U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CONTROLO DA CAPACIDADE DE RECENTRAMENTO POR INCLINAÇÃO DE UM APARELHO DE APOIO PENDULAR

TIAGO MIGUEL NOVAIS DE MAGALHÃES

Dissertação submetida para satisfação dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientadora: Professora Doutora Elsa de Sá Caetano

Coorientador: Engenheiro Miguel Pedro Garcia Machado Guimarães

JUNHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌍 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil – 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meu avô, que me ensinou desde cedo que,
a foca é um animal mamífero que respira pelas guelras como o cavalo
e à minha avó,
que preferia que fosse jogador da bola,
não tivesse eu nascido com dois pés esquerdos.

Pressure is a Privilege
Billie Jean King

AGRADECIMENTOS

Aproximando-se o final do quarto ano de Engenharia Civil, pesava a decisão sobre o tema da tese, se esta seria académica, se em ambiente empresarial, se em Portugal, se no Estrangeiro. Parece que em casa fiquei. Foi graças mais de uma dezena de conversas com a Professora Elsa de Sá Caetano, que, do verão de 2023 a fevereiro de 2024, permitiram tomar a decisão de realizar a dissertação na Faculdade de Engenharia.

Os meus agradecimentos vão para a Professora Elsa de Sá Caetano, que desde cedo se mostrou disponível para me ajudar a definir o tema da tese, ajudando a alinhar o tema com as minhas expectativas, bem como com o meu desejo de realizar um trabalho aliado à investigação. Em segundo lugar, pela disponibilidade e total prontidão que apresentou no decorrer deste trabalho. E por fim, pela motivação que transmitiu em todo o processo. Quer na orientação do trabalho, quer a título pessoal, onde o seu contributo muitas vezes me deixou mais confiante no trabalho que estava a desenvolver e nos objetivos que ambiciono para o futuro. Um bem haja a si Professora. Foi essencial para a minha formação. Como engenheiro. E como pessoa.

Ao Engenheiro Miguel Guimarães. Tive o privilégio de ter o acompanhamento de um engenheiro soberbo, enquanto profissional, e de homem cuja cultura e valores que me transmitiu levo para a vida. Consigo aprendi e aprendo todos os dias. Um bem haja a si Engenheiro Miguel.

A todo o pessoal da Struconcept, que proporcionaram sempre o melhor ambiente, fazendo deste lugar uma segunda casa. Um especial agradecimento ao Eng. Alberto Teixeira, por ter resgatado este rapaz no verão e lhe ter mostrado o mundo que é a Engenharia Civil.

Ao Professor Xavier Romão, cuja ajuda na modelação da estrutura no SAP2000 foi valiosa. Mesmo não estando diretamente ligado a esta tese, mostrou-se sempre disponível para me auxiliar. Um bem haja a si Professor, que tem a porta do gabinete sempre aberta e isso demonstrou-se mais do que uma vez no decorrer deste trabalho.

Ao Professor Luís Guerreiro, por toda a disponibilidade e ajuda que demonstrou no decorrer deste trabalho. Foi graças ao seu contributo que consegui melhor entender o mundo que é o isolamento de base, salientando o seu potencial, e a sua aplicabilidade, quer para este trabalho, quer em qualquer outro projeto. Estou certo de que as interações que tive consigo tornaram-me um profissional melhor e mais completo. Um bem haja a si também.

À minha caríssima amiga Chica de Cascais, que fez o favor de realizar um desvio protocolar nas suas férias para tirar algumas fotografias do viaduto. Sem ela, a memória fotográfica deste trabalho não seria possível, pelo que estou eternamente grato.

Um agradecimento especial à Dra. Helena Lopes do Gabinete de Orientação e Integração da Faculdade de Engenharia por me ter aguentado as neuras nos últimos tempos. Esta tese é essencialmente fruto do acompanhamento prestado por si. Foi consigo que consegui perceber melhor como responder aos eventos do dia a dia, em alguns momentos de forma mais delicada. Mas é graças ao seu trabalho que eu e muitos superamos as dificuldades que nós próprios impomos. O trabalho foi meu, mas a guia foi você. Um bem haja a si.

Por fim, um bem haja à minha família, que durante cinco anos tiveram de ouvir com um filho a dizer o que o curso era e o que não era. Parece que, afinal, não era nenhum dos dois...

RESUMO

Os Aparelhos de Apoio Pendulares têm sido largamente utilizados com o objetivo do isolamento de base sísmico. Ao permitirem uma resposta pendular, conseguem conter os movimentos horizontais por via da elevação vertical da carga suportada, desenvolvendo forças de restituição, também designadas como capacidade de recentramento, que permitem que o aparelho de apoio volte à posição de equilíbrio após uma determinada ação imposta. Esta possibilidade é relevante para equipas de projeto, promovendo que as deformações estruturais são tidas em conta por estes aparelhos, reduzindo as forças de corte da estrutura isolada.

Os Aparelhos de Apoio Pendulares tendem a desenvolver deslocamentos residuais incrementais com a utilização, criando a necessidade de controlar o recentramento do aparelho de apoio, potenciando um desempenho específico em projeto. Porventura, os deslocamentos residuais incrementais podem ser controlados através de outras metodologias de isolamento de base, sob pena de maior custo de projeto, dando aso ao desenvolvimento de outros metodologias que consigam resolver este problema só com o dimensionamento do aparelho de apoio.

É objetivo deste estudo demonstrar um caso em que o controlo dos deslocamentos residuais incrementais pôde ser efetuado por inclinação da base do aparelho de apoio, de modo a cumprir objetivos de projeto. Como tal, uma abordagem baseada no desempenho foi desenvolvida e calibrada recorrendo a uma análise temporal, sendo posteriormente aplicada a uma ponte ferroviária, onde, em âmbito do projeto, era necessário cumprir critérios de desempenho para a ação sísmica e para a força de frenagem.

Os resultados mostram que inclinações de 1% ou menos são suficientes para promover um recentramento adequado em situação de serviço, demonstrando que a inclinação de um aparelho de apoio pendular e a utilização de uma abordagem baseada no desempenho permite garantir critérios específicos de desempenho em âmbito de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: isolamento sísmico, abordagem baseada no desempenho, análise temporal, aparelhos de apoio pendulares, recentramento

ABSTRACT

Friction Pendulum Systems (FPS) have been widely deployed in the context of seismic base isolation. By counteracting any horizontal movement into vertical weight uplift through a pendulum-type response, these seismic isolators develop restoring forces, commonly referred to as self-centering capability, which allows the device to passively reposition itself to its center of equilibrium after an imposed action. This is of high interest for structural engineers as structural deformations can be taken into account by these devices, lowering reactions on structural supports.

Nevertheless, FPS tend to develop accrual displacements overtime, and, in certain design conditions, re-centering must be controlled in order to meet project specific requirements. These can be controlled through the implementation of other isolation methodologies at the expense of a higher project cost, leading the way for the development of other solutions that solve this issue within the device itself.

With this study, it is aimed to show that accrual displacements can be controlled in specific design scenarios to achieve specific design criteria through the horizontal inclination of the support where FPS are installed. To prove this, a performance-based approach is envisioned through a kinematic model that is developed and calibrated through Time-History analysis for application in the context of a cargo railway bridge where performance-based criteria needs to be met for seismic actions and railway braking force.

Results show that inclinations of 1% or smaller are sufficient to ensure that project specific criteria are met. With this work, it is proven that base inclination can be a performance-based approach ensuring specific project requirements are met.

KEYWORDS: seismic isolation, performance-based, time-history analysis, Friction Pendulum Systems, re-centring

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V
ÍNDICE DE FIGURAS XI
ÍNDICE DE QUADROS XVI
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS XVIII

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. MOTIVAÇÃO 1
1.2. ENQUADRAMENTO 1
1.3. OBJETIVOS 2
1.3.1. OBJETIVOS GERAIS 2
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2
1.4. ESTRUTURA 3

2. ESTADO DA ARTE 5
2.1. INTRODUÇÃO 5
2.2. O ISOLAMENTO DE BASE COMO ESTRATÉGIA DE CONCEÇÃO ESTRUTURAL EM PONTES 5
2.2.1. CONCEÇÃO ESTRUTURAL SÍSMICA CLÁSSICA 5
2.2.2. O ISOLAMENTO DE BASE 9
2.3. SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE 13
2.3.1. ENQUADRAMENTO NACIONAL 13
2.3.2. APARELHOS DE APOIO PENDULARES COM UMA SUPERFÍCIE DE DESLIZE 14
2.3.3. APARELHOS DE APOIO PENDULARES COM MÚLTIPLAS SUPERFÍCIES DE DESLIZE 16
2.4. ADAPTIVE FRICTIONAL PENDULUM SYSTEM | MAURER SIP®–ADAPTIVE 18
2.4.1. CARACTERÍSTICAS DO SIP®–ADAPTIVE 19
2.4.1.1. Dimensionamento e Otimização dos Coeficientes de Atrito 19
2.4.1.2. Dimensionamento da capacidade de deslocamento 21
2.4.1.3. Efeito do Aparelho de Apoio no Período de Vibração 21
2.4.1.4. Validação dos parâmetros de dimensionamento 22
2.4.2. INCLINAÇÃO DA BASE DE UM SIP®–ADAPTIVE 22
2.5. EVOLUÇÃO DA CONDIÇÃO DE RECENTRAMENTO NOS EUROCÓDIGOS ESTRUTURAIS 24

3. ANÁLISE E MODELAÇÃO LINEAR DO SIP®–ADAPTIVE 29

3.1. INTRODUÇÃO....29

3.2. GEOMETRIA DE UM SIP®–ADAPTIVE 29

3.3. HISTERESE PARA UMA SUPERFÍCIE DE DESLIZE 30

3.3.1. MECÂNICA DE DESLIZE NUM FPS 30

3.3.2. DETERMINAÇÃO RIGOROSA DO RAIO EFETIVO DE UM FPS 34

3.3.3. EFEITO DO CONTACTO COM O BATENTE 37

3.3.4. EFEITO DA ROTAÇÃO DA BASE NUM FPS....39

3.4. FORMULAÇÃO DA HISTERESE PARA O SIP®–ADAPTIVE 44

3.4.1. INTRODUÇÃO: REGIMES DE DESLIZE E A SUA SEQUÊNCIA 44

3.4.2. REGIMES DE DESLIZE DE UM DFPS ADAPTATIVO 45

3.4.2.1. Regime de Deslize I 45

3.4.2.2. Regime de Deslize II 47

3.4.2.3. Regime de Deslize III 50

3.5. HISTERESE DO SIP®–ADAPTIVE COM INCLINAÇÃO DA BASE....56

3.5.1. DESVIO VERTICAL NO CICLO DE HISTERESE 56

3.5.2. DESVIO NA POSIÇÃO DA ARTICULAÇÃO ROTULADA 59

3.5.3. ALTERAÇÃO DA FORÇA DE CONTACTO NO BATENTE 60

4. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO SIP®–ADAPTIVE 65

4.1. INTRODUÇÃO....65

4.2. IMPLEMENTAÇÃO ANALÍTICA EM MATLAB 65

4.2.1. APLICABILIDADE DE MODELOS EM SÉRIE PARA DFPS....65

4.2.2. CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE DINÂMICA 68

4.2.3. FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MOVIMENTO....68

4.2.4. INCORPORAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA BASE 76

4.3. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA EM SAP2000 78

4.3.1. APLICABILIDADE DE MODELOS EM SÉRIE PARA TFPS 78

4.3.2. LINK/SUPPORT ELEMENT – TRIPLE PENDULUM ISOLATOR....79

5. O VIADUTO FERROVIÁRIO DE SINES E A SUA REABILITAÇÃO 87

5.1. INTRODUÇÃO....87

5.2. CONCEÇÃO ESTRUTURAL DO VIADUTO FERROVIÁRIO DE SINES 87

5.3. NECESSIDADES DE INTERVENÇÃO EM CENÁRIO DE SERVIÇO 90

5.3.1. O EFEITO DA FRENAGEM SOBRE O ENCONTRO DIREITO 90
5.3.2. PROPOSTA DE REABILITAÇÃO 91
5.3.2.1. Seleção do Raio Efetivo de Curvatura e Coeficientes de Atrito 92
5.3.2.2. Definição da Inclinação da Base do Aparelho de Apoio 96

6. ANÁLISE DO DESEMPENHO DO APARELHO DE APOIO SOB AÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS 99
6.1. INTRODUÇÃO 99
6.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO ESTÁTICA 99
6.2.1. OBJETIVOS A ATINGIR COM A INCLINAÇÃO DO APARELHO DE APOIO 99
6.2.2. MELHORIA DA CONDIÇÃO DE RECENTRAMENTO 101
6.3. DESEMPENHO SOB ANÁLISE DINÂMICA 102
6.3.1. DESEMPENHO EM SISMOS INTENSOS E PROLONGADOS – 1940 EL CENTRO 102
6.3.2. DESEMPENHO PARA SISMOS TIPO-IMPULSO – 1999 GEBZE 108
6.3.3. DESEMPENHO PARA SISMOS MODERADOS E CONTÍNUOS – 1985 CIDADE DO MÉXICO 113

7. CONCLUSÕES 119
7.1. REFLEXÕES FINAIS 119
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Colapso do tabuleiro de uma ponte com o sismo de San Fernando, 1971 6

Figura 2 – Rotura de um pilar por excesso de corte na base com o Sismo de San Fernando, 1971 7

Figura 3 – Colapso do viaduto de Hanshin com o sismo de Kobe, 1995 8

Figura 4 – Estrutura conceptual com isolamento de base, adaptado de Guerreiro (1996) 9

Figura 5 – Sistema de isolamento patenteado por Touaillon em 1870, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 10

Figura 6 – Comparação do efeito sísmico numa ponte concebida de forma tradicional vs. numa ponte com isolamento de base, adaptado de Mohammed et al. (2022) 11

Figura 7 – Efeito do isolamento de base na aceleração espetral 11

Figura 8 – Influência do isolamento de base nos modos de vibração, adaptado de Guerreiro (2007) 12

Figura 9 – Secção de um FPS, adaptado de Zayas et al. (1990) 15

Figura 10 – Composição da Histerese de um FPS convencional, Figura do Autor 16

Figura 11 | (a) – Secção de um DFPS; (b) – Histerese de um DFPS, adaptado de Calvi e Calvi (2018) 17

Figura 12 | (a) – Secção de um TFPS; (b) – Histerese de um TFPS, adaptado de Calvi e Calvi (2018) 17

Figura 13 – Secção esquemática do SIP®–Adaptive, adaptado de (Weber et al., 2023) 19

Figura 14 – Espetro de resposta elástico do tipo 1, classe C, incluindo a trajetória de todas as opções possíveis de coeficientes de atrito e capacidades de deslocamento para o dimensionamento de um DFPS otimizado, retirado de Weber, Meier, et al. (2018) 20

Figura 15 – Esquema de um pilar flexível na rotação da base de um TFPS, retirado de Becker (2011) 23

Figura 16 – Modelo Bilinear Equivalente de um Sistema de Isolamento de Base para avaliação da capacidade de restituição, retirado de CEN (2005b) 24

Figura 17 – Modelo Bilinear Equivalente de um Sistema de Isolamento de Base para a Avaliação da Capacidade de Restituição, retirado de CEN (2011, 2022, 2027) 26

Figura 18 – Secção pormenorizada de um SIP®–Adaptive, adaptado de MAURER (2019) 30

Figura 19 – Diagrama de Corpo Livre da Articulação de um FPS na configuração deformada, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 31

Figura 20 – Comportamento histerético de um FPS tradicional, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 33

Figura 21 – Ilustração do movimento pendular da estrutura suportada, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 34

Figura 22 – Geometria deslocada do isolador com centro da articulação dentro da fronteira delineada pela superfície esférica, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 35

Figura 23 – Ciclo de histerese de um FPS quando a articulação atingiu um batente com comportamento rígido-elástico, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 38

Figura 24 – Ciclo de histerese de um FPS quando a articulação atingiu um batente com comportamento rígido-elástico elevado, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 39

Figura 25 – Diagrama de corpo livre de um FPS com a base inclinada de τ, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 41

Figura 26 – Desvio no ciclo Força-Deslocamento de um FPS causado pela inclinação da superfície de deslize, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 42

Figura 27 – Efeito de diferentes tipos de inclinações no comportamento histerético de FPS, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 43

Figura 28 – Configuração deformada de um DFPS no Regime de Deslize I, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 45

Figura 29 – Diagrama de corpo livre de um DFPS no Regime de Deslize I, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 46

Figura 30 – Ciclo de Histerese de um DFPS no Regime de Deslize I, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 47

Figura 31 – Configuração deformada de um DFPS no Regime de Deslize II, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 48

Figura 32 – Diagrama de corpo livre para um DFPS no Regime de Deslize II, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 48

Figura 33 – Comportamento Histerético de um DFPS no Regime de Deslize II, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 49

Figura 34 – Configuração deformada de um DFPS no Regime de Deslize III, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 51

Figura 35 – Diagrama de corpo livre de um DFPS no Regime de Deslize III, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 52

Figura 36 – Ciclo de Histerese de um DFPS no Regime III (a), adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 53

Figura 37 – Comportamento Histerético de um DFPS no Regime III (b), adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 54

Figura 38 – Ciclo de Histerese Total para o exemplo de um DFPS com uma inclinação da base de $\tau 1 = +0.01$ e $\tau 2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 58

Figura 39 – Ciclos de Histerese Isolados para o exemplo de um DFPS com uma inclinação da base de $\tau 1 = +0.01$ e $\tau 2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 58

Figura 40 – Ciclo de Histerese Total para o exemplo de um DFPS com uma inclinação da base de $\tau 1 = +0.02$ e $\tau 2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 59

Figura 41 – Ciclos de Histerese Isolados para um DFPS com uma inclinação da base de $\tau 1 = +0.02$ e $\tau 2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 60

Figura 42 – Ciclo de Histerese Total para um DFPS com uma inclinação da base de $\tau 1 = +0.01$ e $\tau 2 = 0$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 61

Figura 43 – Ciclos de Histerese Isolados para um DFPS com uma inclinação da base de $\tau 1 = +0.01$ e $\tau 2 = 0$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 62

Figura 44 – Modelo analítico de um DFPS com dois elementos FPS associados em série, retirado de Constantinou e Fenz (2008) 66

Figura 45 – Ciclo de Histerese Total de um DFPS modelado como uma associação em série de dois elementos FPS, adaptado de Fenz e Constantinou (2008b) 67

Figura 46 – Ciclos de Histerese Isolados de um DFPS modelado como uma associação em série de dois elementos FPS, adaptado de Constantinou e Fenz (2008) 67

Figura 47 – Esquema de um SDOF isolado com um SIP®–Adaptive, retirado de Fenz e Constantinou (2008a) 69

Figura 48 – Diagramas de corpo livre das massas $m1$, $m2$ e $m3$ utilizadas para definir as equações do movimento do SDOF isolado com um SIP®–Adaptive, retirado de Fenz e Constantinou (2008a) 70

Figura 49 – Acelerograma do sismo de 1940 de ElCentro 74

Figura 50 – SDOF isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB 75

Figura 51 – Comportamento Adaptativo de um SDOF isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB 75

Figura 52 – Histerese Real de um SDOF Isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB 77

Figura 53 – Histerese de um SDOF Isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB 77

Figura 54 – Modelo Analítico de um TFPS com três elementos FPS associados em série, retirado de Fenz e Constantinou (2008b) 78

Figura 55 – Modelo numérico da associação em série de três FPS, com dois elementos de folga, conectados por via de elementos rígidos, adaptado de Fenz e Constantinou (2008b) 79

Figura 56 – Definição dos parâmetros de massa, peso e propriedades direcionais do SIP®–Adaptive, retirado de CSI (2024) 80

Figura 57 – Rigidez e Amortecimento Axial do SIP®–Adaptive, modelado em SAP2000, retirado de CSI (2024) 81

Figura 58 – Definição dos parâmetros de rigidez horizontal de um SIP®–Adaptive para análise linear e não linear em SAP2000, retirado de CSI (2024) 82

Figura 59 – Secção de um SIP®–Adaptive, retirado de uma proposta comercial do aparelho de apoio 83

Figura 60 – Ciclo de Histerese de um SIP®–Adaptive recorrendo a uma análise não linear em SAP2000 84

Figura 61 – Ciclo de Histerese de um SIP®–Adaptive recorrendo a uma análise linear em SAP2000 85

Figura 62 – Viaduto Ferroviário de Sines 88

Figura 63 – Alçado e Planta do Traçado Original do Viaduto Ferroviário de Sines, Encontro Esquerdo e Pilares P1 a P8, adaptado do projeto original..... 88

Figura 64 – Alçado e Planta do Traçado Original do Viaduto Ferroviário de Sines, Pilares P9 a P15 e Encontro Direito, adaptado do projeto original..... 89

Figura 65 – Encontro Direito e Pilar P15 89

Figura 66 – Geometria atual do Pilar e ligação do mesmo ao tabuleiro 92

Figura 67 – Conceptualização do Modelo Numérico utilizado para caracterizar a estrutura existente 93

Figura 68 – Modelo Numérico Bidimensional do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000..... 93

Figura 69 – Modelo Numérico Bidimensional Extrudido do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000 93

Figura 70 – Secção do Pilar P15 no Modelo Numérico Bidimensional do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000..... 94

Figura 71 – Secção Extrudida do Pilar P15 no Modelo Numérico Bidimensional do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000..... 94

Figura 72 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive aplicado no Viaduto Ferroviário de Sines 100

Figura 73 – Acelerograma do sismo de 1940 em El Centro 102

Figura 74 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1940 em El Centro 103

Figura 75 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive nos Regimes de Deslize I e II quando submetidos ao sismo de 1940 em El Centro..... 103

Figura 76 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Inferior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1940 em El Centro..... 104

Figura 77 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Superior do SIP®–Adaptive, quando submetida ao sismo de 1940 em El Centro..... 104

Figura 78 – Comparação da Força Horizontal exibida pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1940 em El Centro..... 105

Figura 79 – Variação dos Deslocamentos do SIP®–Adaptive e das suas Superfícies de Deslize em função do tempo, para o sismo de 1940 El Centro..... 106

Figura 80 – Comparação do Deslocamento desenvolvido pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1940 em El Centro 107

Figura 81 – Acelerograma do sismo de 1999 em Gebze 108

Figura 82 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze 109

Figura 83 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive nos Regimes de Deslize I e II quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze 109

Figura 84 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Inferior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze 110

Figura 85 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Superior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze 110

Figura 86 – Variação dos Deslocamentos do SIP®–Adaptive e das suas Superfícies de Deslize em função do tempo, para o sismo de 1999 em Gebze 111

Figura 87 – Comparação do Deslocamento desenvolvido pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1999 em Gebze..... 112

Figura 88 – Comparação da Força Horizontal exibida pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1999 em Gebze..... 112

Figura 89 – Acelerograma do sismo de 1985 na Cidade do México 113

Figura 90 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1985 na Cidade do México 114

Figura 91 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive nos Regimes de Deslize I e II quando submetidos ao sismo de 1985 na Cidade do México..... 115

Figura 92 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Inferior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1985 na Cidade do México..... 115

Figura 93 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Superior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1985 na Cidade do México..... 116

Figura 94 – Variação dos Deslocamentos do SIP®–Adaptive e das suas Superfícies de Deslize em função do tempo, para o sismo de 1985 na Cidade do México..... 117

Figura 95 – Comparação do Deslocamento desenvolvido pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1985 na Cidade do México 117

Figura 96 – Comparação da Força Horizontal exibida pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, para o sismo de 1985 na Cidade do México..... 118

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo do comportamento do SIP®–Adaptive 55

Quadro 2 – Esforços verticais por Pilar para o Estado Limite de Serviço na combinação Quase Permanente 95

Quadro 3 – Média dos Esforços por Aparelho de Apoio para o Estado Limite de Serviço, combinação Quase Permanente 95

Quadro 4 – Repartição da Ação da Frenagem por Aparelho de apoio, valores nominais e normalizados 98

Quadro 5 – Características dos registos sísmicos utilizados para analisar o SIP®–Adaptive 102

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

1. Símbolos

a – parâmetro numérico para o cálculo do coeficiente de atrito dinâmico [adimensional]

α – amplitude de deslocamento numa superfície de deslize $[rad]$

A_i – variável adimensional para análise dinâmica de uma superfície i [adimensional]

A_1 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 1 [adimensional]

A_2 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 2 [adimensional]

β_i – variável adimensional para análise dinâmica de uma superfície i [adimensional]

β_1 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 1 [adimensional]

β_2 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 2 [adimensional]

c_{u1} – amortecimento axial de um aparelho de apoio pendular $[kN \cdot s/m]$

C_o – centro de rotação da superfície na configuração nivelada $[m]$

C_r – centro de rotação da superfície na configuração inclinada $[m]$

d_0 – deslocamento residual máximo do sistema de isolamento em equilíbrio estático $[m]$

d_1 – capacidade de deslocamento da superfície 1 $[m]$

d_2 – capacidade de deslocamento da superfície 2 $[m]$

$\bar{d}_1$ – capacidade de deslocamento da articulação no SAP2000 $[m]$

$\bar{d}_2$ – capacidade de deslocamento da superfície 1 no SAP2000 $[m]$

$\bar{d}_3$ – capacidade de deslocamento da superfície 2 no SAP2000 $[m]$

d_{art} – capacidade de deslocamento da articulação $[m]$

d_{bd} – deslocamento de cálculo do isolador $[m]$

d_{cd} – deslocamento de cálculo do sistema de isolamento $[m]$

δ_d – coeficiente numérico que delimita a condição de recentramento [adimensional]

Δ_{strand} – alongamento do cabo de pré-esforço $[m]$

d_i – capacidade de deslocamento de uma superfície i $[m]$

d_m – deslocamento máximo do sistema de isolamento $[m]$

$d_{a,max}$ – deslocamento máximo de projeto para um sistema de isolamento $[m]$

d_{max} – capacidade de deslocamento máxima do sistema de isolamento $[m]$

d_{rm} – deslocamento residual máximo $[m]$

d_{r1} – batente da superfície 1 [adimensional]

D – capacidade de deslocamento máxima arbitrária $[m]$

E – módulo de elasticidade do aço $[GPa]$

$E_{D,i}$ – energia dissipada pelo sistema de isolamento $[kN \cdot m]$

F – força horizontal desenvolvida pelo sistema de isolamento $[kN]$

F_{dr} – força horizontal do contacto com o batente $[kN]$

F_{dri} – força horizontal do contacto com o batente duma superfície i $[kN]$

F_{dr1} – força horizontal do contacto com o batente da superfície 1 $[kN]$

$F_{dr1,inclinado}$ – força horizontal do contacto no batente da superfície 1 na configuração inclinada $[kN]$

F_f – força de atrito $[kN]$

F_{fi} – força de atrito numa superfície i $[kN]$

F_{f1} – força de atrito numa superfície 1 $[kN]$

F_{f2} – força de atrito da superfície 2 $[kN]$

F_{Fre} – força introduzida pela frenagem $[kN]$

$F_{Fre,Pi}$ – força introduzida pela frenagem num pilar i $[kN]$

F_m – força máxima do sistema de isolamento para o respetivo deslocamento máximo $[kN]$

F_r – força de restituição no batente $[kN]$

F_{ri} – força de restituição no batente de uma superfície i $[kN]$

F_{r1} – força de restituição no batente da superfície 1 $[kN]$

$F_{r1,inclinado}$ – força de restituição no batente da superfície 1 na configuração inclinada $[kN]$

g – aceleração da gravidade $[m/s^2]$

γ_i – variável adimensional para análise dinâmica de uma superfície i [adimensional]

γ_1 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 1 [adimensional]

γ_2 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 2 [adimensional]

h – distância entre o ponto de contacto com a superfície e o centro da articulação $[m]$

h_1 – altura entre o centro da articulação rotulada e a superfície de deslize $[m]$

h_2 – altura entre o centro da articulação rotulada e a superfície de deslize $[m]$

H – função Heaviside [adimensional]

k_{u1} – rigidez axial de um aparelho de apoio pendular $[kN/m]$

k_{dr} – rigidez horizontal do batente $[kN/m]$

K_{eff-u2} – rigidez horizontal efetiva da superfície de deslize $[kN/m]$

m_i – massa de uma superfície i $[ton]$

m_1 – massa da superfície 1 $[ton]$

m_2 – massa da superfície 2 $[ton]$

μ – coeficiente de atrito [adimensional]

μ_1 – coeficiente de atrito da superfície 1 [adimensional]

μ_2 – coeficiente de atrito da superfície 2 [adimensional]

μ_i – coeficiente de atrito da superfície i [adimensional]

μ_{max} – coeficiente de atrito para deslize com velocidades rápidas [adimensional]

μ_{min} – coeficiente de atrito para deslize com velocidades lentas [adimensional]

μ_e – coeficiente de atrito efetivo [adimensional]

P $-$ Δ – momentos gerados por excentricidade da carga atuante $[kN \cdot m]$

ζ_{eff} – amortecimento horizontal efetivo da superfície de deslize $[kN \cdot s/m]$

ζ_s – coeficiente de amortecimento da estrutura [adimensional]

k_{dr} – rigidez horizontal do batente $[kN/m]$

k_{ri} – rigidez horizontal do batente de uma superfície i sob análise dinâmica $[kN/m]$

R – raio de curvatura de uma superfície esférica $[m]$

R_{art} – raio de curvatura da articulação interna $[m]$

R_1 – raio de curvatura da superfície 1 $[m]$

R_2 – raio de curvatura da superfície 2 $[m]$

R_{eff} – raio de curvatura efetivo de uma superfície esférica $[m]$

R_{eff1} – raio de curvatura efetivo da superfície 1 $[m]$

R_{eff2} – raio de curvatura efetivo da superfície 2 $[m]$

$\bar{R}_{eff1}$ – raio de curvatura efetivo da articulação no SAP2000 $[m]$

$\bar{R}_{eff2}$ – raio de curvatura efetivo da superfície 1 no SAP2000 $[m]$

$\bar{R}_{eff3}$ – raio de curvatura efetivo da superfície 2 no SAP2000 $[m]$

s – desvio vertical do ciclo de histerese total na configuração inclinada [adimensional]

S – força resultante da pressão normal ao contacto com a superfície $[kN]$

σ_{strand} – tensão instalada em cada cordão de pré-esforço $[MPa]$

θ – ângulo de rotação entre o centro da articulação e o CdR na configuração nivelada$[rad]$

θ_r – ângulo de rotação entre o centro da articulação e o CdR na configuração inclinada $[rad]$

θ_1 – ângulo de rotação entre o centro da articulação e o CdR da superfície 1 $[rad]$

θ_2 – ângulo de rotação entre o centro da articulação e o CdR da superfície 2 $[rad]$

τ – ângulo de inclinação da base de uma superfície $[rad]$

τ_1 – ângulo de inclinação da base da superfície 1 $[rad]$

τ_2 – ângulo de inclinação da base da superfície 2 $[rad]$

τW – incremento de força no ciclo de histerese de uma superfície com uma inclinação de τ $[kN]$

$\tau_i W$ – incremento de força no ciclo de histerese de uma superfície i com uma inclinação de τ_i $[kN]$

$\tau_1 W$ – incremento de força no ciclo de histerese da superfície 1 com uma inclinação de τ_1 $[kN]$

$\tau_2 W$ – incremento de força no ciclo de histerese da superfície 2 com uma inclinação de τ_2 $[kN]$

t_f – trações de atrito na rótula da articulação interna $[kN]$

T_{eff} – período efetivo $[s]$

T_{iso} – período de isolamento $[s]$

$T_{iso-Adaptive}$ – período de isolamento do SIP®–Adaptive $[m]$

u – deslocamento horizontal total do sistema de isolamento $[m]$

u_1 – deslocamento horizontal da superfície 1 $[m]$

u_2 – deslocamento horizontal da superfície 2 $[m]$

u_{dri} – deslocamento horizontal para o qual ocorre contacto com o batente da superfície de uma superfície i $[m]$

u_{dr1} – deslocamento horizontal para o qual ocorre contacto com o batente da superfície 1 $[m]$

$u_{dr1,nivelado}$ – deslocamento para o qual ocorre contacto com o batente da superfície 1 na configuração nivelada $[m]$

$u_{dr1,inclinado}$ – deslocamento para o qual ocorre contacto com o batente da superfície 1 na configuração inclinada $[m]$

u_i – deslocamento horizontal de uma superfície i $[m]$

u_{max} – deslocamento horizontal máximo do sistema de isolamento $[m]$

u_r – deslocamento residual quando aplicada uma rotação de τ $[m]$

u_{r1} – deslocamento residual quando aplicada uma rotação de τ_1 $[m]$

u_{r2} – deslocamento residual na superfície 2 quando aplicada uma rotação de τ_2 $[m]$

u_{yi} – deslocamento de cedência de uma superfície i $[m]$

u_{y1} – deslocamento de cedência da superfície 1 $[m]$

u_{y2} – deslocamento de cedência da superfície 2 $[m]$

$u'_{\tau i}$ – desvio da posição de equilíbrio de uma superfície i devido a uma inclinação de τ_i $[m]$

$u'_{\tau 1}$ – desvio da posição de equilíbrio da superfície 1 devido a uma inclinação de τ_1 $[m]$

$u'_{\tau 2}$ – desvio da posição de equilíbrio da superfície 2 devido a uma inclinação de τ_2 $[m]$

$\dot{u}_i$ – velocidade de deslize de uma superfície i $[m/s]$

$\dot{u}_1$ – velocidade de deslize na superfície 1 $[m/s]$

$\dot{u}_2$ – velocidade de deslize na superfície 2 $[m/s]$

$\dot{u}_3$ – velocidade da estrutura isolada $[m/s]$

$\ddot{u}_s$ – aceleração estrutural em relação ao solo $[m/s^2]$

$\ddot{u}_g$ – aceleração do solo $[m/s^2]$

$|\ddot{u}_s + \ddot{u}_g|$ – aceleração estrutural absoluta $[m/s^2]$

u^* – deslocamento para o qual ocorre deslize duplo $[m]$

v – deslocamento vertical do sistema de isolamento $[m]$

x – deslocamento cartesiano horizontal $[m]$

y – deslocamento cartesiano vertical $[m]$

w – força horizontal normalizada de um sistema de isolamento [adimensional]

W – carga vertical atuante $[kN]$

W_D – energia dissipada pelo sistema de isolamento $[kN \cdot m]$

W/R_{eff} – rigidez pós-elástica do deslize numa superfície curva $[kN/m]$

Z_i – variável histerética de uma superfície i[adimensional]

Z_1 – variável histerética da superfície 1 [adimensional]

Z_2 – variável histerética da superfície 2 [adimensional]

η_i – variável adimensional para análise dinâmica de uma superfície i [adimensional]

η_1 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 1 [adimensional]

η_2 – variável adimensional para análise dinâmica da superfície 2 [adimensional]

$\{x\}$ – vetor de estado [adimensional]

$\{x_{inc}\}$ – vetor de estado na configuração inclinada [adimensional]

2. Acrónimos e Siglas

CdR – Centro de Rotação

DBE – *Design Basis Earthquake* (Sismo de Referência)

DFPS – *Double Friction Pendulum System* (Aparelho de Apoio Pendular com Duas Superfícies de Deslize)

FBD – *Force Based Design* (Método de Dimensionamento Sísmico baseado nas Forças Sísmicas)

FPS – *Friction Pendulum System* (Aparelho de Apoio Pendular com Uma Superfície de Deslize)

HDRB – *High Damping Rubber Bearing* (Aparelho de Apoio de Neoprene com Elevado Amortecimento)

MCE – *Maximum Credible Earthquake* (Máximo Sismo Credível)

PBD – *Performance Based Design* (Método de Dimensionamento baseado no Desempenho Estrutural)

SDOF – Sistema de Um Grau de Liberdade

SIP® – *Sliding Isolation Pendulum®*

TFPS – *Triple Friction Pendulum System* (Aparelho de Apoio Pendular com Três Superfícies de Deslize)

3. Abreviaturas

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CEN – *Comité Européen de Normalisation*

CQP – Combinação Quase Permanente

1
INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Com o término do ciclo de estudos em engenharia civil, a escolha do tema da dissertação foi, porventura, das tarefas que melhor reflete os cinco anos neste percurso. A título pessoal, o tema deveria refletir dois aspetos distintos que, pelo trabalho efetuado neste documento, deverão estar cada vez mais interligados na prática diária da Engenharia Civil.

Em primeiro lugar, o tema deveria constituir uma análise detalhada de determinado fenómeno ou evento, pois é em ambiente académico, por via da investigação, que se conseguem desenvolver novas abordagens e soluções para os problemas práticos do dia a dia. Todavia, o segundo aspeto vem da prática, do que se observa no terreno, onde aparecem necessidades concretas que motivam estudos de pormenor sobre determinado fenómeno ou área.

É desta dicotomia entre academia e prática que surge a motivação para a presente dissertação: encontrar um tema que reflita uma necessidade clara e concreta de projeto que, aliada à constante capacidade de inovação da academia, possa ser mais bem resolvida com a cooperação entre estas duas vertentes da Engenharia Civil.

Por esta mesma razão, é apresentado um caso de estudo relativo a uma necessidade de projeto cujo estudo da problemática inerente ao mesmo necessita de uma análise concreta e detalhada, por vezes omissa ou simplificada por via de soluções mais estandardizadas, em prol de honorários reduzidos e de um ritmo de trabalho que impossibilita esta cooperação.

A convergência destas duas vertentes neste trabalho não só permite mostrar que a cooperação entre o setor académico e o tecido empresarial é essencial, como também deve ser aumentada, para promover a criação de novas metodologias de investigação, análise e dimensionamento que doutro modo não seriam abordadas.

1.2. ENQUADRAMENTO

A reabilitação estrutural de um viaduto ferroviário implica que exista uma compreensão clara e detalhada do comportamento da estrutura para vários casos de carga. Merece destaque a ação da frenagem, que pode requerer que a forma como esta ação é suportada pelo viaduto tenha de ser ponderada. Isto é, o comportamento que o viaduto irá exibir para este caso de carga, após a reabilitação, pode diferir da resposta que esta exibia antes da intervenção.

Em concreto, a ação da frenagem pode induzir esforços nominais nos encontros próximos da sua capacidade. Havendo capacidade disponível noutros elementos estruturais, esta ação pode ser repartida entre eles de forma controlada por via da aplicação de sistemas de isolamento de base nos pilares.

O isolamento de base é uma abordagem de dimensionamento que permite a uma estrutura ser mais resiliente a ações horizontais, sendo necessário, no entanto, um controlo adequado dos seus deslocamentos.

A utilização de sistemas de isolamento de base com aparelhos de apoio pendulares permite controlar de forma mais eficiente a transferência de esforços horizontais, como a força da frenagem, para a subestrutura dos pilares. Porém, é necessário controlar a capacidade de recentramento destes aparelhos de apoio, isto é, a capacidade de o aparelho voltar à posição de equilíbrio após um deslocamento máximo provocado por uma ação horizontal.

Para potenciar esta capacidade, foi efetuado, para este trabalho, o estudo do efeito da inclinação da base num aparelho de apoio pendular. De forma resumida, a inclinação horizontal do aparelho de apoio permite mudar a posição de equilíbrio, conduzindo a uma capacidade de deslocamento ajustada, sem que isso conduza, necessariamente, a maiores forças de corte na estrutura.

Aplicando ao caso de estudo concreto deste trabalho, a inclinação horizontal destaca-se como uma metodologia de intervenção essencial no contexto da reabilitação de um viaduto ferroviário, ao permitir que a estrutura como um todo tenha uma resposta mais controlada para a ação da frenagem, sem que isso condicione a resistência última de outros elementos estruturais.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar o efeito da inclinação da base no comportamento histerético de um aparelho de apoio pendular, a fim de garantir que esta metodologia possa ser integrada de forma segura e controlada na reabilitação de um viaduto ferroviário de carga.

Com o trabalho desenvolvido, aplicado no contexto de uma reabilitação estrutural, procura-se salientar e reforçar a necessidade de haver uma maior cooperação entre a academia e o tecido empresarial na Engenharia Civil.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta dissertação são os seguintes:

- Compreender o conceito de isolamento de base, bem como as vantagens e desvantagens associadas a esta abordagem de conceção estrutural com estratégias de conceção tradicionais;
- Analisar as especificações regulamentares para o isolamento de base, com especial foco na condição de recentramento, tanto ao nível das análises que devem ser efetuadas, como também na evolução destas prescrições, procurando compreender se há recomendações na literatura que sugiram a evolução destas prescrições;
- Compreender o comportamento dos aparelhos de apoio pendulares, realizando uma exposição detalhada da relação força-deslocamento e do comportamento histerético destes dispositivos;

- Analisar o efeito da inclinação dos aparelhos de apoio pendulares, tanto ao nível da relação força-deslocamento como do comportamento histerético, visando uma compreensão total das implicações desta estratégia na reabilitação de um viaduto ferroviário de carga;
- Estudar metodologias de análise temporal e de implementação numérica de aparelhos de apoio pendulares, quer por via de uma rotina em MATLAB, quer por via do SAP2000, de modo a entender as adaptações numéricas que têm de ser efetuadas para calibrar estes dispositivos numericamente;
- Desenvolver uma metodologia de cálculo que contemple o efeito da inclinação, quer no MATLAB, quer no SAP2000;
- Analisar e avaliar o efeito da inclinação da base de apoios pendulares num viaduto ferroviário extenso de modo a garantir o recentramento em condições de serviço;
- Ponderar o ajuste da condição de recentramento presente na regulamentação atual de modo que esta seja mais adaptada a aparelhos de apoio com uma elevada capacidade de recentramento, tendo em vista, também, o comportamento em serviço.

1.4. ESTRUTURA

A presente dissertação divide-se em seis capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução
- Capítulo 2 – Estado da Arte
- Capítulo 3 – Análise e Modelação Linear do SIP®–Adaptive
- Capítulo 4 – Implementação Numérica do SIP®–Adaptive
- Capítulo 5 – O Viaduto Ferroviário de Sines e a sua Intervenção
- Capítulo 6 – Análise e Desempenho do Aparelho de apoio sob Ações Estáticas e Dinâmicas
- Capítulo 7 – Conclusões

No presente capítulo, é contextualizada a motivação para a investigação realizada neste trabalho, o enquadramento da sua aplicação, assim como os objetivos a atingir e a estrutura do documento proposto.

No segundo capítulo, é realizado um enquadramento aos efeitos potencialmente devastadores da ação sísmica em viadutos, razão pela qual metodologias de isolamento de base começaram a ser implementadas de forma regular neste tipo de estruturas. É realizada uma revisão da literatura sobre o isolamento de base e respetivos sistemas, convencionais e pendulares, bem como as vantagens e desvantagens da aplicação desta metodologia na engenharia de estruturas. Também, é conduzido um estudo sucinto sobre o aparelho de apoio utilizado neste trabalho, bem como é apresentada a origem do estudo do efeito da inclinação em sistemas de isolamento de base. Posteriormente, é dado um enquadramento quanto ao recentramento dos sistemas de isolamento de base, com especial enfoque na evolução da condição de recentramento com as sucessivas atualizações regulamentares, realçando que esta deve ser ponderada, estabelecendo-se critérios para as condições de serviço que poderão, porventura, ser distintos dos aplicáveis aos sismos. Por fim, é dada uma nota quanto ao enquadramento legal na utilização dos regulamentos, procurando entender a necessidade de seguir o regulamento ou não, tendo em vista temática.

