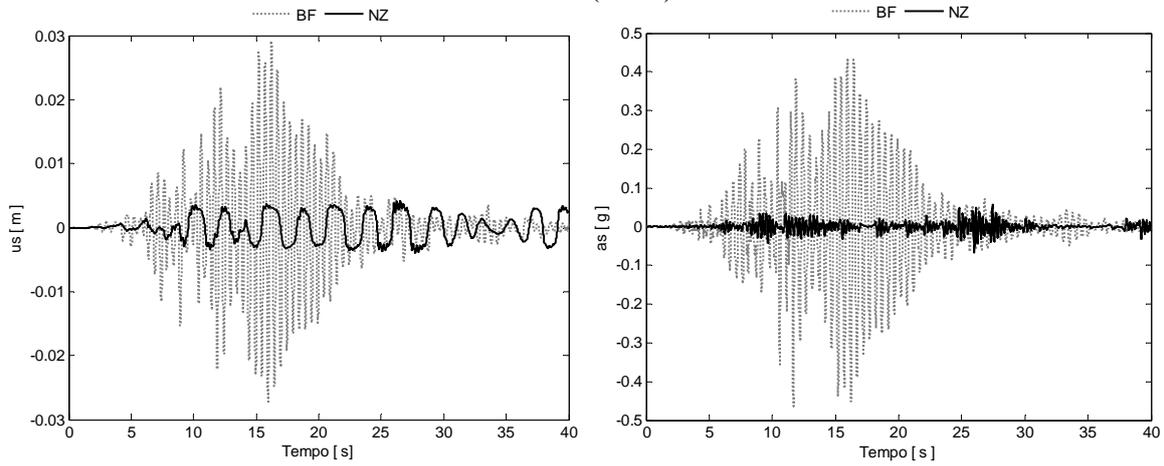
EL Centro (1940)



(c)

(d)

Kobe (1995)



(e)

(f)

Loma Prieta (1989)

Figura 4.13 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 2GDL isolada sismicamente com o sistema NZ

$$(T_b = 2,5; \xi_b = 0,10; F_y/W = 0,05).$$

Tabela 4.3 – Eficiência no controle dos deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 2GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos.

| Isolador de base | EL Centro, 1940 | | Kobe, 1995 | | Loma Prieta, 1989 | |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | R- u_s [%] | R- a_s [%] | R- u_s [%] | R- a_s [%] | R- u_s [%] | R- a_s [%] |
| P-F | 83 | 49 | 77 | 28 | 71 | -3 |
| FPS | 81 | 50 | 76 | 24 | 69 | 15 |
| R-FBI | 85 | 60 | 80 | 40 | 75 | 20 |
| LRB | 79 | 91 | 76 | 94 | 80 | 87 |
| NZ | 86 | 82 | 85 | 81 | 86 | 86 |

Nas Figuras 4.12(a)-(f) mostra-se a evolução dos deslocamentos e acelerações da superestrutura isolada com o LRB. O tempo de duração da excitação sísmica considerado neste estudo foi de 40s em todos os terremotos. Nestas figuras verifica-se um alto desempenho do sistema LRB no controle das vibrações do sistema de 1GDL, pois o neoprene fornece alto amortecimento, o que permite elevar a eficiência deste isolador.

Ao observar a Tabela 4.3, destacam-se os altos valores da eficiência no controle dos deslocamentos e acelerações do sistema LRB, sendo que no controle das acelerações é o sistema que apresenta o melhor desempenho.

As Figuras 4.13(a)-(f) mostram a evolução dos deslocamentos e acelerações da superestrutura isolada com o sistema de NZ. Este sistema, assim como o LRB, apresenta alto desempenho no controle dos deslocamentos e acelerações. Em particular, neste sistema, se destaca o desempenho no controle dos deslocamentos da superestrutura.

Os sistemas NZ e o LRB são equipamentos que fornecem alta proteção de edifícios em um amplo intervalo de frequências da excitação sísmica. Por esta razão é usado em muitos projetos de edifícios, como foram mostrados na Tabela 2.1 do capítulo 2.

4.2 SISTEMA DE SEIS GRAUS DE LIBERDADE -6GDL

Para avaliar o desempenho dos isoladores em estruturas com modos de vibração mais altos apresenta-se a seguir a análise de um edifício tipo *shear building* de seis graus de liberdade (6GDL) incluindo o isolador. O edifício foi submetido a três registros de aceleração sísmica, EL Centro, Kobe e Loma Prieta.

As propriedades da superestrutura são resumidas na Tabela 4.4. com base nesses dados foram obtidas as características dinâmicas do edifício considerado como base fixa. Para isto, foi implementado um código em Matlab® que determinará o problema de autovalores. A matriz de amortecimento apresentada na Tabela 4.4 é proporcional à matriz de rigidez, conforme a Kelly et al (1987).

Excetuando os valores do coeficiente de atrito, onde foi suposto um coeficiente de 0,01 em todos os sistemas deslizantes (P-F, FPS e R-FBI), os parâmetros dos isoladores considerados neste estudo são os mesmos dos apresentados na Tabela 4.1, submetidos aos registros de Kobe, Loma Prieta e o de EL Centro. O decréscimo de μ foi feito com o objetivo de alcançar o escorregamento da base e obter a redução dos deslocamentos quanto às acelerações da superestrutura.

Tabela 4.4 – Massa, rigidez e amortecimento da superestrutura.

| Massa dos pavimentos (kg) | Coefficiente de rigidez (kN/m) | Coefficiente de amortecimento (kN.s/m) |
|---------------------------|--------------------------------|--|
| $m_b = 6800$ | $k_b = 232$ | $c_b = 3.74$ |
| $m_{s_1} = 5897$ | $k_{s_1} = 33732$ | $c_{s_1} = 67$ |
| $m_{s_2} = 5897$ | $k_{s_2} = 29093$ | $c_{s_2} = 58$ |
| $m_{s_3} = 5897$ | $k_{s_3} = 28621$ | $c_{s_3} = 57$ |
| $m_{s_4} = 5897$ | $k_{s_4} = 24954$ | $c_{s_4} = 50$ |
| $m_{s_5} = 5897$ | $k_{s_5} = 19059$ | $c_{s_5} = 38$ |

4.2.1 Resposta em função do tempo do edifício com o sistema P-F

Na Figura 4.14 são mostrados os deslocamentos e acelerações do topo da superestrutura de 5GDL equipado com o isolador P-F. Nesta figura se observa que os deslocamentos e as acelerações da superestrutura são reduzidas nos três tipos excitação sísmica, quando comparadas com a superestrutura de base fixa.

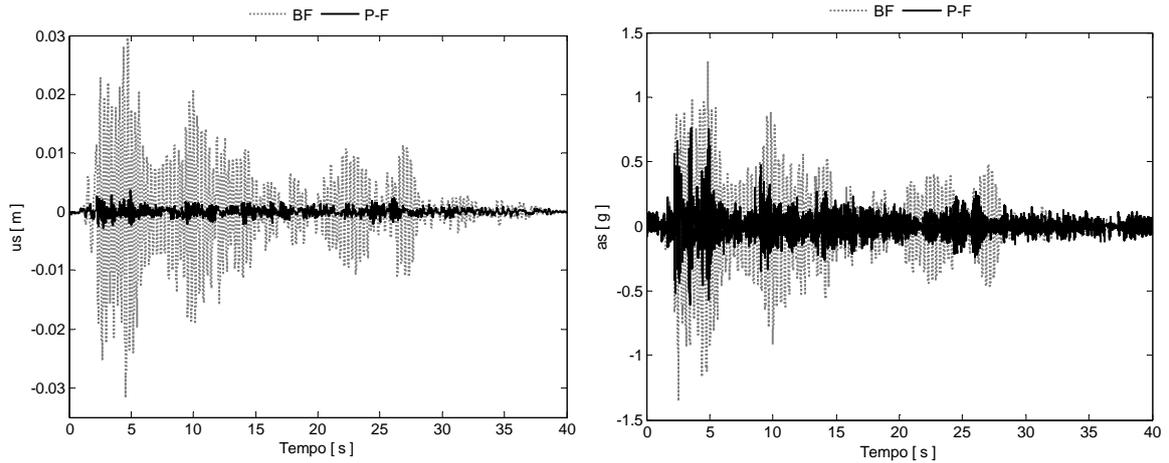
A Tabela 4.5 apresenta os valores máximos dos deslocamentos e acelerações do topo da superestrutura para diferentes isoladores. Nesta tabela se observa que de maneira geral, os deslocamentos e as acelerações máximas são maiores para os sismos de EL Centro e Kobe. No entanto, as reduções das vibrações estão em níveis aceitáveis, comprovando uma vez mais o bom desempenho de estruturas isoladas quando submetidas à ação de carregamento sísmico.

Comparando às acelerações a_s do sistema de 2GDL com acelerações a_s do sistema de 6GDL, pode-se observar acelerações menores na superestrutura de vários graus de liberdade por causa da redução do coeficiente atrito. Inclusive, problemas de amplificação de acelerações apresentados no sistema de 2GDL são reduzidos e evitados com a mudança deste parâmetro.

Embora os deslocamentos e acelerações da superestrutura de vários graus de liberdade sejam reduzidos a níveis aceitáveis, observa-se nos sistemas de base deslizante um controle inadequado das acelerações, quando comparada com a redução dos deslocamentos. No entanto, estes sistemas podem ser melhorados com a variação de seu parâmetro mais influente, isto é, o coeficiente μ .

Tabela 4.5 – Deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 6GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos.

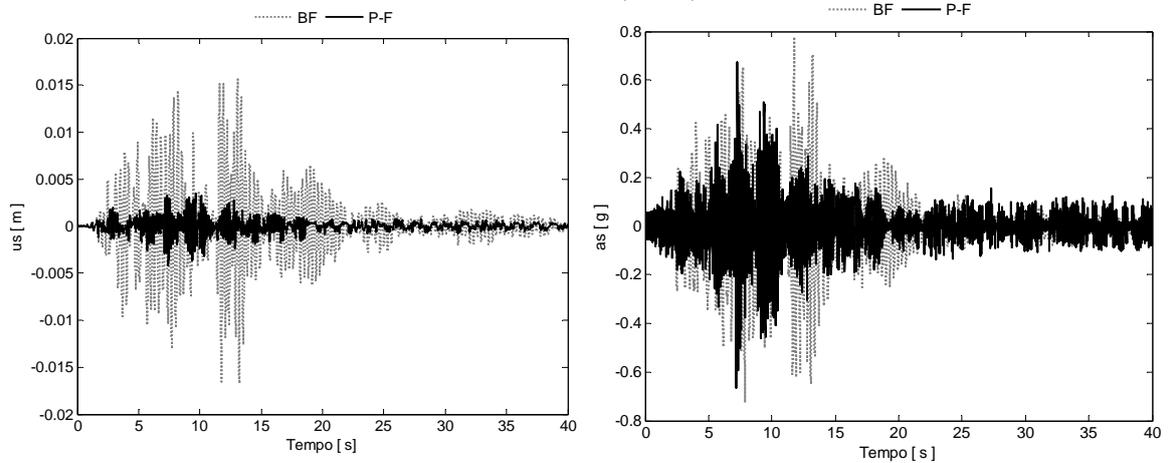
| Isolador de base | EL Centro, 1940 | | Kobe, 1995 | | Loma Prieta, 1989 | |
|------------------|-----------------|-------------|--------------|-------------|-------------------|-------------|
| | u_s [cm] | a_s [g] | u_s [cm] | a_s [g] | u_s [cm] | a_s [g] |
| P-F | 0,360 | 0,755 | 0,410 | 0,672 | 0,190 | 0,244 |
| FPS | 0,440 | 0,171 | 0,630 | 0,148 | 0,270 | 0,156 |
| R-FBI | 0,150 | 0,181 | 0,190 | 0,215 | 0,190 | 0,174 |
| LRB | 0,490 | 0,046 | 0,440 | 0,051 | 0,270 | 0,0305 |
| NZ | 0,300 | 0,131 | 0,230 | 0,087 | 0,210 | 0,058 |
| BF | 3,160 | 1,357 | 1,700 | 0,779 | 1,970 | 0,871 |



(a)

(b)

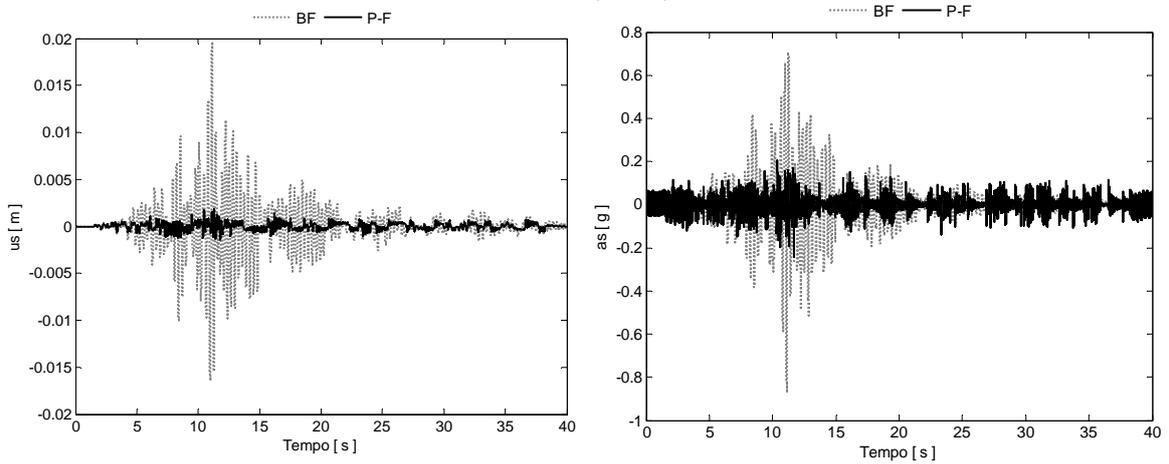
El Centro (1940)



(c)

(d)

Kobe (1990)



(e)

(f)

Loma Prieta (1989)

Figura 4.14 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema P-F($\mu = 0,01$).