No terceiro capítulo é realizada uma análise detalhada sobre o comportamento de isoladores pendulares friccionais de duas superfícies de deslize, quer numa configuração nivelada, quer numa configuração inclinada. Esta análise é essencial para compreender o comportamento dos aparelhos de apoio em ambos os cenários, podendo depois aplicar estas deduções para caracterizar o efeito desta estratégia no viaduto ferroviário.

No quarto capítulo, são feitas algumas considerações quanto à implementação numérica deste tipo de aparelhos de apoio para efeitos de análises temporais. Este capítulo descreve as metodologias necessárias para caracterizar o comportamento do aparelho de forma dinâmica em MATLAB para uma qualquer aceleração que varie no tempo. Também é efetuado um estudo sobre o comportamento deste aparelho de apoio no SAP2000, revelando as dificuldades na sua calibração, o que inviabilizou o uso deste programa para a análise do recentramento.

No capítulo quinto, é exposto o caso de estudo de forma genérica, procurando mostrar a sua tipologia e conceção estrutural. São definidas as condicionantes de projeto que motivaram este estudo, bem como a proposta de reabilitação para o mesmo.

No sexto capítulo é analisado e discutido o efeito da inclinação da base no viaduto ferroviário de Sines para três registos sísmicos diferentes. É realçado o comportamento histerético do aparelho de apoio, bem como uma comparação entre a melhoria no recentramento, quer em cenário sísmico, quer em cenário de frenagem, entre uma análise linear ou numérica.

No sexto e último capítulo são retiradas as ilações finais deste trabalho em relação aos objetivos propostos. São ainda sugeridos alguns desenvolvimentos futuros, fruto de dificuldades processuais durante a realização desta dissertação que, por limitações de ordem temporal, impossibilitaram o estudo desses problemas no decorrer deste processo.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os conceitos chave que permitem a conceção deste trabalho. Na Secção 2.2.1, é dado um enquadramento histórico à evolução da conceção estrutural sísmica, salientando o efeito devastador que alguns sismos tiveram nas estruturas, motivando uma evolução na metodologia de análise. Em 2.2.2 é introduzido o conceito de isolamento de base, salientando de que forma esta estratégia conduz a estruturas mais resilientes ao efeito dos sismos, bem como às vantagens e desvantagens que advém da sua aplicação.

Na Secção 2.3 são estudados alguns sistemas de isolamento de base, com especial foco nos sistemas friccionais, que permitem concretizar a estratégia de conceção abordada. É, também, feito um pequeno enquadramento em 2.3.1 sobre a aplicação de isolamento de base em Portugal.

Em 2.4 é aprofundado o estudo de um aparelho de apoio friccional adaptativo, salientando de que forma este se destaca de outros sistemas friccionais. Em 2.4.2 é abordada, de forma sucinta, o efeito da rotação acidental destes aparelhos de apoio, realçando de que modo é possível aproveitar o comportamento adaptativo do sistema em estudo para se cumprirem objetivos de desempenho específicos.

Por fim, na Secção 2.5 é estudada a evolução da condição de recentramento presente na regulamentação atual. Com a evolução das prescrições normativas, esta tem vindo a mudar de formulação nas últimas atualizações do regulamento europeu. Porém, estas mudanças são aparentes, e o cálculo do recentramento continua a seguir o mesmo princípio base que, como sugerido por alguns autores, não é conservativo para a análise de aparelhos de apoio friccionais.

2.2. O ISOLAMENTO DE BASE COMO ESTRATÉGIA DE CONCEÇÃO ESTRUTURAL EM PONTES

2.2.1. CONCEÇÃO ESTRUTURAL SÍSMICA CLÁSSICA

O dimensionamento de pontes é uma tarefa de elevado relevo e notoriedade que sempre ocupou um lugar especial no trabalho dos projetistas. As pontes são sistemas estruturais tipicamente puros e simples, cujo formato tende a ser uma representação direta, quase exata, da sua funcionalidade.

Por este motivo, elas têm um aspeto apelativo, mantendo-se eficientes do ponto de vista estrutural. Projetadas com o objetivo principal de resistir às cargas gravíticas, as pontes têm sido frequentemente destruídas ou danificadas pelas ações (Priestley et al., 1996).

Nos últimos cinquenta anos, as metodologias de dimensionamento anti-sísmico têm vindo a evoluir de forma complexa e multifacetada. Esta evolução decorre da melhoria das práticas correntes de conceção

estrutural foi potenciada pela evolução tecnológica, bem como das mudanças em normas e regulamentações, assimilando os ensinamentos obtidos da ocorrência de vários eventos sísmicos de elevado relevo.

O *Force-Based Design* (FBD) pode ser considerado o método tradicional, clássico, de dimensionamento anti-sísmico. Consiste em determinar as forças de corte sísmicas a que uma estrutura está sujeita, determinado em função do tipo de estrutura e do local, dotando os elementos estruturais com capacidade resistente superior à induzida pelas forças sísmicas avaliadas.

Com efeito, uma das primeiras disposições regulamentares relativas ao *FBD* apareceu em Itália, no início do século XX, ao sugerir, a partir da observação de danos ocorridos, que o dimensionamento sísmico deveria ter em conta a existência de forças laterais de magnitude 1/12 do peso próprio (Holmes, 2010).

Esta foi a prática corrente até à década de 70, era prática corrente assumir as forças sísmicas como 2% a 6% do peso próprio da estrutura (Duan & Li, 2003). Porém, o sismo de 1971 de San Fernando (EUA) veio a revelar que estas considerações não eram suficientes (ver Figura 1).

Figura 1 – Colapso do tabuleiro de uma ponte com o sismo de San Fernando, 1971

Figura 2 – Rotura de um pilar por excesso de corte na base com o Sismo de San Fernando, 1971

Com efeito, as forças sísmicas consideradas no dimensionamento não descreviam adequadamente a ação sísmica encontrada no local. Tal promoveu o desenvolvimento da avaliação do efeito dos sismos com base em espetros de resposta, incluindo considerações quanto à interação solo-estrutura.

A conceção baseada no FBD potenciava um aumento significativo na rigidez dos elementos estruturais, o que restringia a sua ductilidade, condição essencial para o dimensionamento anti-sísmico, como atualmente estabelecido.

Este impedimento não só levava a cedências estruturais nos elementos verticais (ver Figura 2) ao serem atingidas as forças de corte resistente na sua base, como também provocava a deslocamentos significativos, dando origem a desconexões entre os pilares e o tabuleiro, e, no limite, o seu colapso (ver Figura 1).

A preocupação com a ductilidade dos elementos estruturais ganhou ainda maior relevo após os sismos de Loma Prieta e Kobe em 1989 e 1995, respetivamente. Várias infraestruturas colapsaram (ver Figura 3) devido à formação de rótulas plásticas nos pilares, muito antes da formação destes mecanismos em vigas ou outros elementos estruturais que não são, para este efeito, os condicionantes da resistência última da estrutura.

Figura 3 – Colapso do viaduto de Hanshin com o sismo de Kobe, 1995

Estes dois últimos sismos tiveram elevada relevância na evolução regulamentar, onde alterações (após o sismo de 1971 em San Fernando) focadas em melhorar o comportamento sísmico estrutural foram aplicadas.

No entanto, estas mostraram-se insuficientes face sismos de Loma Prieta e Kobe, dando aso ao desenvolvimento de novas abordagens, alternativas às metodologias do FBD.

Com efeito, a extensão e a gravidade dos danos estruturais que estes sismos causaram obrigaram a uma mudança na abordagem da conceção estrutural, surgindo um cuidado acrescido em dotar as estruturas de ductilidade suficiente, nas vigas e pilares, para que a formação de rótulas plásticas não ocorresse em primeiro lugar nos elementos verticais.

Esta metodologia é hoje conhecida como *capacity design* e é prática indispensável na engenharia sísmica, podendo ser como das primeiras metodologias de conceção anti-sísmica baseada no *Performance-Based Design* (PBD) (Priestley, 2000).

De uma forma sucinta, o dimensionamento sismo-resistente atual procura dotar as estruturas de ductilidade suficiente para fazer face às ações sísmicas de projeto que lhe são impostas (Jordan et al., 2020), ou seja, capacidade de ter deformações fora do regime elástico, exibindo um comportamento não linear, em vez de lhes conferir a capacidade de resistir em regime elástico a tais ações.

Estas metodologias estão implementadas na regulamentação atual, havendo um cuidado acrescido em garantir ductilidade e redundância nos sistemas estruturais, para que estes possam acomodar melhor as deformações impostas por uma ação sísmica mais intensa.

Nestes cenários, é a própria estrutura a dissipar a energia sísmica, assumindo a possibilidade da ocorrência de danos em elementos estruturais e não-estruturais (Guerreiro, 1996).

2.2.2. O ISOLAMENTO DE BASE

Tendo em conta a possibilidade de as estruturas desenvolverem dano aquando de uma ação sísmica intensa, novas estratégias apareceram para melhor controlar o efeito da ação nas estruturas dimensionadas.

O isolamento de base é uma destas estratégias, focando-se no uso de dispositivos de proteção sísmica que procuram desconectar as estruturas do movimento do solo, durante ação sísmica. Com efeito, o isolamento de base é uma estratégia passiva de dimensionamento sísmico. A designação "passiva" decorre de serem incorporados na estrutura dispositivos de isolamento sísmico que não necessitam de energia externa para controlar os efeitos da ação sísmica.

Sendo a ação sísmica particularmente danosa no plano horizontal, os dispositivos de isolamento de base procuram desconectar a estrutura destes movimentos, garantindo rigidez suficiente para se oporem aos mesmos e resistência suficiente para suportar as ações verticais estruturais e sísmicas (Guerreiro, 1996).

De um ponto de vista abstrato, o isolamento sísmico baseia-se na criação de uma superfície de descontinuidade horizontal em toda a estrutura (ver Figura 4), permitindo movimento relativo entre esta e o solo.

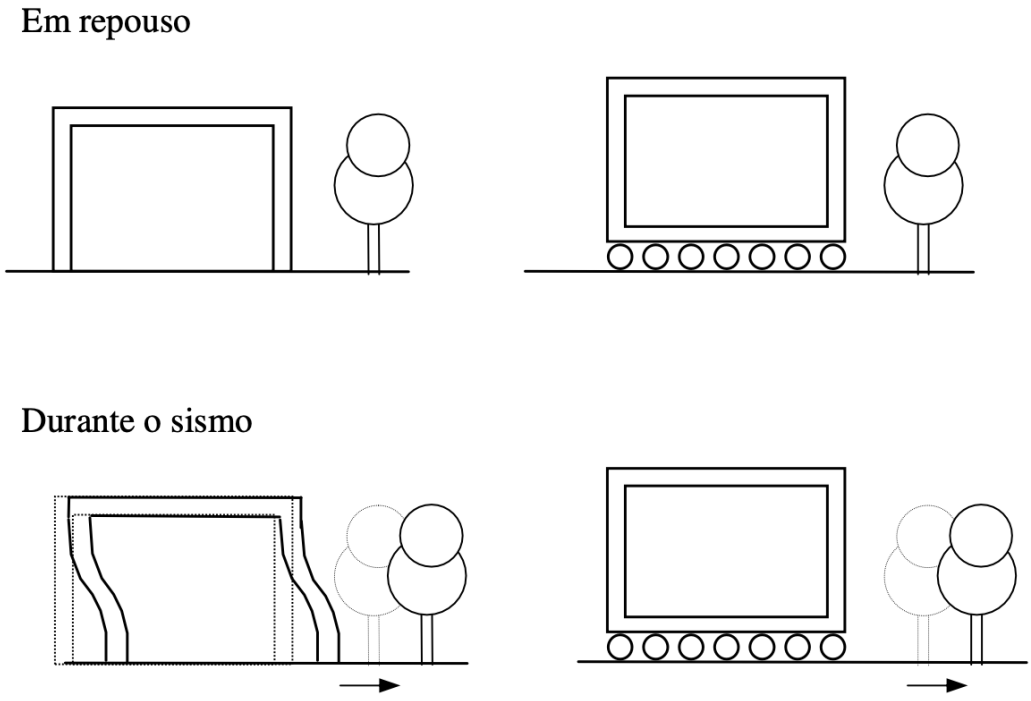


Figura 4 – Estrutura conceptual com isolamento de base, adaptado de Guerreiro (1996)

Uma estrutura como a apresentada na Figura 4 é altamente conceptual e não concretizável. Porém, historicamente há algumas patentes que procuram criar esta superfície de descontinuidade nas estruturas com isolamento de base.

É o caso do edifício conceptualizado por Jules Touaillon em 1870 (ver Figura 5), onde a superfície de descontinuidade era garantida por via do deslize sobre rolamentos esféricos em duas superfícies côncavas. Como se verá na Secção 2.3, este sistema de isolamento evoluiu para os aparelhos de apoio pendulares, utilizados atualmente pelo seu comportamento adaptativo.

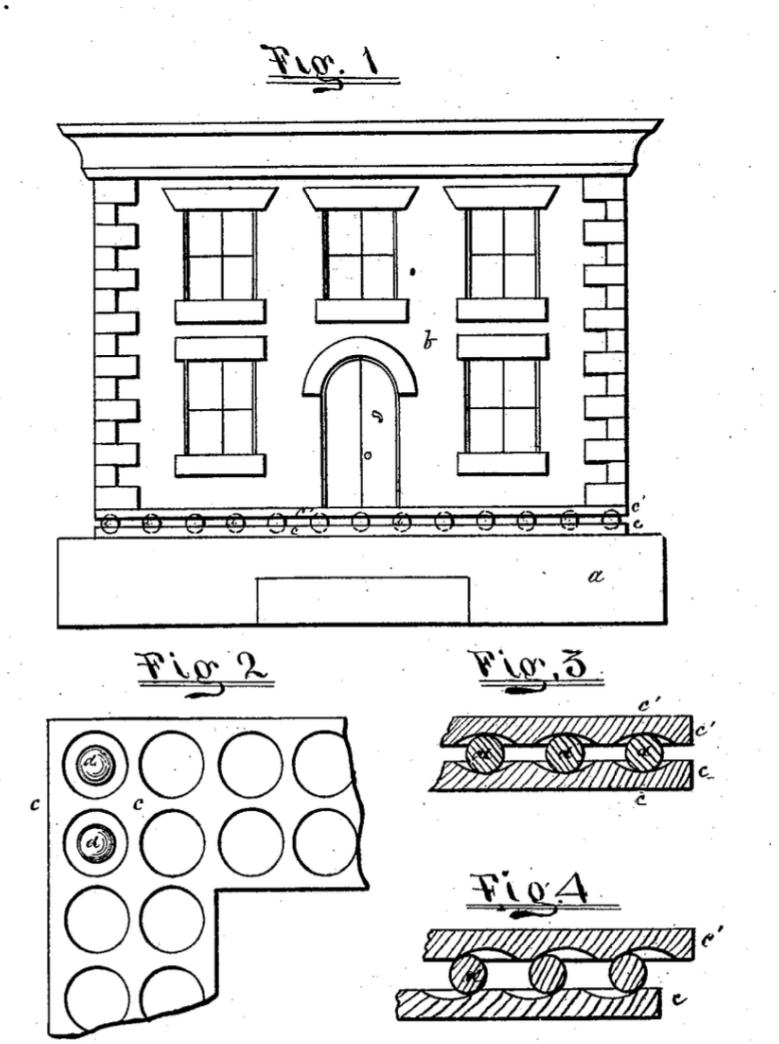


Figura 5 – Sistema de isolamento patenteado por Touaillon em 1870, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

Quando comparado com uma estratégia de dimensionamento tradicional, o isolamento de base tem como objetivo principal proteger as estruturas do efeito dos sismos, ao desconectá-las dos movimentos do solo por via de sistemas de isolamento de base.

Estes são elementos estruturais de rigidez vertical bastante elevada, mas com rigidez horizontal relativamente baixa, colocados na superfície de descontinuidade (ver Figura 6) tal que, na ocorrência de um sismo, as deformações não-elásticas ocorram no aparelho de apoio e não na estrutura.

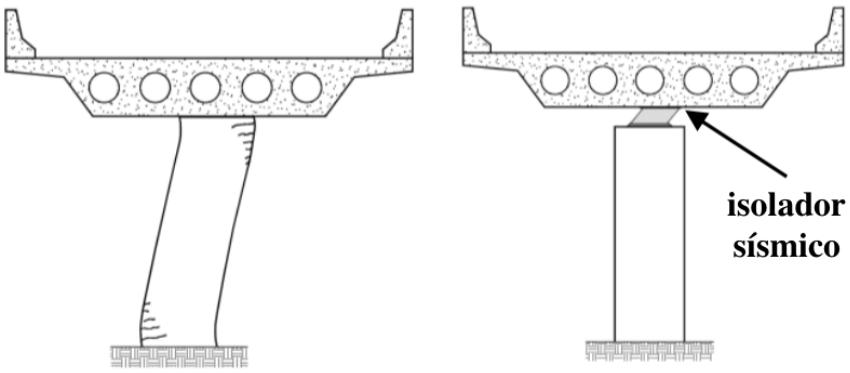


Figura 6 – Comparação do efeito sísmico numa ponte concebida de forma tradicional vs. numa ponte com isolamento de base, adaptado de Mohammed et al. (2022)

A principal vantagem das deformações não-elásticas, danosas, que ocorrerem no sistema de isolamento de base, é permitir que, quer a subestrutura, quer a superestrutura, permaneçam em regime elástico quando um sismo de projeto ocorra. Isto é possível já que o sistema de isolamento aumenta o período de vibração fundamental da estrutura, bem como o amortecimento efetivo, o que potencia uma redução global do espetro de resposta em virtude do maior, como também reduzir a aceleração específica a que as estruturas estão sujeita – em virtude do aumento do período de vibração, mudando o ponto do espetro onde se obtém o valor da aceleração (ver Figura 7).

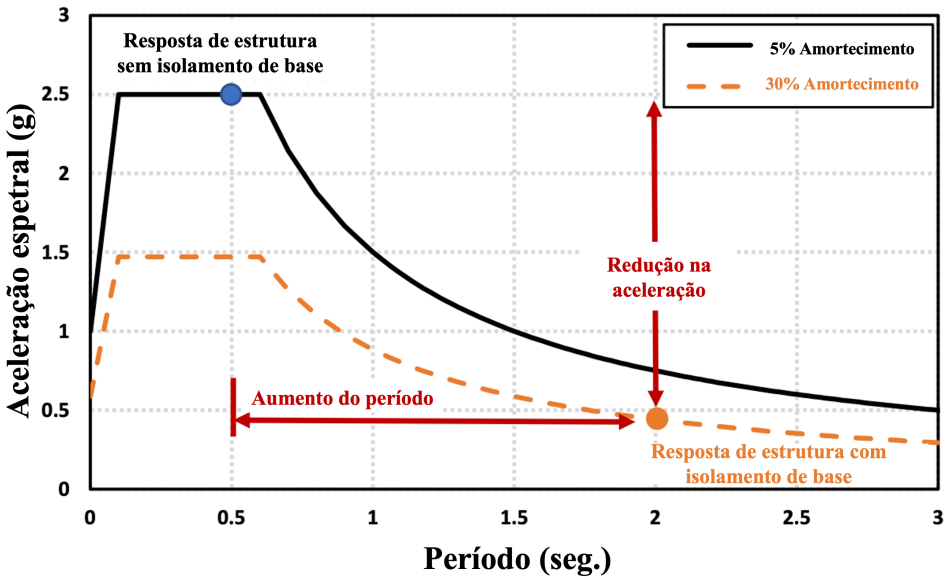


Figura 7 – Efeito do isolamento de base na aceleração espetral

A partir de uma análise modal, é possível compreender que a introdução de um sistema de isolamento de base origina do comportamento dinâmico da estrutura, nomeadamente através da redução das frequências naturais de vibração e modificação das correspondentes formas modais (ver Figura 8), tendo menor participação no efeito das ações sísmicas (Skinner et al., 1993).

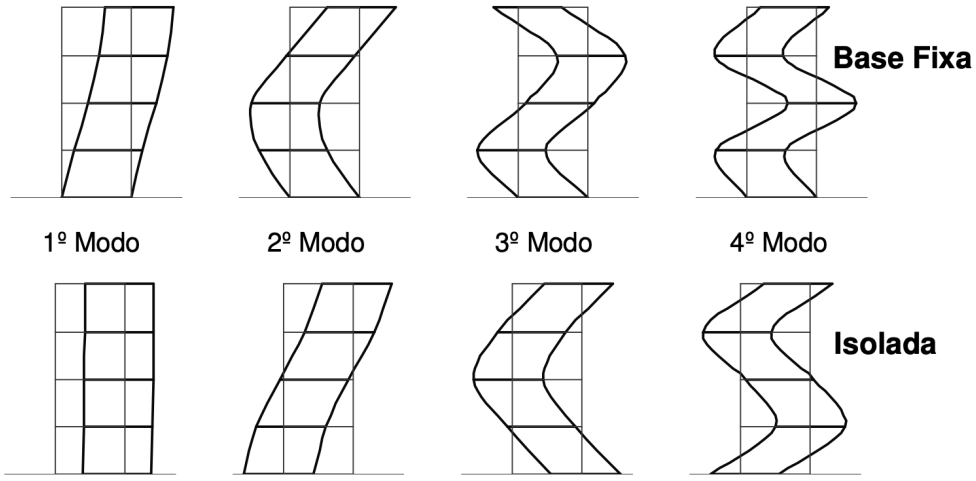


Figura 8 – Influência do isolamento de base nos modos de vibração, adaptado de Guerreiro (2007)

De uma forma sucinta, em pontes, o isolamento de base é das técnicas mais eficientes para mitigar o efeito das ações sísmicas, tendo como principais vantagens:

- Redução das forças sísmicas globais, conduzindo a uma estrutura mais económica;
- Melhor desempenho, já que a ponte como um todo irá ter um melhor comportamento para vários níveis de ação sísmica, mas também para ações de serviço como ações térmicas ou de ações diretamente aplicadas, como é o caso da frenagem;
- Redução de Danos, ao desligar a superestrutura das estruturas de suporte, promovendo que os efeitos da ação sísmica sejam dissipados parcialmente nos dispositivos de isolamento sísmico;

Porém, o isolamento de base também tem desvantagens:

- Custo global da obra poderá ser maior. Ao ser necessária a instalação de dispositivos adicionais, o custo total da estrutura poderá acrescer ao custo de uma estrutura sem isolamento de base. Tipicamente só é recomendado o uso de isolamento de base para estruturas com importância elevada. No entanto, uma estrutura sem isolamento de base pode necessitar de um dimensionamento mais exigente e pormenorizado, que incrementará o custo da obra, podendo este equiparar-se ao custo de uma solução com isolamento de base;
- Deslocamentos acrescidos, havendo a necessidade de dotar as pontes de juntas de dilatação com maior capacidade que as tradicionais. A menor solicitação da estrutura tem como contrapartida que esta se desloque mais, ainda que de forma controlada;
- Maior complexidade no dimensionamento, o que obriga à existência de equipas de projeto especializadas que, usando métodos e técnicas de análise mais ou menos convencionais, saibam aplicar e dimensionar corretamente estruturas com isolamento de base;
- Manutenção acrescida, tendo em conta que alguns dispositivos de isolamento de base, como os aparelhos de apoio friccionais, podem estar sujeitos a desgaste acrescido no seu ciclo de vida, obrigando a manutenção continua;
- Consequências adicionais nas instalações técnicas, pois estas devem prever a acomodação dos movimentos originados pelo sistema de isolamento, e tal deve ser garantido de forma que o

serviço destas instalações se mantenha sempre sem interrupção, pelo menos para os sismos de projeto.

De um ponto de vista da reabilitação estrutural de pontes, o isolamento de base é uma técnica eficiente, tanto de um ponto de vista funcional e técnico, como de um ponto de vista económico, pois a ponte estará sujeita a esforços sísmicos mais reduzidos e melhor controlados, bem como garante um melhor desempenho, reduzindo o potencial para danos.

Adicionalmente, apesar do custo acrescido, realizando uma análise de ciclo de vida a longo prazo, o custo destes sistemas fica diluído no tempo útil da infraestrutura.

Ao implementar isolamento de base em pontes, alguns estudos mostram que é possível reduzir o custo da estrutura entre 5 a 10% (Mayes et al., 2012) a longo prazo. O mesmo é beneficial, pois, apesar do seu elevado custo inicial, estes sistemas provam ser uma solução com um custo-benefício favorável, a longo prazo.

2.3. SISTEMAS DE ISOLAMENTO DE BASE

2.3.1. ENQUADRAMENTO NACIONAL

A aplicação de sistemas de isolamento de base em Portugal tem vindo a aumentar nos últimos cinquenta anos. Na engenharia de pontes moderna, estes foram sempre implementados no dimensionamento de pontes, sendo raras as situações onde estes sistemas não foram implementados.

Dando um pequeno enquadramento histórico, o uso de soluções de isolamento de base já haviam sido pensadas nos viadutos e pontes em Portugal, muito embora estas aplicações não visassem diretamente o isolamento sísmico, como ele é hoje conhecido.

As primeiras aplicações destes sistemas consistiam em aplicar apoios de borracha, formalmente conhecidos por neoprene, que dotavam os encontros de mais flexibilidade, mais tarde associando estes sistemas a fusíveis que visavam desconectar a estrutura superior dos encontros quando uma força de corte predefinida fosse atingida. A utilização destas soluções conduzia a uma redução da frequência de vibração estrutural, ainda que esta redução não fosse visada com o propósito do isolamento sísmico.

Durante a década de oitenta, a utilização de *pot-bearings* foi largamente implementada, não como uma solução de isolamento sísmico, mas, na maioria das aplicações, associada a soluções proteção sísmica. Estas foram as primeiras soluções que funcionavam em regime elasto-plástico.

Com a década de noventa e a construção em massa de pontes e viadutos em Portugal, o uso de sistemas de isolamento de base para proteção sísmica cresceu de forma notável, essencialmente com a utilização do neoprene cintado (HDRB – *High Damping Rubber Bearing*), amortecedores viscosos e aparelhos altamente histeréticos (Azevedo & Guerreiro, 2007).

Na maioria dos cenários, a aplicação de determinado sistema de proteção sísmica ficava restrita a três condicionamentos: a disponibilidade no mercado, a inovação da solução e o respetivo custo. Com efeito, muitas soluções estão dependentes da disponibilidade de determinado sistema de isolamento no mercado, podendo, nalguns cenários, a falta de disponibilidade ser uma razão para se escolher determinado sistema face a outro.

Associado a esta dificuldade, alguns gabinetes de projeto desenvolveram soluções feitas à medida, por vezes desenvolvendo os seus próprios sistemas de proteção sísmica, em função das necessidades que cada projeto pudesse ter.

A construção de um sistema feito à medida é uma vantagem na medida em que o seu dimensionamento reflete uma necessidade concreta em obra. Porém, por não serem soluções comerciais, a sua manutenção e, essencialmente, o custo associado a soluções pouco convencionais é ainda mais elevado do que o custo já acrescido do isolamento de base.

De 2007 até à presente época pouco mudou. A tendência na utilização de sistemas de isolamento de base a nível nacional continua a ser a mesma. Acrescem a este facto dois pontos acessórios que caracterizam o porquê da implementação generalizada de determinados sistemas de proteção sísmica face a outros.

Em primeiro lugar, a implementação recorrente de sistemas de isolamento em HDRB a nível nacional permitiu que equipas de projeto já tenham soluções pré-dimensionadas com estes aparelhos, havendo uma maior familiaridade no seu uso que facilita a sua seleção na maioria dos projetos.

Em segundo lugar, como consequência do ponto referido anteriormente, estando esta tecnologia facilmente enraizada no conhecimento das equipas de projeto nacionais, o custo de desenvolvimento, implementação e manutenção de soluções com HDRB é, naturalmente, inferior quando comparado com outras soluções, como aparelhos oleodinâmicos ou friccionais.

2.3.2. Aparelhos de Apoio Pendulares com Uma Superfície de Deslize

Os Aparelhos de Apoio Pendulares com uma Superfície de Atrito – conhecidos na literatura como Friction Pendulum Systems (FPS) – são sistemas de isolamento sísmico com uma filosofia diferente de outros sistemas de isolamento de. O conceito foi patenteado em 1985, tendo sido descrito em 1987 e mais tarde publicado (Zayas et al., 1990).

Este era constituído por uma superfície de deslize, isto é, uma interface entre dois corpos independentes de um aparelho de apoio friccional, constituída por uma película de material pouco compressível, de muito baixo atrito e resistente ao desgaste, que facilita o deslize relativo entre os dois corpos independentes. Esta superfície é incorporada num prato, ou seja, o corpo constituinte de um aparelho de apoio, que permite de um dos lados a fixação do sistema de isolamento à estrutura e do outro uma superfície de contacto que permite o deslize relativo entre dois corpos independentes.

Ao contrário de outros tipos de aparelhos, este permitia obter resultados simples, previsíveis e estáveis quando sujeitos à ação sísmica, deslocando o período natural de vibração estrutural ao selecionar um raio de curvatura da superfície côncava (ver Figura 9) adequado ao desempenho pretendido.

O período natural de vibração de uma massa suportada com um FPS, T, é determinado a partir do raio de curvatura da superfície de deslize, R, presente na equação de movimento de um pêndulo,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \tag{1}$$

onde, da Equação (1), se salienta que g é a aceleração da gravidade.

O deslize só irá ocorrer quando o nível de força exceder a força de atrito presente no material de deslize, $F_f = \mu W$, com μ o coeficiente de atrito do material da superfície de deslize e W a carga atuante no aparelho de apoio.

Quando a ação sísmica produz níveis de força que são inferiores à força de atrito, o comportamento será idêntico ao de uma estrutura sem isolamento de base, com um período de vibração convencional.

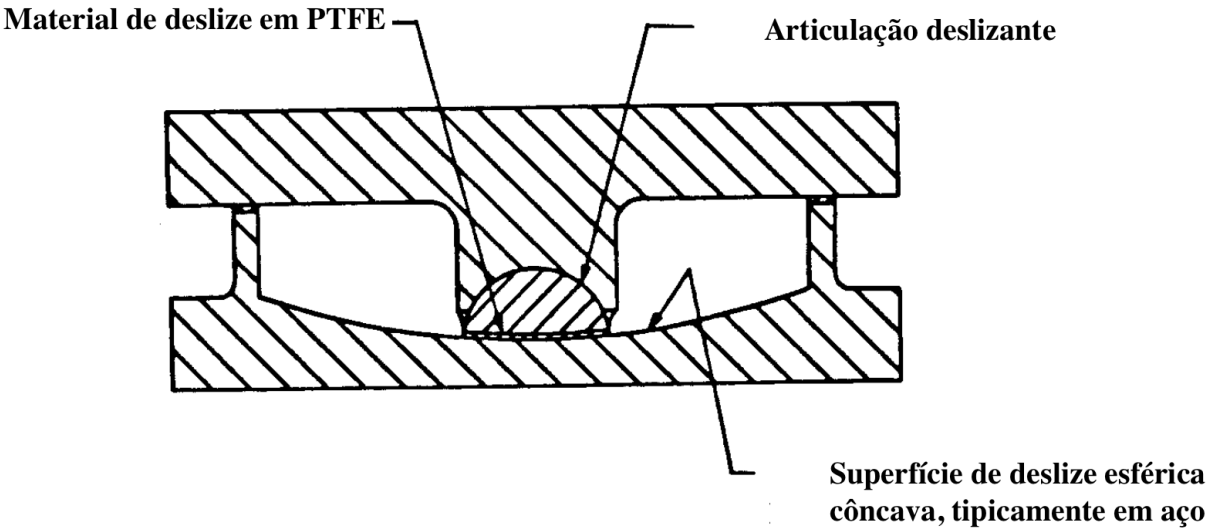


Figura 9 – Secção de um FPS, adaptado de Zayas et al. (1990)

A partir do momento em que a ação sísmica exceda a força de atrito, ocorre deslize e a resposta passa a ser controlada pelo FPS, com o período de vibração apresentado na Equação (1). Deste modo, a rigidez do aparelho de apoio pode ser caracterizada como a combinação destas duas componentes envolvidas na dissipação de energia: a curvatura e o atrito no contacto. A curvatura irá proporcionar uma rigidez inversamente proporcional ao raio da superfície esférica, criando um regime linear-elástico de dissipação de energia, como observável na parte inferior esquerda da Figura 10 da Página 16.

Por sua vez, o atrito que ocorrente do contacto entre a articulação interna e a superfície de deslize provoca uma força constante para todo o deslocamento no aparelho de apoio, criando um regime de dissipação de energia perfeitamente plástico (ver Figura 10, página 16, na parte inferior direita).

Tendo em conta que a rigidez total é composta pela combinação do regime linear elástico do raio de curvatura em conjunto com a rigidez plástica proporcionada pelo atrito, a relação força-deslocamento de um FPS fica definida por

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W sign(\dot{u}) \tag{2}$$

sendo prática corrente apresentar esta relação pela força normalizada, ou seja, a força horizontal desenvolvida em função da carga vertical atuante no isolador, obtendo-se

$$F/_W = \frac{1}{R}u + \mu \tag{3}$$

Os aparelhos de apoio pendulares irão exibir este comportamento até atingirem a capacidade de deslocamento máxima, momento onde a força de corte solicitada à subestrutura é máxima e, portanto,

de maior relevância analítica. É a partir deste ponto que é definida a rigidez, atrito e amortecimento efetivo do sistema de isolamento, como também a energia por si dissipada.

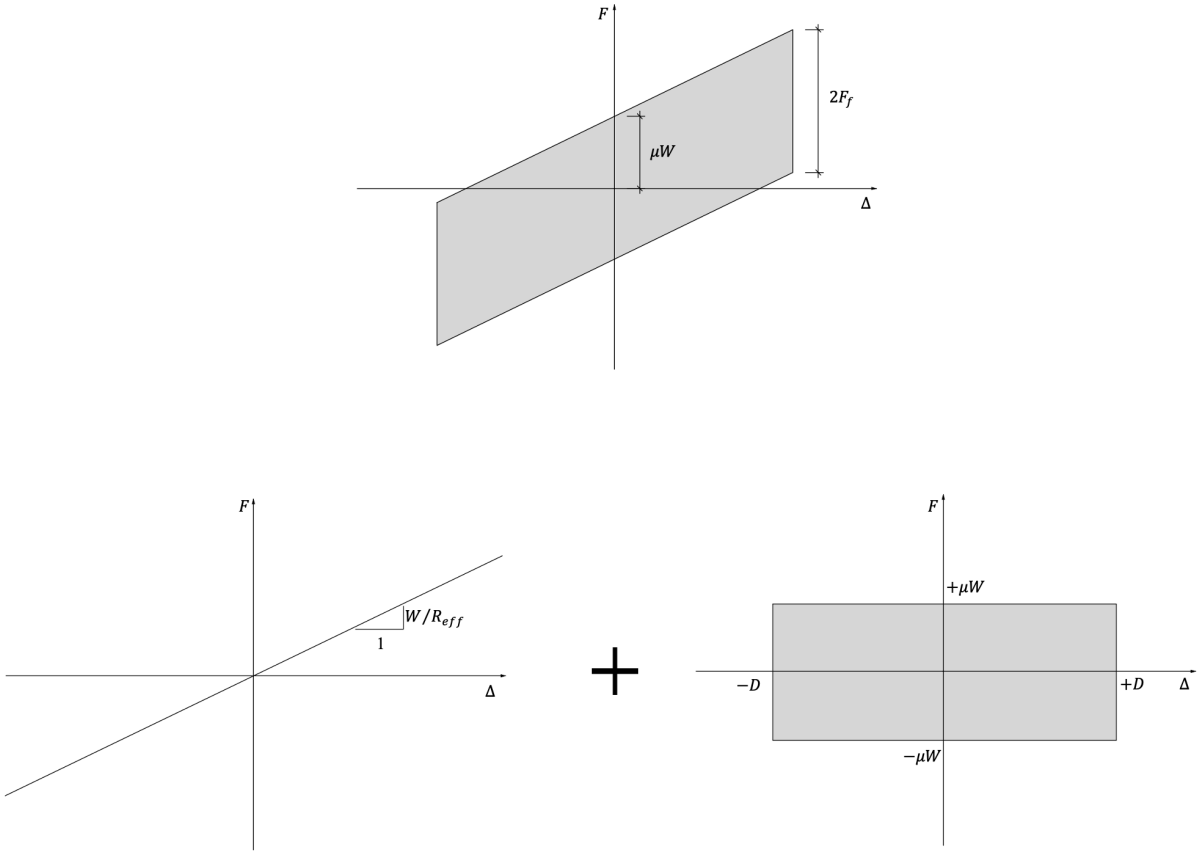


Figura 10 – Composição da Histerese de um FPS convencional, Figura do Autor

2.3.3. Aparelhos de Apoio Pendulares com Múltiplas Superfícies de Deslize

Apesar de conseguirem atingir um melhor desempenho do que outros sistemas de isolamento sísmico, os FPS continuam a ter algumas limitações. A mais evidente é o facto de só ser possível dimensionar o apoio para o nível de ação sísmica a considerar no projeto.

Por sua vez, o FPS irá ter o desempenho adequado para essa solicitação, muito embora exiba um desempenho insuficiente para ações sísmicas mais ou menos intensas (Calvi & Calvi, 2018).

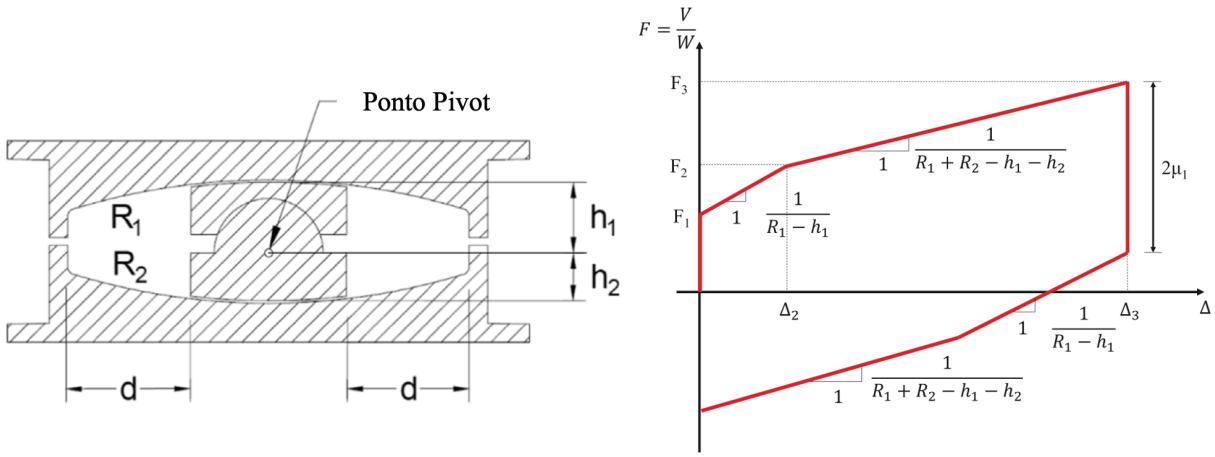
Calvi e Calvi (2018) numa revisão da literatura que pretendia enquadrar o desenvolvimento histórico de sistemas de isolamento de base friccionais, sintetizaram que das limitações dos FPS, houve a necessidade de desenvolver aparelhos friccionais com múltiplas superfícies de deslize.

Daqui, foram criados os aparelhos de apoio pendulares com duas e três superfícies de deslize (respetivamente, *Double Friction Pendulum Systems* – DFPS e *Triple Friction Pendulum Systems* – TFPS) com o objetivo de dotarem maior capacidade de deslocamento e um desempenho mais holístico à família de apoios pendulares.

Os DFPS e os TFPS consistem então em construções de sistemas de isolamento friccionais com mais do que uma superfície de deslize, havendo a possibilidade de cada superfície ter um raio de curvatura, atrito e capacidade de deslocamento específicos às necessidades de cada projeto.

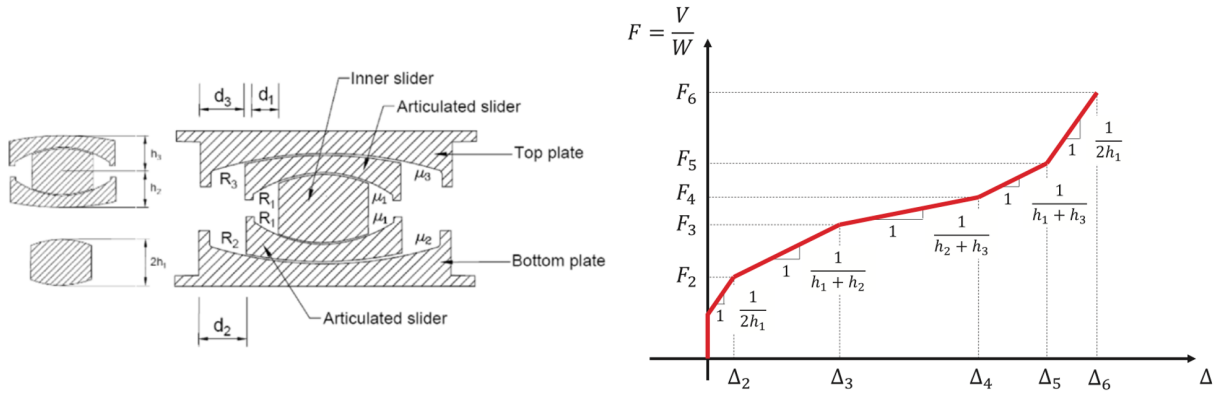
Na maioria dos destes dispositivos, a presença de um batente em cada prato – peça que delimita e define a capacidade de deslocamento de cada prato – e a altura entre o Ponto Pivot (Figura 11) e a superfície de deslize – h_1 e h_2, respetivamente – também influenciam o comportamento final do isolador.

Tal como foi demonstrado em 2.3.2, os FPS atingem o nível de desempenho pretendido para a capacidade de deslocamento máxima. Os dois objetivos principais em adicionar mais superfícies de deslize são a capacidade de deslocamento aumentada e a possibilidade de haver uma histerese adaptativa, conseguida a partir do DFPS e TFPS com raios de curvatura e atritos desiguais entre superfícies.



(a) (b)

Figura 11 | (a) – Secção de um DFPS; (b) – Histerese de um DFPS, adaptado de Calvi e Calvi (2018)



(a) (b)

Figura 12 | (a) – Secção de um TFPS; (b) – Histerese de um TFPS, adaptado de Calvi e Calvi (2018)

O acréscimo de mais superfícies de deslize irá aumentar o período de resposta da estrutrura, melhorando o isolamento e reduzindo mais nível de ação de projeto. O cálculo do período fica determinado ao somar os raios de curvatura do dispositivo, como se pode observar na Equação

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_i R_i}{g}} \tag{4}$$

O comportamento dos DFPS e TFPS com diferentes raios de curvatura e coeficientes de atrito foi caracterizado em 2008 por Constantinou e Fenz (2008), identificando-se o que se designou comportamento adaptativo. Entende-se por comportamento adaptativo a capacidade destes dispositivos exibirem desempenhos diferentes para diferentes níveis de ação.

Com efeito, os FPS, por só disporem de uma superfície de deslize, apenas podiam ser otimizados para um único nível de sismicidade, tendo um comportamento menos eficiente para outras ações – sísmicas ou de serviço.

2.4. ADAPTIVE FRICTIONAL PENDULUM SYSTEM | MAURER SIP®–ADAPTIVE

Dentro dos dispositivos de dupla superfície de deslize, destaca-se o MAURER SIP®–Adaptive, âmbito de estudo do presente trabalho, nas próximas subsecções. É necessário fazer referência a alguns aspetos concretos deste aparelho, quer pelas suas vantagens, quer pela necessidade de o retratar convenientemente para a metodologia a desenvolver no Capítulo 3.

O SIP®–Adaptive (*Sliding Isolation Pendulum*) pertence à classe de aparelhos de apoio pendulares com duas superfícies de deslize duplos com comportamento adaptativo, tendo sido criado com o objetivo de melhorar o isolamento estrutural, reduzir as forças sísmicas, controlar melhor o deslocamento e melhorar a capacidade de rotação dos DFPS (MAURER, 2019).

A possibilidade de reduzir o deslocamento total, mantendo a qualidade de desempenho, permite que o dispositivo tenha dimensões de construção menores, contribuindo para uma solução mais económica, não só para o aparelho de apoio, como também para a estrutura, por exemplo por reduzir os efeitos P-Δ gerados pela excentricidade adicional.

O SIP®–Adaptive consiste em duas superfícies concavas e uma articulação interna que visa desacoplar os movimentos relativos entre o prato inferior e o prato superior, como é observável na Figura 13. Esta garante que a distribuição de pressões é relativamente uniforme e centrada.

A sua inexistência provocaria, a longo prazo, desgaste heterogéneo e até perdas de contacto pontuais, que podem induzir variações consideráveis nas propriedades friccionais do isolador (Hyakuda et al., 2001).

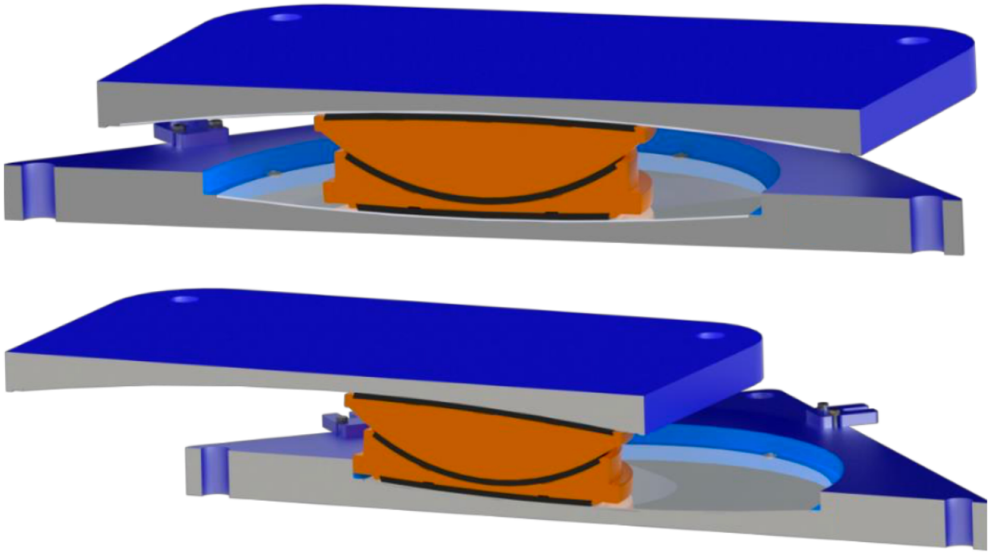


Figura 13 – Secção esquemática do SIP®–Adaptive, adaptado de (Weber et al., 2023)

Como referido por Constantinou e Fenz (2008), os aparelhos de apoio pendulares poderão apresentar um comportamento adaptativo se os raios de curvatura e atrito de cada superfície não fossem iguais entre si.

Para além desta característica, o SIP®–Adaptive não restringe o movimento no prato superior e é mais compacto (ver Figura 13), não desenvolvendo forças de impacto no batente se a solicitação exceder a prevista, tendo ainda um tamanho mais pequeno.

Sendo possível dimensionar os parâmetros de cada prato individualmente, a superfície inferior é geralmente otimizada para acelerações inferiores à do sismo de projeto, tendo em vista o comportamento para ações de serviço, enquanto a superfície superior é geralmente otimizada tendo em vista o desempenho sob acelerações iguais à do sismo de projeto (Weber, Braun, et al., 2018).

2.4.1. Características do SIP®–Adaptive

2.4.1.1. Dimensionamento e Otimização dos Coeficientes de Atrito

Os parâmetros de dimensionamento de DFPS são o período da estrutura com o sistema de isolamento , T_{iso}, que permite determinar o seu raio de curvatura efetivo, R_{eff} ; os coeficientes de atrito, μ, que descrevem o comportamento friccional entre o material de deslize e a superfície de deslize; e a capacidade de deslocamento, d_{cd}.

O espetro de resposta aplicável permite determinar os parâmetros específicos ao projeto, nomeadamente a carga atuante e a aceleração do solo a que o aparelho está sujeito (Weber, Braun, et al., 2018). O coeficiente de atrito do prato inferior, μ_1, é usualmente projetado para uma gama de *0,5%* a *1,25%*, com o objetivo de:

- Provocar o deslize relativo no aparelho e, por conseguinte, isolar a estrutura para acelerações bastante inferiores à do sismo de projeto e
- Permitir acomodar movimentos induzidos por ações térmicas e de serviço e rotações do SIP®–Adaptive, no caso de pontes e construções com desenvolvimento relevante

Pode, eventualmente, ser aumentado, caso a estrutura tenha necessidade de ser travada para a ação do vento, atingindo valores na ordem dos *2%* a *3%* para μ_1.

No caso do prato superior, o coeficiente de atrito μ_2, é escolhido com o objetivo de aumentar a rigidez total do isolador. Este valor dependerá naturalmente do sismo de projeto, DBE e do desempenho estrutural pretendido para este nível de ação e das características do prato inferior, para um DFPS otimizado.

A necessidade de otimizar os parâmetros de dimensionamento surge da possibilidade de se dimensionarem inúmeras variações de DFPS desde que estas exibissem uma força compatível força horizontal máxima permitida por uma análise linear por espetro de resposta (CEN, 2010).

Esta condição pode ser satisfeita com uma infinidade de soluções que façam variar os coeficientes de fricção e capacidades de deslocamento, porém só uma destas combinações é que, efetivamente, reduz a aceleração estrutural (Weber, Meier, et al., 2018). Várias investigações foram efetuadas para tentar otimizar os coeficientes de fricção e capacidade de deslocamento, tendo também em conta o recentramento do dispositivo.

Apesar das investigações efetuadas conduzirem a resultados otimizados, nem todas eram soluções válidas para dimensionar DFPS, como também muitos dos resultados obtidos para estes estudos eram válidos para espetros de resposta específicos, faltando uma abordagem holística para os dois tipos de espetro de resposta elástica e para os cinco diferentes tipos de solo definidos na NPEN001998-1 (CEN, 2005a).

Weber, Meier, et al. (2018) procuraram fazer este estudo, visando reduzir a aceleração da resposta estrutural, tendo desenvolvido um algoritmo que, em função das prescrições e limitações regulamentares, determina a capacidade de deslocamento ótima para o respetivo coeficiente de atrito. Deste modo, é possível determinar uma curva com opções de dimensionamento otimizadas (Figura 14) que minimiza a aceleração estrutural.

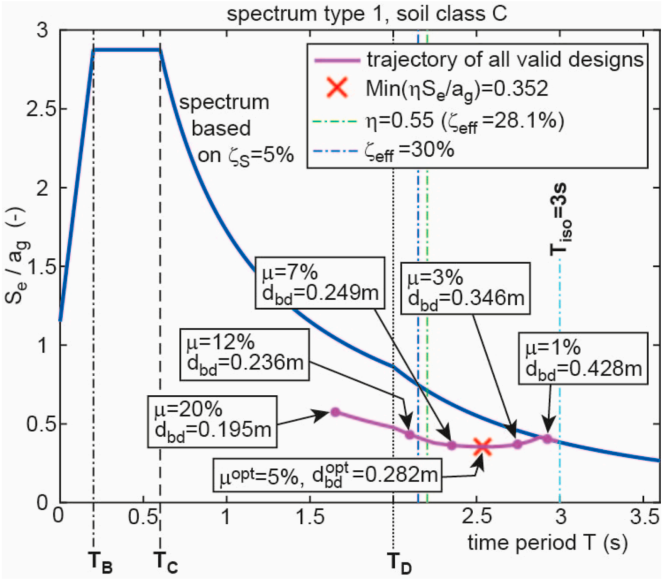


Figura 14 – Espetro de resposta elástico do tipo 1, classe C, incluindo a trajetória de todas as opções possíveis de coeficientes de atrito e capacidades de deslocamento para o dimensionamento de um DFPS otimizado, retirado de Weber, Meier, et al. (2018)

O benefício desta otimização assenta na possibilidade de, para um determinado período, haver sempre uma escolha de coeficientes de atrito que maximizem o desempenho e minimizem a aceleração estrutural da resposta.

Definindo o valor do coeficiente de atrito otimizado para um DFPS convencional, o coeficiente de atrito do prato superior no SIP®–Adaptive, no pré-dimensionamento, fica definido pela Equação (5)

$$\mu_2 = \mu^{opt}[min(max(|\ddot{u}_s + \ddot{u}_g|), DBE, DFPS\ otimizado)] \quad (5)$$

onde $\ddot{u}_s$ representa a aceleração da estrutura em relação ao solo, $\ddot{u}_g$ a aceleração do solo, $|\ddot{u}_s + \ddot{u}_g|$ a aceleração estrutural em termos absolutos, e $max(|\ddot{u}_s + \ddot{u}_g|)$ a aceleração de pico, em termos absolutos (Weber, Braun, et al., 2018).

O valor do coeficiente de atrito do prato superior, μ_2, para efeitos de pré-dimensionamento do aparelho de apoio, ficará definido como o menor dos coeficientes de atrito da Equação (5), otimizados em função da aceleração imposta ao apoio para cada um dos três cenários apresentados: a aceleração de pico absoluta, $max(|\ddot{u}_s + \ddot{u}_g|)$; o sismo de projeto, DBE; e a aceleração do aparelho de apoio de duas superfícies de deslize, otimizado conforme o estudo desenvolvido por Weber, Meier, et al. (2018).

2.4.1.2. Dimensionamento da capacidade de deslocamento

A escolha das diferentes capacidades de deslocamento, d_1 e d_2, dos diferentes pratos do aparelho de apoio dependem do projeto onde este dispositivo é aplicado. A superfície inferior é limitada por um batente para evitar que o deslocamento relativo entre superfícies seja demasiadamente excessivo.

Esta superfície está sujeita a ações de serviço, efeitos induzidos por ações térmicas, rotações e mesmo outras solicitações de magnitude mais reduzida que o DBE, sendo necessário dimensionar d_1 de forma a garantir que estes deslocamentos conseguem ser acomodados.

A superfície superior, que irá reagir a ações de magnitude igual ou superior à do sismo de projeto, não tem qualquer impedimento na sua capacidade máxima de deslocamento. Esta característica permite que o prato superior consiga desenvolver uma rigidez superior, onde a escolha da capacidade de deslocamento, d_2, garante que o deslocamento total do SIP®–Adaptive consegue acomodar os deslocamentos relativos superiores aos do sismo de projeto, expectáveis no MCE (*Maximum Credible Earthquake*) (Weber, Braun, et al., 2018).

Assim, d_2 não corresponde a uma limitação física num batente, mas decorre apenas do movimento que a geometria do aparelho é capaz de acomodar.

2.4.1.3. Efeito do Aparelho de Apoio no Período de Vibração

Dada a existência de uma articulação interna rotulada, os movimentos relativos entre as superfícies não são iguais em todos os instantes, o que afeta o período observado. Este irá depender do movimento relativo que ocorre no aparelho e em que superfícies de deslize ocorre o movimento.

Enquanto a força horizontal que se desenvolve no prato inferior não ultrapasse o atrito do prato superior, só ocorrerá deslize na superfície inferior.

Tal é relevante, pois o período do SIP®–Adaptive irá depender do nível da aceleração do solo e dos parâmetros de dimensionamento do dispositivo – sendo diferentes consoante o deslize ocorra no prato inferior ou se há deslize em simultâneo (Weber, Braun, et al., 2018).

Dado este comportamento adaptativo, é possível escolher raios de curvatura que permitem ao aparelho ter um período de resposta igual ao de um DFPS convencional, sem que isso comprometa a capacidade de deslocamento e força de corte na base, para uma mesma aceleração.

Deste modo, o período do aparelho de apoio de um SIP®–Adaptive é dado pela Equação (6)

$$T_{iso-Adaptive} = 1{,}0099\, T_{iso} \approx T_{iso} \tag{6}$$

2.4.1.4. Validação dos parâmetros de dimensionamento

Com os parâmetros de dimensionamento definidos, a validação do dimensionamento pode ser feita, para cada projeto, a partir de uma análise não linear no domínio do tempo da estrutura em estudo, modelada com o SIP®–Adaptive.

Programas de análise estrutural corrente como o CSI SAP2000 (CSI, 2024) e Autodesk RSA 2024 (Autodesk, 2024b) permitem este tipo de análises com estes aparelhos de apoio, embora se tratem de aproximações.

Os parâmetros do pré-dimensionamento são otimizados com o objetivo de garantir o desempenho estrutural para as acelerações do solo em termos de:

- Garantir as forças de bloqueio necessárias para a ação do vento;
- Redução das acelerações estruturais de pico para o sismo de projeto DBE;
- Redução das forças de corte e da capacidade de deslocamento no isolador para o MCE;

No caso de pontes, a otimização e as características geométricas do dispositivo também devem:

- Garantir que o movimento relativo que ocorre no prato inferior é acionado para ações térmicas e de serviço;
- Garantir uma capacidade de rotação adequada às necessidades de projeto.

2.4.2. Inclinação da Base de um SIP®–Adaptive

O correto funcionamento dos aparelhos de apoio pendulares depende das condições em que estes são aplicados em obra. O comportamento pretendido irá ser alterado devido a dois aspetos, independentemente se o aparelho de apoio é calibrado recorrendo a análises lineares ou não lineares no domínio do tempo.

Em primeiro lugar, em projeto, assume-se que o aparelho estará nivelado e, portanto, não terá nenhuma inclinação parasita na sua instalação. A inclinação consiste na rotação inicial segundo a normal ao plano definido pela ligação do aparelho de apoio à estrutura.

Porém, como descrito por Constantinou e Fenz (2008) a regulamentação existente tem em conta a possibilidade de haverem inclinações adicionais. A norma americana (AASHTO, 2014) limita o valor máximo que esta inclinação pode ter. Este limite apresentado pela AASHTO assenta em variações de ± 0.01 radianos.

No entanto, como se verá no Capítulo 3, inclinações inferiores a este limite induzem mudanças substanciais no comportamento do aparelho de apoio. Se estas não forem controladas, podem comprometer o funcionamento pretendido da solução estudada.

O segundo aspeto assenta na possibilidade da estrutura que suporta o dispositivo poder sofrer assentamentos diferenciais, bem como fenómenos de fluência (Constantinou & Fenz, 2008), ou, ser flexível suficiente para poder desenvolver inclinações que causem mudanças no comportamento estrutural, como foi estudado por (Becker, 2011) para TFPS.

A NPEN001998-2 (CEN, 2005b) aborda a questão de pilares flexíveis no Capítulo 7.7, atendendo que estes podem induzir mudanças na rigidez das soluções de isolamento de base. Porém, uma análise concreta da mudança do comportamento do aparelho de apoio não é prescrita.

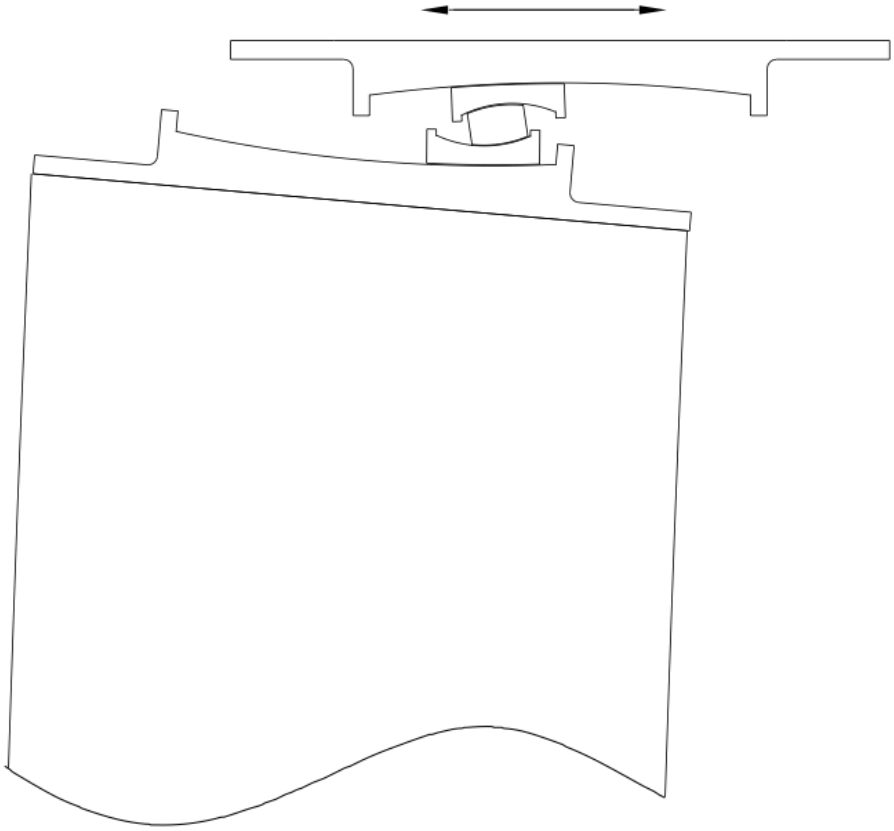


Figura 15 – Esquema de um pilar flexível na rotação da base de um TFPS, retirado de Becker (2011)

Os estudos desenvolvidos e aplicados no Capítulo 3 e 5, respetivamente, originam desta possibilidade. Na literatura, a inclinação da base é descrita como um fenómeno temporário ou permanente, mas sempre com índole acidental. Em todo o caso, em ambos os cenários, há sempre alguma mudança no funcionamento do isolador.

Sendo o SIP®–Adaptive um aparelho de apoio pendular com comportamento adaptativo, que permite acomodar deslocamentos e rotações relativas, poderá, então, ser possível provocar uma inclinação na base destes aparelhos de apoio para atingir objetivos de desempenho concretos.

Os estudos desenvolvidos foram motivados por uma imposição de projeto que pretende melhorar a condição de recentramento presente na NPEN001998-2 (2011, 2027), sendo as metodologias apresentadas no Capítulo 3 motivadas pelos desenvolvimentos efetuados por Constantinou e Fenz (2008) que descrevem por completo a influência que a inclinação da base têm em DFPS e TFPS.

Beneficiando do comportamento adaptativo do aparelho de apoio, será possível arranjar uma inclinação que cumpra com as necessidades e imposições de projeto, de modo que a condição de recentramento aumente, sem que isso comprometa o comportamento total do aparelho de apoio – não comprometendo o desempenho para o sismo de projeto, muito embora melhore o comportamento em situação de serviço.

2.5. EVOLUÇÃO DA CONDIÇÃO DE RECENTRAMENTO NOS EUROCÓDIGOS ESTRUTURAIS

A condição de recentramento, presente na regulamentação europeia, representa a capacidade de um determinado sistema de isolamento de base ter suficiente restituição lateral nas duas direções horizontais principais, a fim de evitar qualquer acumulação de deslocamentos (CEN, 2005b).

O objetivo será controlar o deslocamento residual do aparelho de apoio, d_{rm} ou d_0, de modo que este não comprometa a segurança da estrutura. Este representa o deslocamento residual do sistema de isolamento, representativo do deslocamento residual quando a força máxima, F_m, que induz o deslocamento, d_m ou d_{cd}, é retirada, em condições quase-estáticas. A Figura 16 da página 24, apresenta o modelo bilinear equivalente, proposto pela CEN (2005b).

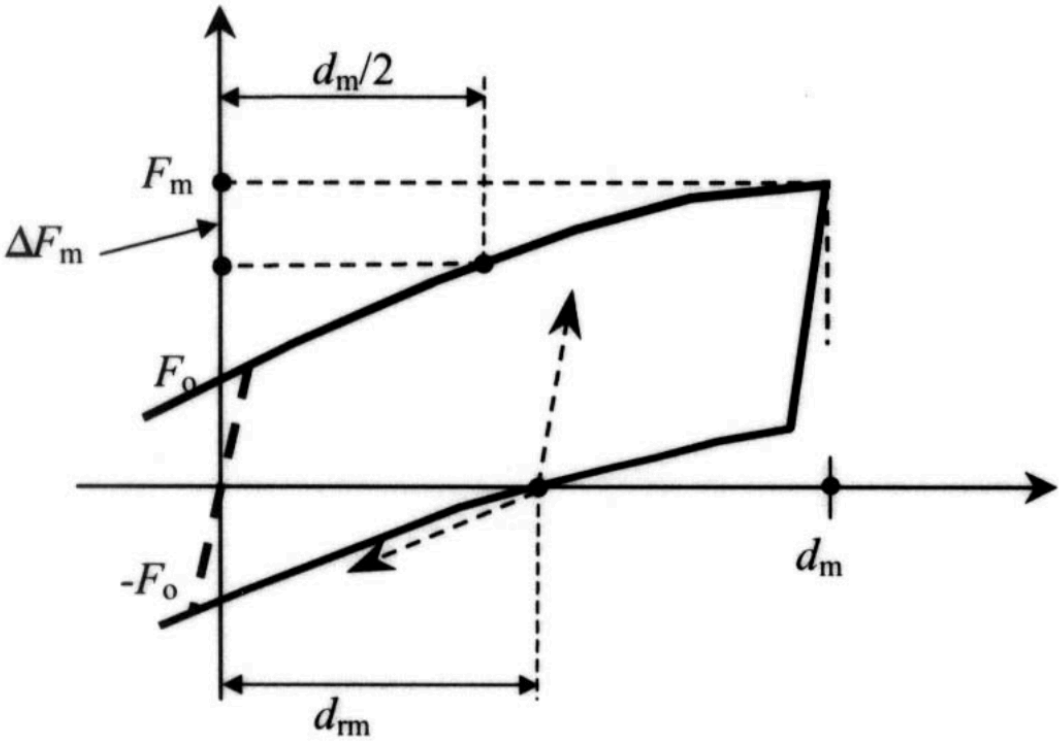


Figura 16 – Modelo Bilinear Equivalente de um Sistema de Isolamento de Base para avaliação da capacidade de restituição, retirado de CEN (2005b)

Seguindo o que é definido pelas condições 7.7.1 (1)P, o deslocamento residual deve ser relativamente pequeno em relação ao deslocamento máximo. Isto deve-se à rigidez do sistema de isolamento ser

substancialmente menor para movimentos em direção ao ponto de equilíbrio do que a rigidez que este exibe para o deslocamento máximo.

Deste modo, a partir da equação (7.24b) da mesma norma, o deslocamento residual, d_{rm}, fica definido por

$$d_{rm} \leq d_m - \delta_d d_{a,max} \tag{7}$$

sendo δ_d um coeficiente numérico de valor recomendado igual a 0,5, que reduz $d_{a,max}$, o máximo deslocamento de projeto para o sistema de isolamento em estudo, podendo este valor ser acrescido de $1{,}5 \times d_{a,max}$ ao ter em conta os deslocamentos sísmicos e eventuais deslocamentos da subestrutura. Dimensionando o sistema de isolamento tal que $d_m = d_{a,max}$, vem que o deslocamento residual é:

$$d_{rm} \leq 0{,}5 d_m \tag{8}$$

ou, caso $d_m = 1{,}5 \times d_{a,max}$

$$d_{rm} \leq 0{,}25 d_m \tag{9}$$

e, portanto, o rácio entre o deslocamento máximo e o deslocamento residual ficaria definido por, respetivamente

$$\frac{d_m}{d_{rm}} \geq 2{,}0 \tag{10}$$

e

$$\frac{d_m}{d_{rm}} \geq 4{,}0 \tag{11}$$

Tendo em vista o dimensionamento de sistemas de isolamento pendulares friccionais, quer a Equação (10), quer a Equação (11) permitem um controlo da capacidade de recentramento exigente e satisfatório, pois garantem suficiente restituição lateral nestes aparelhos de apoio.

Como avaliado por Quaglini et al. (2017), para aparelhos de apoio pendulares, especialmente para dispositivos de múltiplas superfícies com comportamento adaptativo, a condição de recentramento deve enquadrar-se dentro do intervalo apresentado pelas Equações (10) e (11).

Esse autor aponta vários estudos experimentais que indicam a possibilidade de aparelhos adaptativos poderem ter uma capacidade de restituição muito elevada tal que a condição de recentramento atinja valores de

$$\frac{d_m}{d_{rm}} \geq 7{,}0 \tag{12}$$

É de realçar que valores elevados para a condição de recentramento podem não ser do lado da segurança. Apesar de uma elevada capacidade de restituição lateral, o sistema de isolamento induz na estrutura excentricidades que podem conduzir a esforços excêntricos substanciais que condicionem o desempenho estrutural.

Todavia, com a evolução dos eurocódigos estruturais, o modelo bilinear equivalente apresentado na Figura 16 evoluiu para o apresentado na Figura 17.

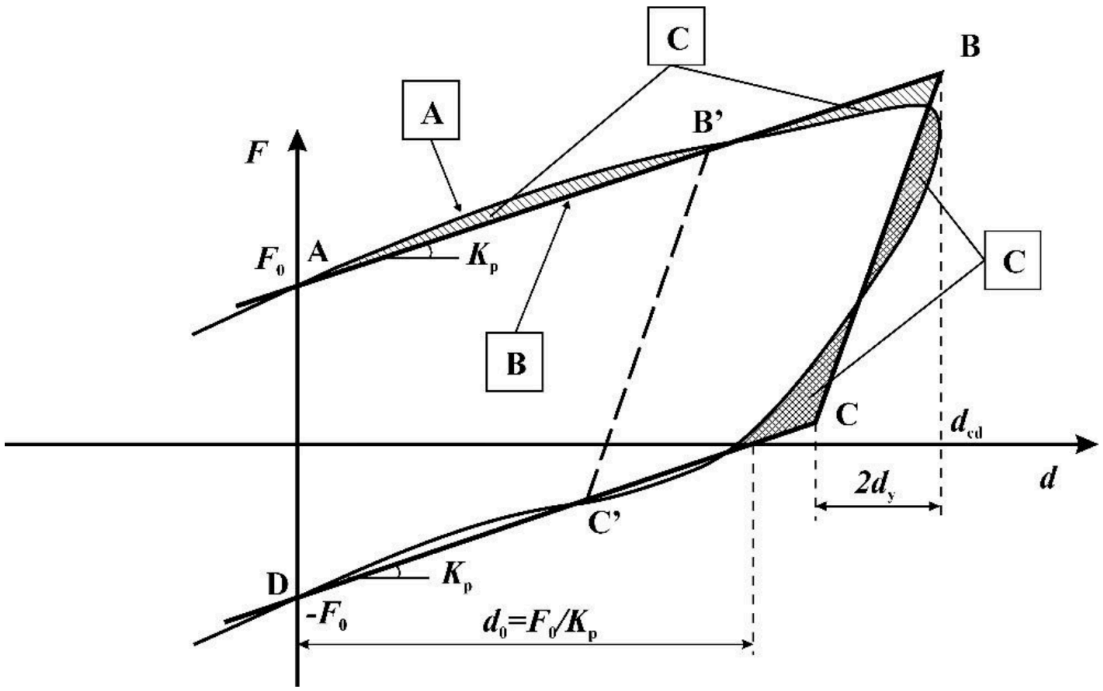


Figura 17 – Modelo Bilinear Equivalente de um Sistema de Isolamento de Base para a Avaliação da Capacidade de Restituição, retirado de CEN (2011, 2022, 2027)

Analisando a Figura 17, parece conduzir o leitor a um modelo bilinear equivalente semelhante ao apresentado pela CEN (2005b) na Figura 16. Porém, a expressão (7.24) da secção 7.7.1 desse mesmo documento define a condição de recentramento como

$$\frac{d_{cd}}{d_0} \geq \delta \tag{13}$$

sendo δ um coeficiente numérico igual a $\delta = 0{,}5$, ficando a condição de recentramento definida como

$$\frac{d_{cd}}{d_0} \geq 0{,}5 \tag{14}$$

De notar que a formulação da condição de recentramento e o modelo bilinear equivalentes, presentes na FprEN1998-2 (CEN, 2027), são ligeiramente diferentes das apresentadas, porém conduzirá ao mesmo resultado presente nas normas NPEN001998-2 CEN (2011); (2022).

Esta condição de recentramento implica que o deslocamento máximo do sistema de isolamento seja $d_{cd} = d_m = 0{,}5d_0$. A título de exemplo, considere-se um aparelho de apoio arbitrário com um deslocamento máximo de $100\ cm$ e um deslocamento residual de $50\ cm$. Ao aplicar a condição da Equação (18), implicaria que o deslocamento máximo do sistema de isolamento teria de ser $25\ cm$, 4 vezes inferior ao deslocamento máximo do sistema de isolamento, sendo redundante para aparelhos de apoio pendulares.

O porquê da evolução do coeficiente numérico δ de pelo menos 2,0 para 0,5 reside no aparecimento relativamente recente de deslocamentos residuais elevados em aparelhos de apoio cuja superfície de deslize comporta materiais de elevada fricção.

Adicionalmente, estes materiais tendem a exibir um comportamento *stick-slip*, ou seja, transitam entre o repouso e o deslize múltiplas vezes quando as velocidades de deslize são baixas. Quando o aparelho de apoio interrompe o movimento, ainda que momentaneamente, o coeficiente de atrito aumenta, criando resistência para a restituição do movimento (Constantinou et al., 2007).

Muito embora o estudo da capacidade de recentramento de aparelhos de apoio pendulares ser relativamente recente, já existem alguns estudos que apontam que a condição de recentramento do Eurocódigo atual não conduz a resultados conservativos nestes dispositivos. Em detalhe, um estudo paramétrico realizado por Cardone et al. (2015) detalha que só aparelhos de apoio pendulares com uma condição de recentramento de pelo menos

$$d_{cd}/d_0 \geq 2{,}5 \tag{15}$$

é que exibem deslocamento residuais que podem ser negligenciáveis. A correta avaliação da condição de recentramento para aparelhos de apoio pendulares é fundamental, já que esta afeta os parâmetros de dimensionamento do próprio aparelho de apoio, bem como da estrutura isolada. Apesar de existir pouca validação experimental na literatura, é razoável supor que aparelhos de apoio pendulares dimensionados segundo a condição de recentramento presente na regulamentação atual podem ter uma restituição inferior à pretendida.

Deste modo, é recomendável que a condição de recentramento utilizada para aparelhos de apoio pendulares seja, pelo menos, superior a 2,0, de acordo com a que estava presente na NPEN001998-2:2005 (CEN, 2005b).

Por fim, apesar de a condição de recentramento ter sido criada com a ação sísmica em mente, para cenários em serviço, onde o nível de ação é presumivelmente inferior, também o deslocamento máximo será menor – caso o material deslizante tenha um atrito elevado. Assim, ações como a frenagem ferroviária poderão induzir deslocamentos residuais superiores aos sísmicos, sendo necessário garantir meios que consigam melhorar a condição de recentramento, como a inclinação da base destes aparelhos de apoio.

3

ANÁLISE E MODELAÇÃO LINEAR DO SIP®–ADAPTIVE

3.1. INTRODUÇÃO

Esta secção apresenta os princípios necessários para caracterizar a histerese de Apoios Pendulares com Atrito. As formulações apresentadas são aplicáveis e extensíveis a todas as variações de FPS, sendo realizadas análises concretas para o SIP®–Adaptive – um DFPS com comportamento adaptativo.

A metodologia utilizada é baseada quase integralmente no trabalho desenvolvido por Constantinou e Fenz (2008), resultando de uma extensão do comportamento uni-friccional dos FPS aos dispositivos com múltiplas superfícies de atrito que, por muito que o seu comportamento histerético final seja mais complexo, continua a ser uma aplicação destes princípios fundamentais.

Em 3.2 é descrita a geometria de um aparelho de apoio pendular adaptativo, realçando a sua construção e as características físicas do mesmo que garantem o comportamento histerético apresentado em 3.4.

Com o objetivo final de compreender a histerese de um aparelho com mais do que uma superfície de deslize, são apresentadas em 3.3 as formulações do comportamento força-deslocamento com uma única superfície de deslize. Estas constituem a base teórica para os vários regimes de funcionamento apresentados em 3.4, como também para a inclinação da base no aparelho de apoio adaptativo, caracterizado em 3.5.

3.2. GEOMETRIA DE UM SIP®–ADAPTIVE

Tal como descrito em 2.4, o SIP®–Adaptive baseia o seu funcionamento no deslize relativo entre duas superfícies esféricas côncavas, separadas por uma articulação interna, que tem como objetivo separar e isolar os movimentos relativos que ocorrem no prato inferior e superior (Weber, Braun, et al., 2018).

As superfícies côncavas inferior e superior (ver Figura 18) têm raios de curvatura R_1 e R_2, respetivamente, sendo estes idealmente desiguais para se obter um comportamento adaptativo. Os coeficientes de fricção do deslize nestas superfícies são μ_1 e μ_2, respetivamente, também idealmente diferentes para que a adaptatividade seja obtida.

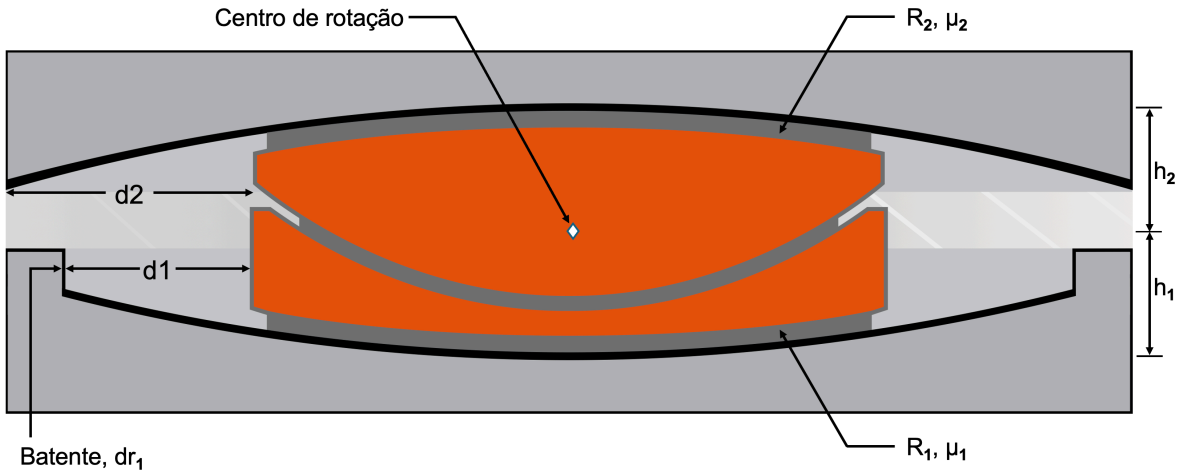


Figura 18 – Secção pormenorizada de um SIP®–Adaptive, adaptado de MAURER (2019)

A capacidade de deslocamento de cada superfície fica limitada a d_1 para a superfície inferior e d_2 para a superior, podendo estas ter valores diferentes para um comportamento mais versátil e adaptativo, dando origem a uma capacidade de deslocamento total, para todo o aparelho de apoio, de

$$d_{max} = d_1 + d_2 \tag{16}$$

A Figura 18 denota um ponto central que representa o Centro de Rotação (CdR), local a partir do qual se inicia e desenvolvem rotações na articulação. As quantidades representadas na Figura 18 por h_1 e h_2 representam a distância entre o CdR e a local de contacto em cada superfície de deslize, inferior e superior, respetivamente. Estas desempenham um papel fundamental nas equações de equilíbrio de um FPS, que consideram as forças verticais e horizontais atuando neste CdR. Por conseguinte, essas mesmas equações denotam um raio de curvatura efetivo, como irá ser abordado com maior rigor na Secção 3.3.2.

$$R_{eff1} = R_1 - h_1 \text{ e } R_{eff2} = R_2 - h_2 \tag{17}$$

3.3. Histerese para uma Superfície de Deslize

3.3.1. Mecânica de deslize num FPS

Os isoladores de base são projetados para suportar cargas verticais enquanto controladamente transmitem forças horizontais. Em cenários onde a força horizontal aplicada é menor do que a resistência por fricção, não ocorre movimento e os FPS apresentam uma rigidez elástica elevada. Este comportamento não é completamente rígido devido a pequenas deformações nos materiais do apoio e de deslize.

No entanto, quando a força horizontal ultrapassa a resistência por fricção, o deslize inicia-se e o diagrama de corpo livre representado na Figura 19 pode ser aplicado.

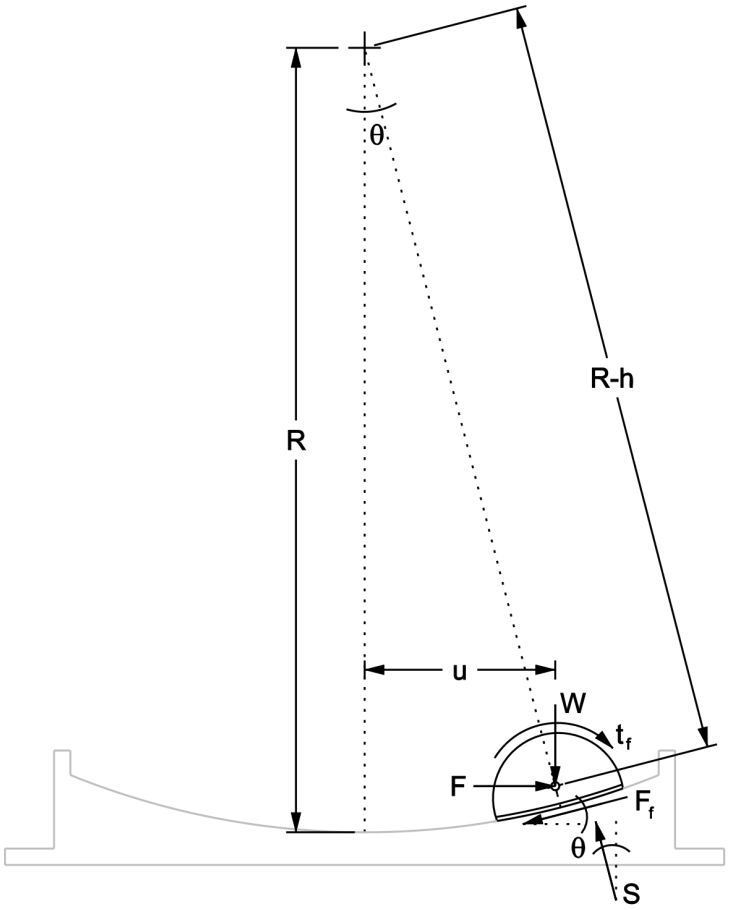


Figura 19 – Diagrama de Corpo Livre da Articulação de um FPS na configuração deformada, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

A relação força-deslocamento, é derivada do equilíbrio e da geometria da articulação na configuração deslocada. Para este cenário, as forças atuantes no CdR da articulação são:

1. A carga vertical atuante no CdR, W
2. A força horizontal, F, transmitida à estrutura através do apoio
3. A força de atrito resultante, $F_f = \mu S \approx \mu W$, atuante ao longo da superfície de deslize. O valor de μ, em boa verdade, não é constante. Ele é expresso nas equações de equilíbrio como um parâmetro único. Porém, este varia em função de vários fatores, como a velocidade a que ocorre o contacto no deslize e a pressão a que ocorre esse mesmo contacto, podendo ainda intervir a temperatura e o próprio desgaste com o uso. Realizando uma análise dinâmica, as equações não perdem validade. É apenas necessário utilizar um valor de μ atualizado a cada passo no tempo (ver Secção 4.2.2), definido em função da velocidade de deslize no instante em que ocorre o contacto (considerando-se os restantes fatores como inalteráveis em cada análise). Todavia, a simplificação baseada na utilização de um valor constante, médio, para μ, não invalida o uso das formulações descritas em diante. Esta simplificação fica apenas afetada a um erro que é aceite em todas as aplicações práticas de dispositivos friccionais conhecidos. Não é âmbito deste estudo, mas será sempre possível balizar de forma prática esta questão ao realizar análises para

valores extremos. Uma análise mais rigorosa implicaria cálculos iterativos (ver Secção 4.2.3), possibilidade que neste capítulo não é considerada.

4. A força resultante da pressão normal ao contacto que ocorre no deslize, S. Esta deve ser ligeiramente descentrada do CdR para garantir o equilíbrio de momentos com F_f e, consequentemente, a distribuição de pressões na interface de deslize não é uniforme
5. As forças de atrito que se desenvolvem dentro da articulação interna, t_f, cujo efeito se assume integrado na força de atrito resultante, F_f, e, portanto, não aparecem explicitamente nas equações de equilíbrio, muito embora também incrementem a excentricidade de S.

Considerando o equilíbrio nas direções horizontal e vertical no CdR, obtém-se a Equação (18) e (19), respetivamente:

$$F - S\,sin\,\theta - F_f\,cos\,\theta = 0 \tag{18}$$

$$W - S\,cos\,\theta + F_f\,sin\,\theta = 0 \tag{19}$$

Pela geometria da Figura 19, o deslocamento horizontal, u, e vertical, v, do CdR são definidos por

$$u = (R - h)\,sin\,\theta = R_{eff}\,sin\,\theta \tag{20}$$

$$v = R_{eff}(1 - cos\,\theta) \tag{21}$$

de onde se destaca o raio de curvatura efetivo, R_{eff}, definido como a distância do centro da superfície esférica de deslize ao CdR da articulação interna.

Combinando as Equações (18), (19) e (20), obtém-se a relação força-deslocamento que governa o movimento de um FPS, dada pela Equação

$$F = \frac{W}{R_{eff}\,cos\,\theta}u + \frac{F_f}{cos\,\theta} \tag{22}$$

A Equação (22) pode ainda ser simplificada. Considerando que a maioria das aplicações de FPS terão um raio de curvatura bastante superior ao deslocamento horizontal que é desenvolvido, pode-se assumir que $cos\,\theta \approx 1$, conduzindo à seguinte simplificação

$$F = \frac{W}{R_{eff}}u + F_f \tag{23}$$

A simplificação apresentada na Equação (23) introduz um erro inferior a 5% desde que o deslocamento horizontal produzido pelo FPS seja menor do que 30% do raio da curvatura. A título de exemplo, um

FPS com um raio de curvatura de 4 metros (raio típico na aplicação destes dispositivos) necessitaria de produzir um deslocamento de 1,20 metros para que o erro fosse superior a 5%. Tal condição é irrealista, garantindo que a simplificação é aceitável.

Tendo em conta que a força de atrito irá sempre opor-se ao movimento, o comportamento cíclico força-deslocamento, baseado na Equação (23), é representado pela Figura 20. Partindo do repouso, a força cresce sem deslocamentos significativos até se vencer a força de atrito, F_f, verificando-se a partir daí movimentos com uma rigidez linear de W/R_{eff}.

Ocorrendo reversão do movimento, o dispositivo descarrega rigidamente até à inversão total da força de atrito, observando-se um decréscimo da força exterior de $2F_f$, sendo que depois desliza na direção oposta com rigidez pós-elástica de W/R_{eff}. Na outra extremidade do movimento, o comportamento é análogo e daí este tipo de comportamento histerético se denomine rígido-linear.

Resulta então que a histerese de um FPS é definida por dois parâmetros relativos a mecanismos distintos: o raio efetivo da superfície esférica, R_{eff}, e o atrito do material deslizante, μ.