As Figuras 4.15(a)-(f) apresentam a resposta ao longo do tempo e a força do isolador P-F. Analisando as Figuras 4.15(a)-(c), verificam-se deslocamentos máximos da base no sistema P-F quando este é solicitado ao carregamento de baixa frequência de Loma Prieta. Adicionalmente, se registram deslocamentos permanentes da base quando o isolador é submetido à ação dinâmica de EL Centro e Loma Prieta.

A força gerada no isolador P-F é apresentada nas Figuras 4.15(d)-(f). Estas figuras confirmam o comportamento histerético dos sistemas de isolamento de base descritos na Figura 3.2(b). Nos três sistemas de base deslizante são observados níveis de força (fb), semelhantes, com valores máximos próximos a 0,01. Os valores máximos dos deslocamentos da base são 10, 8, e 20 cm para EL Centro, Kobe e Loma Prieta respectivamente.

Com a mudança do valor do coeficiente de atrito verifica-se na Tabela 4.6 um aumento da eficiência dos sistemas de base deslizante no controle das acelerações, em relação ao sistema de dois graus de liberdade.

Tabela 4.6 – Eficiência no controle dos deslocamentos e acelerações máximas do sistema de 6GDL para vários sistemas de isolamento de base submetido a três registros sísmicos.

| Isolador de base | EL Centro, 1940 | | Kobe, 1995 | | Loma Prieta, 1989 | |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | R- u_s [%] | R- a_s [%] | R- u_s [%] | R- a_s [%] | R- u_s [%] | R- a_s [%] |
| P-F | 89 | 44 | 76 | 14 | 90 | 72 |
| FPS | 86 | 87 | 63 | 81 | 86 | 82 |
| R-FBI | 95 | 87 | 89 | 72 | 90 | 80 |
| LRB | 84 | 97 | 74 | 93 | 86 | 96 |
| NZ | 91 | 90 | 86 | 89 | 89 | 93 |

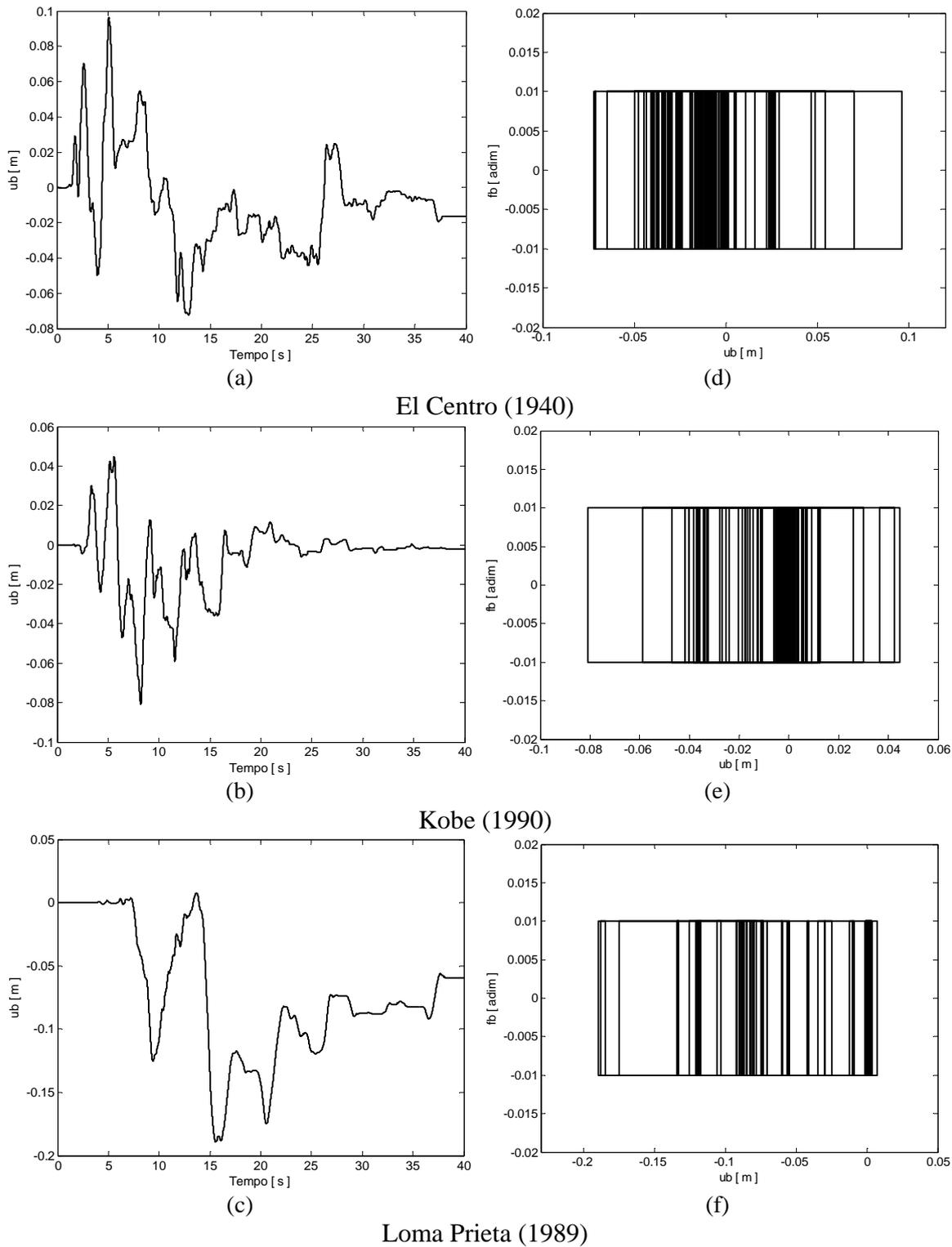


Figura 4.15 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força do sistema de isolamento P-F ($\mu = 0,01$).

4.2.2 Resposta em função do tempo do edifício com o sistema FPS

A efetividade do isolador FPS no controle das vibrações do sistema de 6GDL é estudada nas Figuras 4.16(a)-(f). Nestas figuras observa-se, que em geral, ocorre uma redução dos deslocamentos e acelerações da superestrutura protegida com o isolador FPS. Verifica-se também na Tabela 4.5 um deslocamento máximo maior no terremoto de Kobe, porém o desempenho apresentado é de 63%, como pode ser comprovado pela Tabela 4.6. Deste modo, este isolador filtra 63% dos deslocamentos gerados pelo sismo de Kobe.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.6, observa-se que as acelerações máximas do isolador FPS são comparáveis com as acelerações máximas do sistema R-FBI, mas no que se refere aos deslocamentos, o sistema R-FBI apresentou um melhor desempenho..

Nas Figuras 4.17(a)-(c) são apresentados os deslocamentos (u_b) da base para o isolador FPS. Comparativamente com o sistema anterior, o FPS apresenta deslocamentos da base maiores para os sismos de El Centro e Kobe. De acordo com as Figuras 4.17(a)-(c), o isolador FPS apresenta a vantagem de retornar a superestrutura à sua posição inicial, condição nem sempre possível para o isolador P-F. A característica do sistema FPS de retornar a superestrutura à sua configuração inicial é fornecida pela curvatura das superfícies metálicas que compõem este isolador.

Os diagramas força-deformação da base, f_b , são mostrados nas Figuras 4.17(d)-(f) para o isolador FPS. Realizando uma análise comparativa, observa-se que o sistema FPS apresenta níveis de força f_b mais altos do que o isolador P-F. Do mesmo modo que no caso anterior, o formato do diagrama é coerente com os diagramas teóricos descritos na Figura 3.2. do capítulo 3.

Embora o isolador FPS não seja o sistema de melhor desempenho no controle das vibrações de edifícios, pode-se concluir que este sistema de isolamento fornece proteção satisfatória desde que os parâmetros que governem o seu comportamento dinâmico sejam selecionados com especial atenção.

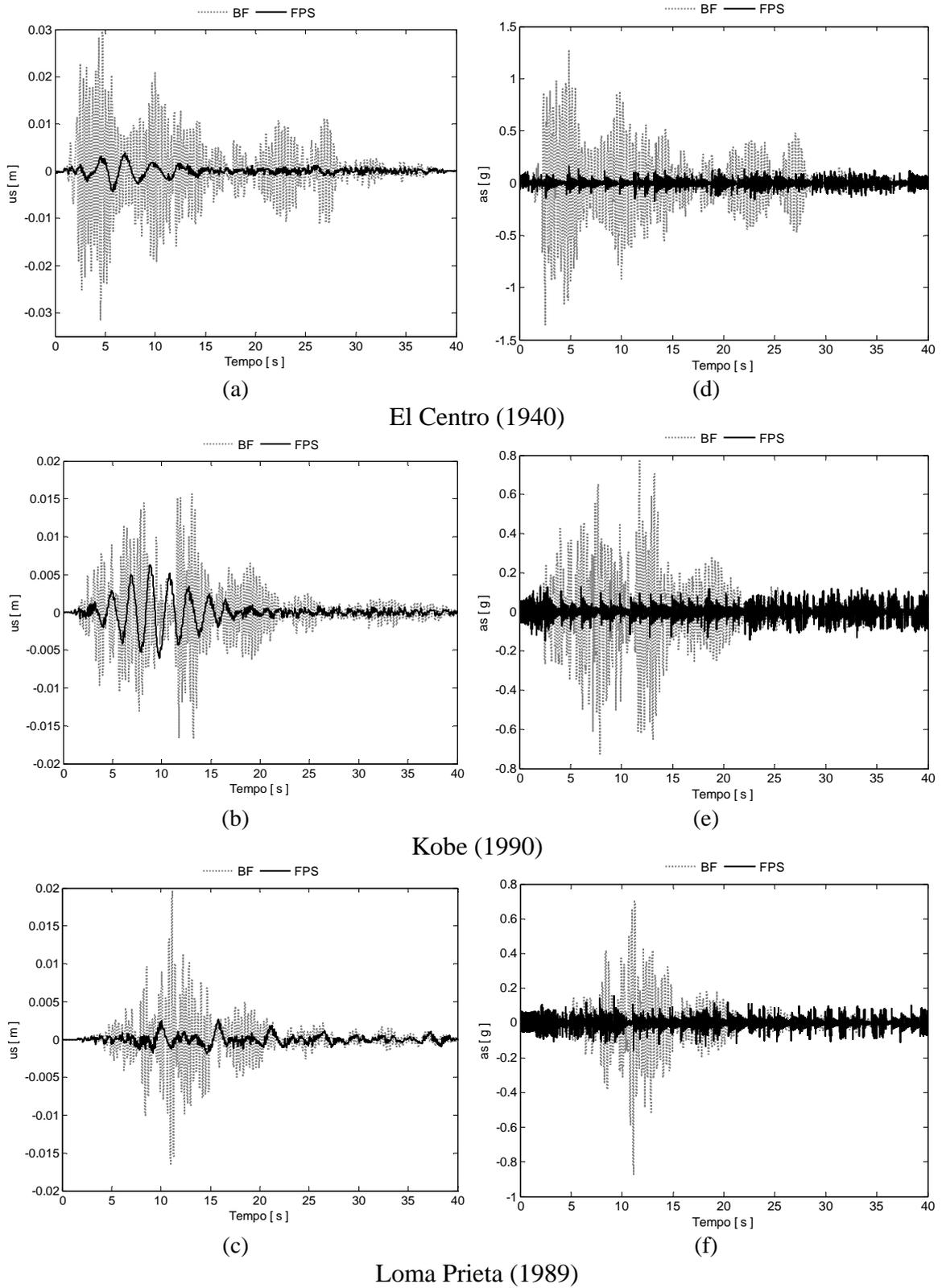
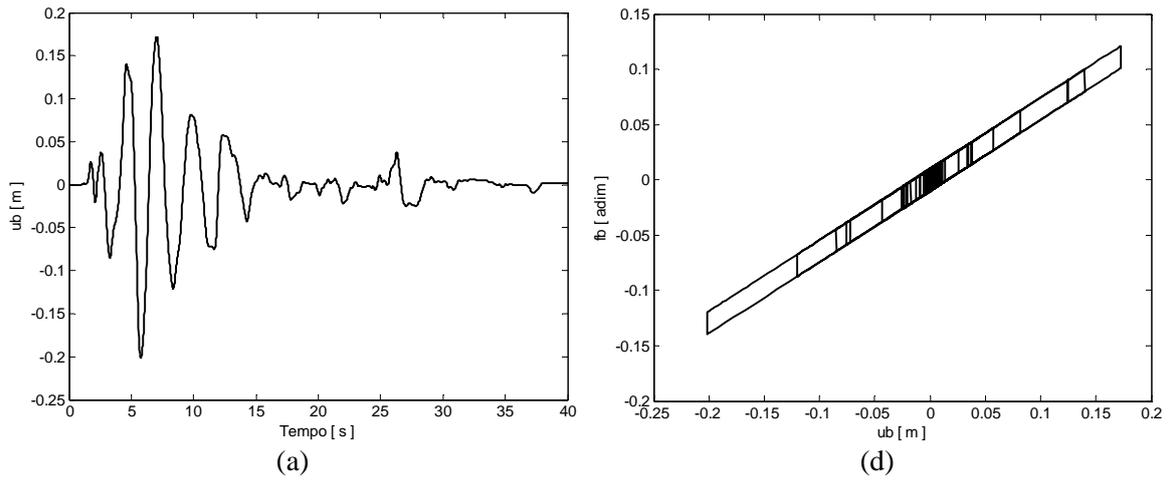
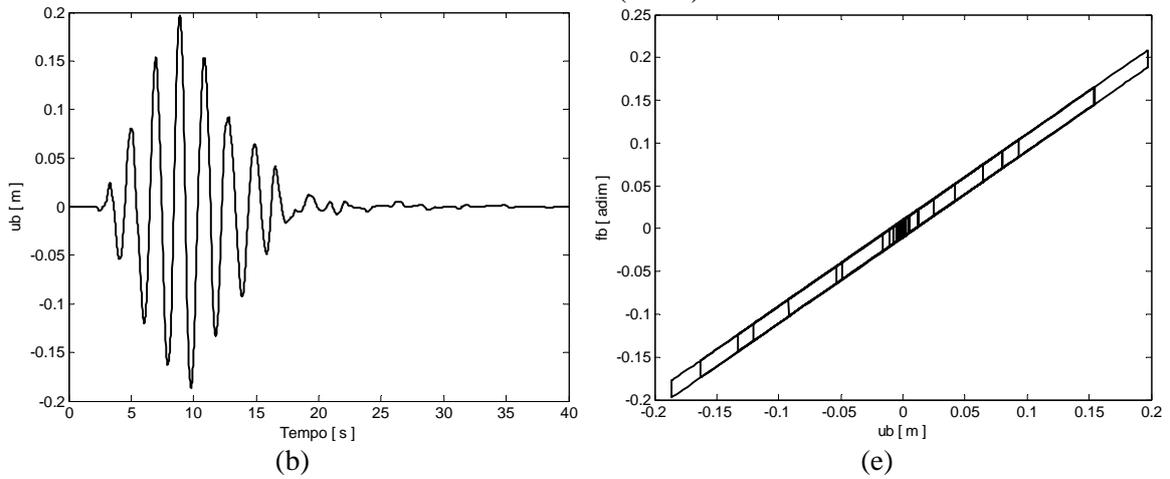


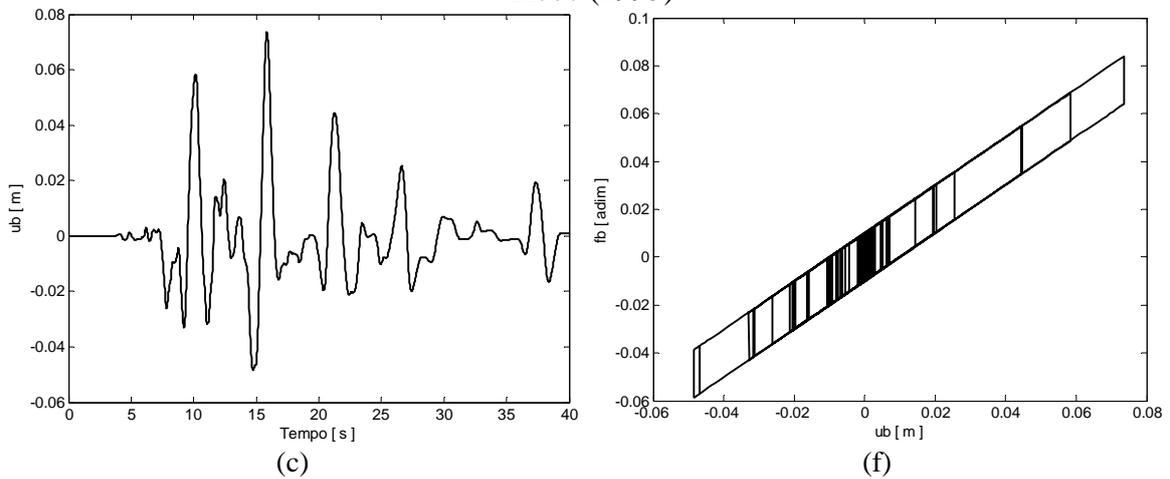
Figura 4.16 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema FPS ($\mu = 0,01$; $T_b = 2,5s$).



El Centro (1940)



Kobe (1995)



Loma Prieta (1989)

Figura 4.17 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força do sistema de isolamento FPS ($\mu = 0,01$; $T_b = 2,5s$).

4.2.3 Resposta em função do tempo do edifício com o sistema R-FBI

O estudo da efetividade do sistema R-FBI é apresentado nas Figuras 4.18(a)-(f). Os deslocamentos da superestrutura são apresentados nas Figuras 4.18(a)-(c), enquanto que as acelerações são mostradas nas Figuras 4.18(d)-(f). Observando estes resultados pode-se concluir que o sistema R-FBI fornece alta proteção para edifícios submetidos a excitações sísmicas, devido às altas taxas de redução dos deslocamentos e acelerações que foram observadas.

Apesar da Figura 4.18(f) apresentar pequenas amplificações da aceleração no início e no final do sismo de Loma Prieta, observa-se, que de maneira geral, ocorre uma redução do valor máximo da aceleração da ordem de 80%. Nos casos dos sismos de EL Centro e Kobe as acelerações apresentam reduções de 87% e 72% respectivamente.

O valor máximo dos deslocamentos do sistema R-FBI, Tabela 4.6, apresentou reduções significativas para as três excitações sísmicas consideradas, EL Centro, Kobe e Loma Prieta, com reduções de 95%, 89% e 90% respectivamente. Isto confirma a eficiência do sistema R-FBI para um amplo intervalo de frequência da excitação sísmica.

A resposta ao longo do tempo dos deslocamentos da base é apresentada nas Figuras 4.19(a)-(c). Nestas figuras observa-se um deslocamento máximo da base maior quando o sistema é submetido à ação dinâmica do sismo de EL Centro, e um deslocamento da base menor quando trata do sismo de Kobe. Comparando-se com o sistema FPS, evidencia-se que o R-FBI apresenta um deslocamento menor da base para os sismos de EL Centro e Kobe, e um deslocamento similar no caso do sismo de Loma Prieta. Deste modo, observa-se que o sistema R-FBI de maneira similar ao FPS evita os deslocamentos permanentes da base apresentados pelo sistema P-F.

Os diagramas força-deslocamento são mostrados nas Figuras 4.19(d)-(f). Do mesmo modo que nos casos anteriores estes diagramas correspondem aos diagramas teóricos. Por outro lado, um aspecto de destaque são os valores menores de (f_b) , quando comparados aos valores encontrados nos sistemas P-F e FPS, em todos os casos de excitação sísmica considerados neste estudo.

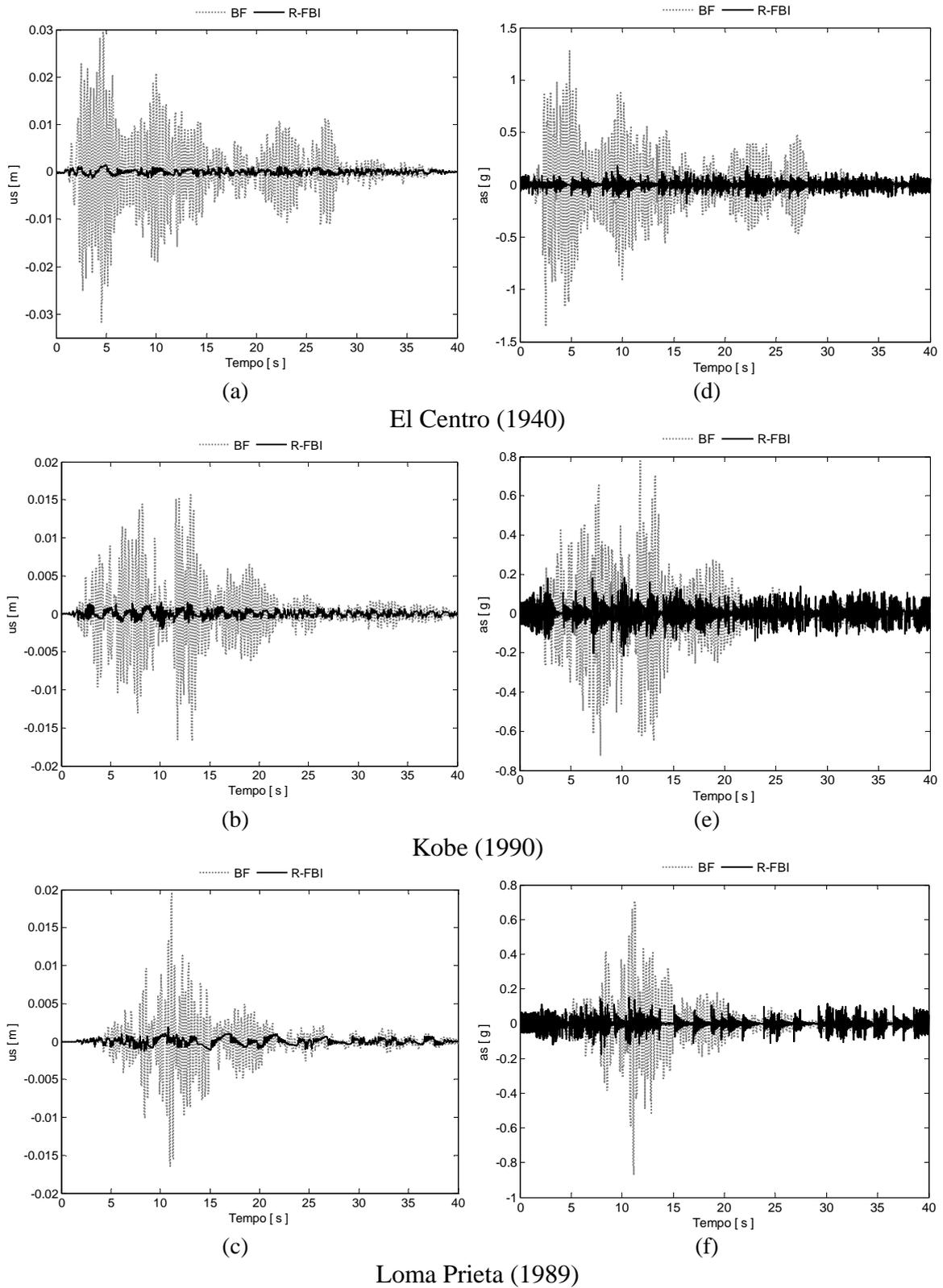
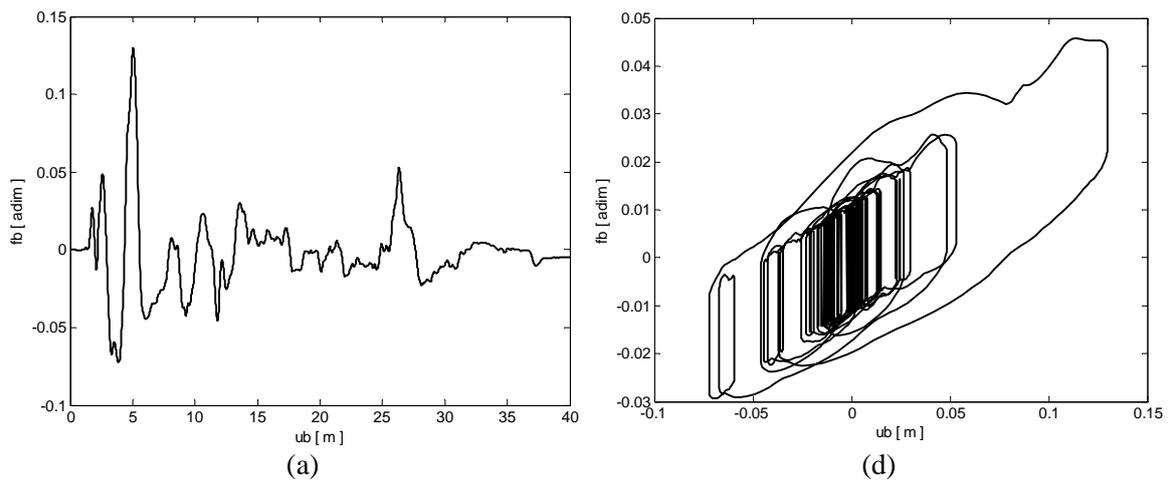
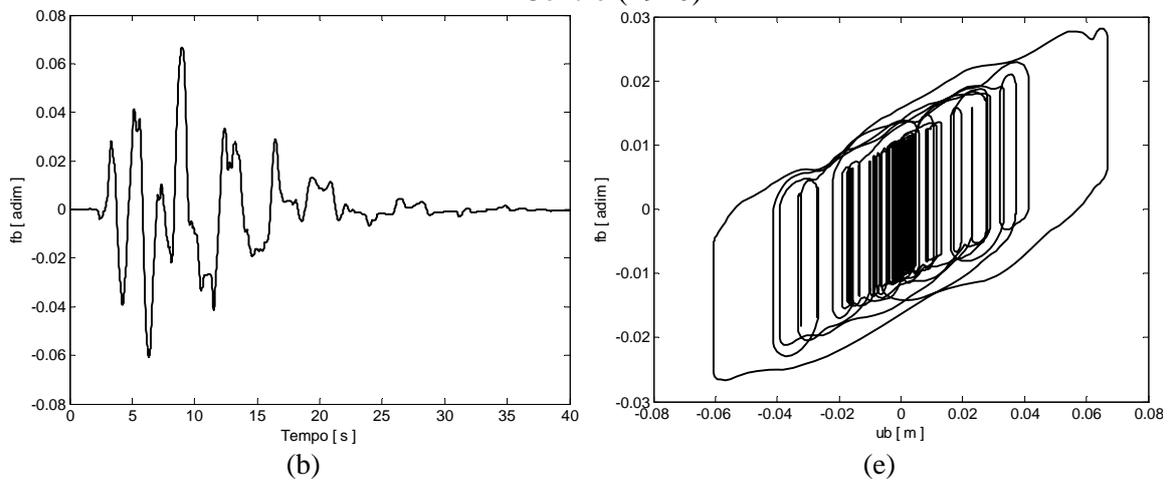