O primeiro determina um comportamento linear-elástico que, dependendo do valor do deslocamento da articulação, desenvolverá maior ou menor força de restituição no aparelho de apoio. O segundo fator determina um comportamento perfeitamente plástico. Este mantém sempre o mesmo nível de força, não variando independentemente de a articulação desenvolver deslocamentos de maior ou menor magnitude (ver Figura 10).

Combinando o comportamento linear-elástico do raio efetivo com o comportamento perfeitamente plástico da componente do atrito, obtém-se o ciclo força-deslocamento típico de um FPS, representado na Figura 20.

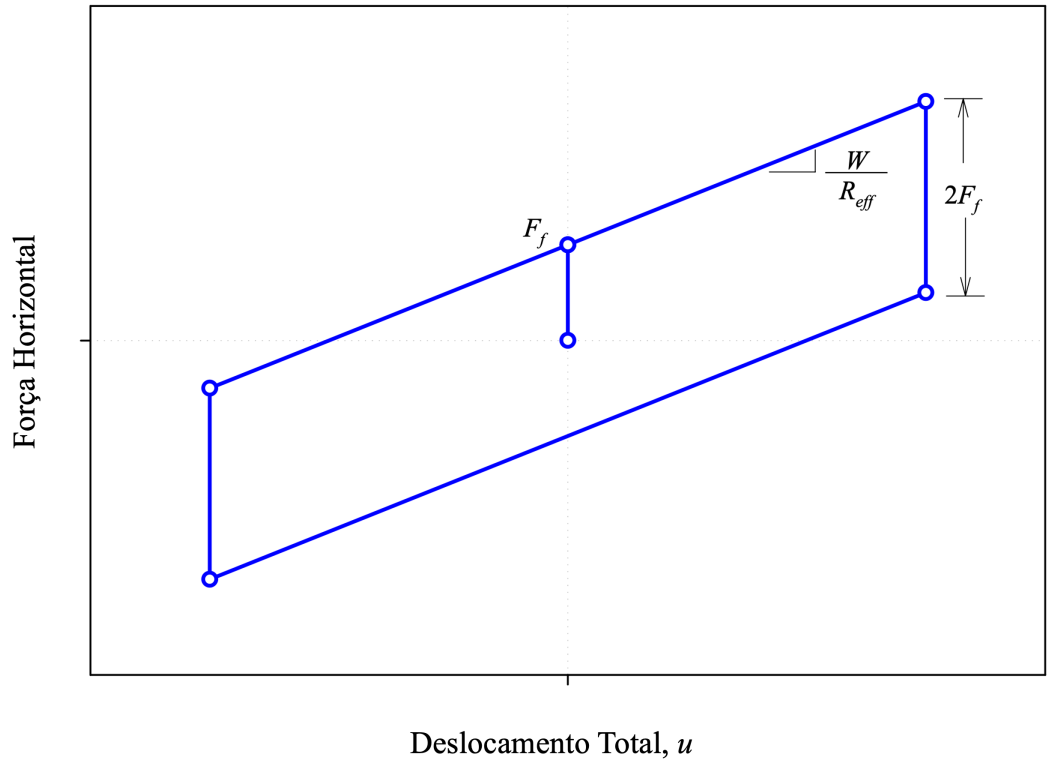


Figura 20 – Comportamento histerético de um FPS tradicional, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

3.3.2. DETERMINAÇÃO RIGOROSA DO RAIO EFETIVO DE UM FPS

Um aspeto fundamental do comportamento de FPS, independentemente da sua tipologia e construção, é que a sua superfície curva produz um movimento pendular da estrutura suportada.

A dedução apresentada de seguida é uma aplicação prática da teoria do movimento de um pêndulo, primeiramente apresentada por (Huygens, 1673) para a caracterização e definição dos princípios físicos de um movimento pendular. Este foi essencial para a definição de vários conceitos, sendo um deles o raio efetivo, característica do centro da massa que descreve um movimento pendular.

De acordo com a representação da Figura 21, à medida que o aparelho se desloca da posição A para a posição E, o ponto P, no centro da superfície de esférica, segue uma trajetória circular de movimento.

O movimento do ponto P, representativo da estrutura suportada, assemelha-se ao movimento de um pêndulo com um comprimento efetivo de raio igual a R_{eff}, com amplitude angular de α à medida que o apoio se desloca da posição A para E. Por conseguinte, é o raio efetivo, R_{eff}, que determina o período de isolamento de um FPS e, consequentemente, a rigidez que este exibe durante o movimento.

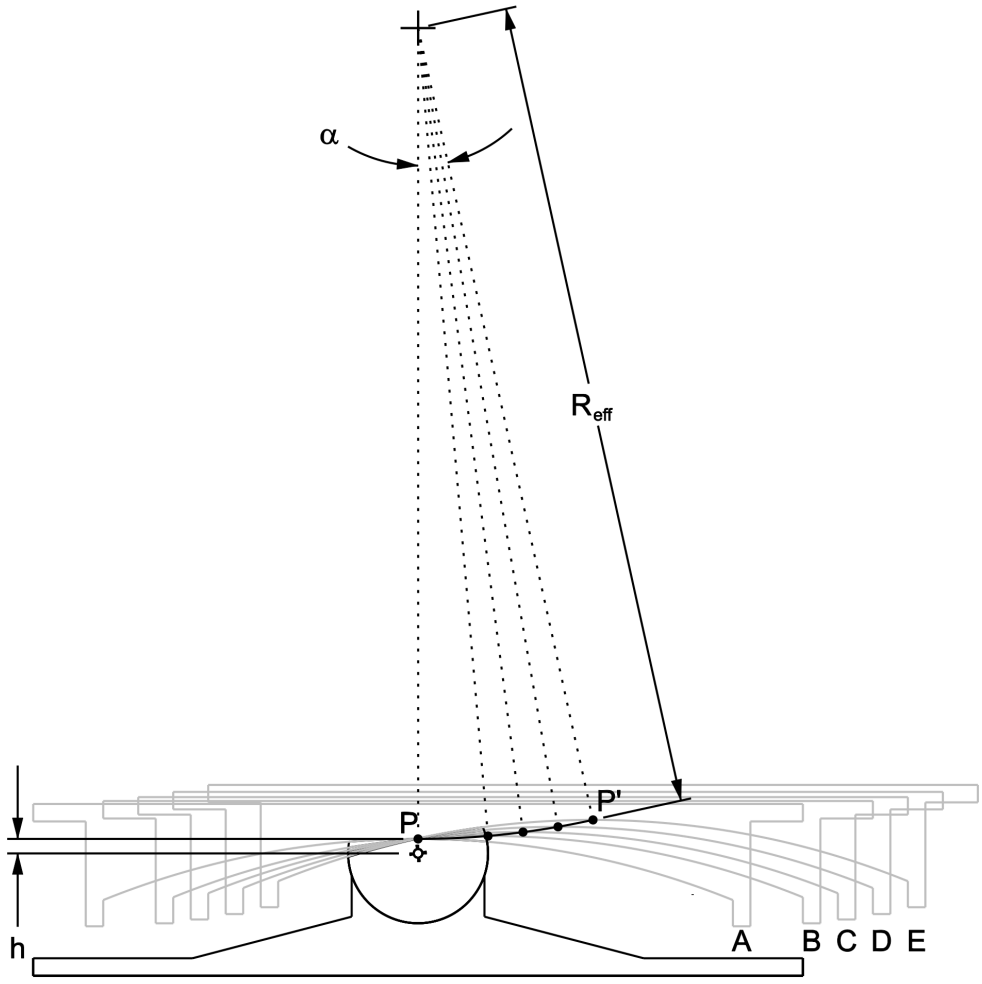


Figura 21 – Ilustração do movimento pendular da estrutura suportada, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

Presume-se que o prato inferior e superior se mantenham paralelos durante o deslocamento relativo lateral e que, portanto, o movimento ao longo da superfície de deslize é garantido pela rotação da articulação interna. Devido à sua construção, a articulação interna é fisicamente obrigada permitir a rotação em torno do seu centro geométrico e, por conseguinte, a dimensão h fica definida como a distância polar a partir deste centro até ao ponto de contacto da superfície de deslize esférica.

Considerando o CdR como a origem do movimento, e recorrendo também à Equação (21) as coordenadas do ponto P' no seu movimento circular ficam definidas por

$$x = R_{eff}\, sin\, \alpha;\; y = h + R_{eff}(1 - cos\, \alpha), \tag{24}$$

sendo o objetivo definir os valores de α e R_{eff} em função das constantes conhecidas R, h e θ, onde R representa o raio de curvatura da superfície côncava, h a distância entre o centro da articulação ao ponto de contacto com a superfície e θ o ângulo de rotação entre o centro da articulação e o CdR. Assume-se que estes parâmetros são conhecidos e determinados, já que R e h são parâmetros físicos e θ consegue ser fisicamente medido e definido.

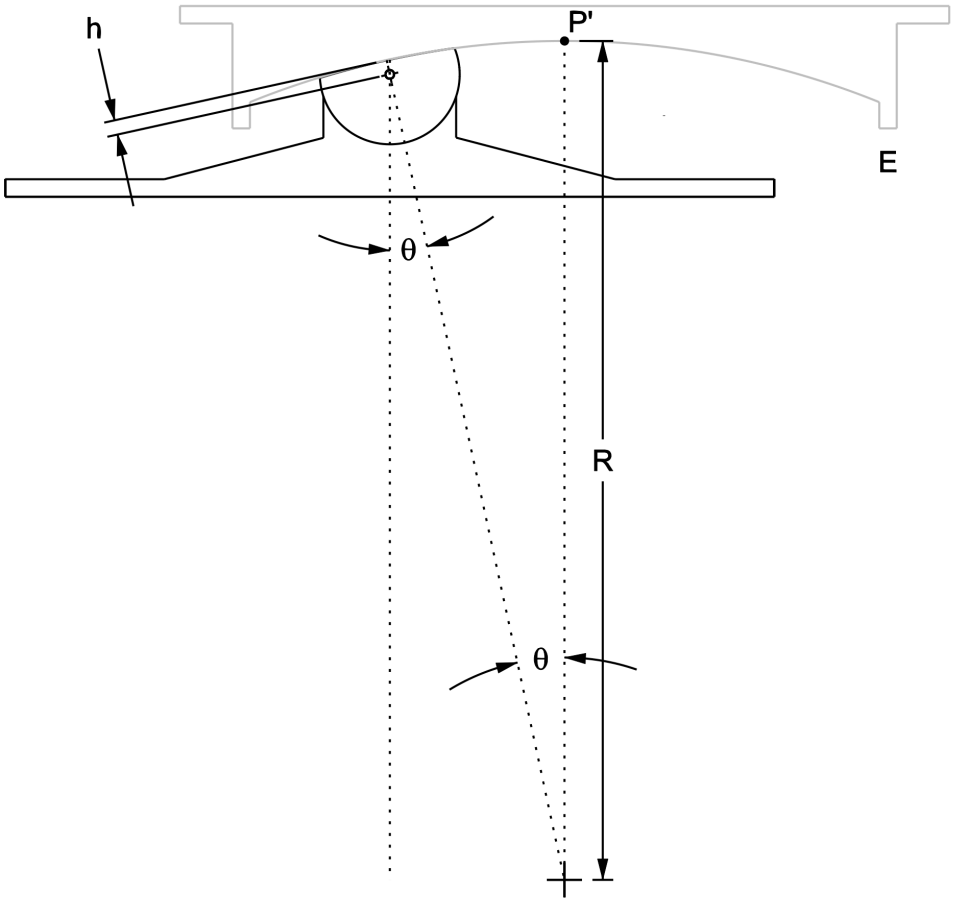


Figura 22 – Geometria deslocada do isolador com centro da articulação dentro da fronteira delineada pela superfície esférica, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

De igual modo, a Figura 22 representa uma forma alternativa de caracterizar o raio efetivo em termos de parâmetros já conhecidos. Tendo em conta esta metodologia, a geometria do apoio na configuração deformada define as coordenadas do ponto P' como

$$x = (R - h)\sin\theta;\ y = R - (R - h)\cos\theta \tag{25}$$

As duas incógnitas, α e R_{eff} podem ser determinadas ao resolver as equações do ponto P' a partir das duas definições alternativas, tornando-se num sistema de duas equações a duas incógnitas e, portanto, de solução conhecida ao determinar as coordenadas x e y, respetivamente.

$$x: R_{eff}\sin\alpha = (R - h)\sin\theta \tag{26}$$

$$y: h + R_{eff}(1 - \cos\alpha) = R - (R - h)\cos\theta \tag{27}$$

A partir da Equação (27) é possível escrever o raio efetivo como

$$R_{eff} = \frac{(R - h)(1 - \cos\theta)}{(1 - \cos\alpha)} \tag{28}$$

Ao substituir o raio efetivo como definido pela Equação (28) na formulação apresentada pela Equação (27), fica garantido que α e θ são iguais, definindo o raio efetivo como

$$R_{eff} = R - h, \tag{29}$$

De notar que as deduções efetuadas nas Equações (25) a (29) têm por base que o centro da articulação interna está dentro da fronteira delineada pela superfície esférica. Caso isso não aconteça, é necessário adaptar as coordenadas do ponto P' em função do novo centro da articulação interna, redefinindo as equações de equilíbrio. Ao realizar essas adaptações, resulta que o raio efetivo será

$$R_{eff} = R + h \tag{30}$$

Em suma, o raio efetivo R_{eff}, determinante para o período real da estrutura isolada pelo FPS, é igual a $R_{eff} = R - h$ quando o CdR se encontra delimitado pela fronteira da superfície de deslize, ou, caso o CdR esteja fora desta fronteira, $R_{eff} = R + h$.

Atendendo à geometria do SIP®–Adaptive apresentada na Figura 18, observa-se que o raio da articulação interna é bastante superior ao raio esquemático da Figura 21. Quer isto dizer que, muito embora não tenha sido determinada a posição do centro da articulação rotulada do aparelho de apoio, é razoável presumir que o centro deste se irá encontrar fora da superfície de deslize, sendo o raio efetivo determinado pela Equação (29).

3.3.3. EFEITO DO CONTACTO COM O BATENTE

Na maioria das aplicações de FPS, a articulação só irá entrar em contacto com o batente em situações excecionais, típicas da falta de capacidade de deslocamento ou de eventos sísmicos atípicos. O batente consiste num mecanismo de segurança existente nos FPS para evitar deslocamentos excessivos, preservando a estabilidade do isolador sísmico.

Também, no caso de DFPS como o SIP®–Adaptive, é da maior importância que ocorra o contacto entre a articulação e o batente, de forma controlada, de modo a garantir um comportamento normal deste tipo de apoio. Este mecanismo é usado para transferir o movimento entre superfícies – interrompendo numa e iniciando noutra, caso o mesmo não tenha ocorrido antes.

Quando a articulação entra em contacto com o batente, há uma mudança na origem da força que se opõe ao movimento. Esta deixa de ser caracterizada pela força do atrito e pela força gravítica e passa a atuar no batente. No instante em que ocorre o contacto com o batente, o deslocamento horizontal é $u = d$ e a força horizontal transmitida ao aparelho, F_{dr}, é dada por

$$F_{dr} = F = \frac{W}{R_{eff}} d + F_f \tag{31}$$

Com o aumento da força para além de F_{dr}, a força de restituição adicional, F_r, do apoio que atua no batente, garantindo que o equilíbrio é satisfeito, é dada pela Equação (32) tal que

$$F - F_{dr} = F_r = k_{dr}(u - d), \tag{32}$$

onde k_{dr} representa a rigidez horizontal do batente. Em termos físicos, F_r representa a força que é transmitida para o batente após o contacto que dependerá do deslocamento relativo adicional, $u - d$, que ocorre sobre o batente.

Após o contacto com o batente, a energia elástica acumulada vence as forças de inércia, iniciando-se o movimento no sentido contrário, onde ocorre a reversão do deslize, assim que o apoio descarregar uma força total de $F_r + 2F_f$ para $F_{dr} - 2F_f$.

Uma das formas mais simples de modelar o contacto com o batente é assumir que este tem um comportamento rígido-elástico, tal que $k_{dr} \to \infty$, sendo os caminhos de carga/descarga iguais. Este pressuposto é razoável para FPS que sejam pouco solicitados, ou mesmo aparelhos de apoio com um batente monoliticamente fundidos com a superfície de deslize côncava.

Tal é o caso do aparelho de apoio usado na plataforma petrolífera de Sakhalin, que pela dimensão da estrutura a suportar, necessitou que o batente fosse monoliticamente conectado (Clarke et al., 2005). Nestes cenários, as forças aplicadas ao batente são bastante inferiores à capacidade resistente do mesmo, atuando este como um limite rígido. Este tipo de comportamento é expresso pela Figura 23 (ver página 38).

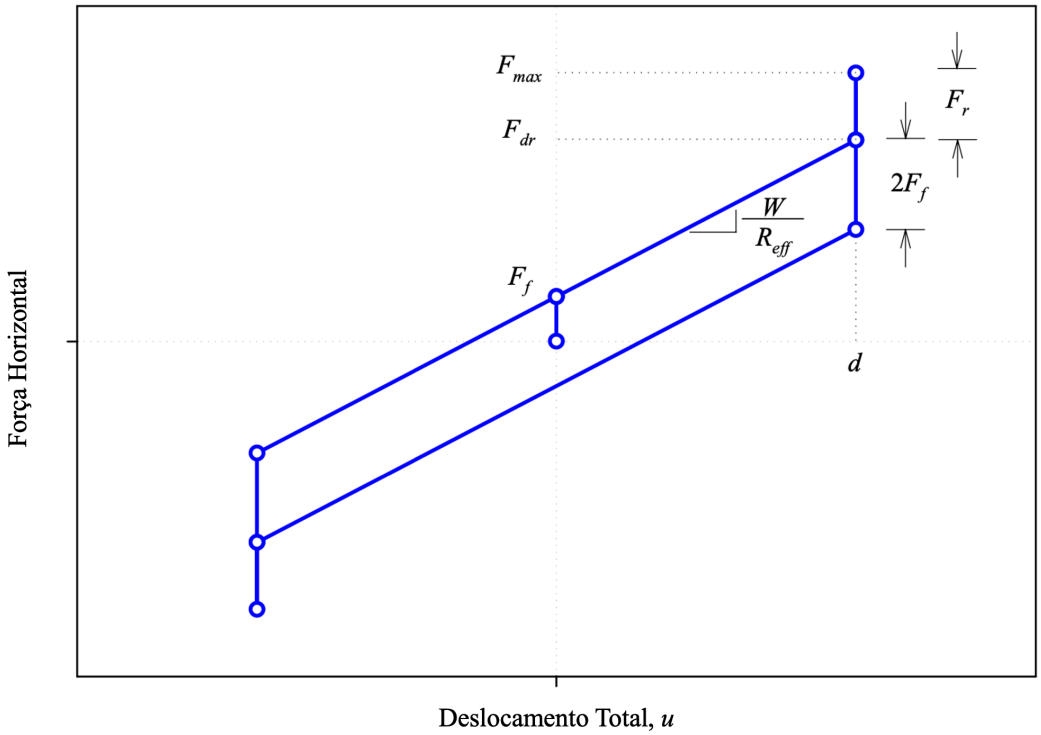


Figura 23 – Ciclo de histerese de um FPS quando a articulação atingiu um batente com comportamento rígido-elástico, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Todavia, a larga maioria dos aparelhos de apoio não exibe um comportamento rígido-elástico perfeito. As forças de contacto no batente tendem a ser relativamente elevadas em virtude da rigidez do batente, originando-lhe um comportamento plástico, com deformações no mesmo. Este cenário é expectável para apoios que estejam sujeitos a solicitações bastante elevadas, podendo nestes o batente ser soldado ao prato da superfície inferior.

Nestes cenários, uma modelação que capta o comportamento inelástico com rigidez finita após o contacto é mais adequada. Este comportamento é demonstrado na Figura 24. Zayas et al. (1989) mostraram que este modelo histerético tende a produzir previsões analíticas da resposta estrutural mais aproximadas do que o modelo rígido-linear.

Em determinadas aplicações de FPS, a presença do batente com comportamento rígido originou uma sobrestimação das forças de corte devido ao desenvolvimento abrupto das mesmas no modelo histerético (ver Figura 23), dando origem a previsões incorretas (Tsai, 2012). Também, por consequência da sobrestimação das forças de corte, a previsão da energia dissipada pelo sistema de isolamento sísmico era inferior à observada, não dando origem a um modelo de análise fiável (Gino et al., 2023).

Em todo o caso, o SIP®–Adaptive não define nenhum valor concreto para a rigidez do batente, k_{dr}. Porém, Weber et al. (2016), num estudo comparativo do desempenho entre um DFPS otimizado vs. um TFPS otimizado, definem a rigidez do batente como duas ordens de magnitude superior à rigidez gerada pelo raio efetivo de curvatura, $k_{dr} = 10^2 \times 1/R_{eff}$.

Esta consideração induz alterações no modelo histerético desenvolvido nas secções 3.4 e 3.5. No entanto, esta variação é relativamente diminuta quando comparada ao comportamento histerético global do SIP®–Adaptive. Não esquecendo que um modelo rígido tende a induzir uma sobrestimação da força de corte e uma subestimação da energia dissipada, este continuará a ser utilizado de ora em diante nas

formulações apresentadas, ao considerar uma rigidez cem vezes superior à da superfície de deslize, é razoável assumir que o batente tem um comportamento rígido-elástico, sem que isso conduza a resultados com menor precisão.

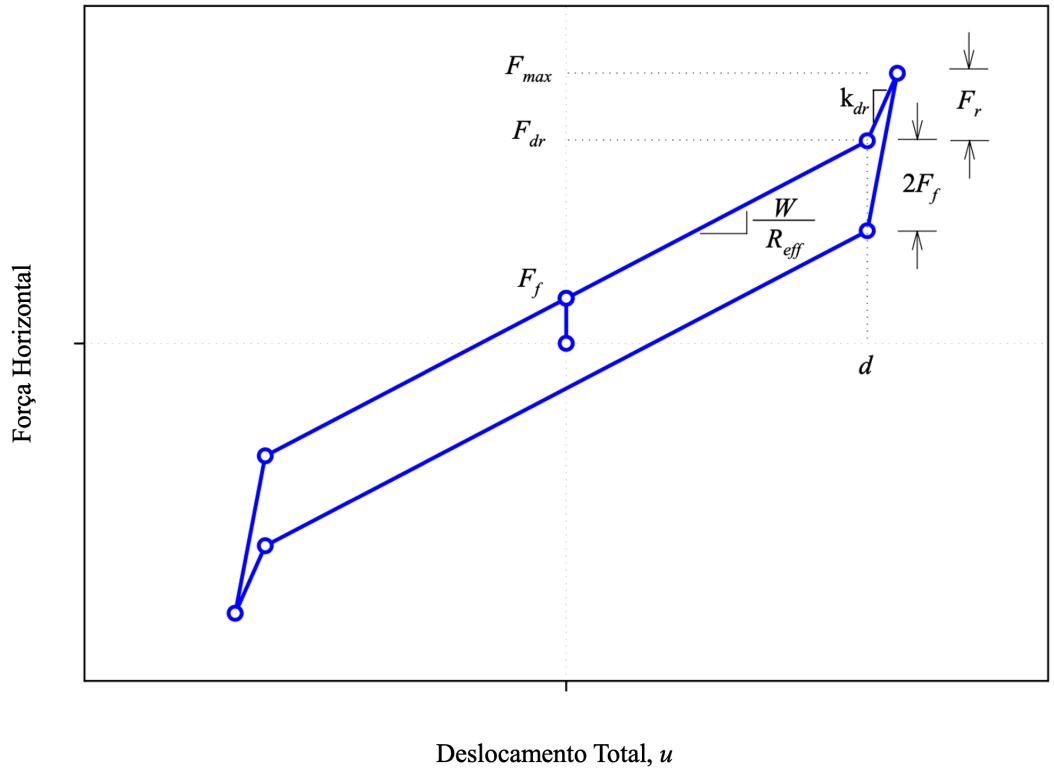


Figura 24 – Ciclo de histerese de um FPS quando a articulação atingiu um batente com comportamento rígido-elástico elevado, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

3.3.4. Efeito da Rotação da Base num FPS

A relação força-deslocamento de um FPS é afetada com a inclinação da superfície de deslize. As inclinações existentes do prato de suporte são acomodadas pela rotação da articulação interna e não afetam o comportamento final. Porém, até ao momento foi pressuposto nas equações de equilíbrio que o FPS foi instalado sem qualquer inclinação, estando perfeitamente nivelado.

Na prática, tolerâncias de ± 0.01 radianos são permitidas para a instalação de aparelhos de apoio segundo a AASHTO (2014) ou mesmo de ± 0.001 radianos, segundo as normas europeias para o transporte, armazenamento e instalação de aparelhos de apoio esféricos (CEN, 1997, 2004).

Com o tempo, inclinações adicionais podem aparecer devido à existência de assentamentos diferenciais na subestrutura ou mesmo de fenómenos de fluência da estrutura de suporte. Estes têm uma índole acidental que origina variações no comportamento histerético. O objetivo de estudo deste trabalho assenta na possibilidade de provocar uma rotação na base de um FPS para atingir objetivos de desempenho concretos numa reabilitação estrutural. Por este mesmo motivo, é fundamental investigar o efeito destas rotações no comportamento de um isolador friccional, como o SIP®–Adaptive.

O impacto da instalação desnivelada de FPS foi primeiro estudada por Constantinou et al. (1991), de forma experimental, com um aparelho de apoio friccional com capacidade de restituição. Mais tarde,

Mosqueda et al. (2004) formulou o efeito desta rotação no comportamento de FPS de uma forma generalizada, apresentada de seguida. Estes trabalhos possibilitaram as deduções desenvolvidas por Constantinou e Fenz (2008) para DFPS (ver Secção 3.5), como também estudos realizados por Becker e Mahin (2013) para TFPS.

A investigação dos efeitos da inclinação consistiu em dotar um FPS de uma rotação no sentido anti-horário, τ, em torno de um ponto representativo do centro da superfície esférica, C_o, como observável na Figura 25. Devido a esta rotação, o ponto de equilíbrio do pêndulo, correspondente com o centro da superfície esférica, C_o, desloca-se do ponto C_o para o ponto C_r – novo ponto de equilíbrio da superfície esférica.

Este desvio induz uma mudança na posição de equilíbrio da articulação, provocando um deslocamento residual, u_r, indicado na Figura 25, que fica definido por:

$$u_r = -R_{eff}\, sin\, \tau, \tag{33}$$

De onde se destaca que este valor é negativo dada a rotação ter um sentido anti-horário, provocando um deslocamento negativo consoante o sistema de eixos definido.

A relação força-deslocamento pode ser obtida em função do deslocamento da articulação na superfície de deslize, semelhante ao método utilizado na Secção 3.3.1 (ver Figura 19). À medida que articulação de desloca em direção ao novo ponto de equilíbrio, C_r, esta desenvolve uma rotação de θ_r. Deste modo, as equações de equilíbrio na direção x e y, Equações (34) e (35), respetivamente, que definem o comportamento presente na Figura 25 são:

$$S\, sin\, \theta_r + F_f\, cos\, \theta_r = 0 \tag{34}$$

$$S\, cos\, \theta_r - F_f\, sin\, \theta_r = 0, \tag{35}$$

onde as forças F, W, S e F_f são definidas tal como foi descrito na Secção 3.3.1 – agora em função do ângulo θ_r. Pela Figura 25, θ_r fica definido como:

$$(u - u_r) = R_{eff}\, sin\, \theta_r \tag{36}$$

A vantagem em definir o ângulo θ_r desta forma assenta no facto da relação força-deslocamento ficar definida em função do ponto de equilíbrio original, C_o. Também, a Equação (36) tem sinal negativo pela rotação no sentido anti-horário em relação ao sistema de eixos adotado. Assumindo uma inclinação da base no sentido horário, θ_r ficaria definido pela Equação (37)

$$(u + u_r) = R_{eff}\, sin\, \theta_r \tag{37}$$

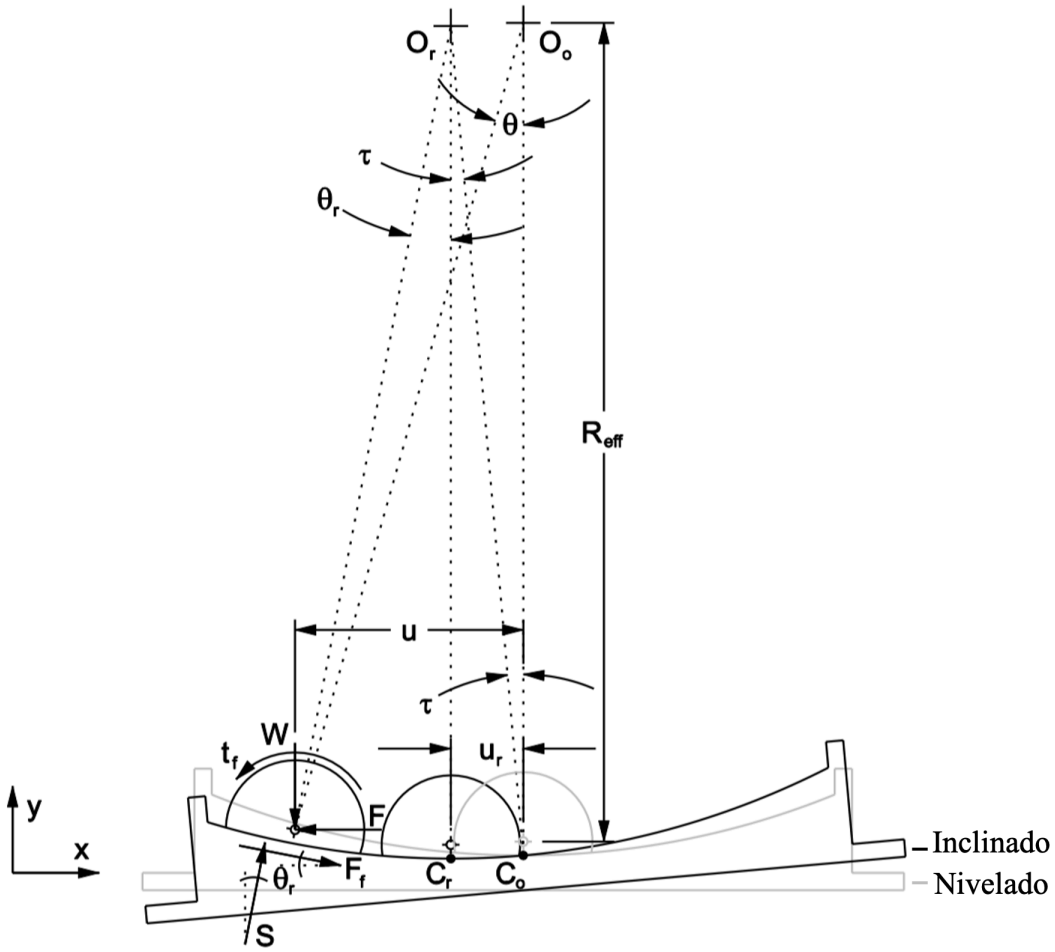


Figura 25 – Diagrama de corpo livre de um FPS com a base inclinada de τ, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Tendo em conta as relações geométricas descritas e as equações de equilíbrio apresentadas em 3.3.1, realizando as adaptações necessárias realizar aos ângulos θ e τ, a relação força-deslocamento fica definida, para um deslize da articulação para a esquerda como:

$$F = \frac{W}{R_{eff}} u + (\mu - \tau) W \tag{38}$$

e para deslize da articulação para a direita:

$$F = \frac{W}{R_{eff}} u + (\mu + \tau) W \tag{39}$$

As Equações (38) e (39) demonstram que a inclinação da base origina um incremento de força ao ciclo de histerese total com magnitude τW, sem que isto tenha qualquer efeito na rigidez durante o deslize.

Fisicamente, este aumento no ciclo força-deslocamento é uma consequência direta do desvio da posição de equilíbrio, salientando que o efeito da rotação não altera a condição de início do movimento, dependente do coeficiente de atrito, μ. Esta mantém-se igual ao apresentado na Secção 3.3.1, $F_f = \mu W$.

Assim, resulta desta alteração um desvio aparente vertical que resulta do desnível provocado pela rotação, como mostra a Figura 26. Este desvio não existiria se o ciclo apresentado não fosse gerado em função da nova posição inicial, C_r, provocada pelo deslocamento residual apresentado na Equação (33).

Continuando com este raciocínio, de modo que o FPS inclinado atinja a capacidade de deslocamento inicial de $\pm D$, é necessário atender a que a amplitude total de deslocamento do apoio é agora $D \pm u_r$, dependendo da direção em que a articulação desliza e da orientação da rotação da base.

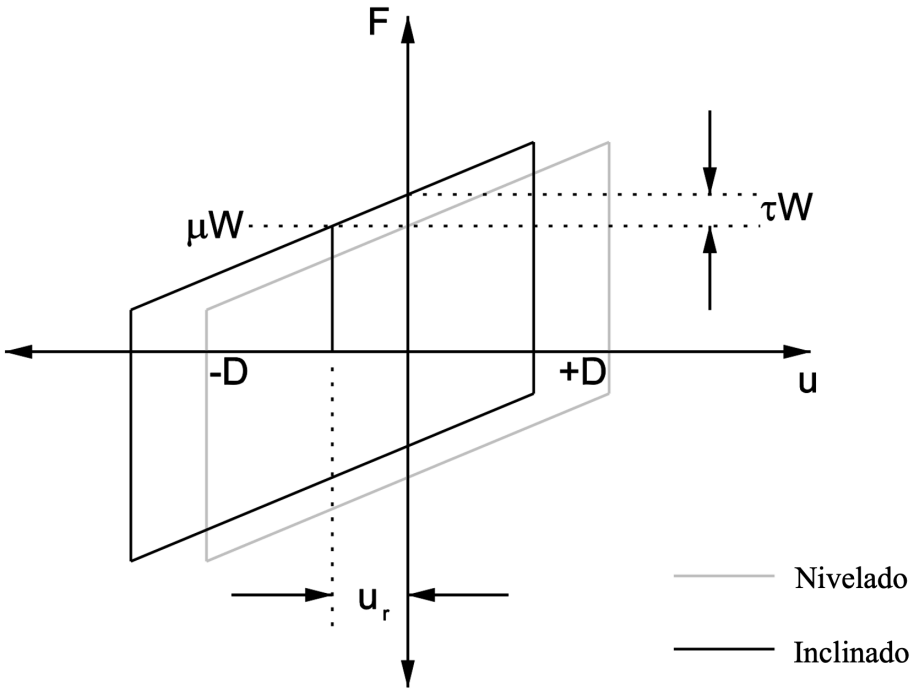


Figura 26 – Desvio no ciclo Força-Deslocamento de um FPS causado pela inclinação da superfície de deslize, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

As Equações (38) e (39) são válidas para um FPS em que a inclinação segue um sentido anti-horário, independentemente se esta rotação foi aplicada numa superfície cuja concavidade aponta para cima ou para baixo. Atendendo à superfície dotada de uma inclinação da base no sentido anti-horário presente na Figura 27, há uma dificuldade acrescida em deslizar a articulação interna para a direita em relação a realizar o mesmo movimento para a esquerda.

Esta dualidade é particularmente visível na alteração do comportamento histerético, onde mais força é necessária para vencer deslocamentos para a direita, o que resulta num deslocamento ascendente de todo o ciclo força-deslocamento (ver Figura 27).

Por conseguinte, no sentido contrário, é necessária menos força para que a articulação deslize, resultando no mesmo deslocamento ascendente. A mesma analogia pode ser efetuada para FPS com uma rotação no sentido horário, que resulta num deslocamento descendente do ciclo força-deslocamento.

Deste modo, o efeito da rotação num FPS é o de introduzir uma componente uniforme e constante na força gravítica com magnitude τW, tal que esta ou incrementa ou reduz a força horizontal desenvolvida pelo aparelho de apoio. Este efeito terá maior relevância na Secção 3.5 quando aplicado ao SIP®–Adaptive, onde serão salientadas as alterações que provoca no comportamento deste dispositivo.

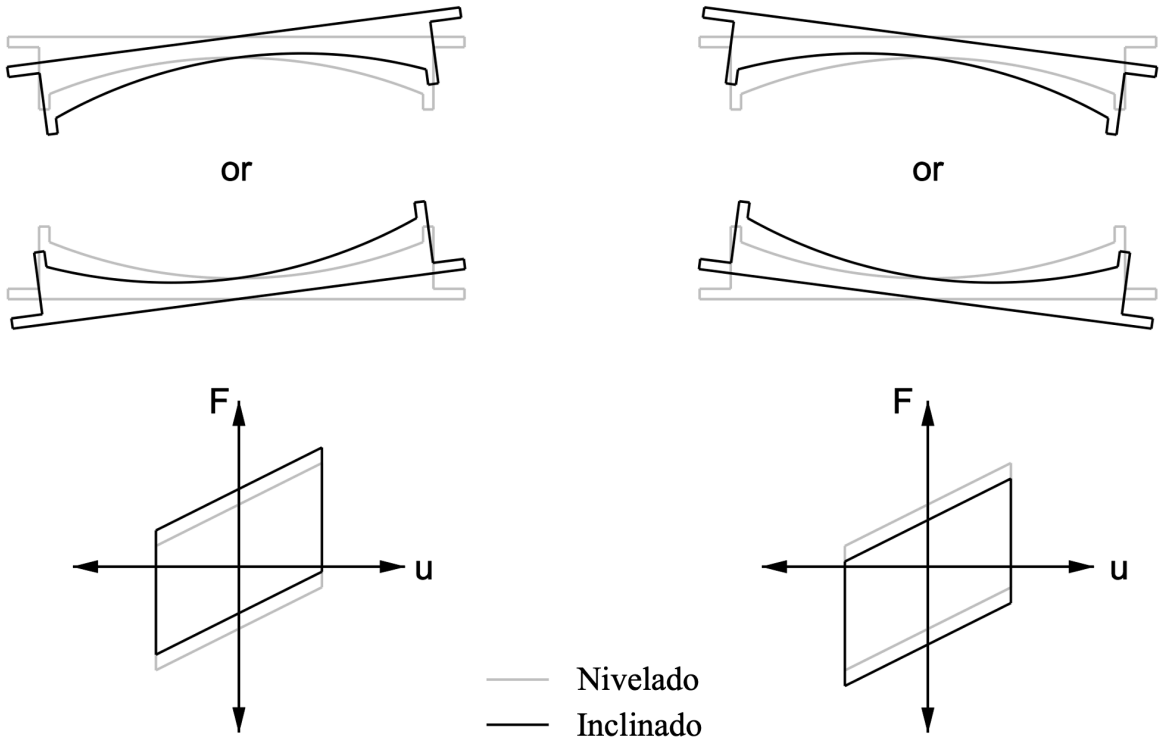


Figura 27 – Efeito de diferentes tipos de inclinações no comportamento histerético de FPS, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

3.4. FORMULAÇÃO DA HISTERESE PARA O SIP®–ADAPTIVE

3.4.1. INTRODUÇÃO: REGIMES DE DESLIZE E A SUA SEQUÊNCIA

O comportamento adaptativo de isoladores sísmicos friccionais com múltiplas superfícies resulta da combinação de diferentes configurações de deslize que podem ocorrer nas diferentes superfícies de deslize esféricas. Para se poder categorizar o comportamento global da interação entre as diferentes configurações, procurou seguir-se uma metodologia que classifica o movimento em diferentes regimes de deslize. Para cada um destes regimes de deslize, as equações de equilíbrio e o comportamento histerético são definidos em função do equilíbrio do apoio quando deformado, como efetuado na Secção 3.3.

As formulações apresentadas daqui em diante foram concebidas para um cenário geral em que os coeficientes de atrito, capacidades de deslocamento e raios efetivos de curvatura eram diferentes entre si. No caso de configurações com valores iguais para estes parâmetros, o comportamento final pode ser obtido ao realizar adaptações simples às formulações gerais apresentadas (Constantinou, 2004; Fenz & Constantinou, 2006).

A sequência entre os regimes de deslize é definida em função do coeficiente de atrito de cada superfície de deslize e da relação entre a capacidade de deslocamento e o raio de curvatura efetivo da superfície onde ocorre o deslize.

Considerando um aparelho de apoio teórico, o deslize inicia-se na concavidade de raio R_i, assim que a força horizontal transmitida pelo apoio excede a força de atrito dessa superfície, F_{fi}. Deste modo, o deslize irá sempre ocorrer primeiro na superfície de deslize que tenha a menor força de atrito e, por consequência, o menor coeficiente de atrito, μ_i. Dependendo do número de superfícies de deslize, a sequência dependerá sempre dos valores relativos do atrito entre superfícies e, no limite, das sucessivas capacidades de deslocamento de cada prato.

O deslize irá parar assim que o deslocamento relativo na última superfície de deslize, u_i, seja igual à capacidade de deslocamento, d_i – adquirindo uma força horizontal na articulação de magnitude F_{dri}, definida de acordo com a Equação (31).

Adicionalmente, pode ainda haver um cenário onde o deslize passa a ocorrer no prato $i+1$ sem que o contacto no batente ocorra. Para esta situação, com o movimento crescente da articulação, o incremento das forças de atrito e de rigidez podem ser superiores à força exterior aplicada.

Quer isto dizer que pode haver um aparelho hipotético onde a transição entre os vários regimes de deslize ocorre sem contacto no batente da superfície i. Muito embora este cenário não seja estudado no presente, representa o comportamento força-deslocamento ideal para os aparelhos de apoio de múltiplas superfícies.

Em suma, a sequência do deslize entre as várias superfícies de um DFPS pode ser determinada ao ordenar os valores relativos de F_{fi} e F_{dri} para todas as superfícies de deslize em análise. A seleção dos parâmetros de base é feita de modo que se obtenha um comportamento desejável do aparelho de apoio.

De notar que a metodologia apresentada foi elaborada para um DFPS com comportamento adaptativo. O SIP®–Adaptive enquadra-se nesta categoria de isoladores sísmico friccionais, podendo as formulações descritas nas próximas secções ser utilizadas, sem induzir qualquer tipo de erro na descrição do comportamento histerético do mesmo.

3.4.2. REGIMES DE DESLIZE DE UM DFPS ADAPTATIVO

3.4.2.1. Regime de Deslize I

Partindo do repouso, ao aplicar uma força horizontal, F, e assumindo que o prato inferior tem um coeficiente de atrito menor que o prato superior ($\mu_1 < \mu_2$), o deslize irá começar na superfície 1 quando $F = F_{f1}$, obtendo a configuração deformada presente na Figura 28.