Figura 4.18 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema R-FBI

$$(\mu = 0,01; T_b = 4,0; \xi_b = 0,10).$$

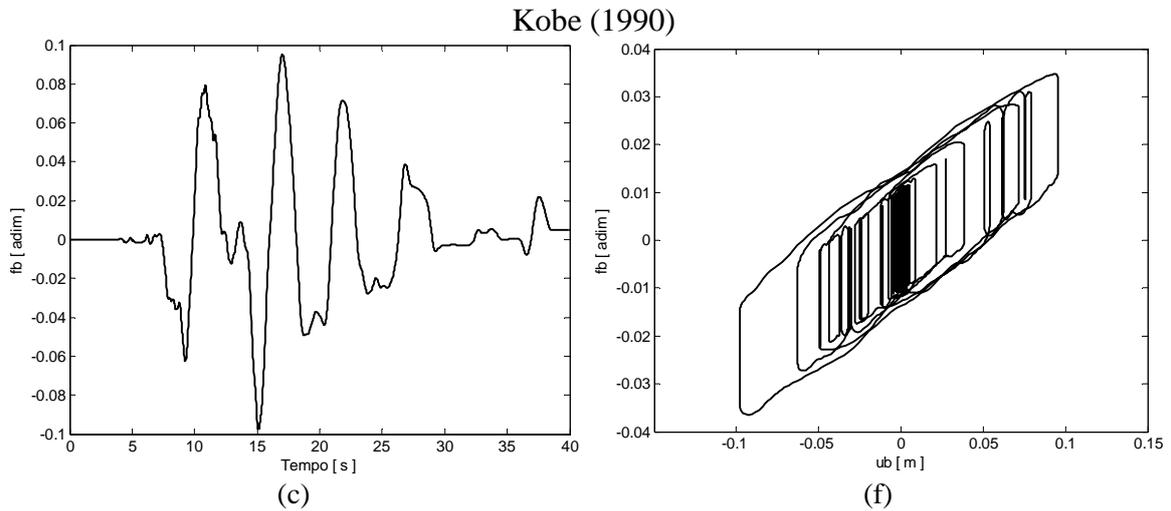


El Centro (1940)



(b)

(e)



(c)

(f)

Loma Prieta (1989)

Figura 4.19 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força do sistema de isolamento de R-FBI ($\mu = 0,01$; $T_b = 4,0$; $\xi_b = 0,10$).

4.2.4 Resposta em função do tempo do edifício com o sistema LRB

A resposta dos deslocamentos e acelerações da superestrutura isolada com o sistema LRB é apresentada nas Figuras 4.20(a)-(f), nas quais observa-se uma alta eficiência no controle dos deslocamentos e das acelerações. De acordo com a Tabela 4.6, os valores da eficiência encontrados no controle dos deslocamentos são de 84%, 74% e 86% para os sismos de El Centro, Kobe e Loma Prieta, respectivamente. Enquanto que as acelerações são reduzidas em 97%, 93%, e 96% na mesma ordem dos sismos citados anteriormente.

De acordo com as Figuras 4.20(d)-(f) e com a Tabela 4.6, observa-se comparativamente no sistema LRB um melhor desempenho no controle das acelerações, a_s , do que nos sistemas P-F, FPS, R-FBI, NZ. No caso do controle dos deslocamentos, u_s , observa-se um melhor desempenho no sistema de base deslizante, R-FBI.

A resposta do deslocamento da base, u_b , é apresentada nas Figuras 4.21(a)-(c). nos quais observa-se um deslocamento máximo da base similar para os sismos EL Centro e Kobe, com valores de 15 e 14 cm respectivamente. No caso do sismo de Loma Prieta o deslocamento da base é de 9 cm. Avaliando-se o comportamento de u_b ao longo do tempo, constata-se que este sistema tende a retornar a sua posição original, evitando assim deslocamentos permanentes na base do edifício após a ocorrência do sismo.

As Figuras 4.21(d)-(f), mostram os diagramas força-deslocamento do isolador, nas quais verifica-se o comportamento de histerese apresentado na Figura 3.2. Neste caso, com exceção da força gerada no sistema FPS devido ao sismo de Kobe, Figura 4.17(e), observa-se níveis de força na base maiores do que os encontrados nos sistemas P-F, FPS, e R-FBI.

Comparando-se com outros sistemas de isolamento de base, P-F, FPS, R-FBI e NZ, o sistema LRB apresenta o melhor desempenho no controle de acelerações da superestrutura. Além disso, é um sistema que permite isolar edifícios submetidos a diferentes espectros de frequências. Por outro lado, pelo comportamento linear de f_b , o sistema LRB pode ser usado em combinação com outros sistemas de controle.

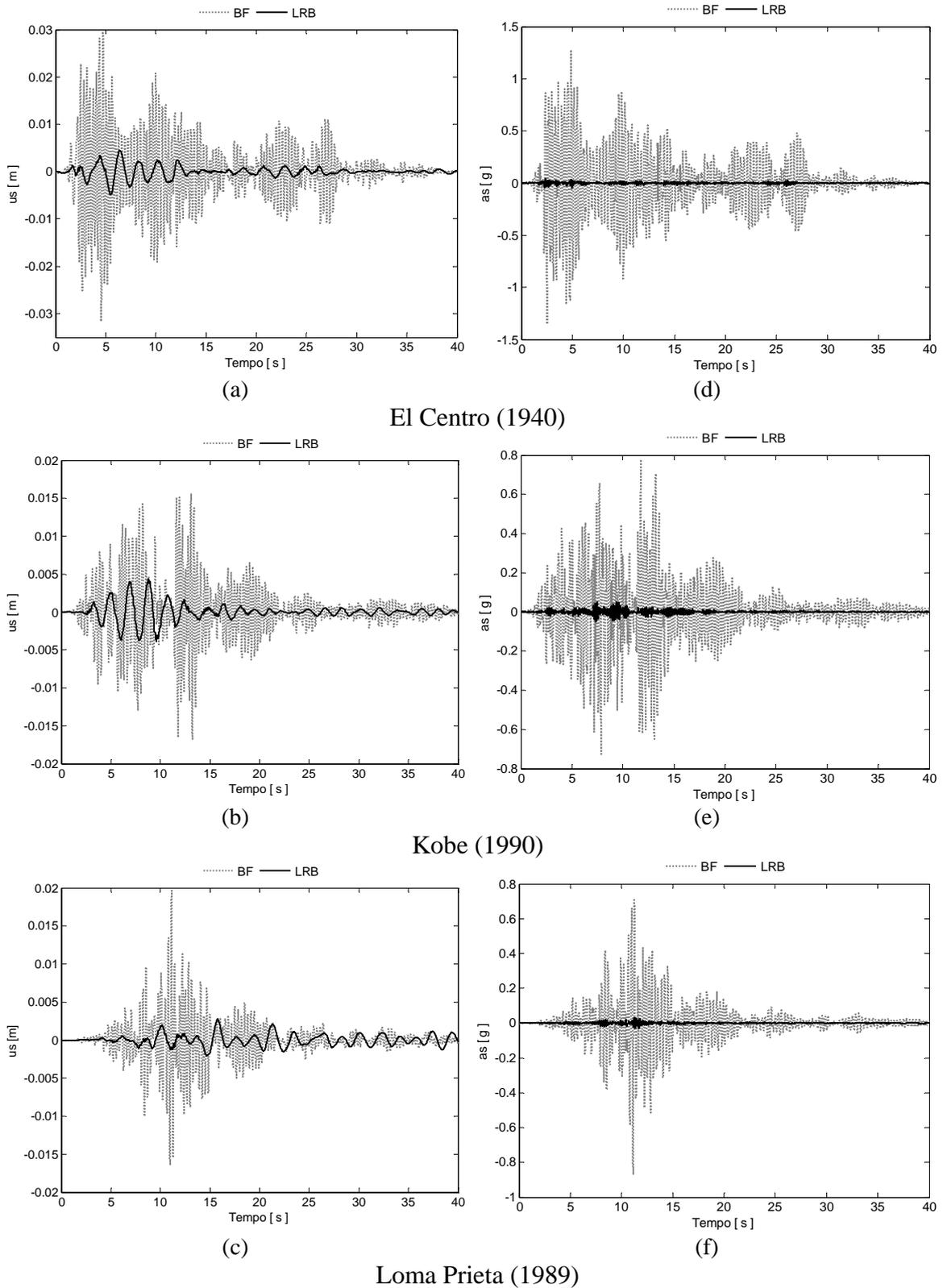


Figura 4.20 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema LRB ($T_b = 2,0$; $\xi_b = 0,10$).

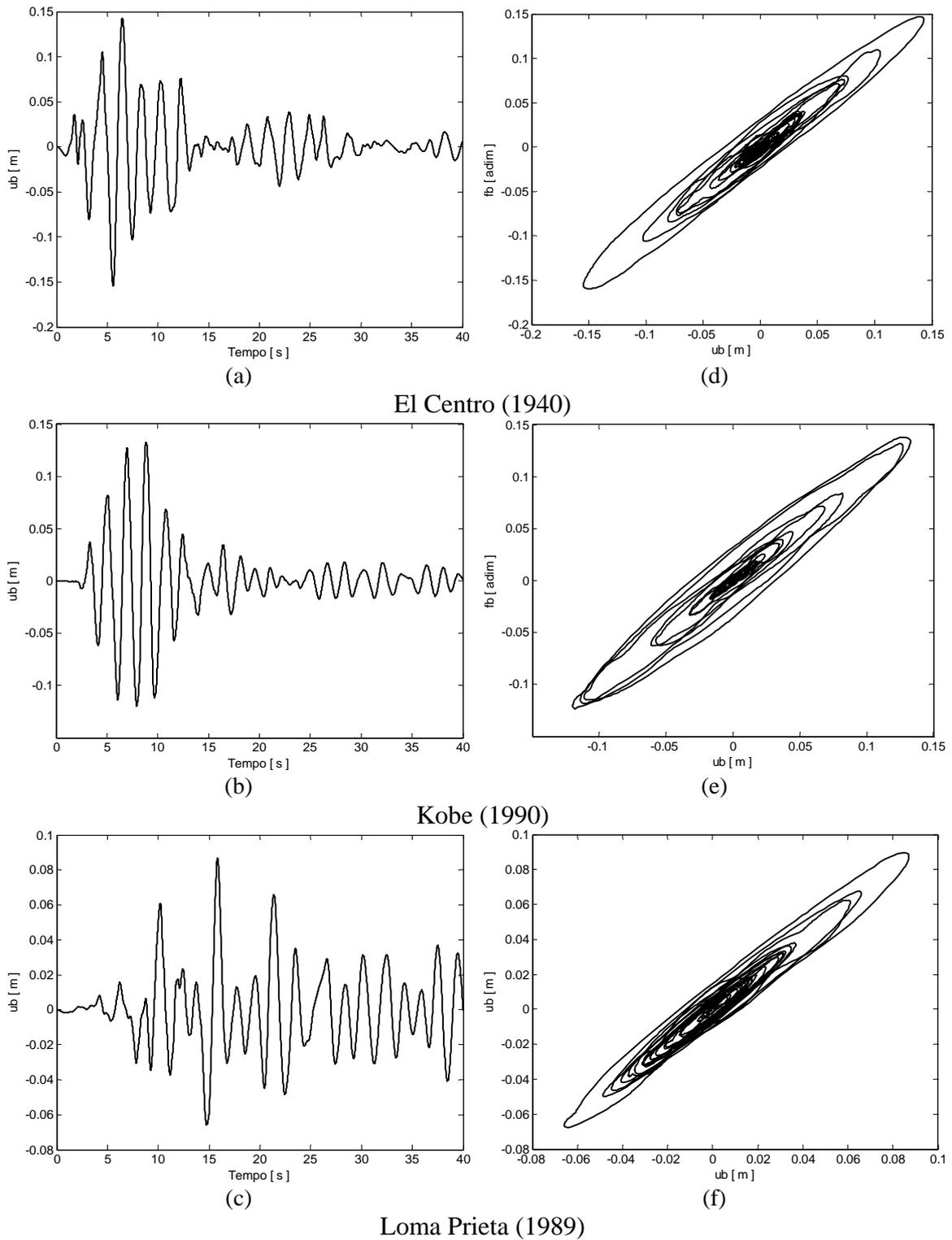


Figura 4.21 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força do sistema de isolamento LRB ($T_b = 2,0$; $\xi_b = 0,10$).

4.2.5 Resposta em função do tempo do edifício com o sistema NZ

As Figuras 4.22(a)-(c) apresentam uma análise da efetividade do sistema de isolamento de base NZ no controle dos deslocamentos da superestrutura, observando-se reduções de 91%, 86% e 89% para os sismos de EL Centro, Kobe e Loma Prieta, respectivamente. Apesar da redução do deslocamento u_s ser menor para o terremoto de Loma Prieta, observa-se de modo geral que o sistema de isolamento NZ apresenta valores de deslocamentos menores que os do sistema LRB.

As acelerações são apresentadas nas Figuras 4.22(d)-(f), nas quais pode-se verificar uma redução significativa das acelerações e levando em conta os resultados da Tabela 4.6, o sistema NZ, com eficiências de 90%, 89% e 93% , seria o segundo melhor sistema de isolamento para o controle das acelerações da superestrutura, sendo o primeiro o sistema LRB.

As Figuras 4.23(a)-(c) apresentam os deslocamentos da base ocasionados pelas três excitações sísmicas, EL Centro, Kobe e Loma Prieta. Observando estas figuras conclui-se que o sistema NZ, em geral, apresenta maiores deslocamentos da base, uma condição desfavorável quando comparada com os sistemas P-F, FPS, R-FBI e LRB, podendo esta condição ser melhorada com a otimização de seus parâmetros característicos.

Uma característica inerente ao sistema NZ é a tendência de retornar a estrutura a sua posição inicial, logo após da ocorrência de um evento sísmico.

Nas Figuras 4.23(d)-(f) verifica-se o comportamento de histerese teórico descrito na Figura 3.2(e). Para obter esta curva foi definido o deslocamento da base em relação à função de histerese, z . De acordo com estas figuras, a força do isolador, f_b , se encontra no intervalo de 0,06 a -0,06 nos três casos de excitação sísmica, assim, nota-se que os valores da força (f_b) no sistema NZ são menores do que no sistema LRB.

Embora o sistema NZ tenha sido criado inicialmente para ser usado em estruturas de usinas nucleares, este estudo mostra que este sistema também apresenta alto desempenho no controle das vibrações de edifícios submetidos à excitações sísmicas.

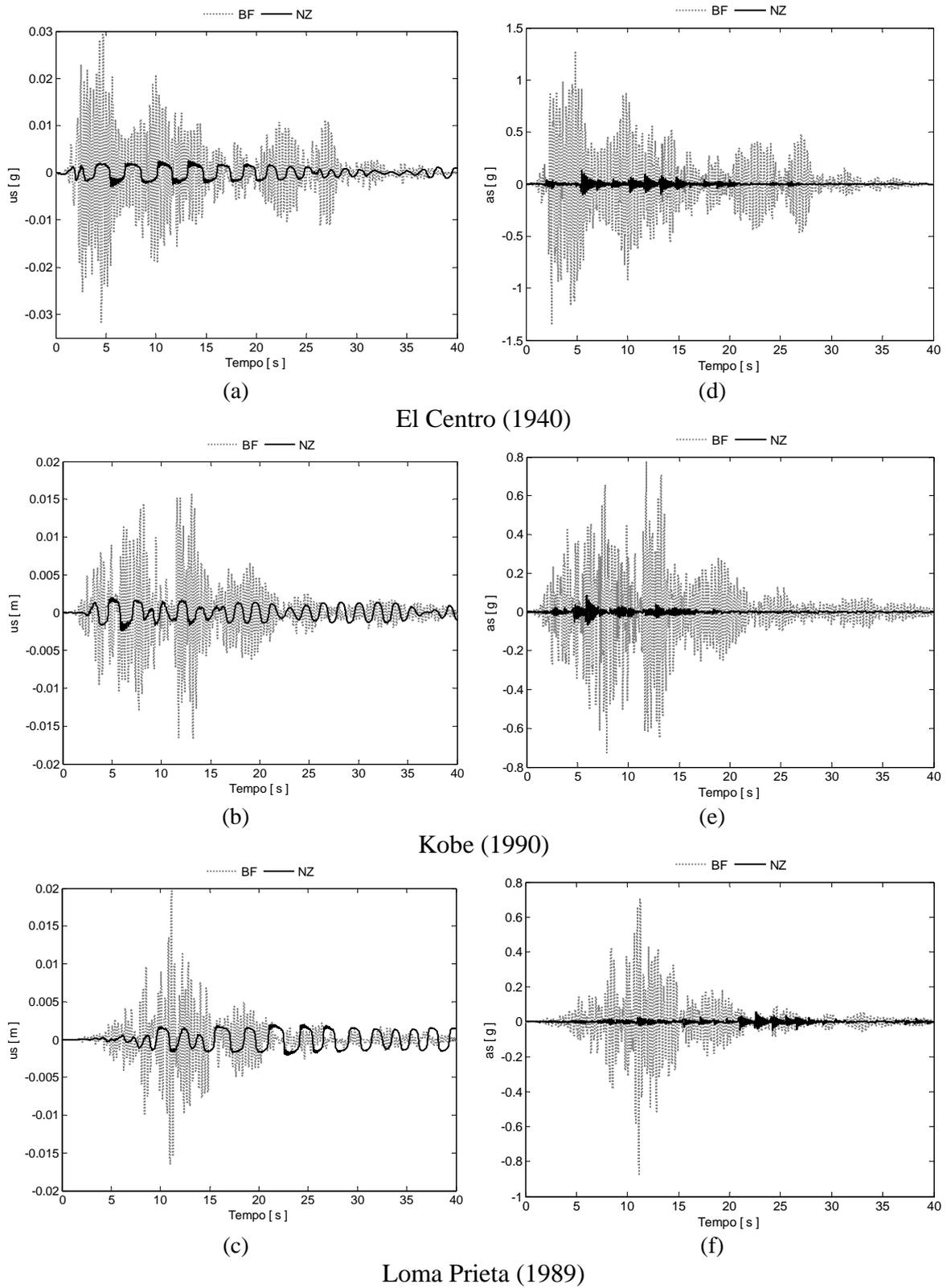
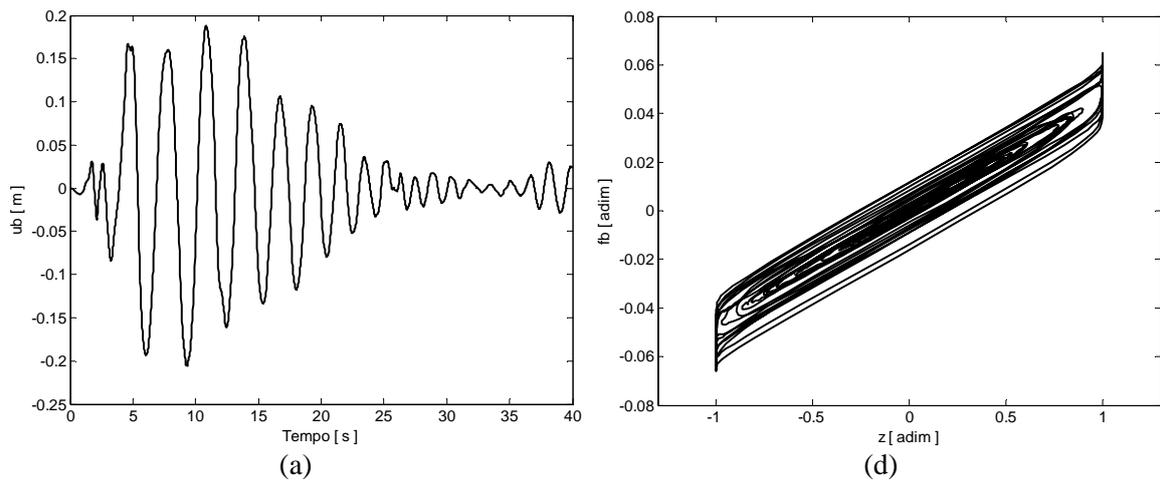
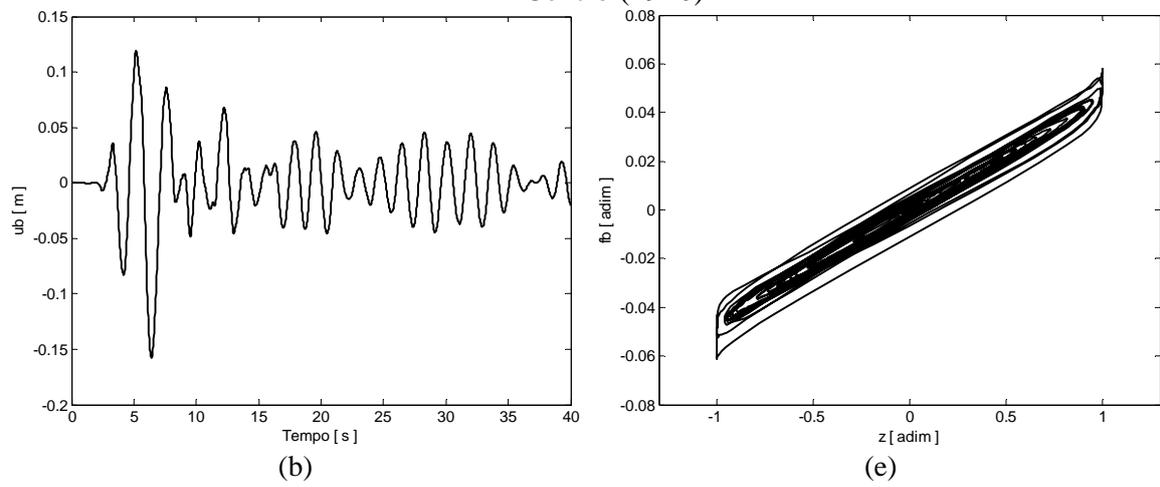


Figura 4.22 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos e acelerações da superestrutura de 5GDL isolada sismicamente com o sistema NZ

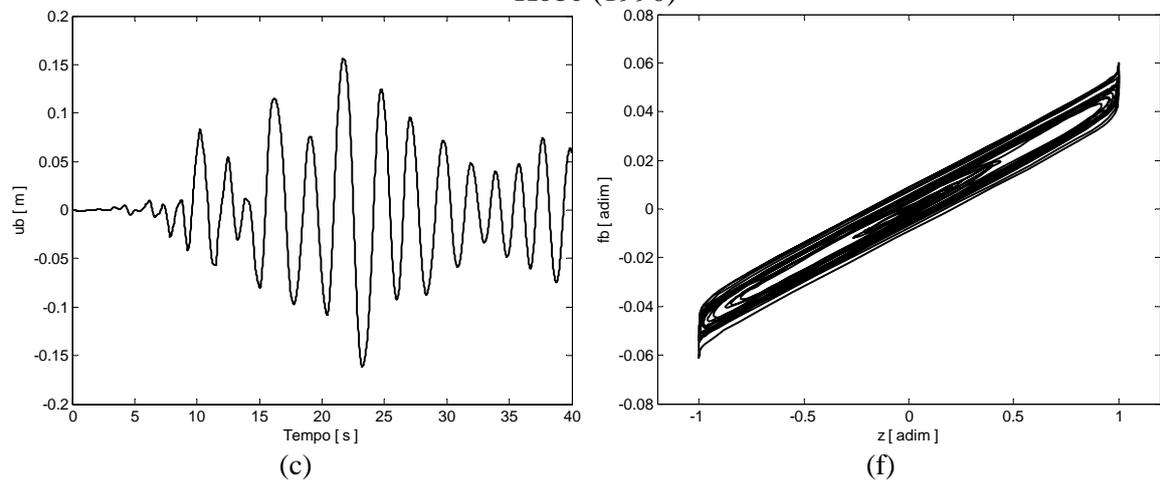
$$(T_b = 2,5; \xi_b = 0,10; F_y/W = 0,05).$$



El Centro (1940)



Kobe (1990)



Loma Prieta (1989)

Figura 4.23 – Resposta em função do tempo dos deslocamentos da base e força do sistema de isolamento NZ ($T_b = 2,5$; $\xi_b = 0,10$; $F_y/W = 0,05$).