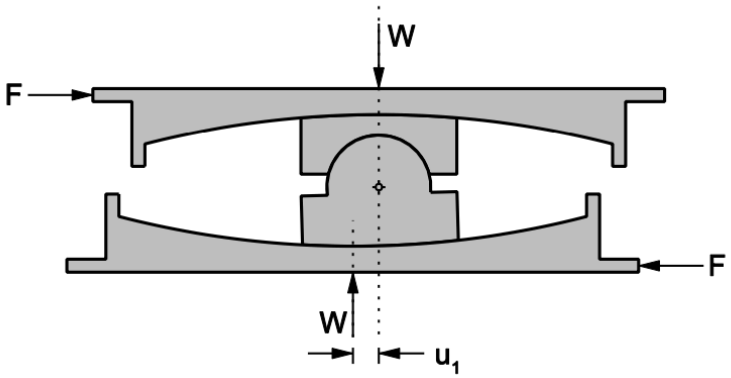


Figura 28 – Configuração deformada de um DFPS no Regime de Deslize I, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

Tendo por base o diagrama de corpo livre apresentado na Figura 29, é possível efetuar as seguintes considerações ao garantir o equilíbrio na direção vertical e horizontal, respetivamente.

$$W + F_{f1}\, sin\, \theta_1 - S_1\, cos\, \theta_1 = 0 \tag{40}$$

$$F_{f1}\, cos\, \theta_1 + S_1\, sin\, \theta_1 - F = 0 \tag{41}$$

A partir da geometria deformada da Figura 28, o deslocamento relativo da articulação relativamente à superfície 1, u_1, é:

$$u_1 = R_{eff1}\, sin\, \theta_1 \tag{42}$$

Atendendo à metodologia apresentada anteriormente – ver Secção 3.3.1 e Equação (23) – a relação força-deslocamento desenvolvida pelo deslize da articulação na superfície 1 é idêntica a esta. Ao combinar as Equações (40) e (41) com a Equação (42), e considerando que o deslocamento u_1 é diminuto quando comparado com o raio de curvatura efetivo, R_{eff1}, tal que $cos\, \theta_1 \approx 1$, obtém-se a seguinte relação força-deslocamento:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} u_1 + F_{f1} \tag{43}$$

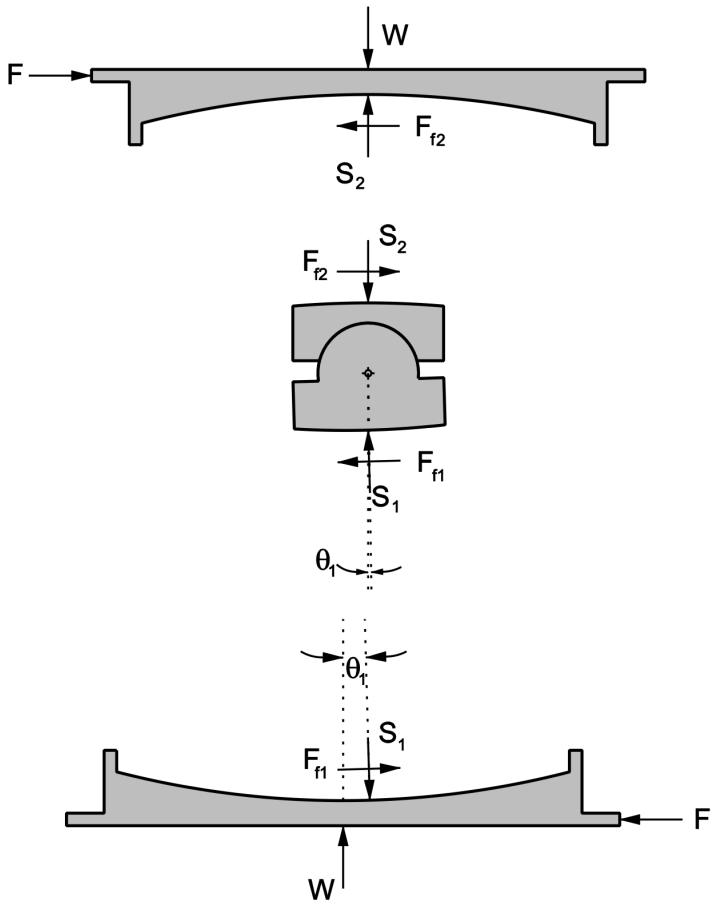


Figura 29 – Diagrama de corpo livre de um DFPS no Regime de Deslize I, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

e, uma vez que ainda não ocorreu deslize na superfície 2, o deslocamento dessa superfície, u_2, será nulo e a relação força-deslocamento global pode ser expressa a partir da Equação (44), atendendo a que o deslocamento global é caracterizado por $u = u_1 + u_2$.

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} u + F_{f1} \tag{44}$$

A Equação (44) define o comportamento histerético rígido-linear com rigidez pós-elástica da superfície inferior, idêntico ao de um FPS, como observável na Figura 30. Esta rigidez é inversamente proporcional ao raio de curvatura efetivo da superfície de deslize, exibindo uma força igual à força de atrito desse mesmo prato.

O Regime de Deslize I irá ocorrer enquanto a força horizontal desenvolvida for inferior à força de atrito da superfície 2, F_{f2}. Nesse momento, o deslocamento desenvolvido será u^*, como se observará na Secção 3.4.2.2, iniciando-se o Regime de Deslize II.

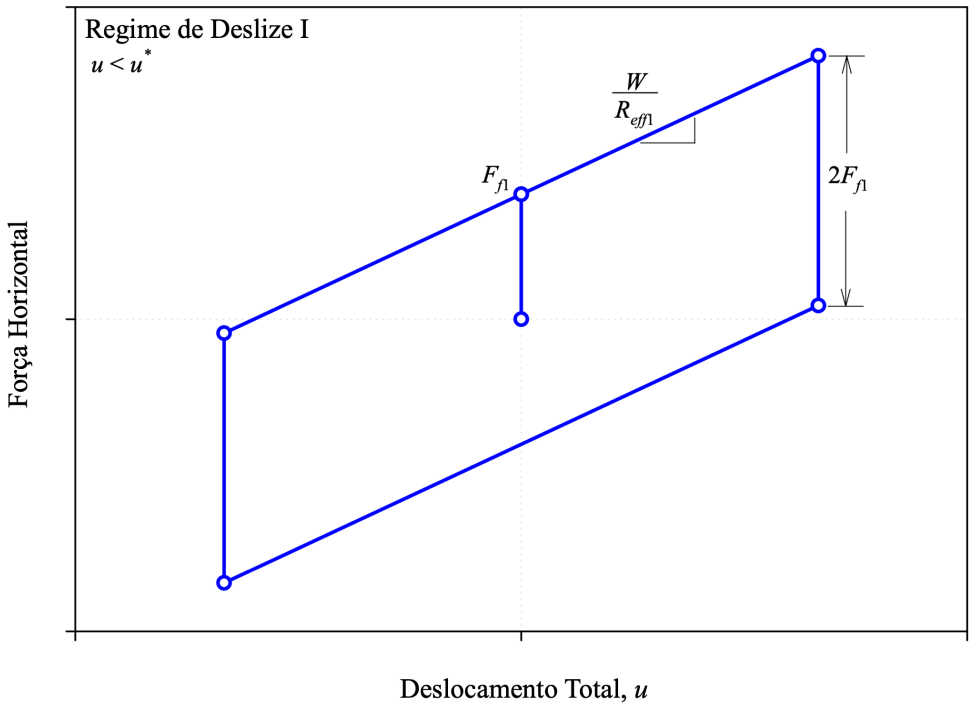


Figura 30 – Ciclo de Histerese de um DFPS no Regime de Deslize I, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

3.4.2.2. Regime de Deslize II

Com o aumento da força horizontal no apoio, o deslize inicia-se na superfície superior quando $F = F_{f2}$, deixando de haver deslize numa única superfície e dando começo ao deslize duplo. Como visto no final da Secção 3.4.2.1, este irá ocorrer para um deslocamento u^*, definido ao resolver a Equação (44) em ordem ao deslocamento quando $F = F_{f2}$. Deste modo,

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1)R_{eff1} \tag{45}$$

Ao comparar o deslocamento da superfície 1, na Figura 28 com a Figura 31 (ver página 48), é possível observar que a única mudança que ocorre é um aumento no deslocamento do prato inferior. Este por sua vez, mantém-se inalterado no que toca ao seu funcionamento, pelo que a Equação (43) continua a regular o movimento desta superfície.

Atendendo ao diagrama de corpo livre da superfície 2, presente na Figura 32 e, aplicando a mesma metodologia que foi aplicada para a superfície 1 (ver Secção 3.4.2.1), é possível obter a relação presente na Equação (46) para a superfície 2:

$$F = \frac{W}{R_{eff2}}u_2 + F_{f2} \tag{46}$$

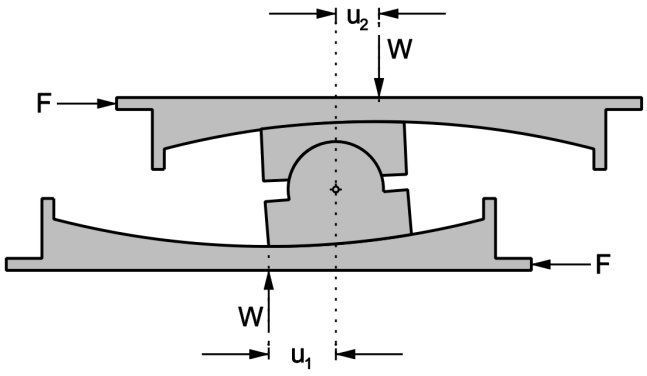


Figura 31 – Configuração deformada de um DFPS no Regime de Deslize II, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

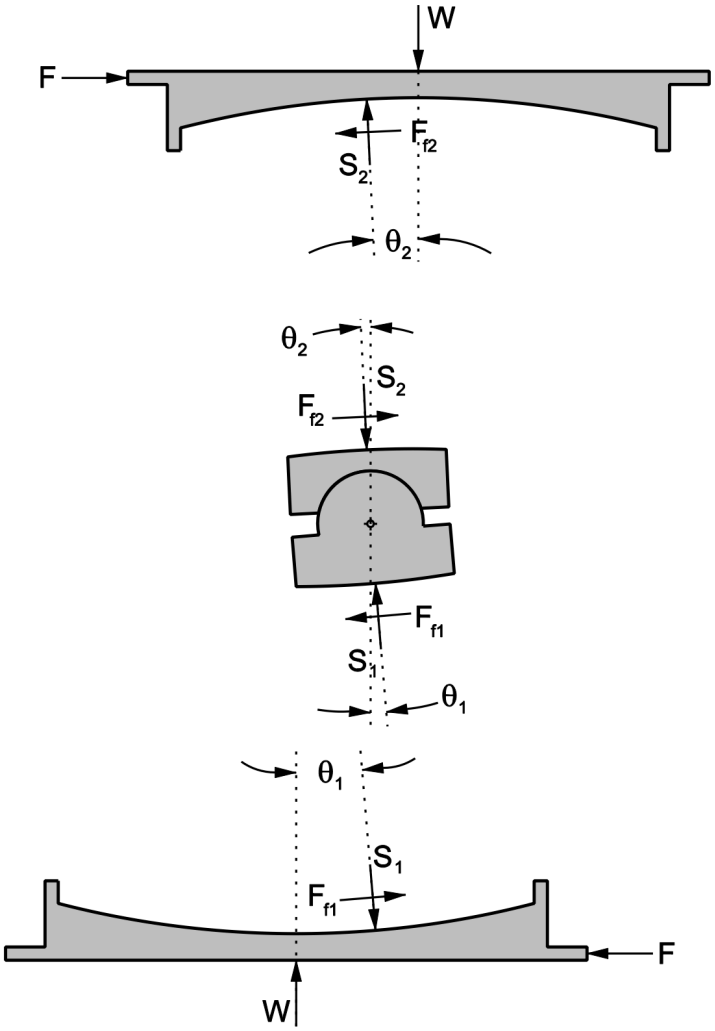


Figura 32 – Diagrama de corpo livre para um DFPS no Regime de Deslize II, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

De um ponto de vista individual, a Equação (43) e a Equação (46), definem o comportamento força-deslocamento das superfícies 1 e 2, respetivamente. Porém, o comportamento global, considerando o deslize duplo, depende do deslocamento total do isolador sísmico, $u = u_1 + u_2$, dependente dos deslocamentos relativos de cada superfície.

Ao incorporar as relações força-deslocamento desenvolvidas na Equação (43) e (46), é possível obter a relação força-deslocamento em deslize duplo, presente na Equação (47):

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} u + \frac{F_{f1} R_{eff1} + F_{f2} R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \tag{47}$$

Deste modo, tendo em conta a relação força-deslocamento individual de cada superfície, o deslocamento individual de cada superfície é dado pelas Equações (43) e (46), de modo a obter

$$u_1 = \left(\frac{F - F_{f1}}{W}\right) R_{eff1} \tag{48}$$

$$u_2 = \left(\frac{F - F_{f2}}{W}\right) R_{eff2} \tag{49}$$

A Equação (47) foi originalmente apresentada por *Tsai et al.* (2005; 2010) em termos do raio de curvatura nominal, sem descontar a distância entre o centro geométrico da articulação e o local de contacto com a superfície de deslize. Em todo o caso, esta equação só é válida quando ocorre deslize duplo, para a qual se obtém o comportamento histerético presente na Figura 33.

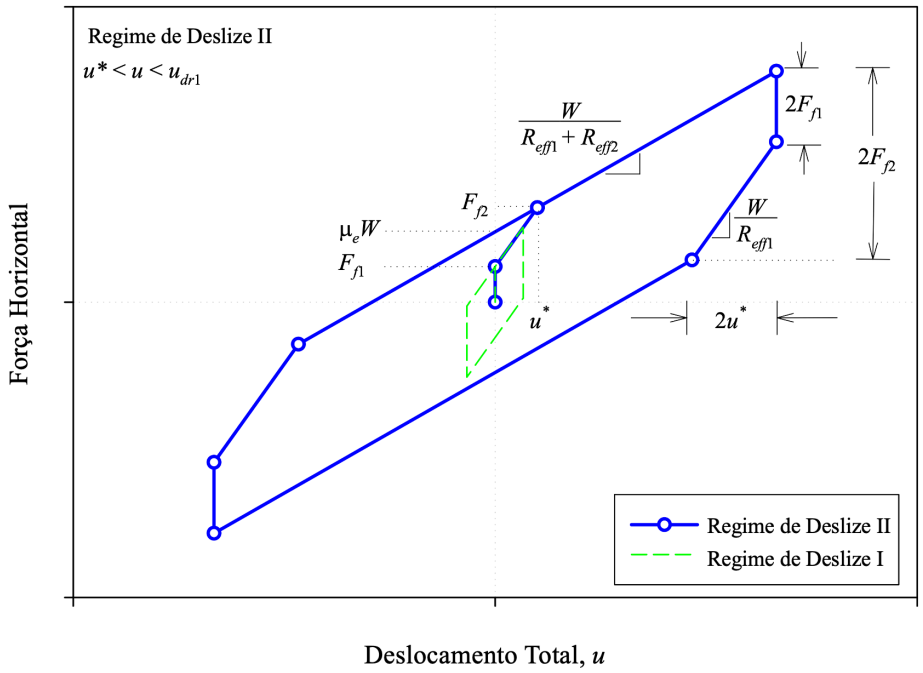


Figura 33 – Comportamento Histerético de um DFPS no Regime de Deslize II, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Este comportamento histerético tem a particularidade de ser distinto quando há reversão do movimento, quando comparado com o apresentado para o Regime de Deslize I (ver Figura 30).

De igual modo, a reversão do movimento irá ocorrer na superfície 1 quando o isolador tiver descarregado um total de $2F_{f1}$, prosseguindo o deslize na superfície inferior durante uma distância de $2u^*$. A partir deste ponto, a superfície 2 terá descarregado um total de $2F_{f2}$, voltando a iniciar-se o deslize duplo no isolador sísmico.

O comportamento obtido é denominado de rígido-bilinear, demonstrando uma redução na rigidez total quando o deslize muda de apenas uma superfície para as duas superfícies em conjunto. Neste momento, quando o deslocamento é $u = 0$, a força exibida pelo aparelho de apoio, no Regime de Deslize II é $\mu_e W$, sendo μ_e o coeficiente de atrito efetivo, definido conforme a Equação (50)

Dividindo o segundo termo da Equação (47) pela carga vertical atuante no aparelho, W, se obtém o coeficiente de atrito efetivo, μ_e

$$\mu_e = \frac{\mu_1 R_{eff1} + \mu_2 R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \tag{50}$$

o que demonstra que há um aumento na força que o isolador sísmico exibe quando ocorre a mudança do Regime de Deslize I para o Regime de Deslize II, muito embora a rigidez se reduza. De uma forma simplificada, este ponto representa o coeficiente de atrito que uma superfície arbitrária teria com a junção das características das superfícies 1 e 2, respetivamente.

De notar, também, que este regime irá ocorrer até ao momento em que o deslocamento atinge o batente, u_{dr1}. Este ponto será analisado em maior detalhe na Secção 3.4.2.3, tipicamente, por se esgotar a capacidade de deslocamento do prato inferior em deslize duplo.

Todavia, é possível atingir este deslocamento antes do deslize se iniciar no prato superior. Este tipo de comportamento não é desejável para a maioria dos cenários de dimensionamento – constituindo uma transição de comportamento brusca – e, por esse mesmo motivo, não será abordado neste trabalho.

3.4.2.3. Regime de Deslize III

Com o início do deslize duplo, este irá ocorrer até ao momento em que haja contacto com o batente da superfície inferior, dr_1. Em termos de capacidade de deslocamento, este ponto irá ocorrer no instante em que a articulação atinge o batente do prato inferior, para um deslocamento u_{dr1} de

$$u_{dr1} = d_1 \left(1 + \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}}\right) - (\mu_2 - \mu_1) R_{eff2} \tag{51}$$

A partir do momento em que o deslocamento apresentado na Equação (51) é vencido, o deslize só passa a ocorrer na superfície 2, apresentando a configuração deformada da Figura 34.

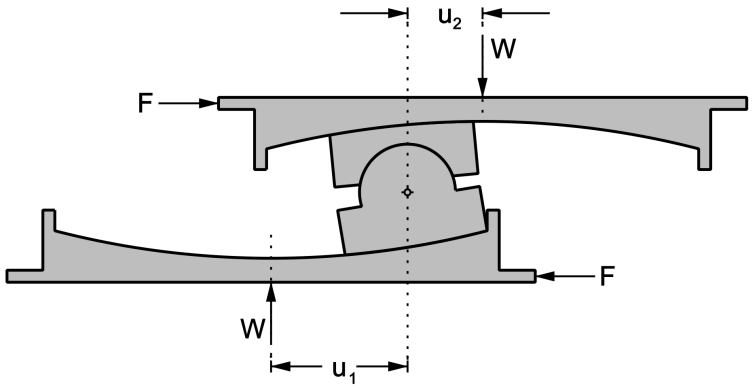


Figura 34 – Configuração deformada de um DFPS no Regime de Deslize III, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

O diagrama de corpo livre da Figura 35 salienta um aspeto que será da maior relevância na Secção 3.5 e no objetivo deste trabalho. Em concreto, o efeito do contacto da articulação com o batente da superfície 1 induz nesta uma força de restituição horizontal, F_{r1}, tal que a relação força-deslocamento desta superfície passa a ser:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \tag{52}$$

Como na Secção 3.3.3 foi definido que o batente do SIP®–Adaptive seguia um comportamento rígido-elástico, o deslocamento relativo na superfície 1 é igual à sua capacidade de deslocamento, $u_1 = d_1$, sendo a força suportada pelo batente definida pela Equação (53) como a diferença entre a força horizontal total, F e a força horizontal que ocorre no contacto com o batente, F_{dr1}.

$$F_{r1} = F - F_{dr1} \tag{53}$$

Recorrendo à mesma metodologia utilizada no Regime de Deslize I e II, continuam a não existir alterações no comportamento do prato inferior. Por esta mesma razão, os princípios adotados anteriormente mantém-se válidos e o deslocamento da superfície 2, u_2, continua a ser determinado pela Equação (49). Deste modo, a relação força-deslocamento, para o deslocamento total u, é

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} (u - d_1) + F_{f2} \tag{54}$$

assumindo $u_1 = d_1$ e utilizando a Equação (49) para definir u_2.

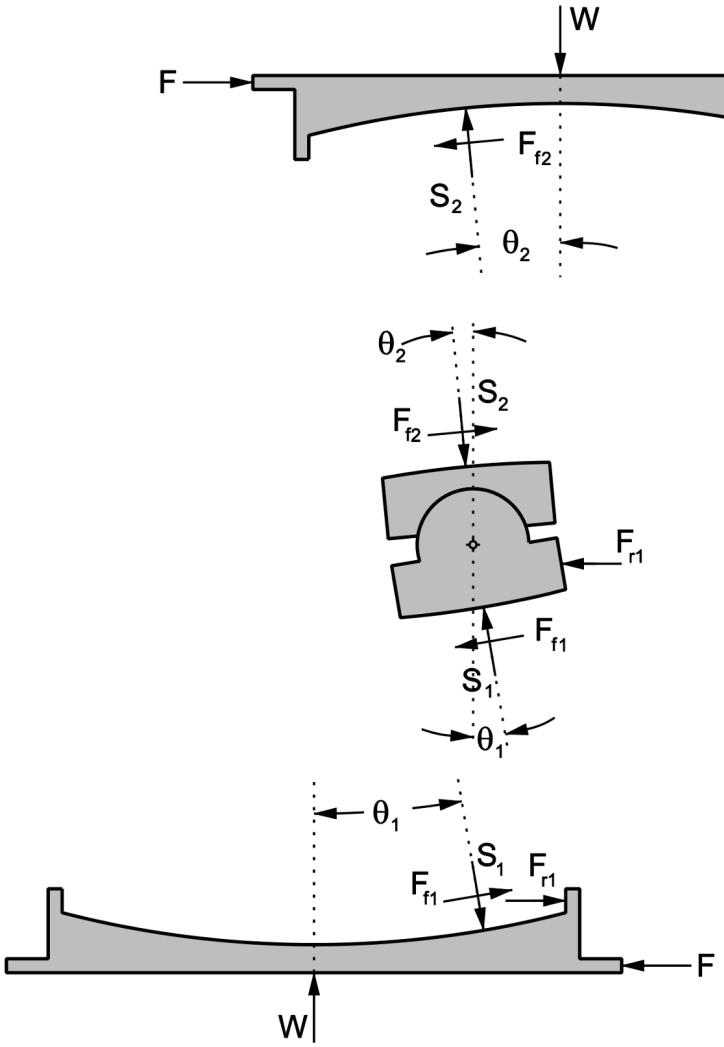


Figura 35 – Diagrama de corpo livre de um DFPS no Regime de Deslize III, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

A Equação (54) evidencia o facto de o contacto com o batente promover um aumento da rigidez no isolador, de $W/(R_{eff1} + R_{eff2})$ para W/R_{eff2}. Não obstante o aumento da rigidez, a força total que o isolador exibe, em comportamento cíclico, na posição de equilíbrio continua a ter um valor de $\mu_e W$ (ver Figura 36 e Figura 37).

Quanto à reversão do movimento, existem duas possibilidades. Esta pode iniciar o deslize quer pela superfície de menor atrito – Regime de Deslize III (a), quer pela superfície de maior atrito – Regime de Deslize III (b), dependendo dos parâmetros de dimensionamento do apoio em análise. Esta última possibilidade constitui um cenário menos usual, mas não menos importante. A compreensão deste é fundamental para se entender o efeito da rotação da base no recentramento do SIP®–Adaptive.

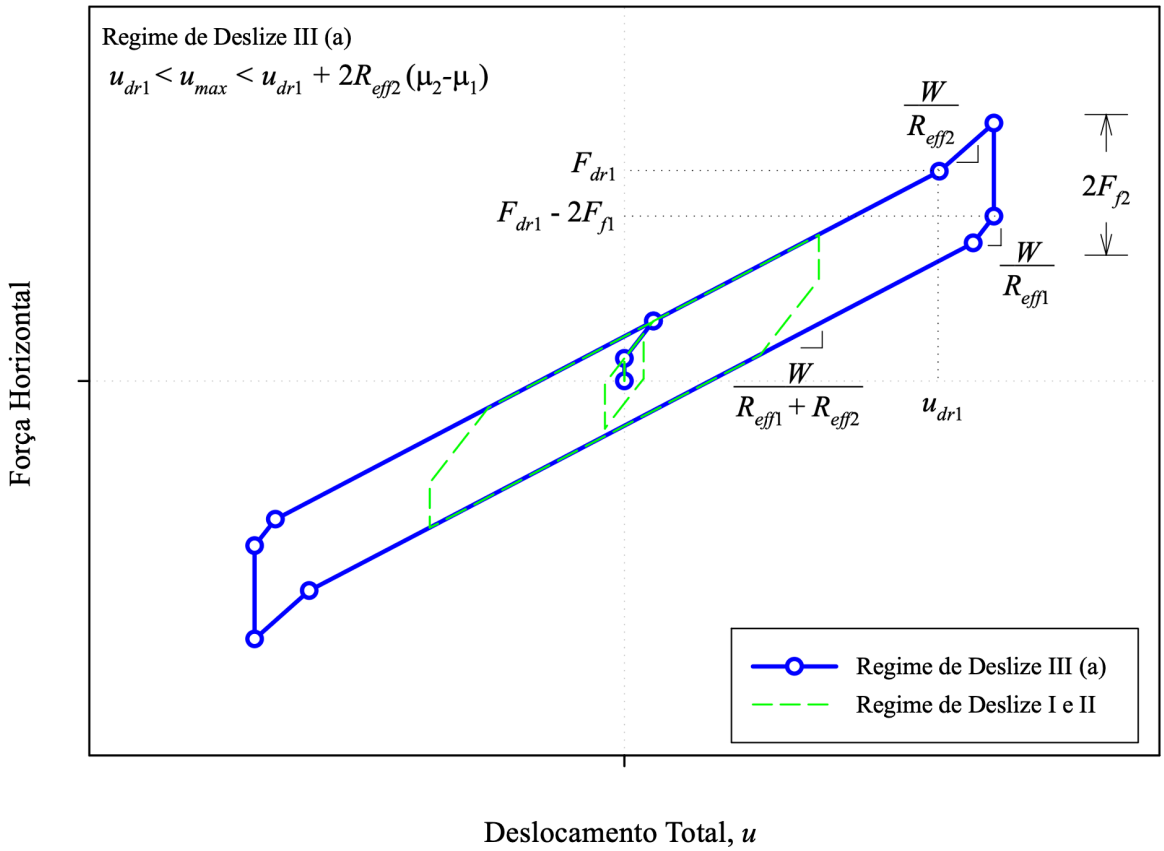


Figura 36 – Ciclo de Histerese de um DFPS no Regime III (a), adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Para o comportamento apresentado na Figura 36 – Regime de Deslize III (a), a reversão do movimento ocorre com deslize na superfície 1 a partir do momento que o apoio descarregou para uma força horizontal de $F_{dr1} - 2F_{f1}$. Isto é equivalente a assumir que o movimento só se irá iniciar assim que, do ponto da força máxima, F_{max}, se descarregue um total de $F_{r1} + 2F_{f1}$ – voltando a ocorrer deslize na superfície 2 assim que esta tenha descarregado, também, a mesma força de $2F_{f2}$.

O comportamento observado na Figura 36 apenas não ocorrerá caso a Equação (55) se verifique

$$u_{max} > u_{dr1} + 2(\mu_2 - \mu_1)R_{eff2} \tag{55}$$

onde u_{max} representa o deslocamento máximo verificado para o sistema de isolamento. De notar que o ramo da direita da Equação (55) descreve o deslocamento necessário para que o deslize ocorra primeiro na superfície 2 antes de ocorrer na superfície 1.

Do mesmo modo que, no Regime de Deslize II, o deslize duplo só volta a ocorrer quando a articulação se mover em $2u^*$, o mesmo acontecerá para o Regime de Deslize III (b). Porém, este deslocamento fica agora definido em função do raio efetivo de curvatura do prato superior, R_{eff2}, movendo-se um total de $2(\mu_2 - \mu_1)R_{eff2}$. Esta condição resulta da consideração da força exercida no batente, F_{r1}.

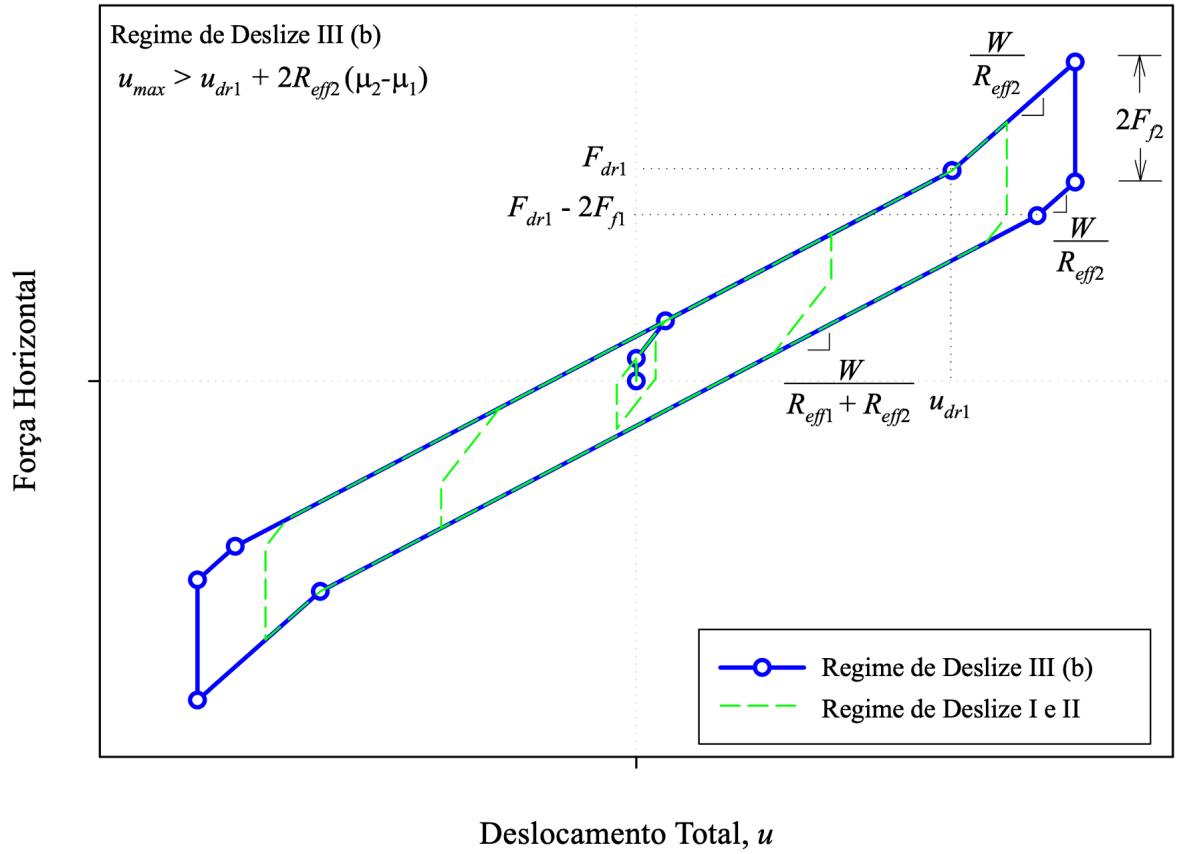


Figura 37 – Comportamento Histerético de um DFPS no Regime III (b), adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Assumindo uma capacidade de deslocamento máxima muito grande, tal que a condição da Equação (55) seja válida, percebe-se que a força horizontal no apoio, F, irá aumentar de forma proporcional a este deslocamento. Como nos encontramos sob o Regime de Deslize III, só ocorre deslize na superfície 2, e, portanto, o prato inferior encontra-se imóvel, em contacto permanente com o batente.

Porém, a força provocada pelo contacto, F_{dr1}, mantém-se constante com o aumento do deslocamento, como demonstrado pela Equação (31) (ver Secção 3.3.3). Quer isto dizer que a força horizontal que o batente exerce no apoio, F_{r1}, tende a aumentar quanto maior for o deslocamento relativo após o contacto com este. Deste modo, é possível conceber um cenário onde a força horizontal é tal, que permita que a superfície 2 descarregue um total de $2F_{f2}$ antes que a superfície 1 tenha conseguido descarregar $F_{r1} + 2F_{f1}$ na sua totalidade. Apesar de trivial, este comportamento é fundamental para perceber como a inclinação da base altera a reversão do movimento, questão que será abordada na Secção 3.5.3.

O Regime de Deslize III (a) tende a ser o que produz resultados mais otimizados, com um comportamento adaptativo definido à medida das necessidades de aplicação de projeto. Por essa mesma razão, daqui em diante será utilizado este Regime para caracterizar o efeito da rotação da base no SIP®–Adaptive.

No Quadro 1, resume-se a relação força-deslocamento para os vários regimes de deslize do SIP®–Adaptive.

Quadro 1 – Resumo do comportamento do SIP®–Adaptive

Regime	Descrição	Relação Força-Deslocamento
I	Deslize ocorre somente na superfície 1	$F = \frac{W}{R_{eff1}} u + F_{f1}$ Válido até: (1) $F = F_{f2}$, (2) $u = u^* = (\mu_2 - \mu_1) R_{eff1}$
II	Deslize ocorre nas duas superfícies em simultâneo	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} u + \frac{F_{f1} R_{eff1} + F_{f2} R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}}$ Válido até: (1) $F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$, (2) $u = u_{dr1} = d_1 \left(1 + \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}}\right) - (\mu_2 - \mu_1) R_{eff2}$
III (a)	Articulação em contacto com o batente; Deslize ocorre somente na superfície 2	$F = \frac{W}{R_{eff2}} (u - d_1) + F_{f2}$
Pressupostos: (1) $\mu_1 < \mu_2$, (2) $d_1 < \frac{R_{eff1}}{R_{eff2}} d_2 + (\mu_2 - \mu_1) R_{eff1}$		

3.5. HISTERESE DO SIP®–ADAPTIVE COM INCLINAÇÃO DA BASE

O estudo do efeito da inclinação da base no comportamento do SIP®–Adaptive foi motivado pela existência de fatores acidentais – como pilares flexíveis ou assentamentos diferenciais da subestrutura – que alteraram o comportamento fundamental do aparelho de apoio. Estes induzem rotações substanciais que, mesmo com a existência de uma articulação rotulada, afetam a relação força-deslocamento global do aparelho e, por conseguinte, o seu ciclo de histerese. Estas alterações têm de ser atendidas, sob pena da estrutura estar sujeita a efeitos prejudiciais para o seu comportamento global, como esforços e deslocamentos acrescidos.

A alteração do comportamento histerético por via da inclinação da base pode ser benéfica, se devidamente controlada. Como será visto de seguida, o efeito da rotação consiste num aumento parcial da força exibida pelo aparelho de apoio dentro de um limite controlado. Em determinadas situações de projeto, esta alteração no comportamento melhora a capacidade de recentramento do aparelho de apoio.

3.5.1. DESVIO VERTICAL NO CICLO DE HISTERESE

Tendo em conta que o efeito da inclinação é aplicável a cada superfície de deslize individualmente, as formulações apresentadas na Secção 3.3.4 continuam a ser válidas e a resposta final do aparelho de apoio resulta da combinação do efeito da rotação nos dois pratos.

Arbitrando um DFPS teórico com uma rotação de τ_1 e τ_2 na superfície inferior e superior, respetivamente, as relações força-deslocamento apresentadas na Equação (38) e (39) continuam válidas. Deste modo, para as superfícies 1 e 2 vem:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} u_1 + (\mu_1 \pm \tau_1) W \tag{56}$$

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} u_2 + (\mu_2 \pm \tau_2) W \tag{57}$$

onde os termos $\pm\tau_i W$ são positivos para deslize para a direita e, por conseguinte, após reversão do movimento, tornam-se negativos.

Considerando $u = u_1 + u_2$, ao igualar as Equações (56) e (57), a relação força-deslocamento de ambas as superfícies de deslize, no Regime de Deslize II, é dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} u + \frac{\left[(\mu_1 \pm \tau_1) R_{eff1} + (\mu_2 \pm \tau_2) R_{eff2}\right] W}{R_{eff1} + R_{eff2}} \tag{58}$$

onde, tal como descrito em cima, os termos $\tau_i W$ são determinados em função da direção em que ocorre o deslize.

De um ponto de vista matemático, as Equações (56) a (58) reforçam o facto de que a inclinação da base de uma superfície de deslize resulta numa alteração da força de atrito efetiva exibida pelo aparelho de apoio.

Deste modo, no Regime de Deslize II, o ciclo de histerese apresenta um desvio vertical, s, de magnitude

$$s = \frac{(\tau_1 R_{eff1} + \tau_2 R_{eff2})W}{R_{eff1} + R_{eff2}} \tag{59}$$

sendo que individualmente, cada superfície de deslize, inferior e superior respetivamente, origina também obtêm uma translação vertical de magnitude $\tau_1 W$ e $\tau_2 W$ desse ciclo (ver Figura 39).

A título de exemplo, a Figura 38 apresenta a relação força-deslocamento em termos de força horizontal normalizada, $w = {}^{F}/_{W}$, ou seja, o rácio entre a força horizontal, F, e a carga vertical atuante, W, para o exemplo concreto de um DFPS com as seguintes características de dimensionamento para a superfície 1 e 2, respetivamente: $R_{eff1} = 1000mm$; $\mu_1 = 0.03$; $R_{eff2} = 3000mm$ e $\mu_2 = 0.06$.

Aplicando uma rotação de $\tau_1 = +0.01$ e $\tau_2 = +0.01$ radianos para as superfícies inferior e superior, respetivamente, a posição de equilíbrio da superfície 1 sofre um desvio de $u_{r1} = -10\text{mm}$ e a superfície 2 um desvio de $u_{r2} = -30\text{mm}$, alterando a posição de equilíbrio global do aparelho de apoio num total de $u_r = -40\text{mm}$.

A partir das novas posições de equilíbrio, tal como no cenário nivelado, o deslize só irá iniciar quando a força horizontal for $F = \mu_1 W$ e $F = \mu_2 W$, para a superfície 1 e 2, respetivamente. Deste modo, quando a articulação interna tiver deslocado para a posição de equilíbrio original ($u_1 = 0$), já terá descrito um movimento total de $u_{r1} = 10\text{mm}$. Para este deslocamento, a força horizontal é dada pela Equação (60), onde

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} u_{r1} + \mu_1 W = \tau_1 + \mu_1 \tag{60}$$

onde é possível observar que o efeito da inclinação da base num DFPS resulta num desvio vertical do ciclo de histerese da superfície 1 de magnitude $\tau_1 W$. Para a superfície 2 o mesmo acontece, sendo que na nova posição de equilíbrio, esta superfície já se deslocou $u_{r2} = -30\text{mm}$, obtendo um desvio vertical do ciclo de histerese desta superfície de $\tau_2 W$ (ver Figura 39).

Adicionalmente, é de realçar que os coeficientes de fricção e a rigidez pós-elástica de cada superfície permanecem inalterados com o a inclinação. Quer isto dizer que o deslocamento u^*, para o qual só ocorre deslize na superfície 1, se mantém inalterado.

No exemplo demonstrado anteriormente, vem que $|u^*| = 30\text{mm} < |u_{r1} + u_{r2}| = 40\text{mm}$ e o deslize nas duas superfícies irá ocorrer antes que se atinja a posição de equilíbrio inicial. De realçar, também, que, devido ao desvio vertical dos ciclos de histerese isolados, o ciclo de histerese total também altera, deslocando-se verticalmente em s/W (ver Figura 38).

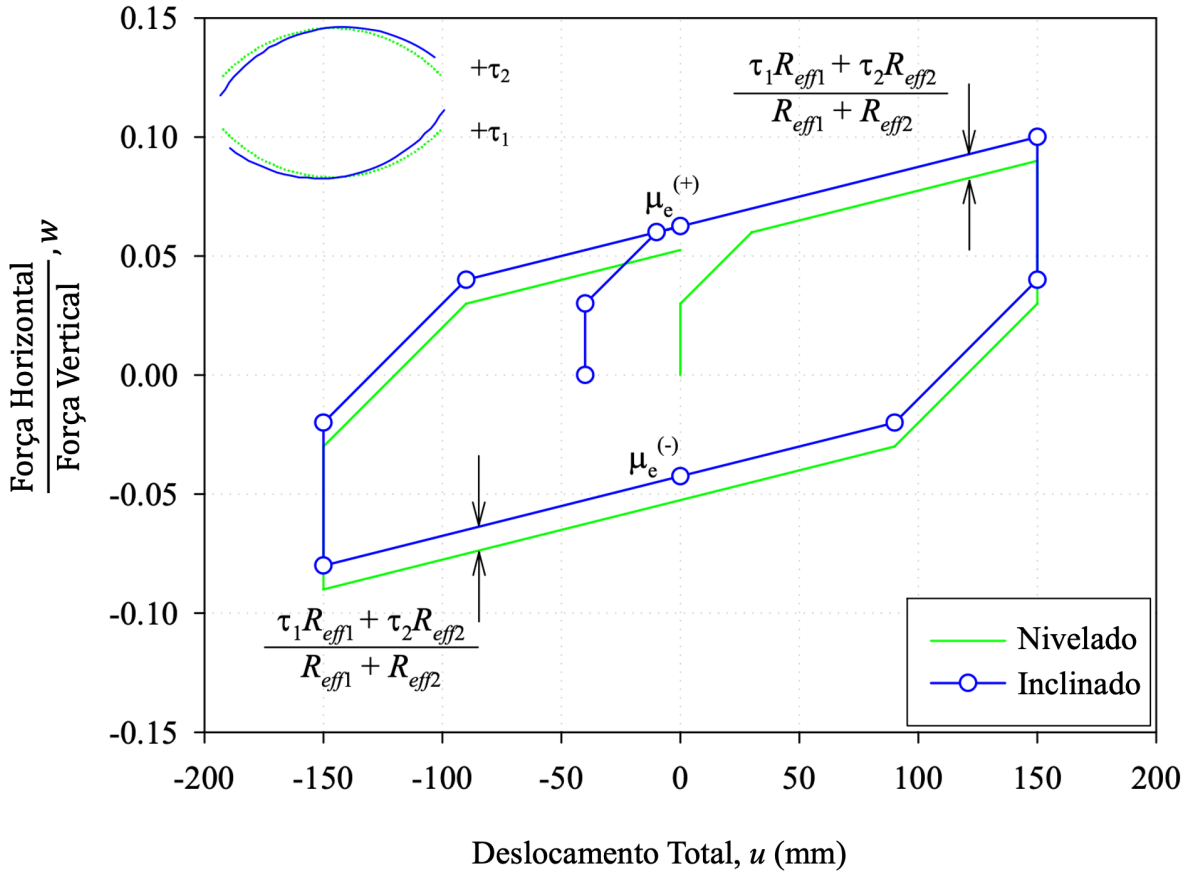


Figura 38 – Ciclo de Histerese Total para o exemplo de um DFPS com uma inclinação da base de $\tau_1 = +0.01$ e $\tau_2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

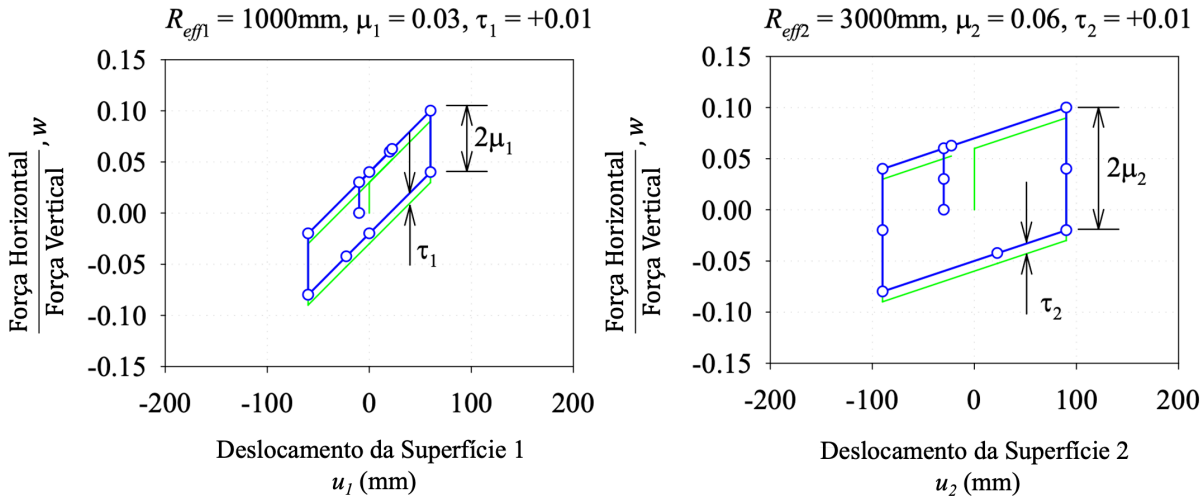


Figura 39 – Ciclos de Histerese Isolados para o exemplo de um DFPS com uma inclinação da base de $\tau_1 = +0.01$ e $\tau_2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

3.5.2. Desvio na Posição da Articulação Rotulada

Arbitrando um cenário em que a inclinação de cada superfície de deslize é diferente entre si, ou seja, $\tau_1 \neq \tau_2$, haverá deslocamentos assimétricos em cada superfície. Isto implica que as amplitudes máximas e mínimas do deslocamento de cada superfície são diferentes, independentemente da amplitude de deslocamento total – superfície 1 mais superfície 2 – continuar a ser simétrica. Tal como visto na Secção 3.5.1, o ciclo de histerese total continua a ter uma translação vertical de magnitude s, como observável na Figura 40, sem que haja qualquer tipo de alteração da rigidez exibida pelo aparelho de apoio, tal como os ciclos de histerese isolados também desviam verticalmente em $\tau_1 W$ e $\tau_2 W$ (ver Figura 41).