De maneira geral os resultados indicam que os sistemas de isolamento R-FBI, LRB e NZ são os sistemas que apresentaram melhor desempenho tanto no controle dos deslocamentos como das acelerações da superestrutura. No caso dos sistemas P-F e FPS observa-se uma grande sensibilidade do coeficiente de atrito μ . Condição que faz operar o sistema inadequadamente no controle das acelerações para alguns valores de μ .

5. ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE UM EDIFÍCIO COM 6 PAVIMENTOS

Para mostrar a efetividade dos sistemas de isolamento de base de edifícios em escala real, considere a planta típica do edifício de seis pavimentos da Figura 4.24, isolado com o sistema NZ. O edifício tem forma retangular de dimensões em planta de 15 x 10 m para uma relação comprimento/largura de 1.5. Adicionalmente, foi considerado um peso de $W=1,2\text{tf}/\text{m}^2$. Neste edifício as vigas e os pilares foram simetricamente distribuídos em relação ao centro de massa CM, com objetivo de fazer coincidir o CM com o centro de rigidez do sistema de isolamento, evitando assim, modos de vibração devido a efeitos de torção.

A superestrutura apresentou um período fundamental $T_s=1,01\text{s}$ com uma razão de amortecimento de $\xi_s=0,05$. As propriedades adotadas no sistema de isolamento de base NZ são listadas na Tabela 4.7, tendo sido sugeridas por Kelly (1999) definidas em função da carga vertical de serviço do edifício.

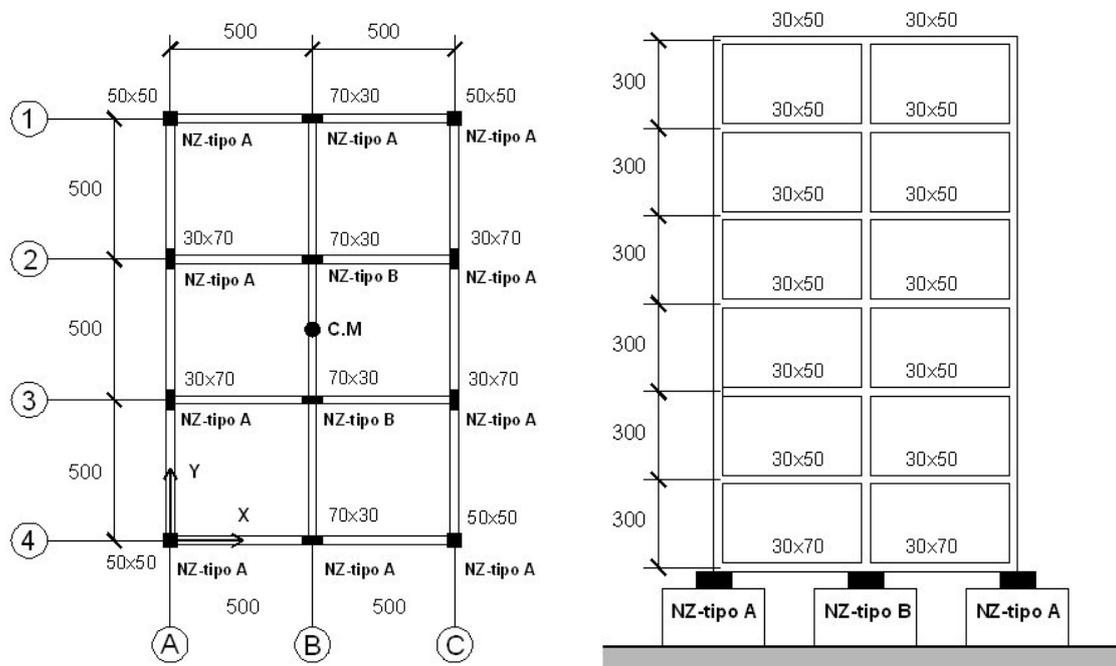


Figura 4.24 – Vista em planta e frontal do edifício com 6 pavimentos, unidades em cm.

O software comercial de análise estrutural SAP2000,V10.07 foi usado para a modelagem deste edifício. Por intermédio deste programa cada laje de piso foi modelada como um diafragma rígido de 3GDL, dois graus de liberdade nas direções laterais, um na direção x e outro na direção y e um grau de liberdade rotacional entorno do eixo vertical z. Para a modelagem do sistema de isolamento NZ foram utilizados elementos *link* definidos com as características da Tabela 4.7. e distribuídos segundo a Figura 4.24.

Tabela 4.7 – Propriedades do sistema de isolamento de base NZ para o exemplo do edifício tridimensional com 6 pavimentos.

| Isolador | P [tf] | Ke [tf/m] | Ko [tf/m] | Fy [tf] | Kp [tf/cm] | Kv [tf/cm] | Φ [cm] | H [cm] |
|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------|--------------------|
| A | 60-100 | 110 | 794 | 7,94 | 0,043 | 1100 | 55 | 18 |
| B | 160-220 | 190 | 1270 | 12,70 | 0,055 | 2800 | 80 | 18 |

Onde,

P: Carregamento vertical do edifício.

Ke: Rigidez efetiva do sistema NZ.

Ko: Rigidez inicial do sistema NZ.

Fy: Força de fluência do sistema NZ.

Kp: Razão de rigidez da força de pos-fluência e a pré-fluência .

Kv: Rigidez vertical do sistema NZ.

Φ: Diâmetro do sistema NZ.

H: Altura do sistema NZ.

O edifício foi submetido à ação simultânea das duas componentes de aceleração sísmica dos terremotos descritos anteriormente na Tabela 3.4. A análise espectral realizada compara as vibrações do edifício convencional com o edifício equipado com o sistema NZ.

Nas Figuras 4.25(a)-(f) são apresentados os espectros dos deslocamentos e das acelerações da superestrutura isolada e não isolada na direção do eixo global x. Nas Figuras 4.25(a)-(b), (c)-(d), se observa um alto desempenho no controle dos deslocamentos e das acelerações quando o edifício esta submetido aos terremotos de EL

Centro e Kobe. No caso do Loma Prieta, observa-se um bom comportamento na redução dos deslocamentos do edifício isolado para períodos $T_s < 1.20s$. Em relação à aceleração da superestrutura, o isolador apresenta um bom desempenho, reduzindo a aceleração máxima absoluta em 43% para o edifício equipado com o sistema de NZ.

Os resultados da análise espectral das vibrações na direção do eixo global y são apresentados nas Figuras 4.26(a)-(f). Observando os resultados encontrados no terremoto de EL Centro, verifica-se que os deslocamentos são reduzidos somente para períodos $T_s < 3.0s$, quanto que as acelerações, Figura 4.26(b), são reduzidas em todo intervalo de variação do período da superestrutura T_s .

Nas Figuras 4.26(c) a (f), evidencia-se uma redução significativa dos deslocamentos e acelerações provocados pelos terremotos de Kobe e Loma Prieta. No entanto, em períodos da superestrutura compreendidos entre 2 a 3s, verifica-se uma perda da efetividade no controle dos deslocamentos. Mesmo assim, registram-se reduções dos deslocamentos de 40% e 30% para os sismos de Kobe e Loma Prieta, respectivamente. Em relação às acelerações da superestrutura, verificam-se reduções de 70 e 75%.

Por intermédio dos parâmetros sugeridos por Kelly (1999), foram obtidas reduções importantes das vibrações na superestrutura, geradas pelos terremotos de EL Centro, Kobe e Loma Prieta. Por outro lado, verificou-se também uma queda da eficiência no controle dos deslocamentos para certos intervalos do período da superestrutura. Esta condição poderia ser solucionada com a otimização dos parâmetros do isolador.

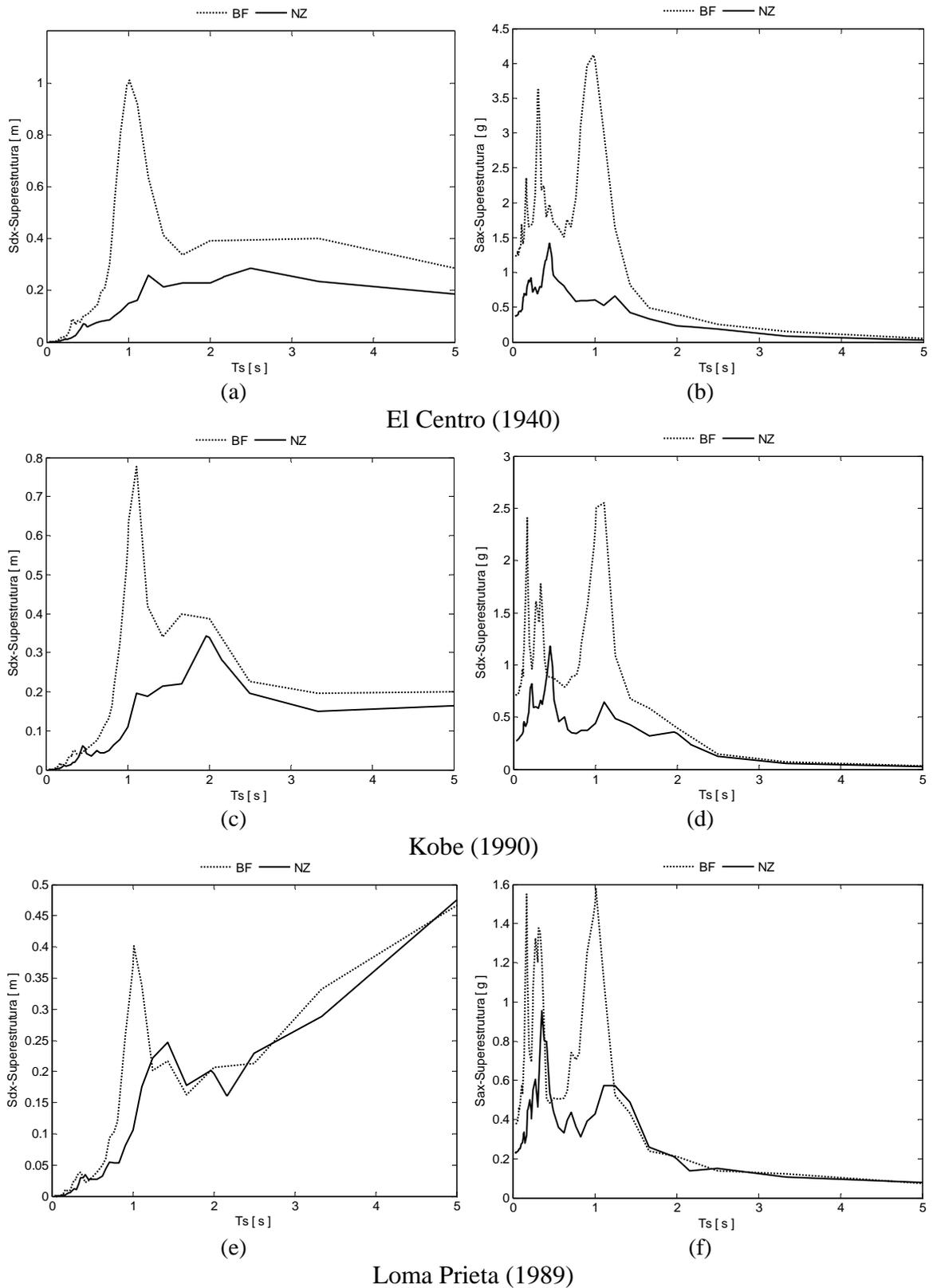


Figura 4.25 – Espectros de resposta dos deslocamentos e acelerações da superestrutura na direção x para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

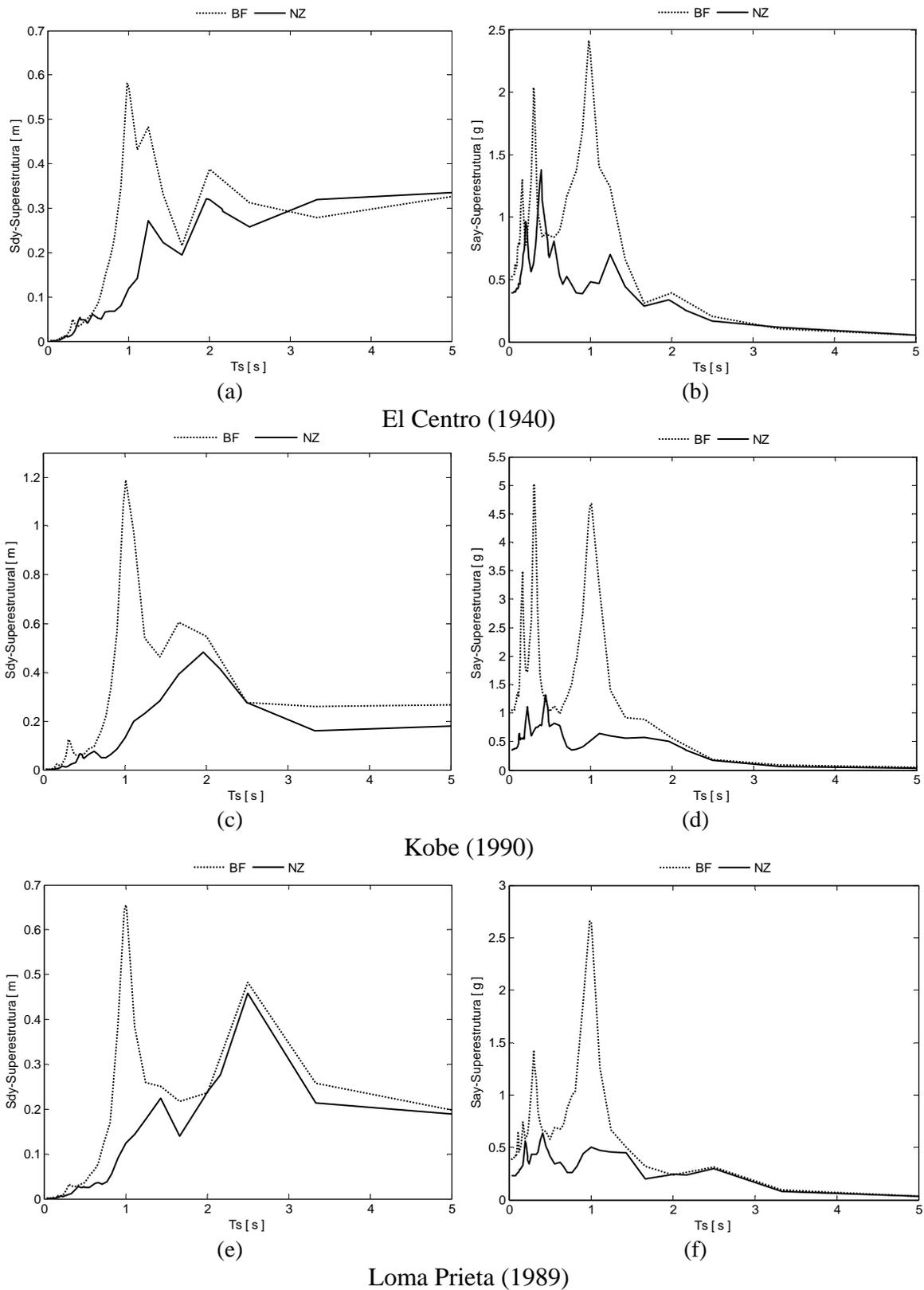


Figura 4.26 – Espectros de resposta dos deslocamentos e acelerações da superestrutura na direção y para os sismos EL Centro (1940), Kobe (1995) e Loma Prieta (1989).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos vários modelos dinâmicos que permitiram representar a resposta sísmica de edifícios com sistemas de isolamento de base (P-F, FPS, R-FBI, LRB e NZ). Estes modelos, constituídos por diagramas de blocos, foram criados por meio da interfase gráfica do programa Simulink® de Matlab® e foram usados para estudar a efetividade dos BISS no controle de vibrações de edifícios. Adicionalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros dos isoladores, para avaliar sua influência na resposta sísmica de edifícios com isolamento de base. Para realizar este estudo foram escolhidos três registros de acelerações sísmicas de diferentes intensidades de frequências: EL Centro, Kobe e Loma Prieta.

De acordo com as respostas sísmicas de edifícios com e sem isolamento de base se conclui que os sistemas de isolamento de base apresentam alto desempenho no controle de vibrações de edifícios geradas por excitações de alta frequência como são os terremotos de EL Centro e Kobe. No caso de sismos de baixa frequência como o terremoto de Loma Prieta, os sistemas de base deslizante, P-F, FPS e R-FBI não funcionam adequadamente e as acelerações da superestrutura apresentam amplificações. Por outro lado, os sistemas LRB e NZ apresentam melhor desempenho em um intervalo mais amplo de frequências da excitação sísmica.

Em relação à análise de sensibilidade dos parâmetros dos isoladores se conclui:

- Os deslocamentos da superestrutura aumentam com o incremento do período natural (T_s) da superestrutura. Deste modo, em edifícios muito flexíveis a performance dos sistemas de isolamento de base no controle dos deslocamentos é reduzida.
- As acelerações da superestrutura são praticamente independentes da variação de seu período natural (T_s), ou seja, mudanças da rigidez da superestrutura não implicam mudanças significativas da aceleração máxima de edifícios com sistemas de isolamento de base.

- Em situações de sismos de alta e intermediária frequências os deslocamentos (u_s) são significativamente reduzidos com o aumento do período do isolador (T_b) para os sistemas FPS, R-FBI, e LRB. No entanto, em condições de sismos de baixa frequência esta tendência prevalece somente no sistema LRB. No sistema NZ esta tendência é pouco apreciável. Por outro lado, as acelerações da superestrutura são reduzidas com aumento de (T_b) apenas no sistema LRB.
- A resposta máxima das acelerações e deslocamentos de edifícios com sistemas de isolamento de base é insensível à variação da razão de amortecimento, (ξ_b).
- Pequenas variações do coeficiente de atrito (μ) produzem leves mudanças na resposta máxima de edifícios, no entanto, grandes variações de (μ), podem afetar significativamente a resposta máxima de estruturas com base deslizante (P-F, FPS, e R-FBI).

Assim, de acordo com as afirmações anteriores se conclui que os parâmetros que mais influem na resposta sísmica de edifícios com isolamento de base são o período da superestrutura (T_s), o período do isolador (T_b) e coeficiente de atrito (μ).

Os sistemas LRB e NZ têm melhor desempenho no controle das acelerações da superestrutura do que os sistemas de base deslizante P-F, FPS e R-FBI, em condições de excitações de alta frequência, porém apresentam deslocamentos da base maiores. Estes resultados coincidem com os encontrados por Su (1990) em modelos de *shear beam* não uniforme com isolamento de base.

De acordo aos espectros de resposta da superestrutura e da base verifica-se que o coeficiente de atrito, μ , é o parâmetro que tem mais influência na resposta máxima de edifícios com sistemas de base deslizante, P-F, FPS e R-FBI. Em geral os deslocamentos e acelerações da superestrutura são aumentados com o incremento do coeficiente μ , enquanto que os deslocamentos da base apresentam redução e as acelerações da base incremento.

A resposta sísmica de edifícios com sistemas isolamento de base é sensível frente a mudanças severas da frequência contida nos terremotos. O uso dos sistemas de base deslizante em regiões de alto potencial de gerar sismos com considerável energia em baixas frequências deve ser evitado. Nessas situações, o uso de sistemas como o LRB e o NZ é mais recomendável.

A principal desvantagem do sistema P-F quando comparado com os sistemas FPS, R-FBI, LRB e NZ é a ausência da força do isolador que permite reduzir ou evitar deslocamentos permanentes da base do edifício. Este sistema não está sendo utilizado atualmente porque necessita de outros dispositivos para prevenir deslocamentos permanentes do isolador.

Os sistemas de isolamento de base apresentam alto desempenho em edifícios de vários graus de liberdade, de acordo com o estudo numérico da seção 4.2 se conclui que edifícios com altos modos de vibração não afetam as performances dos BISS.

Embora os parâmetros de dimensionamento do isolador de NZ no exemplo do edifício em escala real não sejam os ótimos, se verifica um bom desempenho na redução dos deslocamentos e acelerações máximas absolutas da superestrutura nos terremotos de EL Centro e Kobe. Em caso do sismo de Loma Prieta a redução se limita a alguns intervalos do período natural do edifício.

Os espectros de resposta apresentados em esta dissertação são baseados em simulações numéricas, portanto ensaios experimentais de edifícios com vários sistemas de isolamento de base seriam necessários para confirmar estes resultados.

6.2 SUGESTÕES

Embora países como Japão, Estados Unidos, Itália e Nova Zelândia apresentam códigos de dimensionamento de edifícios com sistemas de isolamento de base, ainda são consideradas muitas simplificações que podem resultar em uma utilização inadequada dos BISS. Portanto são sugeridos a seguir alguns temas que poderiam ser estudados para aprimorar o estado da arte de estruturas com isolamento de base:

1. Avaliar edifícios 3D equipados com sistemas de isolamento de base submetidos a excitações sísmicas simultâneas levando em consideração efeitos de torção.
2. Fazer uma análise dinâmica de edifícios com BISS levando em consideração os efeitos da interação solo-estrutura.
3. Examinar os limites das relações comprimento-largura de edifícios em escala real onde os sistemas de isolamento funcionam adequadamente.
4. Realizar um estudo de otimização dos parâmetros dos sistemas de isolamento de base onde o critério seja minimizar simultaneamente os deslocamentos máximos da superestrutura e os deslocamentos da base.
5. Avaliar a efetividade de outros sistemas de isolamento de base como: o isolador “electricite de france” (EDF), o isolador deslizante elástico com atrito (SR-F) e os amortecedores de aço na forma de U ou de espiral.
6. Estudar a resposta dinâmica de edifícios com isolamento de base, submetidos à ação do vento e obter um dimensionamento ótimo do isolador.
7. Analisar o comportamento da resposta sísmica de edifícios 3D levando em consideração efeitos P- δ nos sistemas compostos de neoprene como são os sistemas de isolamento LRB e NZ.
8. Realizar um estudo do desempenho dos isoladores em outros tipos de estruturas como pontes, usinas nucleares, reservatórios de água e torres de transmissão de energia elétrica.
9. Analisar a ação combinada de isoladores do tipo LRB e amortecedores viscoelásticos em edifícios submetidos a excitações sísmicas.
10. Analisar o desempenho do controle das vibrações em edifícios 3D equipados com sistemas semiativos de isolamento de base.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAR, E. Comparison of design specifications for seismically isolated buildings, *Thesis report, Middle east technical university, Turkey, 2006.*

ALVARIÑO, L.A. Isoladores de base para estabilização dinâmica de reservatórios elevados sob ação sísmica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

AMARANTE, J.C. Instabilidade estrutural de reservatório d'água elevado sob ação sísmica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

BAJER, C. Time integrations methods – still questions. *Institute technological research, Polish academy of sciences, Warsaw, Poland, 2003.*

BARBAT A.H.; MOLINARES N.; CODINA, R. Effectiveness of block iterative schemes in computing the seismic response of building with nonlinear base isolation. *Computer & structures*, 58(1). pp. 133-141, 1996.

BLANDÓN, N. A. Dissipação de energia em estruturas de edifícios sob ação sísmica. Dissertação de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil, 2003.

BLANDÓN, N.A.; BATTISTA, R. C. Desempenho de Dispositivos de isolamento sísmico de Base em estruturas aporticadas de Múltiplos Andares. *XXXI Jornadas Sud-americanas de Ingeniería Estructural*, Medoza, Aregentina, 2004.

BOZZO, L.M. Análisis de edificios con sistemas de aislamiento de base. *Revista internacional de ingeniería de estructuras*, 1(1), pp. 17-38, 1996.

CALIÒ, I.; MARLETTA, M.; VICIPROVA, F. Seismic response of multi-storey buildings base-isolated by friction devices with restoring properties. *Computer and structures*, EL SEVIER, pp. 2589-2599.

CARNEIRO, R. Contribuição ao estudo do isolamento de vibrações em estruturas submetidas a excitações sísmicas.” Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Brasil, 2001.

DATTA T.K.; JANGID, R.S. Seismic behavior of base-isolated buildings: a state-of-the-art review. Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, Vol 110, pp. 186-203, 1995.

FALSONE, G.; FERRO, G. Best performing parameters of linear and non-linear seismic base-isolator systems obtained by the power flow analysis. *Computer & Structures*, pp.2291-2305, 2006.

FELIPPA, C.A.; PARK, K.C. Synthesis tools for structural dynamics and partitioned Analysis of Coupled Systems. University of Colorado at Boulder, USA, 2004.

GLOVER, M.D. The analytical and numerical integrations of ODE's. *Lecture 13 section 3*. Woods hole ocean graphic institution. USA, 2000.

HAIRER, E.; WANNER, G. *Stiff and differential-algebraic problems*, Second Edition. Vol II pp.607 Springer Berlin, 1996.

JANGID, R.S. Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering structures*, EL SEVIER, pp. 349-359, 2004.

KAMKE, E. Differentialgleichungen Lösungsmethoden und Lösungen, *Chelsea publishing company*, New York, 1959.

KELLY, J.M. Aseismic isolation. The shock and vibration digest, pp. 17-24.1985.

KELLY, J.M.; LEITMANN, G; SOLDATOS A.G. Robust control of base-isolated structures under earthquake excitation, *Journal of optimization theory and applications*, pp.159-180, 1987.

KELLY, J.M.; NAEIM, F. Design of seismic isolated structures: from theory to practice, John Wiley & Sons, New York.United States of America, 1999.