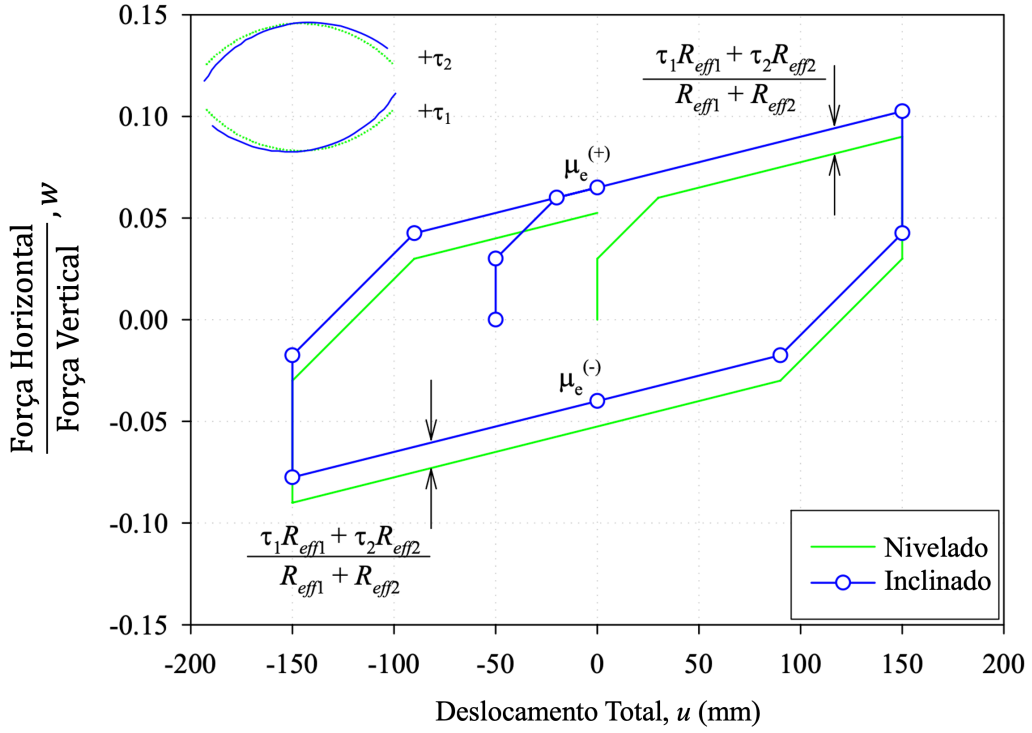


Figura 40 – Ciclo de Histerese Total para o exemplo de um DFPS com uma inclinação da base de $\tau_1 = +0.02$ e $\tau_2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

A Figura 40 apresenta o exemplo de um DFPS com uma inclinação das superfícies inferior e superior de $\tau_1 = +0.02$ e $\tau_1 = +0.01$, respetivamente, sendo o desvio devido à inclinação destas superfícies, $u'_{\tau 1}$ e $u'_{\tau 2}$, caracterizado pelas Equações (61) e (62)

$$u'_{\tau 1} = \left[\frac{\tau_1 R_{eff1} + \tau_2 R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} - \tau_1\right] R_{eff1} \tag{61}$$

$$u'_{\tau 2} = \left[\frac{\tau_1 R_{eff1} + \tau_2 R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} - \tau_2\right] R_{eff2} \tag{62}$$

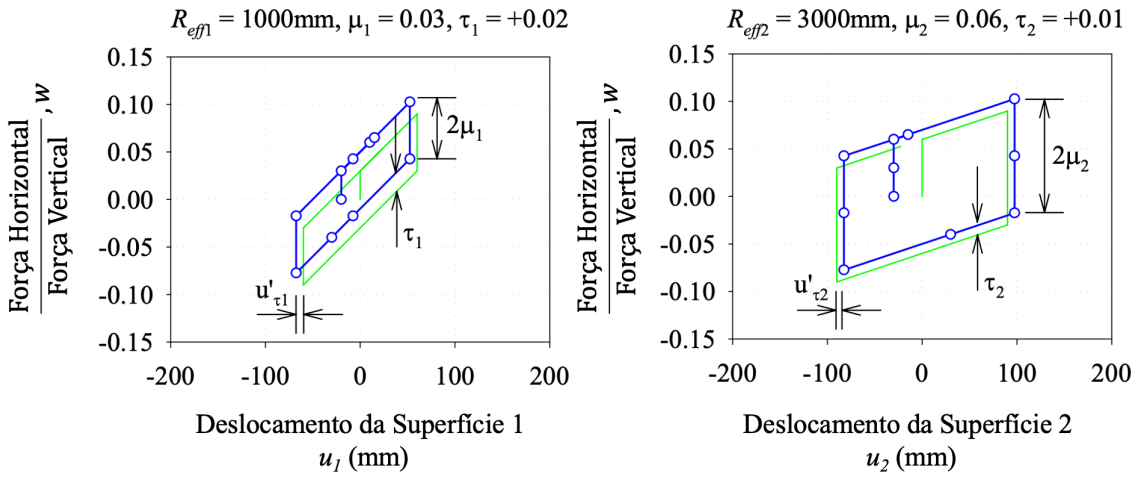


Figura 41 – Ciclos de Histerese Isolados para um DFPS com uma inclinação da base de $\tau_1 = +0.02$ e $\tau_2 = +0.01$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

No exemplo definido em cima, a partir das Equações (61) e (62), $u'_{\tau 1} = -7.5\text{mm}$ e $u'_{\tau 2} = 7.5\text{mm}$, o que permite observar que os desvios induzidos pela inclinação da base têm a mesma magnitude, mas deslocamento oposto. Esta particularidade advém deste desvio ser definido como uma média ponderada do desvio induzido por cada inclinação.

Como esta média depende dos raios efetivos de curvatura do DFPS em análise, os desvios devidos à inclinação terão sempre a mesma magnitude e direções opostas, independentemente da inclinação que é aplicada a cada superfície. A única exceção à regra será para aparelhos de apoio com configurações de igual raio efetivo de curvatura e inclinações iguais em cada superfície, como foi o caso de análise da Secção 3.5.1.

3.5.3. Alteração da Força de Contacto no Batente

As secções anteriores permitiram concluir que a inclinação da base altera a força exibida pelo aparelho de apoio, bem como a posição de equilíbrio da articulação rotulada. Esta alteração geométrica irá interferir com a capacidade de deslocamento da superfície inclinada que, por conseguinte, podem induzir alterações na sequência de deslize dos DFPS.

Uma vez que o deslize ocorre a partir de uma posição desviada, as capacidades de deslocamento da superfície inclinada passam a ser, para cada direção, $d_i + u_{ri}$ e $d_i - u_{ri}$. Este efeito da capacidade de deslocamento não pode ser negligenciado no dimensionamento de DFPS, em particular aparelhos de apoio com períodos de isolamento elevados, isto é, com raios efetivos de curvatura elevados.

A título de exemplo, assumindo um período de $3.5s$, equivalente a um raio de curvatura efetivo de $R_{eff} = 3$ metros, para a inclinação de instalação de ± 0.01rad permitida pela AASHTO (2014), o desvio na posição de equilíbrio devido a esta rotação é

$$u_r = 3m \times sin(\pm 0.01) = \pm 30\text{mm} \tag{63}$$

introduzindo alterações no comportamento do aparelho que, se não forem contempladas no dimensionamento, podem ter efeitos nocivos para a estrutura isolada.

Deste modo, ao haver uma mudança na capacidade de deslocamento, também irá haver uma assimetria no comportamento do aparelho de apoio no Regime de Deslize III em ambas as direções, como observável pela Figura 42.

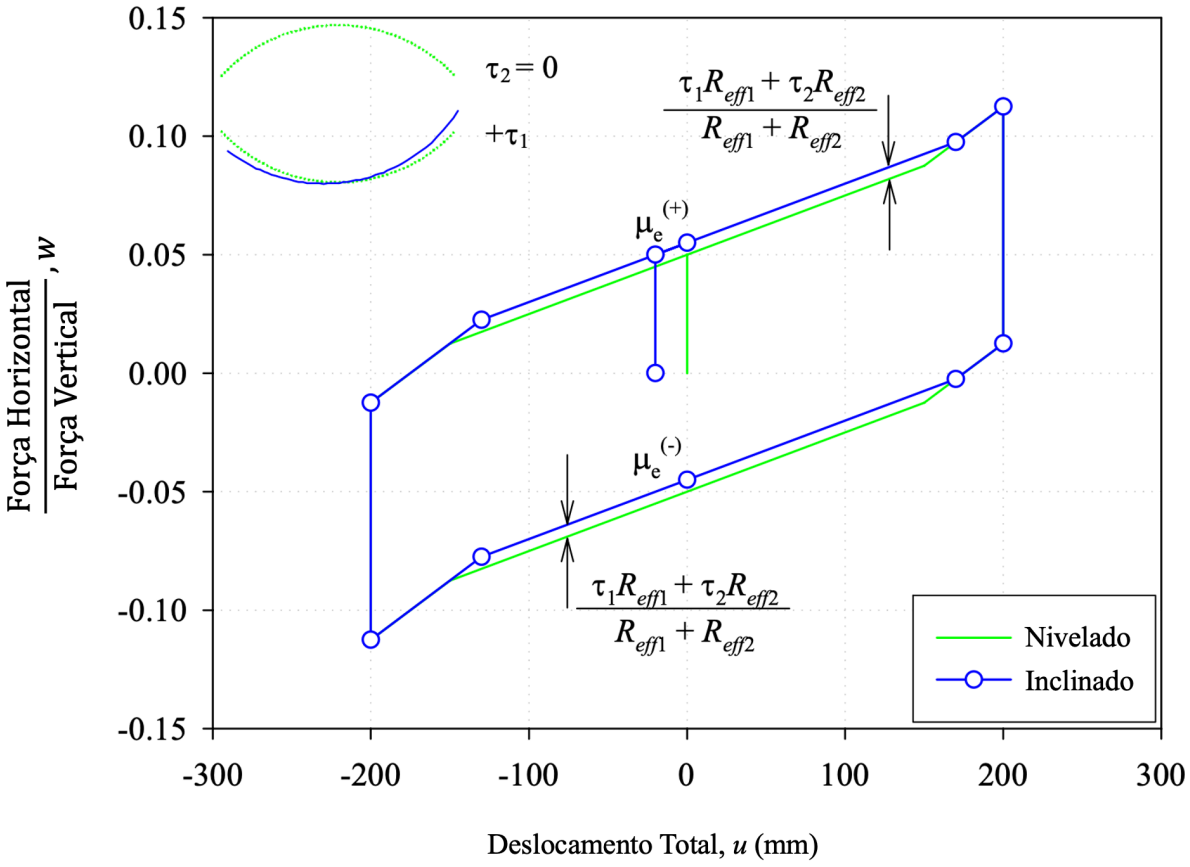


Figura 42 – Ciclo de Histerese Total para um DFPS com uma inclinação da base de $\tau_1 = +0.01$ e $\tau_2 = 0$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Esta assimetria consegue ser definida ao determinar o deslocamento total do aparelho quando ocorre o contacto com o batente, u_{dri}. Para o SIP®–Adaptive, este deslocamento fica definido pela Equação (64) que fica definida ao resolver a Equação (58) em ordem ao deslocamento quando a força horizontal transmitida ao aparelho de apoio é igual a $F = F_{dr1} + \tau_1 W$.

$$u_{dr1} = d_1\left(1 + \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}}\right) - (\mu_2 - \mu_1)R_{eff2} + (\tau_1 - \tau_2)R_{eff2} \tag{64}$$

Ao comparar a Equação (64) com a Equação (51), fica evidente que o efeito da inclinação da superfície de deslize é uma adição ao deslocamento no cenário nivelado. Este deslocamento pode incrementar ou

diminuir o momento em que ocorre o contacto com o batente, dependendo se o sentido da inclinação é anti-horário ou horário, respetivamente. Este pode ser reescrito de uma forma mais clara, tal que

$$u_{dr1,inclinado} = u_{dr1,nivelado} + (\tau_1 - \tau_2)R_{eff2} \tag{65}$$

onde $u_{dr1,nivelado}$ é o mesmo que u_{dr1} apresentado pela Equação (51) e $u_{dr1,inclinado}$ representa o deslocamento para o qual há contacto com o batente na configuração inclinada.

A Figura 42 pretende ilustrar exatamente este efeito. É exemplificado um cenário de um DFPS com raios de curvatura efetivos e coeficientes de atrito iguais – $R_{eff1} = R_{eff2} = 2000\text{mm}$ e $\mu_1 = \mu_2 = 0.05$. A capacidade de deslocamento da superfície 1 é dada por $d_1 = 75\text{mm}$, tendo a superfície 2 uma capacidade de deslocamento bastante superior a d_1, tal que $d_1 \ll d_2$. Este aparelho de apoio teve uma inclinação da superfície 1 de $+0.01\text{rad}$, limitando-se o deslocamento máximo do mesmo a $200mm$.

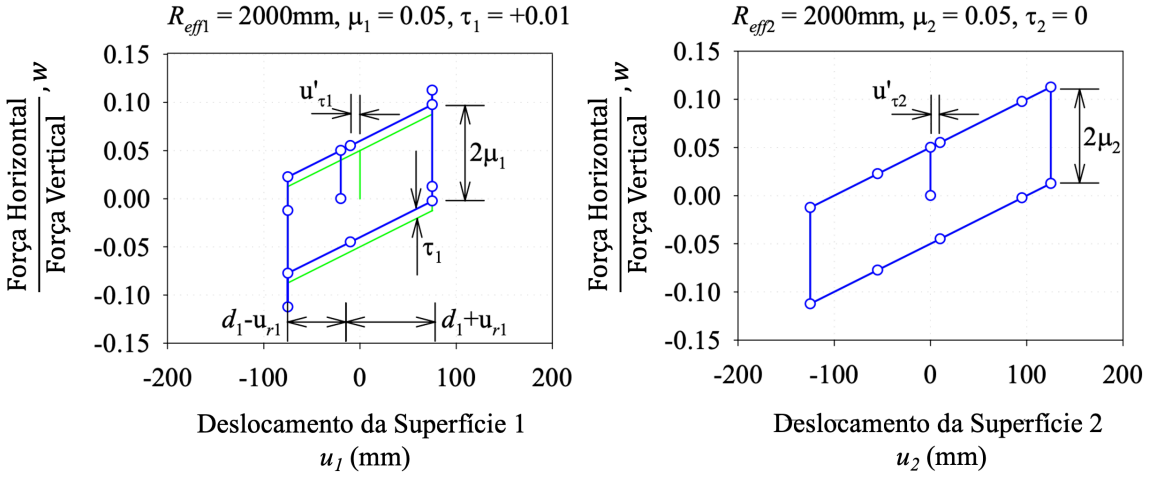


Figura 43 – Ciclos de Histerese Isolados para um DFPS com uma inclinação da base de $\tau_1 = +0.01$ e $\tau_2 = 0$, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Atendendo à Figura 43, pode-se observar que devido à inclinação da base da superfície 1, há alteração no ponto de equilíbrio da articulação rotulada. Esta inicia o seu movimento mais cedo, tendo um desvio de $u_{r1} = -20\text{mm}$. Deste modo, a articulação passa a entrar em contacto com o batente após deslizar $95mm$ no sentido positivo e $55mm$ no sentido negativo e, pela Equação (31), a força de contacto com o batente, F_{dr1}, também irá diferir consoante a direção do movimento.

Esta diferença provoca uma alteração no comportamento força-deslocamento de todo o aparelho de apoio e na histerese da superfície 1, tornando-a assimétrica. Pela Figura 42, o contacto com o batente ocorreria para $u_{dr1} = \pm 150\text{mm}$ na configuração nivelada. Porém, pela Equação (65), este aumenta em $u_{r1} = +20\text{mm}$. Deste modo, na configuração inclinada, o deslocamento para o qual ocorre contacto com o batente é $u_{dr1} = +170\text{mm}$ e -130mm.

Como já havia sido apresentado no final da Secção 3.4.2.3, o efeito da inclinação da superfície de um DFPS consiste, essencialmente, no aumento ou redução da reação que o batente desenvolve. Esta alteração, por sua vez, implica que a reversão do movimento ocorra para níveis de força menores ou maiores, respetivamente.

Atendendo ao deslocamento positivo da superfície 1 presente na Figura 43, é possível determinar que o contacto irá ocorrer quando $u_{dr1} = +170\text{mm}$, 20mm mais do que na configuração nivelada, $u_{dr1} = +150\text{mm}$. Para este deslocamento, quando comparado com a configuração nivelada, a força de contacto com o batente, F_{dr1}, irá aumentar de forma proporcional ao incremento de 20mm. Porém, pela Equação (53), a reação que o batente desenvolve devido ao contacto é agora

$$F_{r1,inclinado} = F - F_{dr1,inclinado} \tag{66}$$

com $F_{dr1,inclinado}$ definida como a força de contacto com o batente para um deslocamento de $+170\text{mm}$. Quer isto dizer que a reação no batente não irá aumentar, mas sim diminuir.

Atendendo a que a reversão do movimento se inicia após o aparelho ter descarregado uma força total de $F_{r1} + 2\mu_1$, sendo este valor agora mais reduzido, também a reversão do movimento se irá iniciar mais cedo. Isto possibilita que, para um mesmo deslocamento máximo – $200mm$ no exemplo da Figura 42, o deslocamento residual máximo, d_0, será menor, melhorando a condição de recentramento do aparelho de apoio, conclusão que importa realçar.

Dada a configuração de raios de curvatura e coeficientes de atrito iguais, o mesmo não é diretamente observável pela Figura 42. Porém, no Capítulo 6, esta metodologia será aplicada a um caso de estudo concreto, onde se conclui que é possível melhorar a capacidade de recentramento de um aparelho de apoio pendular por via da inclinação da superfície inferior do mesmo.

Ainda que não seja o objetivo central deste trabalho, é ainda de referir que, apesar das diferenças na posição e na forma das extremidades dos diagramas, a área contida por eles continua a ser aproximadamente a mesma, pelo que a capacidade de dissipação de energia por histerese se mantém inalterada.

4
IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO SIP®–ADAPTIVE

4.1. INTRODUÇÃO

A implementação de modelos analíticos e numéricos baseados em análises temporais dependem do comportamento mecânico estabelecido no Capítulo 3 para o SIP®–Adaptive. Estes modelos são essenciais para o desenvolvimento e implementação de análises dinâmicas que permitem validar o comportamento real do aparelho de apoio.

Apresentam-se adiante, duas estratégias para análise dinâmica do comportamento do SIP®–Adaptive: uma rotina desenvolvida com base no modelo analítico programado em MATLAB e, também, um modelo numérico no programa SAP2000 (CSI, 2024). Ambas as estratégias pretendem representar o comportamento histerético do SIP®–Adaptive, necessitando contudo de calibração adicional para que a resposta seja tão aproximada quanto possível face ao resultado teórico (Fenz & Constantinou, 2008b; Sarlis & Constantinou, 2010).

Assim, na Secção 4.2 é abordada uma metodologia analítica em MATLAB que caracteriza o comportamento do SIP®–Adaptive como dois FPS em série. Esta abordagem tem a limitação de não conseguir definir o comportamento adaptativo total do aparelho de apoio, muito embora consiga caracterizar de forma aproximada o efeito da inclinação da base no aparelho de apoio.

A Secção 4.3 apresenta uma concretização da implementação numérica em SAP2000. Esta procura caracterizar o comportamento adaptativo do aparelho de apoio por via de um elemento numérico integrado no programa de cálculo estrutural. Como se verá, este modelo é altamente não linear e quer a implementação do aparelho, quer a incorporação da inclinação da base, revelam-se problemas de calibração complexa.

4.2. IMPLEMENTAÇÃO ANALÍTICA EM MATLAB

4.2.1. APLICABILIDADE DE MODELOS EM SÉRIE PARA DFPS

Um dos aspetos principais de um DFPS é o facto de este se comportar como uma associação em série de dois FPS. Esta possibilidade permite que a análise dinâmica no domínio do tempo seja efetuada de forma direta para este tipo de aparelhos de apoio, sem que surjam erros significativos.

No entanto, o SIP®–Adaptive, pelo seu comportamento adaptativo, não pode ser representado de forma completa com esta estratégia de modelação. Isto deve-se ao facto de cada elemento em série só conseguir

caracterizar um único regime de deslize. Tratando-se de uma associação de dois FPS em série, não será possível representar mais do que dois regimes de deslize com esta estratégia.

Em todo o caso, como foi estudado na Secção 3.5, a inclinação da base acaba por só ter efeito no Regime de Deslize I e II e, por isso mesmo, é possível representar com estes modelos os dois regimes de deslize e o efeito da rotação da base com alguma exatidão.

Atendendo ao caminho da carga horizontal no aparelho de apoio, este presume que a carga imposta à estrutura será transmitida à superfície de deslize de menor atrito que, para a maioria dos cenários de dimensionamento, será a superfície inferior. Esta carga será depois transferida para a articulação rotulada e esta, por sua vez, transmite a carga à estrutura superior.

Nota-se que há um só caminho para a carga atuante ser transferida entre ambas as superfícies de deslize. Deste modo, o funcionamento do aparelho de apoio é uma associação em série de FPS, semelhante ao modo como funciona um circuito elétrico em série, onde também só há um caminho para a corrente elétrica.

A relação força-deslocamento pode ser esquematizada pela Figura 44, de onde se salientam dois elementos numéricos associados em paralelo – representativos do comportamento de um FPS – que, em conjunto, procuram representar o comportamento de um DFPS.

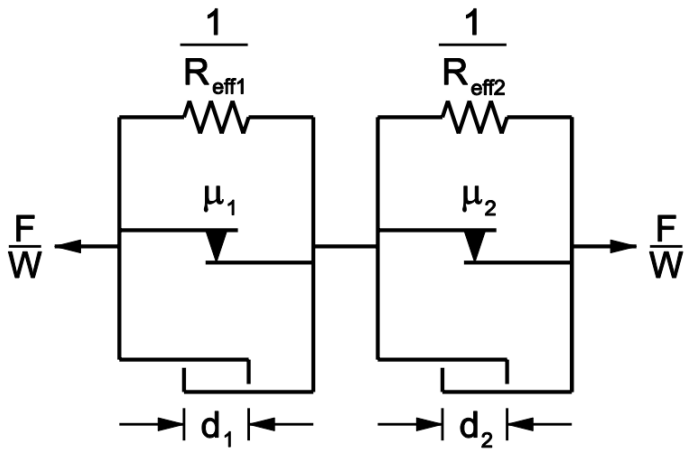


Figura 44 – Modelo analítico de um DFPS com dois elementos FPS associados em série, retirado de Constantinou e Fenz (2008)

Da Figura 44, observa-se que cada elemento FPS corresponde a um circuito em paralelo, contendo: no topo, um elemento de mola, representativo da rigidez fornecida pela curvatura da superfície de deslize; no centro, um elemento de atrito rígido-plástico, dependente da velocidade de deslize na superfície; e em baixo, um elemento de folga, que apenas exerce uma força no sistema quando a capacidade de deslocamento do FPS é excedida.

A título de exemplo, assumindo uma associação em série de dois elementos FPS com as características internas do aparelho de apoio aplicado na Secção 3.5.1, o comportamento força-deslocamento total é representado na Figura 45.

Tal como nos Regimes de Deslize I e II definidos na Secção 3.4.2.1 e 3.4.2.2, quando modelado em série, este dispositivo continua a exibir a rigidez pós-elástica apresentada nessas secções. Em concreto, estes valores continuam a ser

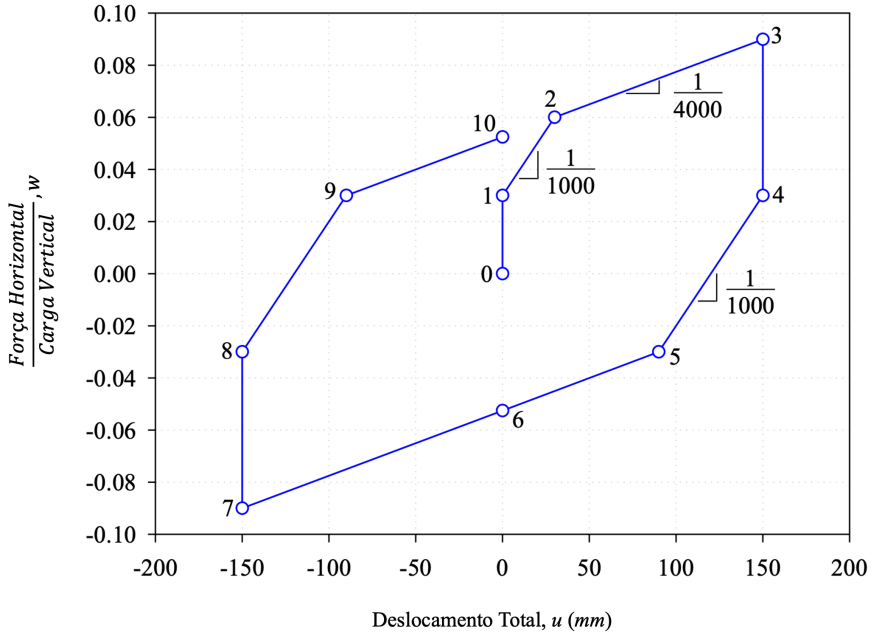


Figura 45 – Ciclo de Histerese Total de um DFPS modelado como uma associação em série de dois elementos FPS, adaptado de Fenz e Constantinou (2008b)

$$W/_{R_{eff1}} = \frac{1}{1000} \tag{67}$$

$$\frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} = \frac{1}{1000 + 3000} = \frac{1}{4000} \tag{68}$$

de onde se verifica que a relação força-deslocamento se mantém para DFPS em série. O ciclo de histerese isolado para cada superfície mantém-se inalterado também. Com efeito, a Figura 45 contém os ciclos de histerese de cada superfície de deslize em separado, onde se pode voltar a confirmar que estes se mantém inalterados quando comparados com os ciclos apresentados na Figura 39.

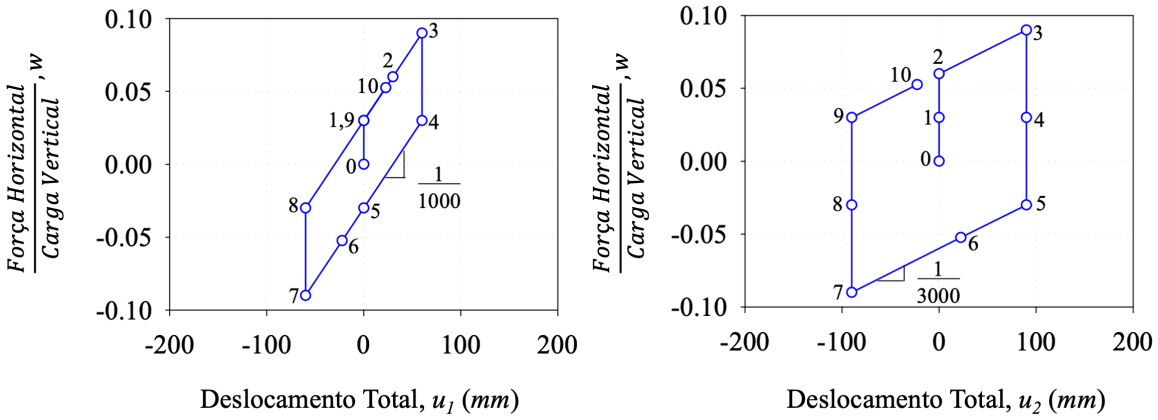


Figura 46 – Ciclos de Histerese Isolados de um DFPS modelado como uma associação em série de dois elementos FPS, adaptado de Constantinou e Fenz (2008)

Em suma, a modelação em série representa de uma forma fidedigna o comportamento para os Regimes de Deslize I e II – aspeto fundamental para a modelação e análise dinâmica do DFPS em programas de análise estrutural. Porém, o SIP®–Adaptive apresenta um comportamento adaptativo, tendo mais um ramo de rigidez pós-elástica após o ponto 3 (ver Figura 45). Em concreto, para se representar adequadamente o comportamento do Regime de Deslize III (a) em série, será necessário implementar o modelo analítico de um TFPS.

4.2.2. Considerações para a Análise Dinâmica

Quando é efetuada uma análise dinâmica, o valor do coeficiente de atrito varia consoante a velocidade a que ocorre o deslize entre a articulação interna e a superfície de deslize. O valor do coeficiente de atrito foi determinado por Constantinou et al. (1990) e é definido como

$$\mu(t) = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \times e^{-a|\dot{u}|} \tag{69}$$

onde $\dot{u}$ representa a velocidade de deslize no prato, μ_{max} e μ_{min} são os coeficientes de atrito para velocidades de deslize elevadas e velocidades próximas do repouso, respetivamente e a é um parâmetro que controla a transição entre μ_{max} e μ_{min}.

Estes parâmetros são determinados a partir de testes laboratoriais e governam o comportamento final dos aparelhos de apoio friccionais. Weber et al. (2023) definem que, para uma modelação adequada do SIP®–Adaptive em programas de análise dinâmica, os coeficientes de atrito μ_{max} e μ_{min} devem ser iguais para representar adequadamente o material na interface entre a articulação e as superfícies de deslize. Deste modo, o coeficiente de atrito é considerado constante no tempo, não sendo necessário atualizar o seu valor a cada instante no tempo.

Em programas que permitem uma análise dinâmica, como o SAP2000, as equações que governam o comportamento dinâmico de um FPS dependem, naturalmente, da forma como este é modelado.

As formulações e sucessivas demonstrações que serão efetuadas de ora em diante são uma exposição do trabalho desenvolvido por Fenz e Constantinou (2008a) que, recorrendo a uma rotina em MATLAB (The MathWorks Inc., 2024), consegue realizar uma análise dinâmica para dois FPS modelados em série com alguma exatidão. A fim de se captar o efeito da inclinação da base, foram realizadas algumas adaptações a esta rotina que serão abordadas de seguida.

4.2.3. Formulação das Equações do Movimento

Como observado na Figura 44, cada elemento da associação em paralelo procura representar o comportamento do aparelho de apoio de modo que respeite as condições fronteira do mesmo (rigidez, raio de curvatura, capacidade de deslocamento e coeficiente de atrito) (Fenz & Constantinou, 2008a).

Deste modo, a força horizontal, F_i, que o elemento i do FPS exerce sob a estrutura, pode ser determinada a partir de

$$F_i = \frac{W}{R_{eff\,i}} u_i + \mu_i W Z_i + k_{ri}(|u_i| - d_i) sign(u_i) \mathrm{H}(|u_i| - d_i) \tag{70}$$

onde W é carga vertical atuante, $R_{eff\,i}$ é o raio efetivo de curvatura da superfície i, u_i é o deslocamento relativo da articulação na superfície de deslize, μ_i é o coeficiente de atrito da superfície i, Z_i é uma variável histerética que varia entre -1 e $+1$ dada pela Equação (71), k_{ri} é a rigidez exibida pelo batente da superfície i, d_i é a capacidade de deslocamento da superfície i e H é a função Heaviside, uma função passo a passo que varia consoante o instante da análise dinâmica. O último termo da Equação (70) representa a força de restituição, F_{ri}, do prato i. A variável histerética Z_i é governada pela equação diferencial

$$\frac{dZ_i}{dt} = \frac{1}{u_{yi}}\{A_i - |Z_i|^{\eta_i}[\gamma_i sign(\dot{u}_i Z_i) + \beta_i]\}\dot{u}_i \tag{71}$$

na qual u_{yi} representa o deslocamento de cedência, $\dot{u}_i$ é a velocidade de deslize na superfície e γ_i, β_i, η_i e A_i são variáveis adimensionais que controlam o formato do ciclo de histerese do FPS em estudo. Essencialmente, os últimos termos das Equações (70) e (71) representam a histerese devida ao atrito como uma função com transição suave, tal que isso não induza o programa em erros numéricos quando este atinge um comportamento puramente friccional para deslocamentos de cedência u_{yi} próximos de zero.

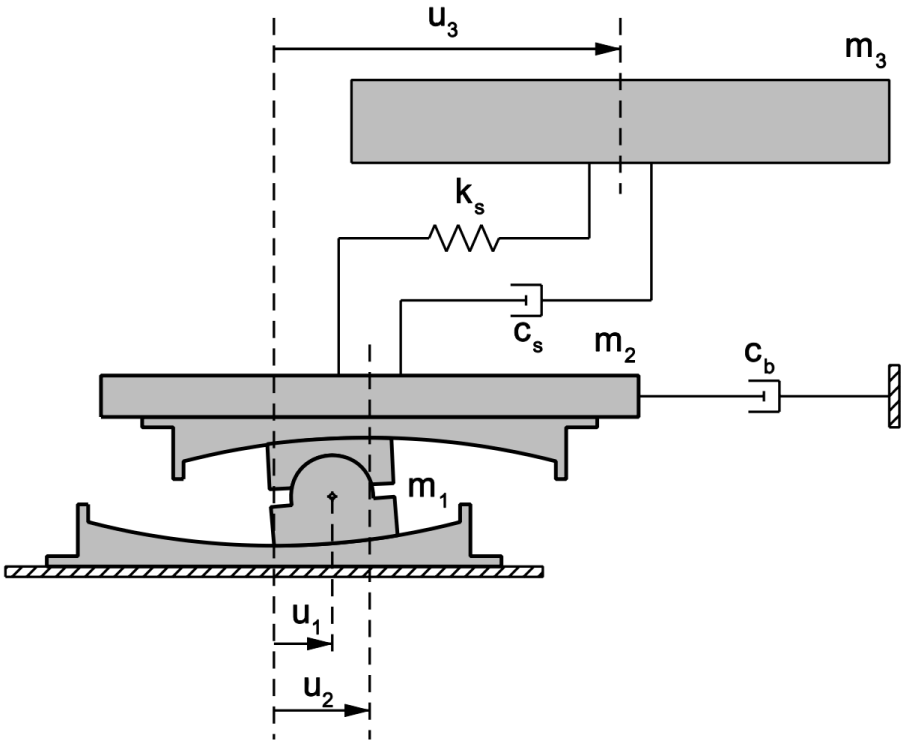


Figura 47 – Esquema de um SDOF isolado com um SIP®–Adaptive, retirado de Fenz e Constantinou (2008a)

Tendo em conta a Figura 47, as equações do movimento podem ser formuladas a partir do SDOF isolado por um SIP®–Adaptive. Neste, a massa m_3 representa a massa da estrutura a suportar e m_2 e m_1 as massas da base da estrutura e da articulação rotulada, respetivamente.

A última necessita de ter um valor bastante reduzido de modo a representar corretamente a massa da articulação rotulada, de modo a não induzir qualquer erro na formulação das equações do movimento da superfície inferior.

A estrutura superior é dotada de uma rigidez k_s e de um amortecimento viscoso equivalente, representado por c_s. Caso exista algum tipo de amortecedor externo na base da estrutura, ou, como representado, ligado ao prato superior, este será representado por c_b.

Os parâmetros respetivos ao SIP®–Adaptive já foram abordados e descritos nas secções anteriores.

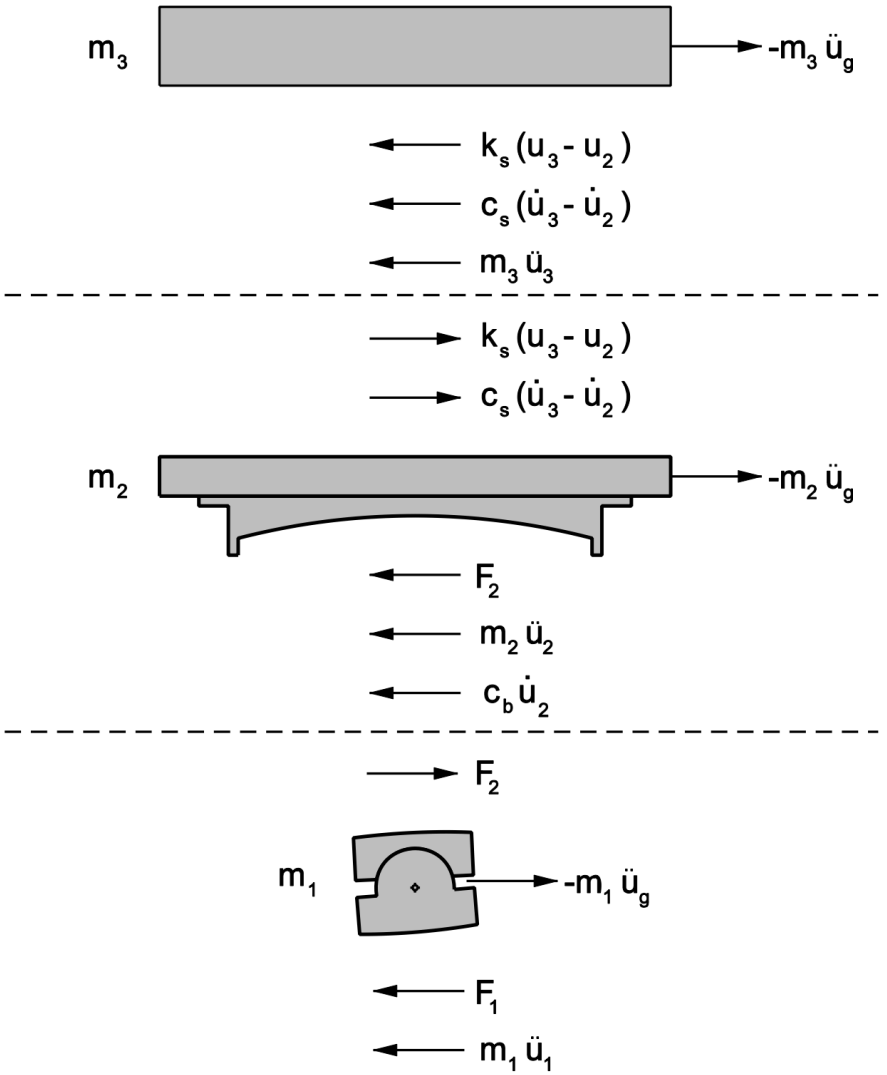


Figura 48 – Diagramas de corpo livre das massas m_1, m_2 e m_3 utilizadas para definir as equações do movimento do SDOF isolado com um SIP®–Adaptive, retirado de Fenz e Constantinou (2008a)

Atendendo aos diagramas de corpo livre da Figura 48, as equações do movimento para a massa da superestrutura, m_3, para a massa na base da estrutura, m_2, e para a aceleração do solo, $\ddot{u}_g(t)$, são:

$$m_3\ddot{u}_3 + c_s(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) + k_s(u_3 - u_2) = -m_3\ddot{u}_g(t) \tag{72}$$

$$\begin{aligned} m_2\ddot{u}_2 + \frac{W}{R_{eff2}}(u_2 - u_1) + \mu_2 W Z_2 \\ + k_{r2}(|(u_2 - u_1)| - d_2)sign(u_2 - u_1)H(|(u_2 - u_1)| - d_2) - c_s(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) \\ - k_s(u_3 - u_2) = -m_2\ddot{u}_g(t) \end{aligned} \tag{73}$$

onde a variável Z_2 é governada por

$$\frac{dZ_2}{dt} = \frac{1}{u_{y2}}\left\{A_2 - |Z_2|^{\eta_2}\left[\gamma_2 sign\left((\dot{u}_2 - \dot{u}_1)Z_2\right) + \beta_2\right]\right\}(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \tag{74}$$

Por fim, a equação do movimento para a massa da articulação, m_1, é dada por:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{u}_1 + \frac{W}{R_{eff1}}u_1 + \mu_1 W Z_1 + k_{r1}(|u_1| - d_2)sign(u_1)H(|u_1| - d_2) - \frac{W}{R_{eff2}}(u_2 - u_1) \\ - \mu_2 W Z_2 - k_{r2}(|(u_2 - u_1)| - d_2)sign(u_2 - u_1)H(|(u_2 - u_1)| - d_2) \\ = -m_1\ddot{u}_g(t) \end{aligned} \tag{75}$$

de onde, de forma análoga, a componente Z_1 é governada por:

$$\frac{dZ_1}{dt} = \frac{1}{u_{y1}}\{A_1 - |Z_1|^{\eta_1}[\gamma_1 sign(\dot{u}_1 Z_1) + \beta_1]\}\dot{u}_1 \tag{76}$$

Estas equações do movimento representam o comportamento parcial de um SIP®–Adaptive e são as mesmas que estão implementadas em software como o SAP2000. No entanto, estas foram modificadas para representar um DFPS modelado em série com capacidades de deslocamento finitas.

As Equações (72) a (76) podem ser ainda escritas como um sistema de equações diferenciais ordinárias da forma

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + \{B\} \tag{77}$$

onde o vetor de estado {x} é:

$$\{\mathrm{x}\} = \{u_1 \;\; u_2 \;\; u_3 \;\; \dot{u}_1 \;\; \dot{u}_2 \;\; \dot{u}_3 \;\; Z_1 \;\; Z_2\}^T \tag{78}$$

Estando o vetor de estado, {x}, definido desta forma, cada termo da sua derivada, $\{\dot{x}\}$, será:

$$\dot{u}_1 = x(4) \tag{79}$$

$$\dot{u}_2 = x(5) \tag{80}$$

$$\dot{u}_3 = x(6) \tag{81}$$

$$\ddot{u}_1 = -\left[\frac{W}{m_1 R_{eff1}} + \frac{W}{m_2 R_{eff2}}\right] u_1 + \frac{W}{m_1 R_{eff2}} u_2 - \frac{\mu_1 W Z_1}{m_1} + \frac{\mu_2 W Z_2}{m1} + \frac{F_{r2} - F_{r1}}{m_1} - \ddot{u}_g \tag{82}$$

$$\ddot{u}_2 = \frac{W}{m_2 R_{eff2}} u_1 - \left[\frac{W}{m_2 R_{eff2}} + \frac{k_s}{m_2}\right] u_2 + \frac{k_s}{m_2} u_3 - \frac{(c_s - c_b)}{m_2} \dot{u}_2 + \frac{c_s}{m_2} \dot{u}_3 - \frac{\mu_2 W Z_2}{m_2} - \frac{F_{r2}}{m_2} - \ddot{u}_g \tag{83}$$

$$\ddot{u}_3 = \frac{k_s}{m_3} u_2 - \frac{k_s}{m_3} u_3 + \frac{c_s}{m_3} \dot{u}_2 - \frac{c_s}{m_3} \dot{u}_3 - \ddot{u}_g \tag{84}$$

$$\dot{Z}_1 = \frac{1}{u_{y1}} \{A_1 - |Z_1|^{\eta_1} [\gamma_1 sign(\dot{u}_1 Z_1) + \beta_1]\} \dot{u}_1 \tag{85}$$

$$\dot{Z}_2 = \frac{1}{u_{y2}} \{A_2 - |Z_2|^{\eta_2} [\gamma_2 sign(\dot{u}_2 Z_2) + \beta_2]\} \dot{u}_1 + \frac{1}{u_{y2}} \{A_2 - |Z_2|^{\eta_2} [\gamma_2 sign(\dot{u}_2 Z_2) + \beta_2]\} \dot{u}_2 \tag{86}$$

Atendendo aos termos do lado direito das Equações (79) a (86), a matriz de estado $[A]$ e o vetor $\{B\}$ ficam completos, tendo as seguintes formulações seguintes (retirado de Fenz e Constantinou (2008a)):

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\left[\frac{W}{m_1 R_{eff1}} + \frac{W}{m_2 R_{eff2}}\right] & \frac{W}{m_1 R_{eff2}} & 0 & 0 \\ \frac{W}{m_2 R_{eff2}} & -\left[\frac{W}{m_2 R_{eff2}} + \frac{k_s}{m_2}\right] & \frac{k_s}{m_2} & 0 \\ 0 & \frac{k_s}{m_3} & -\frac{k_s}{m_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{u_{y1}}\{A_1 - |Z_1|^{\eta_1}[\gamma_1 sign(\dot{u}_1 \square\square_1) + \beta_1]\} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{u_{y2}}\{A_2 - |Z_2|^{\eta_2}[\gamma_2 sign(\dot{u}_2 Z_2) + \beta_2]\} \end{bmatrix} \quad (87)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_1 W}{m_1} & \frac{\mu_2 W}{m_1} \\ -\frac{(c_s - c_b)}{m_2} & \frac{c_s}{m_2} & 0 & -\frac{\mu_2 W}{m_2} \\ \frac{c_s}{m_3} & -\frac{c_s}{m_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{u_{y2}}\{A_2 - |Z_2|^{\eta_2}[\gamma_2 sign(\dot{u}_2 Z_2) + \beta_2]\} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

e o vetor $\{B\}$:

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_{r2} - F_{r1}}{m_1} - \ddot{u}_g \\ -\frac{F_{r2}}{m_2} - \ddot{u}_g \\ -\ddot{u}_g \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (88)$$

Um ponto que deve ser salientado em relação às Equações (82) e (83), referentes às acelerações das superfícies inferior e superior, respetivamente, é o facto de a força de restituição no batente, F_{ri} e o coeficiente de atrito, μ_i, serem calculados com o deslocamento e velocidade do passo de integração anterior.

Esta abordagem não conduz a um resultado perfeitamente correto. Porém, o erro associado é negligenciável, evitando análises que requerem maior capacidade de cálculo computacional para obter soluções do algoritmo.

No MATLAB, o sistema de equações diferenciais ordinárias apresentado na Equação (77) é resolvido recorrendo ao *solver ode15s*, um algoritmo de resolução passo a passo que permite calcular de forma eficiente problemas numéricos com descontinuidades. Em concreto, estas equações são descontínuas devido às variáveis Z_i, que têm uma variação entre -1 e 1 consoante a velocidade de deslize da articulação.

Com efeito, se a velocidade de deslize da articulação não variar, esta irá ter uma transição suave entre -1 e 1. Porém, quando a velocidade de deslize da articulação varia drasticamente, como é o caso da reversão do movimento, os valores de Z_i variam muito rapidamente, tornando a equação rígida.

A título de exemplo, procurou reproduzir-se o cenário exemplo que é apresentado por Fenz e Constantinou (2008a). Tendo em conta que o SIP®–Adaptive terá iguais coeficientes de atrito, ou seja, $\mu_{max} = \mu_{min}$, considerou-se para estes os valores médios apresentados nesse trabalho.

Considerando um edifício reduzido a um SDOF, de massa $m_3 = 92555kN/g$, com uma rigidez de $k_s = 283000kN/m$ e coeficiente de amortecimento de $c_s = 2070kN \cdot s/m$. A base da estrutura tem uma massa de $m_2 = 24242kN/g$, tal que o peso total suportado é $W = 116800kN$. O SIP®–Adaptive considerado tem iguais raios efetivos de curvatura com $R_{eff1} = R_{eff2} = 2.134m$ e coeficientes de atrito $\mu_1 = 0.045$ e $\mu_2 = 0.06$. A capacidade de deslocamento de ambos os aparelhos foi definida de forma arbitrária tal que $d_1 = d_2 = 0.1$ metros. Este aparelho de apoio foi testado para o sismo de 1941 em El Centro (ver Figura 49), com um fator de escala de 1.5, como observável no ciclo de histerese da Figura 50.

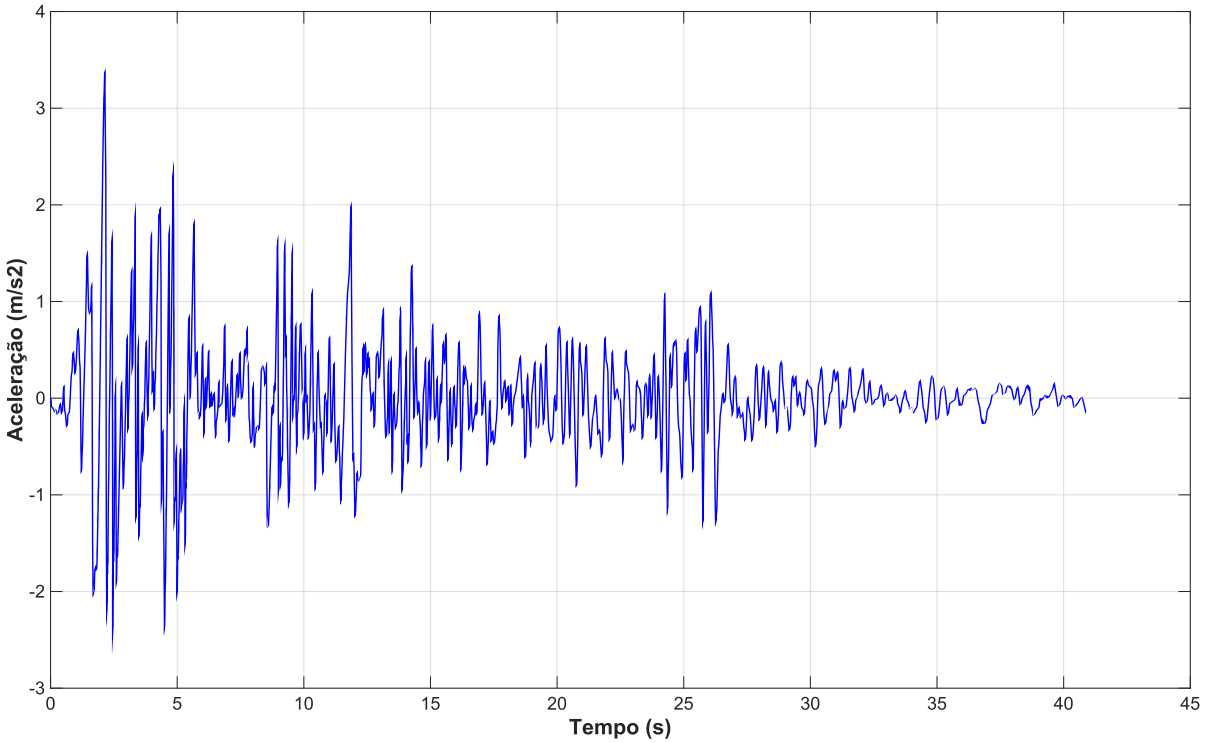


Figura 49 – Acelerograma do sismo de 1940 de ElCentro

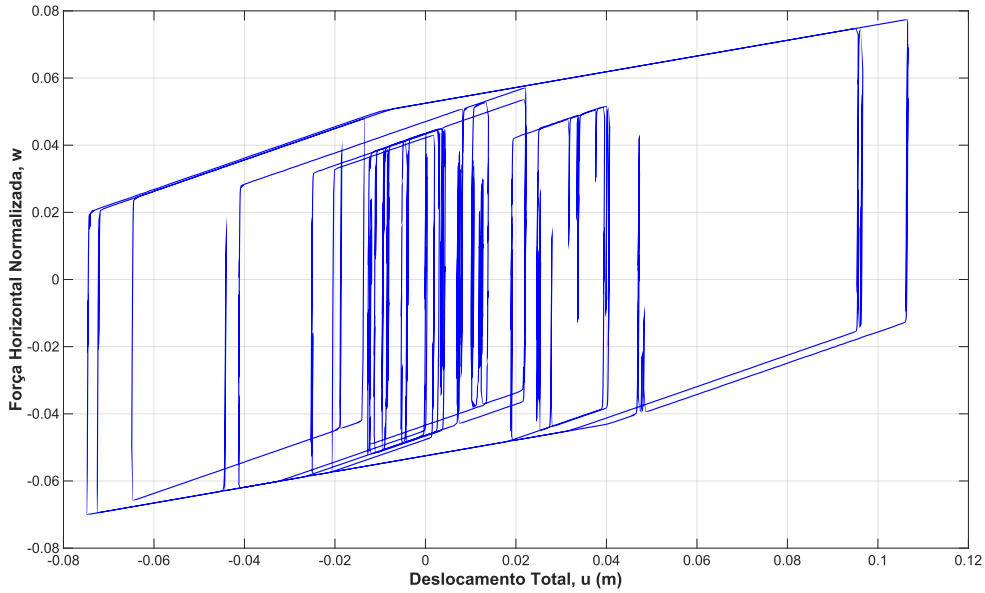


Figura 50 – SDOF isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB

Por análise da Figura 50, é possível observar que a modelação de dois FPS em série resulta num ciclo de histerese representativo dos dois regimes de deslize, com uma correta transição da rigidez entre o Regime de Deslize I e II, o que valida a modelação em série deste modo. A representação do Regime de Deslize III também pode ser efetuada através da modelação em série. Em todo o caso, a representação do comportamento apresentado na Secção 3.4.2.3. não é a mais aproximada. Isto deve-se à necessidade de modelar a superfície inferior com os parâmetros equivalentes ao Regime de Deslize II. Deste modo, o raio efetivo de curvatura a considerar para esta superfície será $R_{eff} = R_{eff1} + R_{eff2}$ e coeficiente de atrito μ_e como definido pela Equação (50), obtendo-se o ciclo de histerese da Figura 51.

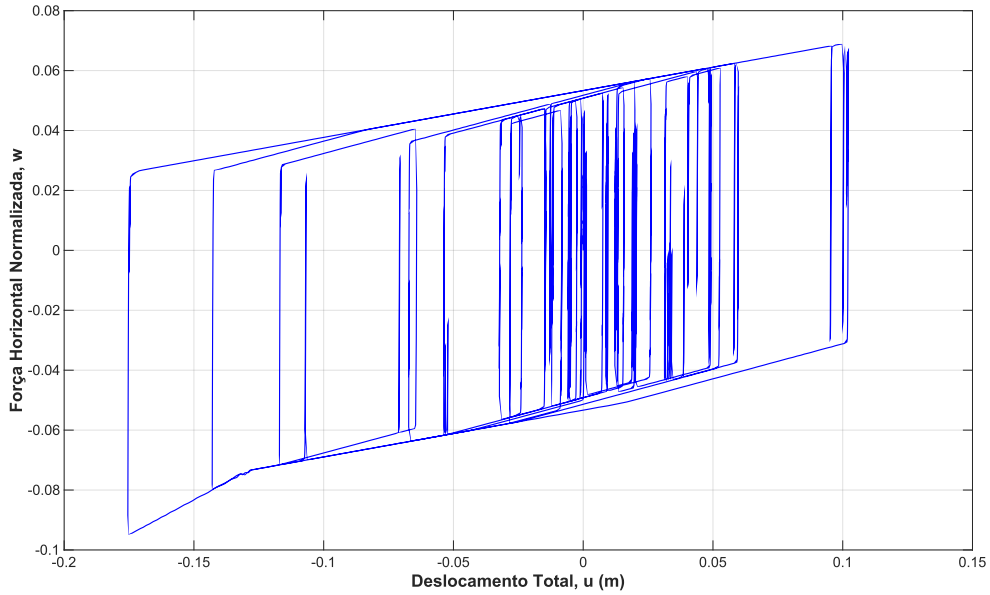


Figura 51 – Comportamento Adaptativo de um SDOF isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB

4.2.4. Incorporação da Inclinação da Base

Como foi possível observar na Secção 3.5, o efeito da inclinação da base na histerese do SIP®–Adaptive consiste num aumento generalizado da força exibida pelo aparelho de apoio e num desvio da posição de equilíbrio. Ao realizar uma análise dinâmica, esta variação tem de ser captada pelos elementos de folga dos FPS modelados em série. Estes exercem uma força pré-estabelecida no aparelho de apoio, a partir de um deslocamento também pré-definido.

Com o efeito da inclinação, é necessário adaptar as condições fronteira das equações diferenciais ordinárias tal que o incremento de força adquirido por via da inclinação da base possa ser corretamente captado.

Analiticamente, esta alteração consiste em alterar o vetor {x}, definido pela Equação (78), incorporando o desvio na posição de equilíbrio na superfície em que é efetuada a inclinação, u_r. Neste trabalho, foi estudado somente o efeito da inclinação da superfície inferior na histerese do aparelho de apoio, sendo efetuadas alterações às fórmulas descritas em 4.2.3 apenas para esta superfície.

Atendendo a isto, incorporar o efeito da inclinação da base consistem em transformar o vetor {x} no vetor $\{x_{inc}\}$, passando este a ser:

$$\{x_{inc}\} = \{u_1 \pm u_r \;\; u_2 \;\; u_3 \;\; \dot{u}_1 \;\; \dot{u}_2 \;\; \dot{u}_3 \;\; Z_1 \;\; Z_2\}^T \tag{89}$$

Deste modo, o deslize no aparelho de apoio irá começar a partir da posição de equilíbrio inclinada, C_r, de forma análoga à descrita nas Secções 3.4.2 e 3.5, iniciando o movimento pelo Regime de Deslize I e finalizando no Regime de Deslize II, no caso da modelação em série.

Não obstante a incorporação da inclinação no modelo analítico descrito em 4.2.3 ser trivial, sendo apenas necessário alterar a posição de equilíbrio de u_1 para $u_1 \pm u_r$, a diferença neste não fica evidenciada ao comparar o início do movimento no cenário nivelado e inclinado. Muito embora exista um aumento na força total que o aparelho de apoio exibe, esta não vem acompanhada de um desvio da posição de equilíbrio.

A razão principal para que este desvio não ocorra deve-se ao facto de que a modelação acima descrita pressupor a existência de uma capacidade de deslocamento finita e inalterada. Esta, por sua vez, fruto da inclinação horizontal da superfície inferior, também irá ser afetada, como aliás foi comprovado na Secção 3.3.4, a partir da Figura 26. Porém, o elemento de folga presente nas equações diferenciais ordinárias acima descritas não contempla esta alteração, quer no nível da sua força, quer no nível do seu deslocamento.

Em todo o caso, enquanto o desvio na posição de equilíbrio não consegue ser modelado diretamente a partir das formulações acima, o aumento da força no aparelho de apoio consegue ser caracterizado. Com efeito, relembrando a Equação (59)

$$s = \frac{(\tau_1 R_{eff1} + \tau_2 R_{eff2})W}{R_{eff1} + R_{eff2}}$$

o efeito da inclinação resulta apenas numa translação vertical do comportamento histerético do aparelho de apoio. Como a força do aparelho de apoio é definida em função do deslocamento que a articulação interna desenvolve, sendo este deslocamento maior, também a força total será maior. Será, então, razoável presumir que o comportamento histerético possa ser representado, em série, pela Figura 52

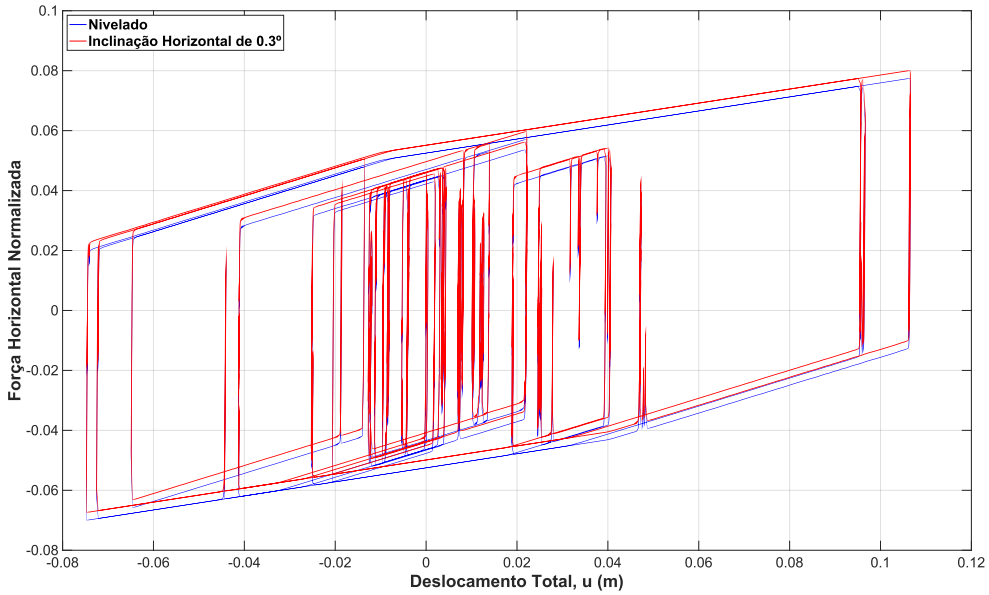


Figura 52 – Histerese Real de um SDOF Isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB

No entanto, para que fique evidenciado o desvio da posição de equilíbrio, foi incrementado em $\pm u_r$ no gráfico da Figura 53. Este, apesar de não representar o comportamento real do aparelho de apoio quando inclinado, facilita a compreensão do desvio horizontal causado pela inclinação.

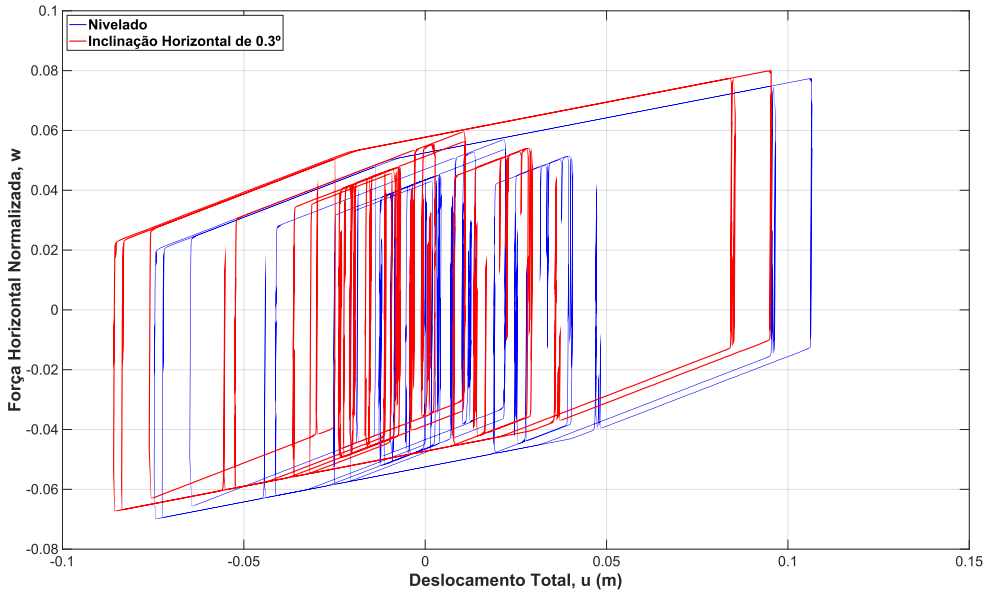


Figura 53 – Histerese de um SDOF Isolado com um SIP®–Adaptive modelado em série em MATLAB

4.3. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA EM SAP2000

4.3.1. APLICABILIDADE DE MODELOS EM SÉRIE PARA TFPS

A análise efetuada na Secção 4.2 permitiu avaliar o comportamento do aparelho de apoio quando representado como uma associação em série de dois FPS.

No entanto, o comportamento adaptativo do SIP®–Adaptive, não consegue ser caracterizada pelo modelo analítico descrito anteriormente, necessitando de uma superfície de deslize adicional, como mostra a Figura 54, para poderem representar a relação força-deslocamento de forma aproximada.

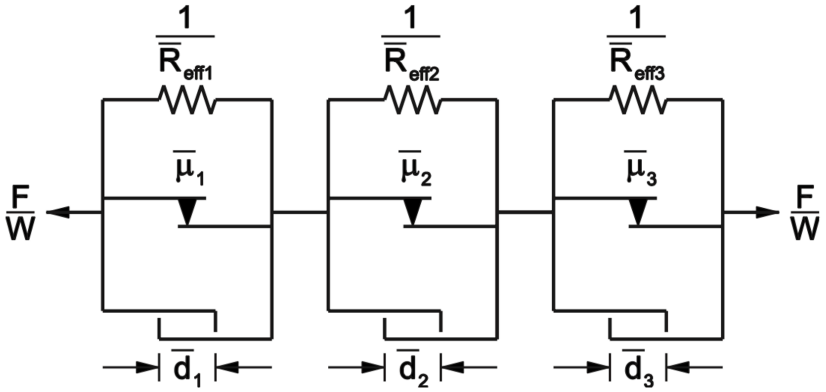


Figura 54 – Modelo Analítico de um TFPS com três elementos FPS associados em série, retirado de Fenz e Constantinou (2008b)

Todavia, a modelação de três FPS associados em série não é a mais efetiva. Isto deve-se ao facto de estes aparelhos de apoio não conseguirem capturar corretamente a interrupção e reinício do movimento do aparelho de apoio entre o Regime de Deslize II e III (a).

Este fenómeno vem associado ao facto de a modelação em série, presente no SAP2000, utilizar elementos de folga unidirecionais (Kim & Constantinou, 2023), que não são representativos do comportamento global destes aparelhos de apoio. Sem considerar estes efeitos, os resultados obtidos numa análise dinâmica são incorretos e incoerentes, muitas vezes subestimando a rigidez demonstrada para o Regime de Deslize III (a).

Em todo o caso, apesar de o comportamento em série não ser idêntico ao do aparelho de apoio em estudo, o SAP2000 permite ajustar os parâmetros do aparelho de apoio (*Link/Support Element > Triple Pendulum Isolator*) tal que a resposta final com uma análise não linear no domínio do tempo se aproxime mais do comportamento adaptativo do aparelho de apoio.

Existem poucos desenvolvimentos quanto às alterações que devem ser efetuadas nos programas de cálculo, sendo estas apenas desenvolvidas de forma teórica. Porém, El-Bayoumi (2015) e Weber et al. (2023) apresentam uma análise exaustiva dos parâmetros a introduzir no programa, bem como as considerações que são necessárias a ter em conta para a modelação adequada do SIP®–Adaptive.

4.3.2. LINK/SUPPORT ELEMENT – TRIPLE PENDULUM ISOLATOR

O elemento *Triple Pendulum Isolator* é um elemento de ligação do SAP2000 que permite incorporar o comportamento de um TFPS num determinado modelo numérico. Este funciona ao adaptar as equações do movimento apresentadas na Secção 4.2.3 para o modelo da Figura 54.

Internamente o programa procura reproduzir, com as equações do movimento, um modelo em série como observável na Figura 55. Este consiste na associação de três FPS (FP1, FP2 e FP3) e de dois elementos de folga (G2 e G3).

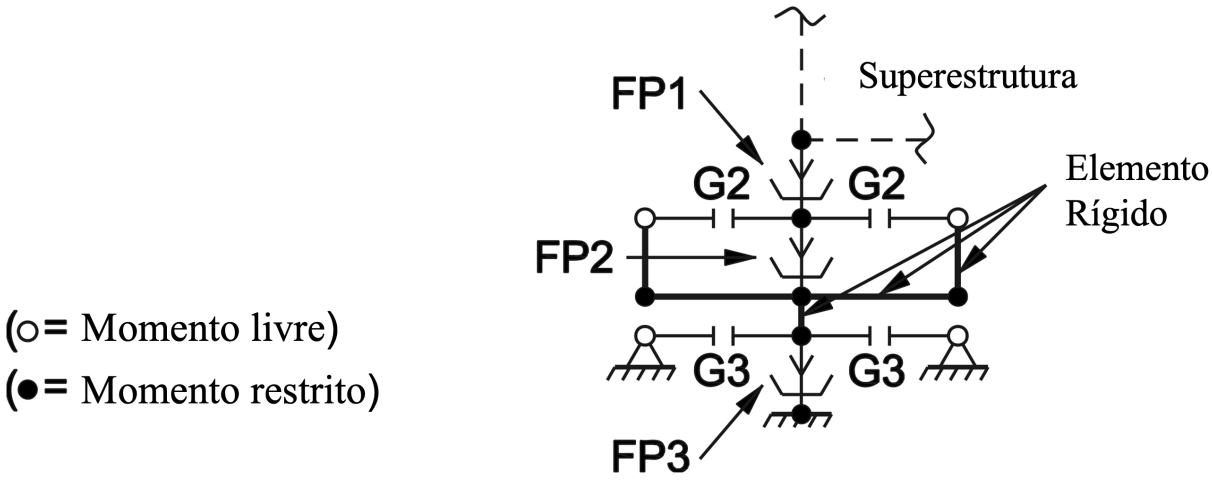


Figura 55 – Modelo numérico da associação em série de três FPS, com dois elementos de folga, conectados por via de elementos rígidos, adaptado de Fenz e Constantinou (2008b)

A associação em série de FPS é uma estratégia de modelação que procura representar de forma simplificada o comportamento adaptativo do aparelho de apoio. Contudo a modelação em série implica que a interação irá ocorrer prato a prato. Quer isto dizer, que cada prato subsequente, $i + 1$, só irá entrar em movimento quando o prato i esgotar a sua capacidade de deslocamento.

Deste modo, o comportamento adaptativo só consegue ser representado de forma adequada se forem realizadas algumas alterações aos parâmetros de entrada do *Triple Pendulum Isolator* para a análise dinâmica. A introdução dos parâmetros no SAP2000 é feita pelo menu da Figura 56 da página 80.

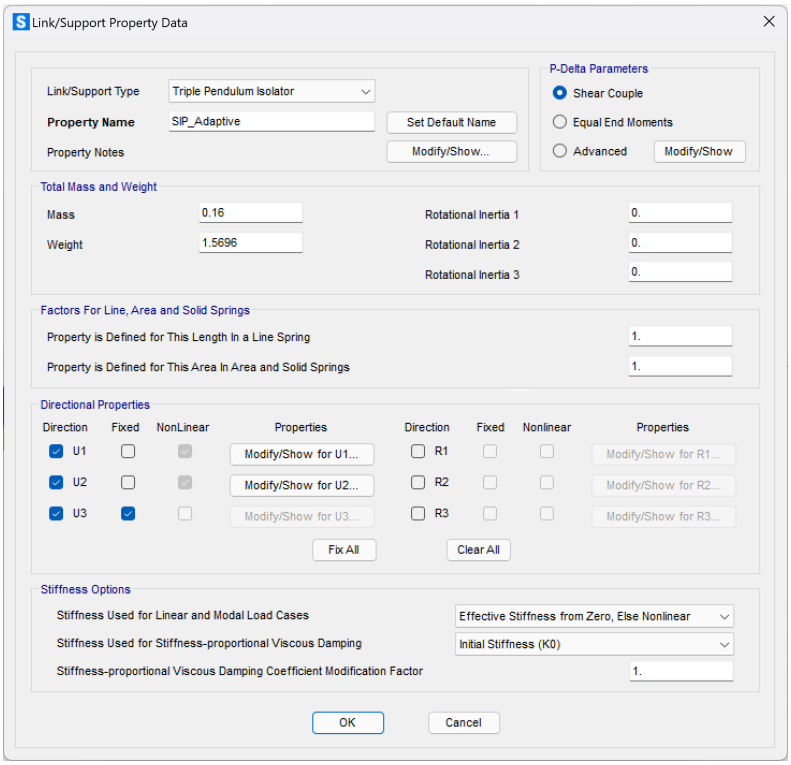


Figura 56 – Definição dos parâmetros de massa, peso e propriedades direcionais do SIP®–Adaptive, retirado de CSI (2024)

onde os parâmetros de massa e peso representam a massa $[ton]$ e o peso $[kN]$ do aparelho de apoio considerado na modelação. As inércias rotacionais para os três eixos de análise também ficam definidas, muito embora Sarlis e Constantinou (2010) tenham descrito que estes parâmetros podiam ser desconsiderados, sem que isso conduzisse a erros significativos.

As propriedades direcionais são específicas de cada eixo de análise e dependem da rigidez do aparelho de apoio para essas direções, sendo também possível restringir o deslocamento e rotação do aparelho de apoio.

Atendendo à Figura 57, a rigidez axial, k_{u1}, e o coeficiente de amortecimento, c_{u1}, do aparelho de apoio são definidos pelas seguintes expressões:

$$k_{u1} = A_{SIP®-Adaptive} \times E \tag{90}$$

$$c_{u1} = 2\sqrt{k_{u1} m_3} \times \zeta_s \tag{91}$$

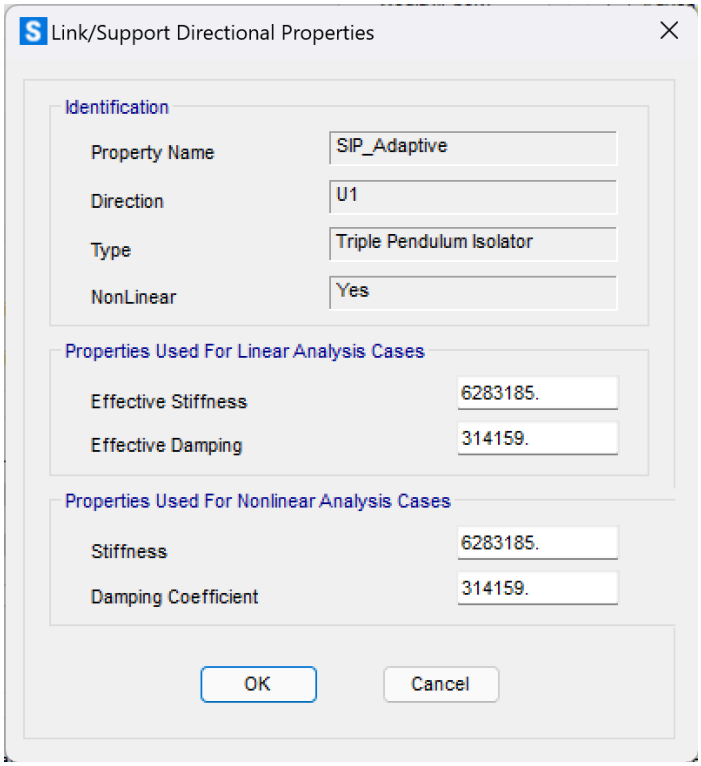


Figura 57 – Rigidez e Amortecimento Axial do SIP®–Adaptive, modelado em SAP2000, retirado de CSI (2024)

onde $A_{SIP®-Adaptive}$ representa a área de contacto da articulação com o prato inferior do aparelho de apoio, E representa o módulo de elasticidade do aparelho de apoio, e ζ_s o coeficiente de amortecimento da estrutura em análise.

Para representar a relação força-deslocamento na direção horizontal, é necessário definir a rigidez que o aparelho de apoio exibe para esta direção. A Figura 58 representa o menu com os parâmetros de entrada necessários para caracterizar o comportamento do aparelho de apoio no SAP2000.

Tendo em conta as propriedades para análise linear, é necessário definir a rigidez efetiva e o amortecimento efetivo. A rigidez efetiva é determinada previamente para a força máxima, F_{max}, que o aparelho de apoio desenvolve quando o mesmo atinge a capacidade de deslocamento máxima, d_{cd}.

$$K_{eff-u2} = \frac{F_{max}}{d_{cd}} \tag{92}$$

O amortecimento efetivo é determinado pelo quociente entre a energia dissipada em cada ciclo de histerese, W_D, e o produto da força máxima pelo deslocamento máximo, equivalente à capacidade de deslocamento do aparelho de apoio. Este pode ser expresso por

$$\zeta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi F_{max} d_{cd}} \tag{93}$$

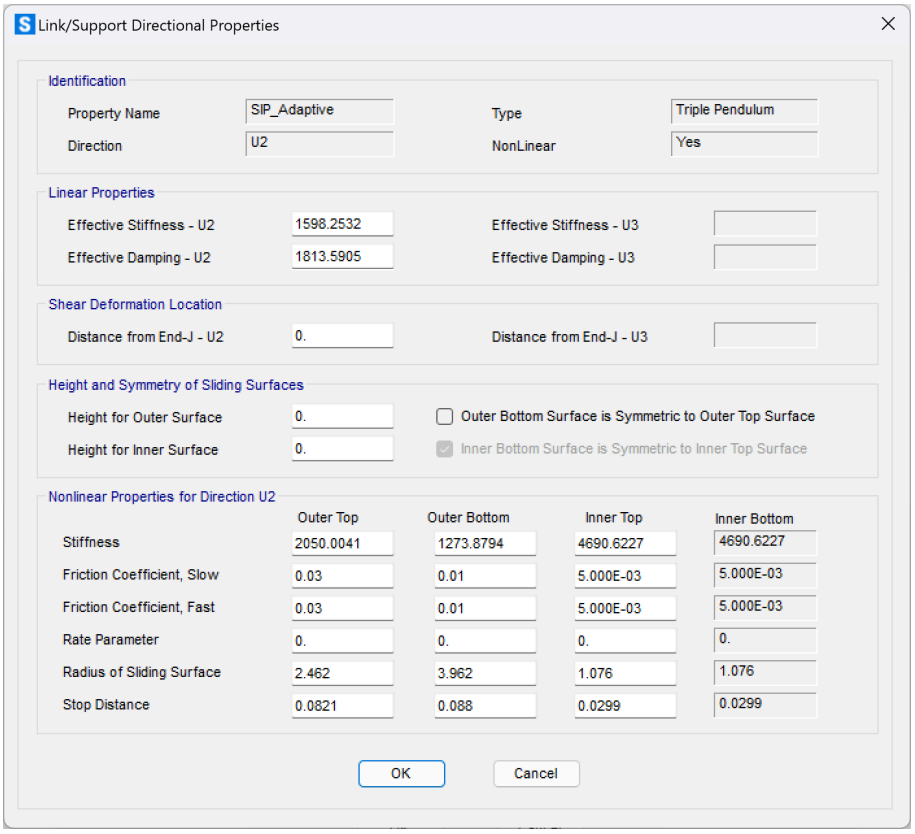


Figura 58 – Definição dos parâmetros de rigidez horizontal de um SIP®–Adaptive para análise linear e não linear em SAP2000, retirado de CSI (2024)

Ou, pela expressão (7.5) do Eurocódigo 8-2 (CEN, 2005b),

$$\zeta_{eff} = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{\sum E_{D,i}}{K_{eff} d_{cd}^2}\right] \tag{94}$$

onde, $\sum E_{D,i}$ representa o somatório da energia dissipada por ciclo de histerese de todos os aparelhos de apoio aplicados numa estrutura.

Os parâmetros definidos por *Outer Top*, *Outer Bottom* e *Inner Top*, são referentes às superfícies de deslize superior, inferior e à articulação interna do aparelho de apoio. Como definido por Fenz e Constantinou (2008b), por se tratar da modelação em série de três FPS, é necessário adaptar os valores do raio efetivo de curvatura e capacidades de deslocamento de cada superfície de deslize em função da articulação interna, para que os resultados calculados pela associação em série sejam o mais próximo possível do comportamento adaptativo do aparelho de apoio.

Para o SIP®–Adaptive, não foi possível encontrar nenhum documento que remetesse para os parâmetros geométricos da articulação interna. Em todo o caso, estes podem ser determinados de forma aproximada com o AutoCAD (Autodesk, 2024a) para um aparelho de apoio de dimensão conhecida.

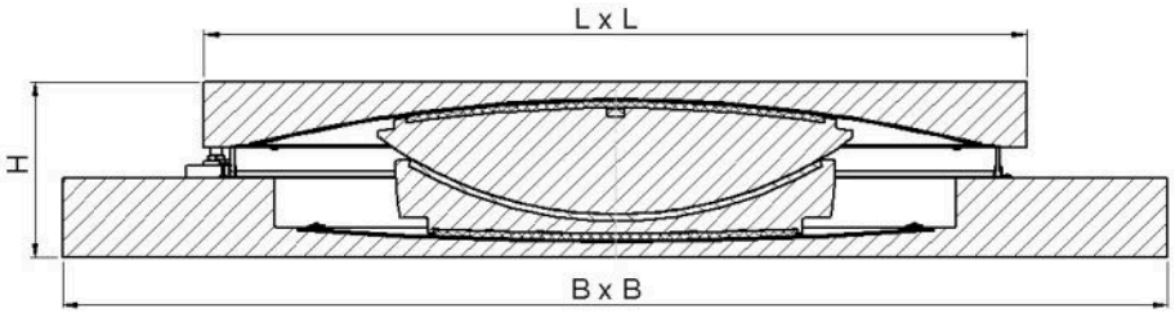


Figura 59 – Secção de um SIP®–Adaptive, retirado de uma proposta comercial do aparelho de apoio

Pela Figura 59, foi possível determinar que o raio de curvatura da articulação, R_{art}, e a capacidade de deslocamento, d_{art}. Recorrendo à terminologia utilizada por Fenz e Constantinou (2008b)), o raio efetivo de curvatura a introduzir no SAP2000 para FP1, FP2 e FP3, ficam respetivamente definidos por:

$$\bar{R}_{eff1} = 2R_{art} \tag{95}$$

$$\bar{R}_{eff2} = R_{eff1} - R_{art} \tag{96}$$

$$\bar{R}_{eff3} = R_{eff2} - R_{art} \tag{97}$$

bem como as capacidades de deslocamento de cada FPS:

$$\overline{d_2} = \frac{R_{eff1} - R_{art}}{R_{eff1}} d_1 \tag{98}$$

$$\overline{d_3} = \frac{R_{eff2} - R_{art}}{R_{eff2}} d_2 \tag{99}$$

$$\bar{d}_1 = (2d_{art} + d_1 + d_2) - \left(\overline{d_2} + \overline{d_3}\right) \tag{100}$$

O parâmetro "a" de cada FPS também irá mudar. Porém, como a foi abordado anteriormente, o coeficiente de atrito do SIP®–Adaptive é considerado como constante para uma análise dinâmica. Deste modo, as alterações a efetuar ao parâmetro "a" não seram abordadas no presente trabalho.

Da análise efetuada por Fenz e Constantinou (2008b), é indicado que o valor de $\bar{d}_1$ pode não ser especificado, sem que isso interfira com os resultados finais. Tal é equivalente a admitir que a capacidade de deslocamento de FP1 é infinita.

Da modelação em SAP2000 efetuada pelo autor, esta consideração foi tida em conta. De modo a não obter instabilidades de cálculo, definiu-se uma capacidade de deslocamento para FP1 de

$$\bar{d}_1 = 10 \tag{101}$$

cerca de cem vezes superiores aos da capacidade de deslocamento das superfícies de FP2 e FP3, para o cenário de dimensionamento que irá ser abordado no Capítulo 6, obtendo-se o ciclo de histerese da Figura 60.

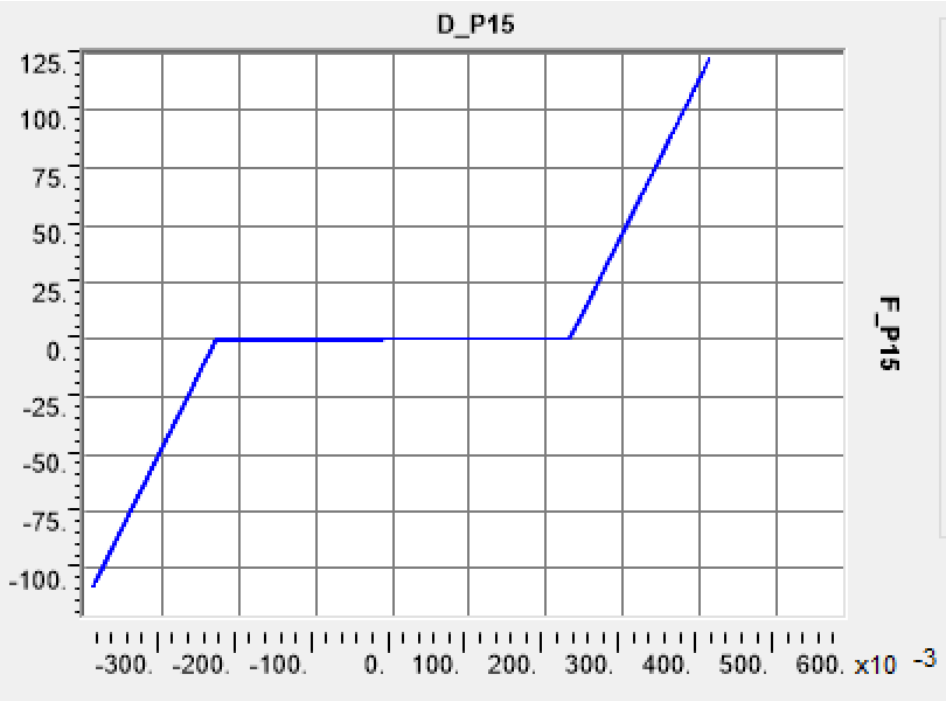


Figura 60 – Ciclo de Histerese de um SIP®–Adaptive recorrendo a uma análise não linear em SAP2000

Como é possível observar, o ciclo de histerese da Figura 60 não conduz a resultados representativos do comportamento do aparelho de apoio. Estes resultados foram obtidos para o sismo de ElCentro (ver Figura 49) e, apesar de conduzirem a forças horizontais próximas do expectável para o cenário exemplo, não apresentam quer deslocamentos coerentes, quer a mudança entre os vários regimes de deslize. Posteriormente, foi efetuada uma análise com a capacidade de deslocamento adaptada, com o valor de $\bar{d}_1 = 0{,}29899\text{cm}$. Esta análise conduziu a um resultado semelhante ao da Figura 60, não havendo mudanças no formato do ciclo de histerese do aparelho de apoio.

É possível dizer, contudo, que o cálculo efetuado pelo programa aparenta conduzir o leitor à conclusão de que estão a ser utilizadas as propriedades de cálculo linear e, portanto, o cálculo estará a ser efetuado com a rigidez efetiva do aparelho de apoio.

A Figura 61 mostra o ciclo de histerese obtido ao realizar uma análise linear. A interpretação dos resultados obtidos para esta análise é ainda mais complexa e revela ainda maior incoerência e disparidade na forma como o SAP2000 realiza o cálculo para este tipo de aparelho de apoio. O comportamento histerético observado não é representativo do comportamento de um aparelho de apoio pendular friccional, quer na análise não linear da Figura 61, quer na análise linear da Figura 61.