LIN, B.C.; TADJBAKHSI, I.G.; PAPAGEORGIOU, A.S.; AHMADI, G. Performance of earthquake isolation systems. *Journal of engineering mechanics*, ASCE 116(2), pp. 446-447, 1990.

MALANGONE, P.; FERRAIOLI, M. A modal procedure for seismic analysis of non-linear base-isolated multistory structures. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* Vol 27, pp. 397-412, 1998.

MATHWORKS. Matlab. Natick (MA): The Math Works, Inc; 2004.

MATSAGAR, V.A.; JANGID, R.S. Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent. *Engrg. Struc.* ELSEVIER, pp. 1311-1323, 2003.

MOSTAGHEL, N.; KHODAVWEDIAN, M. Dynamics of resilient-friction base isolator (R-FBI), *Earthquake Eng. Struct. Dynam.* 15 (3), pp. 379–390, 1986.

NAGARAJAIAH, S.; REINHORN, A.M.; CONSTANTINOU M.C. Non-linear dynamic analysis of 3-D base-isolated structures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, pp. 2035-2055, 1991.

ORDOÑEZ, D.; FOTI, D.; BOZZO, L. Comparative study of the inelastic response of Base isolated buildings. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* Vol 32, pp. 151-164, 2003.

PARK, K.; JUNG, H.; LEE, I. A comparative study on aseismic performance of base isolation systems for multi-span continuous bridge, *Engrg. Struc.*, ELSEVIER, pp. 1001-1013, 2002.

SU L.; AHMADI, G. A comparative study of performance of various base isolation systems, part I: Shear beam structures. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* Vol 18, pp. 11-32, 1989.

SU, L.; AHMADI, G. A comparative study of performance of various base isolation systems, part II: Sensibility analysis. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* Vol 19, pp. 21-33, 1990.

SU, L.; AHMADI, G.; TADJBAKHSI, I.G. Performance of sliding resilient-friction base-isolation system. *J. Struct. Eng.*, ASCE 117 (1), pp. 165–181, 1991.

SU, L.; AHMADI, G.; TADJBAKHSI. Comparative study of base isolation systems. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 115, pp.1976–1992, 1989.

SUY, H.M.R. Nonlinear dynamics analyses of a structure with a friction-base seismic base isolation systems. *Master theses report*. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands, 2005.

SUYING, Z.; ZICHEN, D.; WENCHENG, L. A precise Runge-Kutta integration and its application for solving nonlinear dynamical systems. *Applied mathematics and computation*, EL SEVIER, pp. 496-502, 2007.

TAJIRIAN, F. F.; KELLY, J. M.; AND AIKEN, I. D. Seismic Isolation for Advanced Nuclear Power Stations. *Earthquake Spectra*, 6(1), pp. 371-401, 1990.

WEN, Y. Method for random vibration of hysteretic systems, *Journal of the engineering mechanics division*. ASCE 102, pp.249-263, 1976.

YOUNIS, C.J.; TADJBAKHSI, I.G. Response of sliding rigid structure to base isolation. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 110, pp.417-432, 1984.

APÊNDICES

APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO DINÂMICO EM SIMULINK® EM AMBIENTE MATLAB®

A.1 INTRODUÇÃO AO SIMULINK

SIMULINK é um programa utilizado para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. O programa pode ser aplicado a sistemas lineares e não lineares, contínuos e/ou discretos no tempo.

O programa utiliza uma interface gráfica com o usuário para a construção dos modelos a partir de diagramas em blocos, através de operações de clique-e-arraste do mouse. Com esta interface podem ser criados modelos da mesma forma que se faz com papel e caneta. O SIMULINK é o resultado de uma longa evolução de pacotes de simulação anteriores que necessitavam a formulação de equações diferenciais ou de equações de diferenças finitas em linguagens de programação. O programa inclui bibliotecas de blocos contendo fontes, visualizadores, componentes lineares, não lineares e conectores, com a opção de criação ou personalização de blocos.

Após a definição do modelo, a simulação pode ser feita com diferentes algoritmos de resolução, escolhidos a partir dos menus do SIMULINK ou da linha de comando do MATLAB. Os menus são particularmente convenientes para o trabalho interativo, enquanto a linha de comando tem sua utilidade na simulação repetitiva na qual se deseja somente mudar parâmetros. Usando osciloscópios - *Scopes* ou outros visualizadores, têm-se o resultado gráfico da simulação enquanto esta está sendo executada. Os resultados da simulação podem ser exportados para o MATLAB para futuro processamento ou visualização.

As ferramentas de análise de modelos incluem ferramentas de linearização e ajuste *Trimming* que podem ser acessadas a partir da linha de comando do MATLAB, assim como várias ferramentas do MATLAB e suas TOOLBOXES específicas. Sendo o MATLAB e o SIMULINK integrados, pode-se simular, analisar e revisar os modelos em qualquer dos dois ambientes.

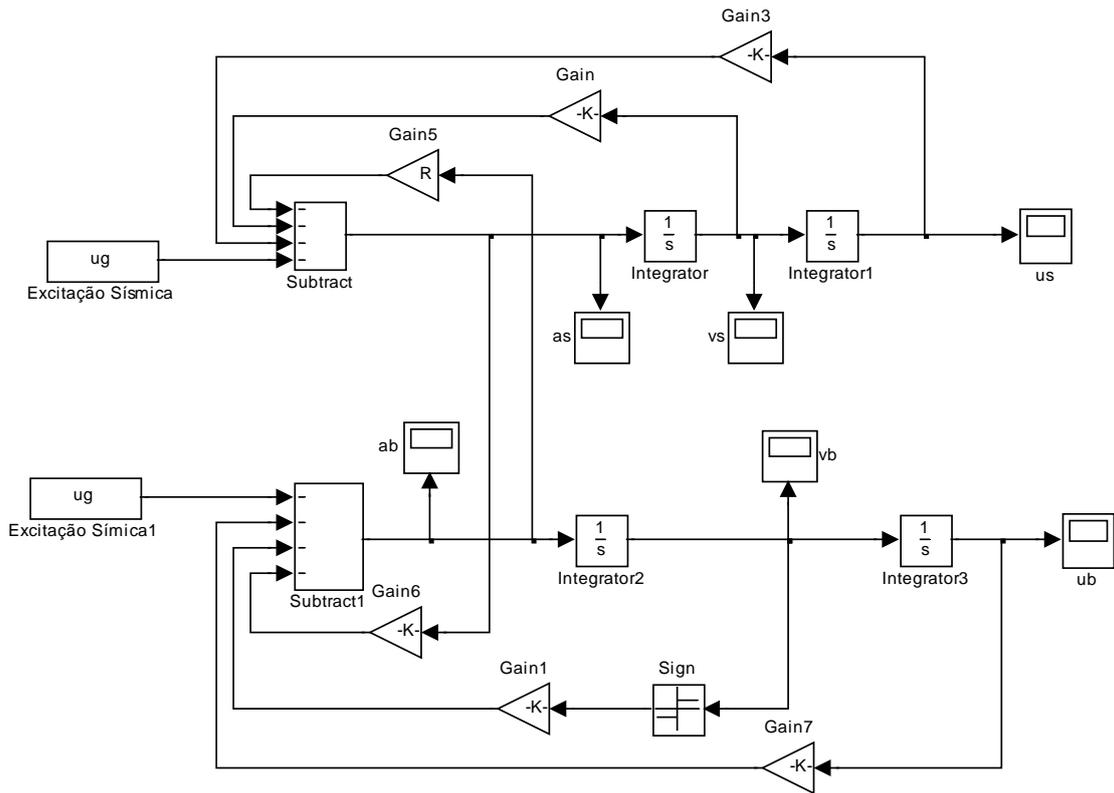


Figura A2 – Modelo dinâmico do edifício com isolador FPS.

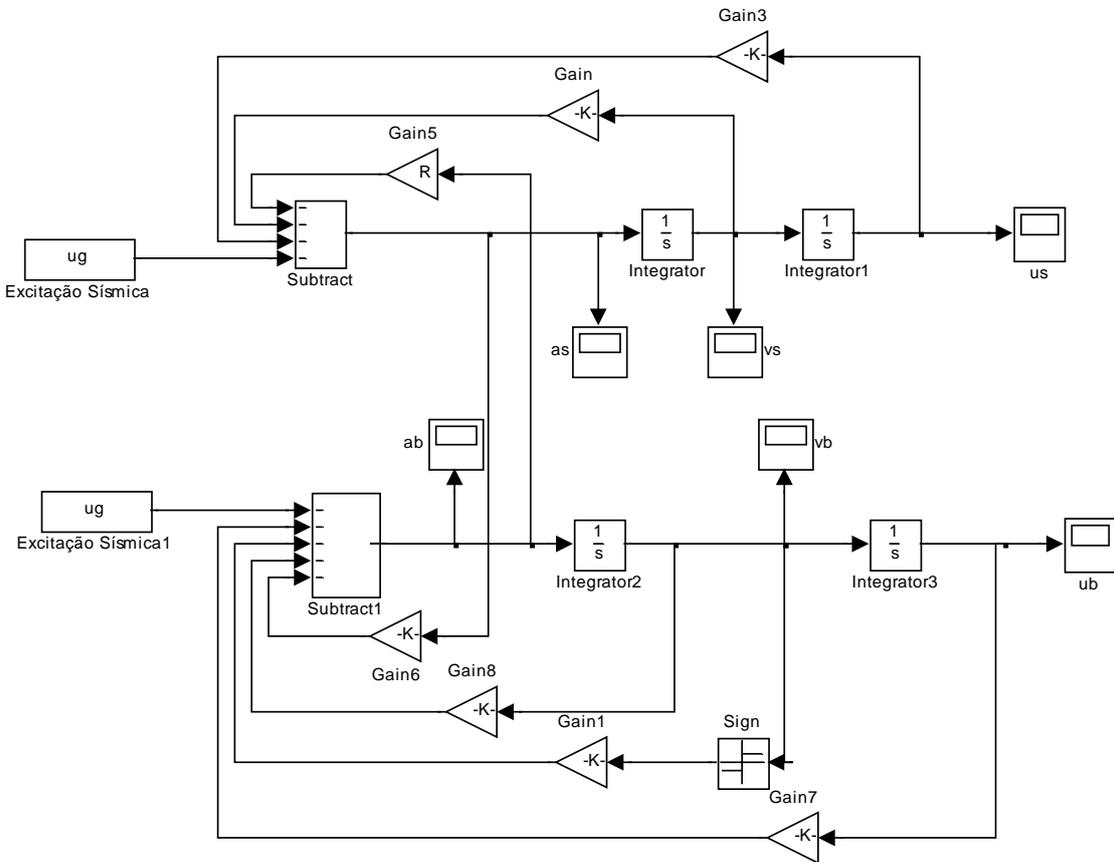


Figura A3 – Modelo dinâmico do edifício com isolador R-FBI.

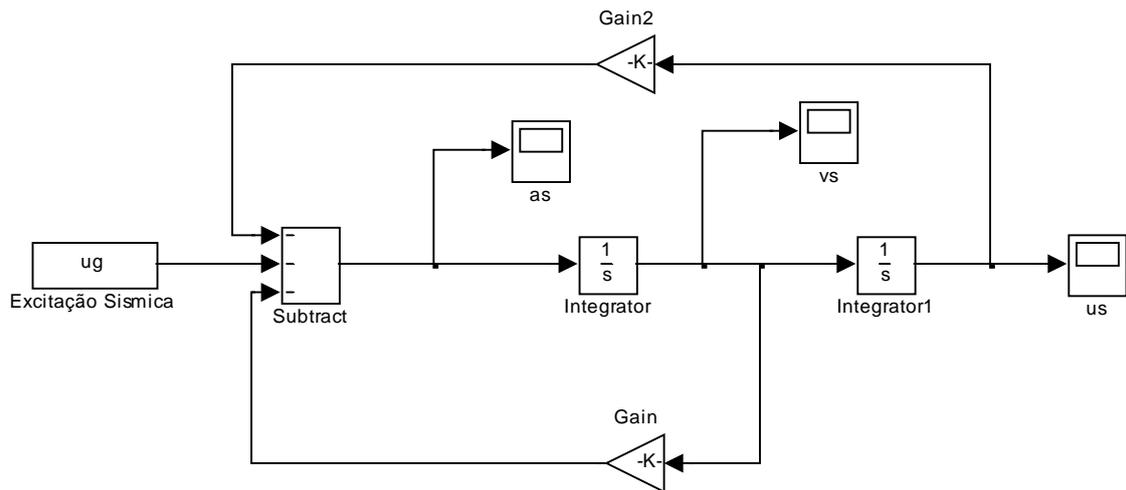


Figura A6 – Modelo dinâmico do edifício de base fixa (BF).

No caso do edifício de cinco graus de liberdade, os diagramas de blocos são construídos de modo que a análise seja realizada matricialmente, adicionalmente é considerado que a excitação sísmica atua em cada pavimento do edifício, portanto neste caso, tanto o sinal de entrada quanto o de saída são definidos vetorialmente.