Em todo o caso, apesar dos resultados do SAP2000 revelarem um comportamento histerético altamente instável, a estrutura apresenta um período próximo do período expectável para uma estrutura com este tipo de sistema de isolamento de base. Por esta mesma razão, é possível tirar duas ilações para a modelação destes aparelhos de apoio em SAP2000.

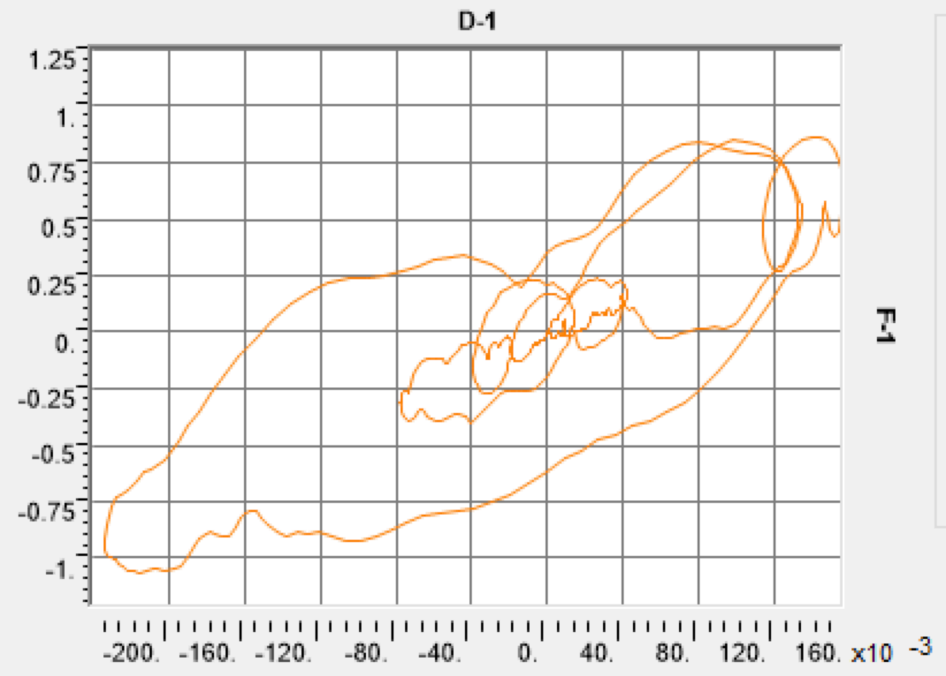


Figura 61 – Ciclo de Histerese de um SIP®–Adaptive recorrendo a uma análise linear em SAP2000

Em primeiro lugar, apesar de uma análise detalhada do comportamento histerético ser inviável, os períodos de vibração de uma estrutura isolada com o aparelho de apoio continuam a ser plausíveis, pelo que uma análise modal pode ser efetuada. Estes aumentam face ao período fundamental de uma estrutura sem isolamento de base, independentemente do comportamento histerético ser altamente variável e inconstante.

A segunda ilação atenta na variabilidade do comportamento do aparelho de apoio, inviabilizando a análise do recentramento por via do SAP2000. Com efeito, o programa utiliza elementos de folga unidirecionais (Kim & Constantinou, 2023) que não conseguem captar corretamente a interação entre os diferentes pratos do aparelho de apoio, não captando o comportamento adaptativo

Deste modo, para efeitos da análise do recentramento, só serão efetuadas análises dinâmicas para uma modelação em série de dois FPS em MATLAB, pois esta metodologia, ainda que não seja representativa do comportamento global do SIP®–Adaptive, consegue conduzir a resultados coerentes com as relações força-deslocamento apresentadas no Capítulo 3.

5

O VIADUTO FERROVIÁRIO DE SINES E A SUA REABILITAÇÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o caso de estudo, o viaduto ferroviário de Sines, que será alvo de uma reabilitação estrutural. Neste serão aplicados apoios do tipo SIP®–Adaptive, tirando partido da inclinação da sua base. Com a aplicação deste tipo de aparelho de apoio, pretende-se atingir dois objetivos: dotar a estrutura de um melhor desempenho aos sismos; e capacitar os pilares com um mecanismo capaz de contribuir para o comportamento global da estrutura sob a ação da frenagem, melhorando a condição de recentramento. Deste modo, em 5.2 é caracterizado o viaduto e o seu formato, bem como, em 5.3, as necessidades de reabilitação para que se consiga uma condição de recentramento conveniente em condições de serviço.

Na Secção 5.3 é apresentada a proposta de reabilitação para o viaduto, salientando o que motivou a escolha da mesma face a outras possibilidades de reabilitação, bem como um esquema do modelo numérico implementado (no projeto, no programa de cálculo do próprio gabinete e em *Robot Structural Analysis*, neste trabalho em SAP2000) que permitiu conduzir aos resultados da estrutura atual. É também caracterizada a razão pela qual a inclinação da base foi necessária para potenciar o recentramento do tabuleiro em cenário de serviço.

5.2. CONCEÇÃO ESTRUTURAL DO VIADUTO FERROVIÁRIO DE SINES

O Viaduto Ferroviário de Sines é uma obra ferroviária construída no início da década de noventa (ver Figura 62 a Figura 64) com dois encontros e quinze pilares. Em planta, esta estrutura tem um tabuleiro único de 290 metros de comprimento, ligeiramente curvo numa das extremidades, em menos de metade da sua extensão. Originalmente, o viaduto havia sido projetado com duas vias de circulação. Porém, por motivos não abordados no presente trabalho, apenas foi construída uma via de circulação, sendo a construção atual diferente da projetada nos anos noventa.

O tabuleiro do viaduto está restringido a qualquer tipo de deslocamento na direção transversal por via de *shear-keys*, aparelhos de apoio que impedem o deslocamento do elemento estrutural suportado em determinada direção. Adicionalmente, o viaduto tem o seu deslocamento longitudinal restringido no Encontro Direito (ver Figura 65) por via de cabos de pré-esforço, estando livre no Encontro Esquerdo. O objetivo destes cabos seria restringir movimentos longitudinais do tabuleiro para a ação da frenagem, e, também, de servirem como um mecanismo de segurança num evento sísmico, ao libertarem o tabuleiro antes que a força de corte do encontro fosse excedida.

Figura 62 – Viaduto Ferroviário de Sines

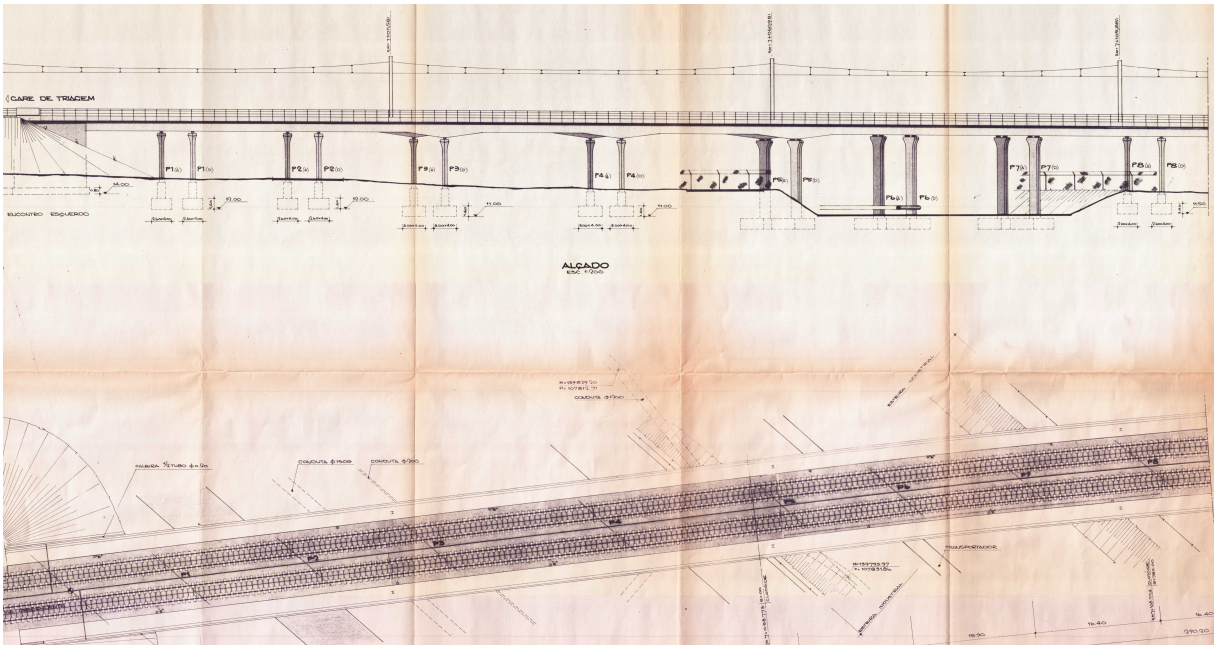


Figura 63 – Alçado e Planta do Traçado Original do Viaduto Ferroviário de Sines, Encontro Esquerdo e Pilares P1 a P8, adaptado do projeto original

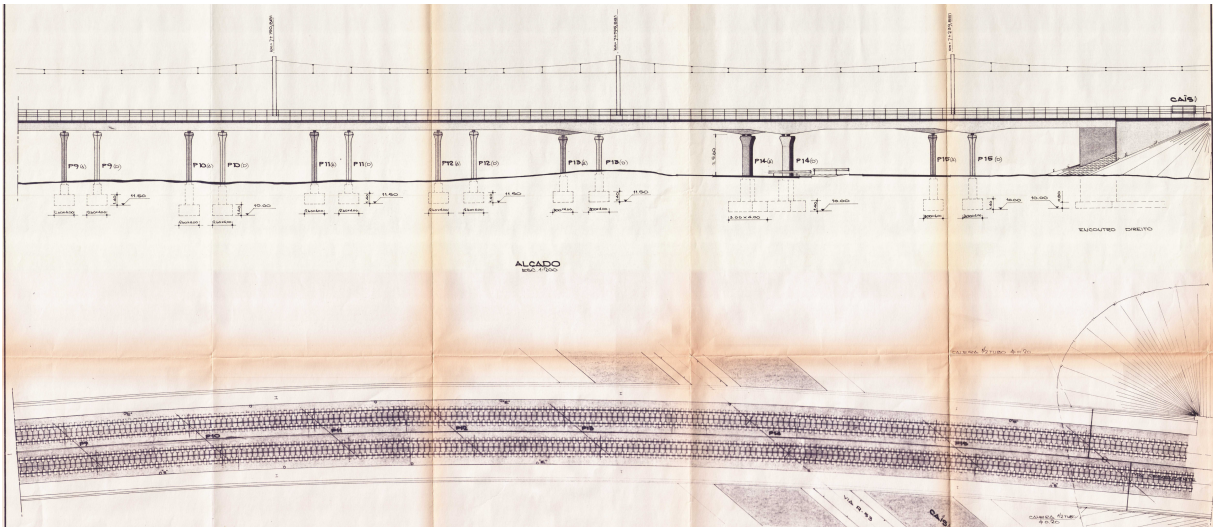


Figura 64 – Alçado e Planta do Traçado Original do Viaduto Ferroviário de Sines, Pilares P9 a P15 e Encontro Direito, adaptado do projeto original

Figura 65 – Encontro Direito e Pilar P15

5.3. NECESSIDADES DE INTERVENÇÃO EM CENÁRIO DE SERVIÇO

5.3.1. O EFEITO DA FRENAGEM SOBRE O ENCONTRO DIREITO

Atendendo à Figura 65 e à conceção do Encontro Direito, convém salientar como é que este irá funcionar sob a ação da frenagem quando o comboio circula em direção ao Encontro Esquerdo, situação que é altamente improvável por duas razões: o Encontro Esquerdo encontra-se mais elevado que o Encontro Direito, sendo que o comboio estaria a aplicar a carga de frenagem total enquanto ganharia elevação; e também, a maioria do tráfego neste viaduto é em direção ao porto de Sines, ou seja, ao Encontro Direito, reduzindo ainda mais a probabilidade de haver uma locomotiva que frenasse (ou acelerasse) com a intensidade regulamentar, na direção mais desfavorável. No entanto, tratando-se de um requisito regulamentar e sendo a sua ocorrência uma possibilidade que não pode ser classificada como ação acidental – apesar da sua baixa probabilidade, tem que se garantir que a estrutura comporta com segurança e desempenho adequado

Não dispondo dos pormenores da conceção estrutural e geometria dos encontros, pelo que a análise efetuada de em diante é baseada nas informações recolhidas a partir do projeto de reabilitação, que também não explicita concretamente a sua conceção e definição iniciais.

Tendo em conta as ações de frenagem presentes na regulamentação atual (CEN, 2023) para uma locomotiva LM71 de classe D4, bem como a interação via-estrutura e via-aterro – interação da frenagem com o balastro e do balastro com a via, como também a interação da frenagem com o aterro do encontro, análise densa e bastante detalhada que excede o âmbito neste trabalho, é possível arbitrar que a ação da frenagem nominal, isto é, sem majoração da ação, a ser absorvida pelo tabuleiro será

$$F_{Fre} = \pm 4750kN \tag{102}$$

O Encontro Direito comporta dois cabos de pré-esforço em cada via de circulação, tendo cada um catorze metros de comprimento. Cada cabo contém doze strands de 0,6 polegadas, com $1{,}4cm^2$ de área, pré-esforçados a um total de $300\ kN$ em cada cabo. Admitindo que estes dois cabos suportam a força de frenagem, a tensão instalada em cada cabo será

$$\sigma_{strand} = \frac{4750kN \times 10^{-3}}{2 \times 12 \times 1.4cm^2 \times 10^{-4}} = 1413\ MPa \tag{103}$$

e, para esta tensão, o cabo irá alongar em

$$\Delta_{strand}/m = \frac{\sigma_{strand}}{E} = \frac{1413MPa \times 10^{-3}}{200GPa} = 0.00707m/m \times 10^2 = 0.707\ cm/m \tag{104}$$

onde E representa o módulo de elasticidade do aço. Atendendo ainda a que o cabo de pré-esforço tem catorze metros de comprimento, o alongamento final do cabo, para a ação da frenagem será

$$\Delta_{strand} = 0.7 \times 14m \approx 10cm \tag{105}$$

Adicionalmente, é também assumido que, para a força de pré-esforço instalada em cada cabo, as cunhas podem entrar e soltar-se com a frenagem do comboio, deixando de prender os cabos e, por consequência, o tabuleiro do Viaduto Ferroviário de Sines.

Se estes não se romperem ou soltarem, as armaduras do Encontro Direito não conseguem suportar por si só a ação da frenagem e, mesmo que conseguissem, a pressão passiva e o atrito exercido pelo terreno adjacente ao Encontro Direito iria mobilizar cargas nominais próximas do limite superior que este conseguiria suportar.

A eventualidade de acontecer uma frenagem regulamentar é improvável. Em todo o caso, regulamentação atual permite um deslocamento relativo entre o tabuleiro e os encontros, para tabuleiros contínuos sem juntas de dilatação, não maior que 6 milímetros.

Sabendo que se trata de uma reabilitação, a conceção inicial do viaduto impede que o deslocamento do tabuleiro seja controlado para que fique de acordo com as normas atuais. Porém, é possível conceber uma estratégia de intervenção que procure controlar melhor este deslocamento, sem que este tenha efeitos graves na estrutura.

5.3.2. Proposta de Reabilitação

A fim de suster o efeito da frenagem no viaduto, é necessária a adoção de estratégias de intervenção externas ao encontro que permitam ao viaduto resistir à ação imposta sem prejuízo do comportamento estrutural. Deste modo, a estratégia de intervenção idealizada para esta reabilitação procura que a estrutura como um todo sustenha a ação da frenagem, em vez de ser só Encontro Direito resistir a esta ação.

Esta intervenção pode ser materializada por via da repartição da ação da frenagem nos quinze pilares e no Encontro Esquerdo do viaduto, pois estes ainda dispõe de alguma capacidade para suportar outras solicitações. Deste modo, em cada pilar (ver Figura 66) serão instalados dois aparelhos de apoio do tipo SIP®–Adaptive, conferindo-lhes uma inclinação pequena na sua base.

Os objetivos da inclinação destes aparelhos de apoio são: aumentar a força horizontal exibida pelo aparelho de apoio, opondo-se ao deslocamento do tabuleiro na direção longitudinal; e promover uma melhoria no recentramento do tabuleiro, aspeto essencial para diminuir o deslocamento relativo em relação ao encontro, quer para a ação da frenagem, quer em caso de rotura devido a uma ação sísmica.

Por este motivo, a condição de recentramento para o estudo do efeito da inclinação da base no viaduto ferroviário de Sines foi definida, como imposição de projeto, para um valor de

$$\frac{d_{cd}}{d_0} \geq 2{,}0 \tag{106}$$

o que é mais exigente do que o requerido na regulamentação anti-sísmica.

Figura 66 – Geometria atual do Pilar e ligação do mesmo ao tabuleiro

5.3.2.1. Seleção do Raio Efetivo de Curvatura e Coeficientes de Atrito

A seleção do raio efetivo de curvatura teve por base a determinação do período efetivo da estrutura como efeito do isolamento idealizado o viaduto. Deste modo, foi criado um modelo numérico bidimensional em SAP2000, de acordo com o desenvolvimento em alçado do viaduto, que tem em conta a variação da secção do tabuleiro em todo o seu desenvolvimento (ver Figura 68 a Figura 69).

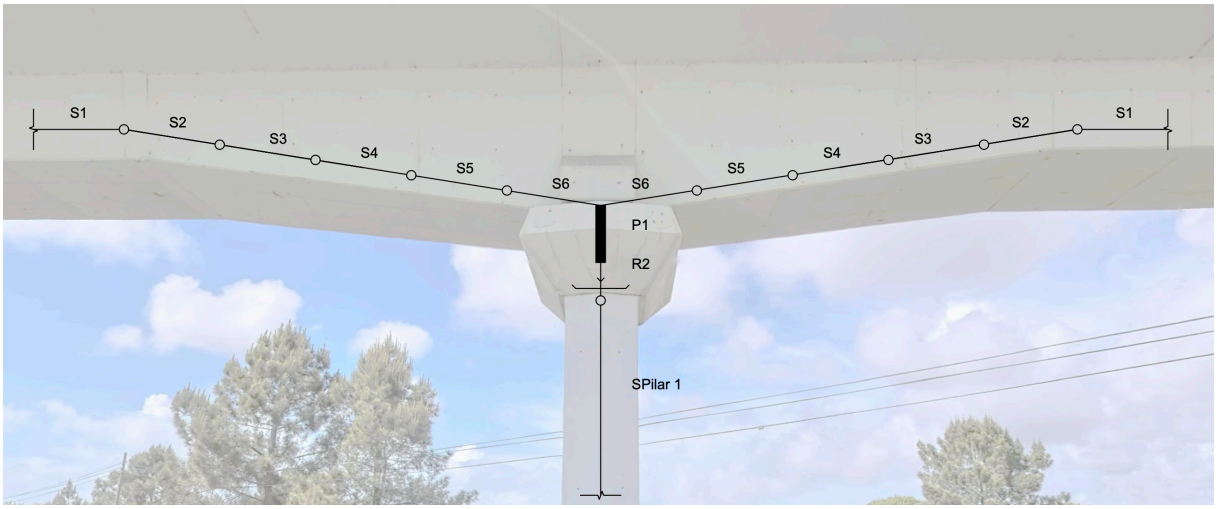


Figura 67 – Conceptualização do Modelo Numérico utilizado para caracterizar a estrutura existente

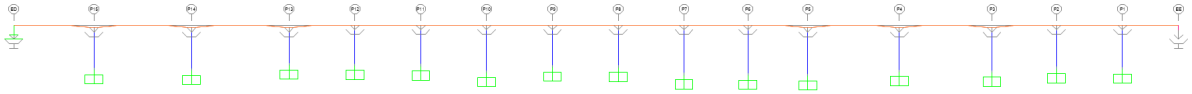


Figura 68 – Modelo Numérico Bidimensional do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000

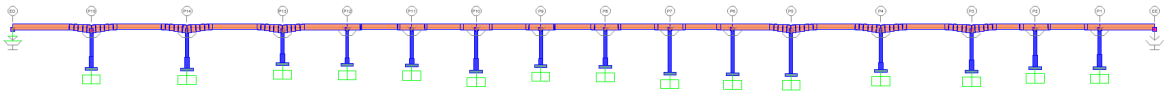


Figura 69 – Modelo Numérico Bidimensional Extrudido do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000

O modelo bidimensional apresentado na Figura 68 foi desenvolvido de raiz pelo autor em SAP2000. Este foi baseado num modelo tridimensional já existente em *Robot Structural Analysis*, desenvolvido para o projeto de reabilitação do viaduto, onde foram realizadas considerações de modo a ter em conta o efeito nos deslocamentos do viaduto ferroviário de Sines provocado pela ação térmica, pela assimetria e variação da secção do tabuleiro, pelo desenvolvimento curvo da via, e pelos cabos de pré-esforço.

Todavia, estas considerações dificultam a análise e calibração do aparelho de apoio na análise do recentramento sob a ação da frenagem. Adicionalmente, a inexistência do elemento *Triple Pendulum Isolator* no *Robot Structural Analysis* também motivou que fosse realizado um modelo bidimensional em SAP2000, mais simplificado, de modo a captar isoladamente o comportamento longitudinal do viaduto.

Deste modo, para representar adequadamente a variação da secção do tabuleiro, foram modeladas vigas de secção geométrica retangular aproximada (ver Figura 67 e Figura 71), sendo a geometria e comprimento destes elementos calculados de modo a representar as propriedades mecânicas e geométricas do tabuleiro. Isto permitiu simular o comportamento da secção real do tabuleiro em todo o seu comprimento. Analogamente, a geometria dos pilares também foi modelada de modo a ser representativa da geometria real e das suas propriedades mecânicas (ver Figura 70 e Figura 71 da página 94).

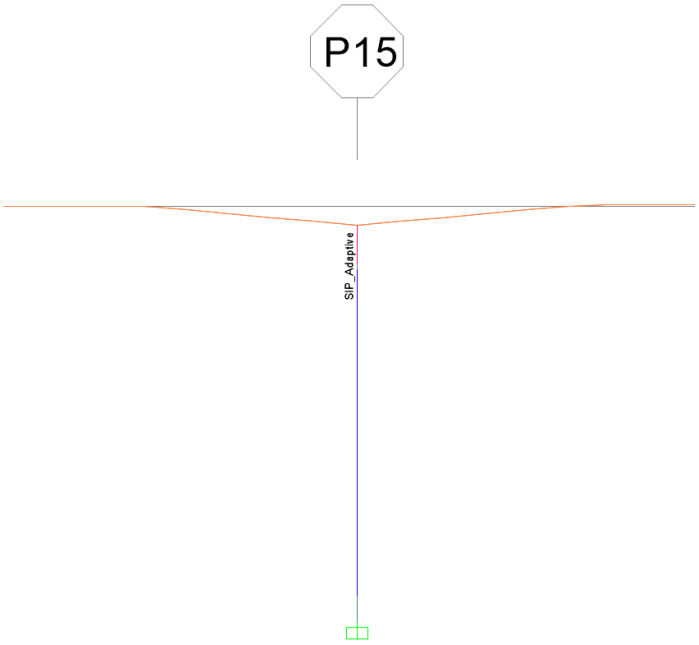


Figura 70 – Secção do Pilar P15 no Modelo Numérico Bidimensional do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000

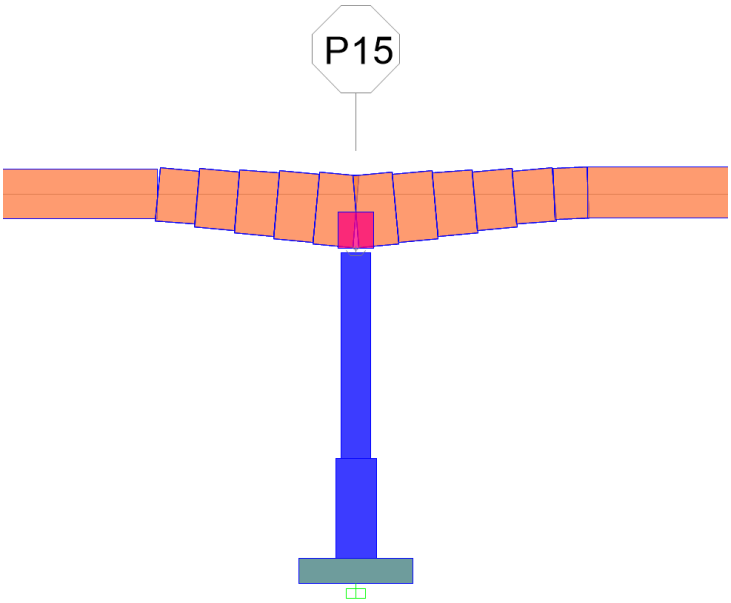


Figura 71 – Secção Extrudida do Pilar P15 no Modelo Numérico Bidimensional do Viaduto Ferroviário de Sines em SAP2000

Desta modelação, para a combinação de ações quase permanente – representativa da solicitação no viaduto, quer em cenário sísmico, quer na eventualidade de uma frenagem regulamentar, foi obtido a reação e massa do tabuleiro sobre os dois encontros, Encontro Esquerdo e Encontro Direito, e nos pilares P1 a P15, representadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Esforços verticais por Pilar para o Estado Limite de Serviço na combinação Quase Permanente

Elemento	Peso [$\boldsymbol{kN}$]	Massa [$\boldsymbol{ton}$]
Encontro Esquerdo	1442,2	147,0
P1	3201,9	326,4
P2	2968,0	302,5
P3	4189,4	427,1
P4	4499,0	458,6
P5	4183,3	426,4
P6	2949,1	300,6
P7	3074,3	313,4
P8	3276,0	333,9
P9	3151,0	321,2
P10	3239,4	330,2
P11	3207,5	327,0
P12	2996,2	305,4
P13	4339,2	442,3
P14	4917,1	501,2
P15	5047,1	514,5
Encontro Direito	1761,8	179,6

Como a estrutura real contém dois aparelhos de apoio por pilar, o Quadro 3 contém o valor médios dos esforços obtidos por aparelho de apoio, para esta combinação de ações.

Quadro 3 – Média dos Esforços por Aparelho de Apoio para o Estado Limite de Serviço, combinação Quase Permanente

Parâmetro	Média	Total
Peso [kN]	1718,9	29221,3
Massa [ton]	175,2	2978,7

A partir da Expressão (7.6) da NPEN001998-2 (CEN, 2005b), sabendo a massa da superestrutura, M_D, e arbitrando uma rigidez equivalente normalizada do isolador e subestrutura, K_{eff}, é possível determinar o período efetivo a partir de

$$T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{M_d}{K_{eff}}} = 2\pi\sqrt{\frac{2978{,}7}{8776{,}4}} \approx 3{,}6\ s \tag{107}$$

Para a zona de Sines, seguindo uma análise por espetro de resposta, quer para o sismo Tipo 1, quer para o sismo Tipo 2, o período para o qual os deslocamentos estabilizam é $T_D = 2{,}0s$, pelo que, com este período efetivo, o viaduto com isolamento de base irá encontrar-se na situação mais vantajosa, em relação ao deslocamento e às forças desenvolvidas.

Sabendo que o raio efetivo de curvatura determina o período efetivo, é possível determinar o raio efetivo de curvatura da superfície superior, R_{eff2}, que irá determinar o comportamento da estrutura sob ações horizontais mais elevadas. Deste modo, R_{eff2} é

$$R_{eff2} = g \times \left(\frac{T_{eff}}{2\pi}\right)^2 = 9{,}81 \times \left(\frac{3{,}6}{2\pi}\right)^2 = 3{,}22m \tag{108}$$

Atendendo a este valor, e à sismicidade da zona de Sines, foi decidido pelo fabricante produzir um SIP®–Adaptive com um raio efetivo de curvatura para a superfície superior de $R_{eff2} = 3{,}0m$ e coeficiente de atrito $\mu_2 = 3{,}0\%$, de modo a exibir uma rigidez e força horizontal superiores, de modo que este ofereça uma maior dissipação de energia para ações horizontais elevadas.

Adicionalmente, para que o aparelho de apoio obtenha uma resposta controlada para ações de serviço, com transições suaves entre os três regimes de deslize, o raio efetivo de curvatura e coeficiente de atrito da superfície inferior são $R_{eff1} = 4{,}5m$ e $\mu_1 = 1\%$. A seleção destes parâmetros permite que a estrutura desenvolva um comportamento adequado para movimentos de serviço, ressalvando o controlo do recentramento.

5.3.2.2. Definição da Inclinação da Base do Aparelho de Apoio

A inclinação da base do aparelho de apoio foi definida pela equipa projetista como 0,3° ou $0{,}005\ rad$, no sentido anti-horário, em relação ao Encontro Esquerdo, isto é, uma rotação anti-horária no sentido do Encontro Direito ao Encontro Esquerdo.

Esta inclinação foi escolhida de modo a garantir que há um incremento de força no aparelho de apoio para uma qualquer ação horizontal, com especial enfoque na ação da frenagem. Este incremento não pode condicionar a capacidade de corte dos pilares, que por si só, já é limitada. Esta pode ser explorada, limitando o valor da inclinação a 0,3° de modo que a introdução da inclinação não conduza a esforços ainda mais preponderantes do que os que esta inclinação já introduz.

Nota-se que inclinações superiores poderiam induzir movimentos relativos na articulação interna sem que qualquer ação fosse introduzida, retirando o efeito benéfico para o controlo do recentramento do tabuleiro.

Poderiam ter sido arbitrados valores mais reduzidos para a inclinação. Porém, a redução do valor da inclinação implicaria um aumento de força reduzido que poderia ser obtido com uma variação ligeira dos raios de curvatura e coeficientes de atrito das duas superfícies de deslize. Tal resultaria em que a inclinação da base seria redundante no sistema de isolamento, sem qualquer benefício prático. No entanto, a assimetria do sistema potencia a solução da inclinação como mais vantajosa.

Sabendo que a força de frenagem é $F_{Fre} = 4750kN$, a repartição desta força por cada pilar pode ser calculada em função de uma média ponderada do peso suportado por cada pilar, descontando a contribuição dos dois encontros no peso suportado. Deste modo, a ação por pilar é dada por:

$$F_{Fre,P_i} = F_{Fre} \times \frac{W_{cqp,P_i}}{\sum_1^{15} W_{cqp,P_i} - W_{cqp,EE} - W_{cqp,ED}} \tag{109}$$

O Quadro 4 (ver página 98) apresenta os valores da repartição da ação da frenagem por aparelho de apoio – em valor nominal, F_{Fre,P_i}, e normalizada, w, em relação ao peso suportado pelo aparelho de apoio, W, para uma ação no sentido Encontro Direito – Encontro Esquerdo:

Quadro 4 – Repartição da Ação da Frenagem por Aparelho de apoio, valores nominais e normalizados

Pilar	Ação por Aparelho de Apoio $[\boldsymbol{kN}]$	Ação Normalizada por Aparelho de Apoio [%]
P1	137,7	4,3
P2	127,6	4,3
P3	180,2	4,3
P4	193,5	4,3
P5	179,9	4,3
P6	126,8	4,3
P7	132,2	4,3
P8	140,9	4,3
P9	136,0	4,3
P10	139,3	4,3
P11	137,9	4,3
P12	257,6	4,3
P13	128,8	4,3
P14	211,4	4,3
P15	217,0	4,3

6
ANÁLISE DO DESEMPENHO DO APARELHO DE APOIO SOB AÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é efetuada a análise do comportamento e desempenho do aparelho de apoio em estudo, o SIP®–Adaptive, para ações estáticas e dinâmicas.

É primeiro abordada, em 6.2, a análise estática do comportamento do aparelho de apoio. Descreve-se em particular o cenário base que servirá para caracterizar, como termo de comparação, as análises dinâmicas efetuadas na secção 6.3. São ainda abordados, em 6.2.1, os objetivos a atingir com a inclinação do aparelho de apoio, bem como, na secção 6.2.2 a melhoria da condição de recentramento, tendo por objeto o Viaduto Ferroviário de Sines.

6.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO ESTÁTICA

6.2.1. OBJETIVOS A ATINGIR COM A INCLINAÇÃO DO APARELHO DE APOIO

A partir das deduções da Secção 5.3.2.2, foi possível concluir que será implementado um aparelho de apoio com $0{,}005\ rad$ de inclinação horizontal. Para a configuração apresentada, o aparelho de apoio terá um desvio da posição de equilíbrio inicial de

$$u_r = 4{,}5 \times sin(0{,}005\ rad) \approx 2{,}4cm \tag{110}$$

e um incremento na força horizontal total exibida, s, em valores normalizados e no sentido do encontro fixo, de

$$s = \frac{(0{,}005\ rad \times 4{,}5 + 0\ rad \times 3{,}0)}{4{,}5 + 3{,}0} = 0{,}00314W = 0{,}314\% \tag{111}$$

Procurando atingir uma capacidade de deslocamento de $d = \pm 10cm$, ao introduzir a inclinação de $0{,}005\ rad$, a capacidade de deslocamento da superfície inferior do aparelho de apoio, d_1, para a configuração inclinada, será

$$d_1 = d + u_r = 10 + 2{,}4 = 12{,}4cm \tag{112}$$

para movimentos no sentido do encontro Encontro Esquerdo, e para movimentos na direção do Encontro Direito:

$$d_1 = d - u_r = 10 - 2{,}4 = 7{,}6cm \tag{113}$$

Atendendo a estes pressupostos, é apresentado na Figura 72 o ciclo de histerese do aparelho de apoio em estudo, quer para a configuração nivelada, representada a azul, quer para a configuração inclinada, representada a vermelho.

Este foi obtido ao aplicar as considerações desenvolvidas na Secção 3.4 para a configuração nivelada, realizando as devidas adaptações para a inclinação, como descrito na Secção 3.5.

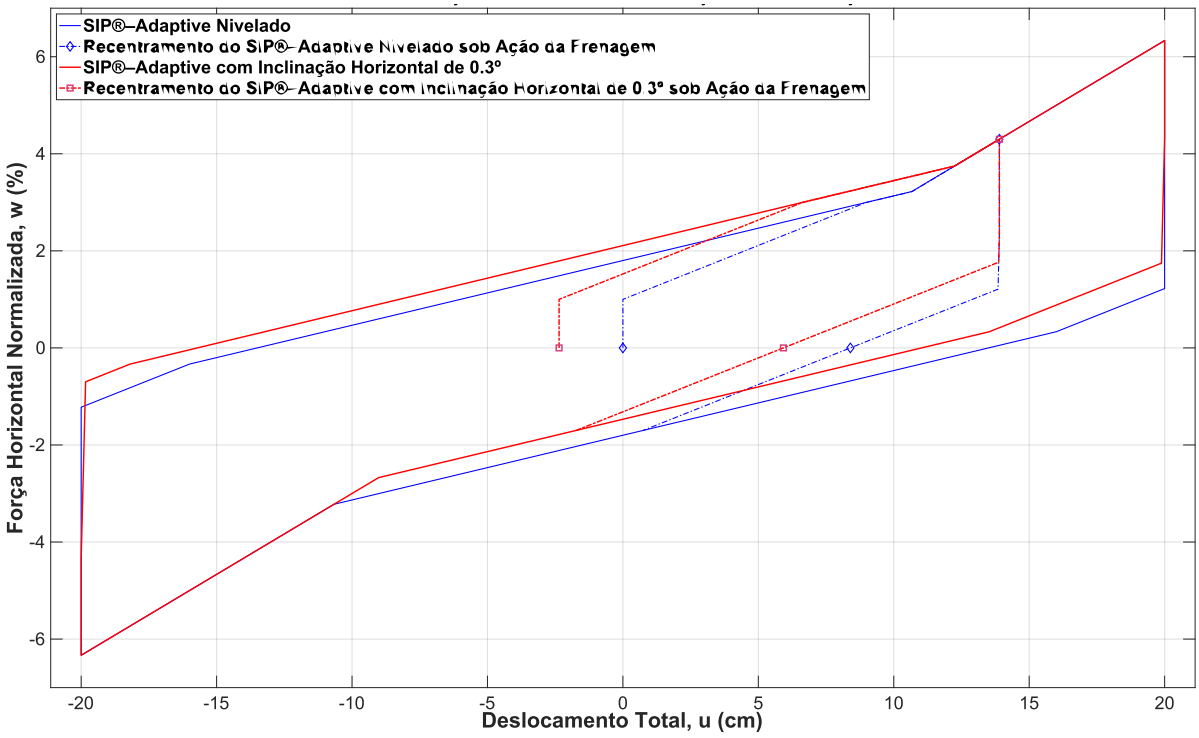


Figura 72 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive aplicado no Viaduto Ferroviário de Sines

A partir da Figura 72 é possível tirar três ilações essenciais. A primeira, remete para o que já havia sido abordado no Capítulo 3, onde é possível observar claramente uma mudança no início do movimento. Com efeito, este começa a partir de uma posição descentrada de $-u_r$, observando-se que, na posição de equilíbrio original, a força exibida pelo aparelho de apoio é agora, também, maior.

Em segundo lugar, o aumento no ciclo de histerese só afeta a relação força-deslocamento dos Regimes de Deslize I e II, afetando somente o começo do Regime de Deslize III (a). Deste modo, o que foi

assegurado na Secção 4.2.1 para a modelação em série de dois FPS está ressalvado e uma análise dinâmica a partir desta estratégia de modelação pode ser representativa do comportamento cíclico do aparelho de apoio.

Em último lugar, o efeito da inclinação permite aumentar a capacidade de recentramento do aparelho de apoio, sem que haja necessidade de aumentar a capacidade de deslocamento do aparelho de apoio, ou, para cenário sísmico, sem aumentar as forças horizontais exibidas pelo aparelho de apoio.

É importante salientar o efeito do contacto com o batente da superfície inferior. Este tem uma rigidez bastante superior à rigidez da superfície 1, tendo um comportamento rígido-elástico muito elevado, como definido na Secção 3.3.3. Também, a força de restituição é menor na configuração inclinada, o que permite que o deslize se inicie mais cedo com a reversão do movimento, tal como delineado na Secção 3.5.3.

6.2.2. Melhoria da condição de recentramento

Atendendo à condição de recentramento da Equação (106) e aos ciclos de histerese da Figura 72, é possível observar que a condição de recentramento, na configuração nivelada, para cenário sísmico e para a ação da frenagem normalizada por pilar, são, respetivamente:

$$\frac{d_{cd}}{d_0} = \frac{0{,}2}{0{,}135} = 1{,}48 \tag{114}$$

$$\frac{d_{cd}}{d_0} = \frac{0{,}138}{0{,}084} = 1{,}64 \tag{115}$$

cumprindo com a condição de recentramento regulamentar, mas ainda bastante longe da condição de recentramento imposta para este caso de estudo.

Adicionando o efeito da inclinação da base, a condição de recentramento para esses dois cenários passa a ser, respetivamente:

$$\frac{d_{cd}}{d_0} = \frac{0{,}2}{0{,}112} = 1{,}78 \tag{116}$$

$$\frac{d_{cd}}{d_0} = \frac{0{,}138}{0{,}059} = 2{,}34 \tag{117}$$

havendo uma melhoria no comportamento global do aparelho de apoio para a ação sísmica, mas um aumento de 42,7% no recentramento em serviço.

O aumento do recentramento permite que o deslocamento do tabuleiro seja sustido em parte pelos pilares do viaduto, potenciando o recentramento da superestrutura para a ação da frenagem – uma ação de serviço, cuja condição de recentramento não está estabelecida de forma regulamentar, muito embora existam estudos nesse sentido.

6.3. DESEMPENHO SOB ANÁLISE DINÂMICA

Para efeito de análise dinâmica, foram considerados três acelerogramas de eventos sísmicos reais, frequentemente utilizados para a análise da resposta sísmica de estruturas, como também para a calibração de aparelhos de apoio, como o SIP®–Adaptive.

Deste modo, foi realizada uma análise dinâmica em MATLAB, segundo um modelo analítico contendo dois FPS em série, para a estrutura apresentada na Secção 5.3.2. Este dispositivo foi analisado para os sismos de 1940 – El Centro, 1999 – Gebze e 1985 – Cidade do México, três registos sísmicos que, quer pela sua tipologia, quer pela sua intensidade, permitem um estudo completo do comportamento do aparelho de apoio sob ação sísmica. No Quadro 5, é feito um sumário das características dos sismos utilizados para realizar uma análise dinâmica do SIP®–Adaptive.

Quadro 5 – Características dos registos sísmicos utilizados para analisar o SIP®–Adaptive

Sismo	Duração do Registo $[s]$	Intervalo de integração $[s]$	Aceleração de Pico $[m/s^2]$	Fator de escala
1940 – El Centro	40,96	0,005	3,4170	1,2
1999 – Gebze	40,96	0,005	2.5978	0,5
1985 – Cidade do México	40,96	0,005	-1.4068	2,5

6.3.1. DESEMPENHO EM SISMOS INTENSOS E PROLONGADOS – 1940 EL CENTRO

O sismo de 1940 em El Centro tem o registo sísmico apresentado na Figura 73. Há particular interesse no estudo de estruturas para este sismo devido à elevada intensidade que este sismo teve, com um valor igual à raiz da média da soma dos quadrados das acelerações de $0{,}52\ m/s^2$. É um sismo com intensidade elevada durante o seu início, tendo uma réplica por volta dos 25 segundos, o que pode potenciar o aumento dos deslocamentos incrementais no aparelho de apoio, mesmo que numa fase final do evento sísmico.

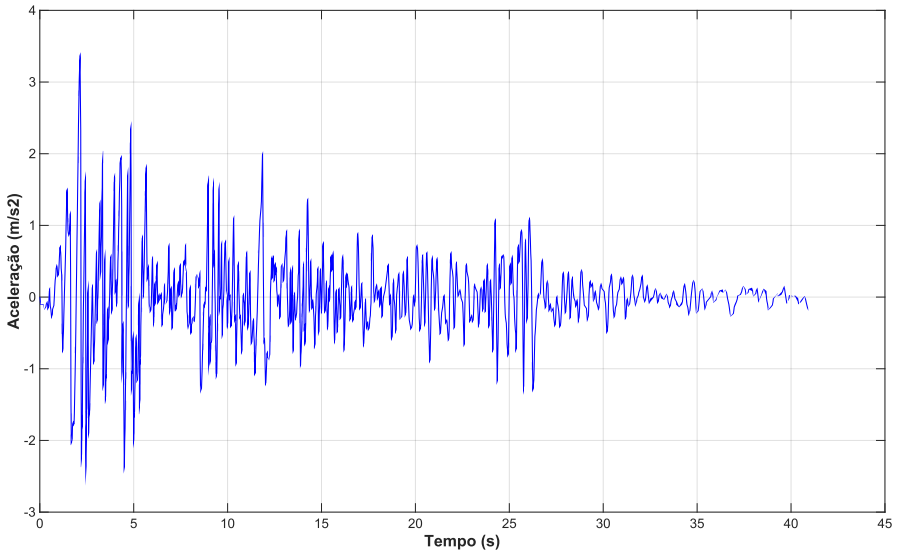


Figura 73 – Acelerograma do sismo de 1940 em El Centro

O ciclo de histerese do SIP®–Adaptive é representado pela Figura 74, bem como o Regime de Deslize I e II, quer na configuração nivelada, quer na configuração inclinada (ver Figura 75), e os ciclos de histerese isolados de cada superfície, na Figura 76 e Figura 77 da página 104, respetivamente.

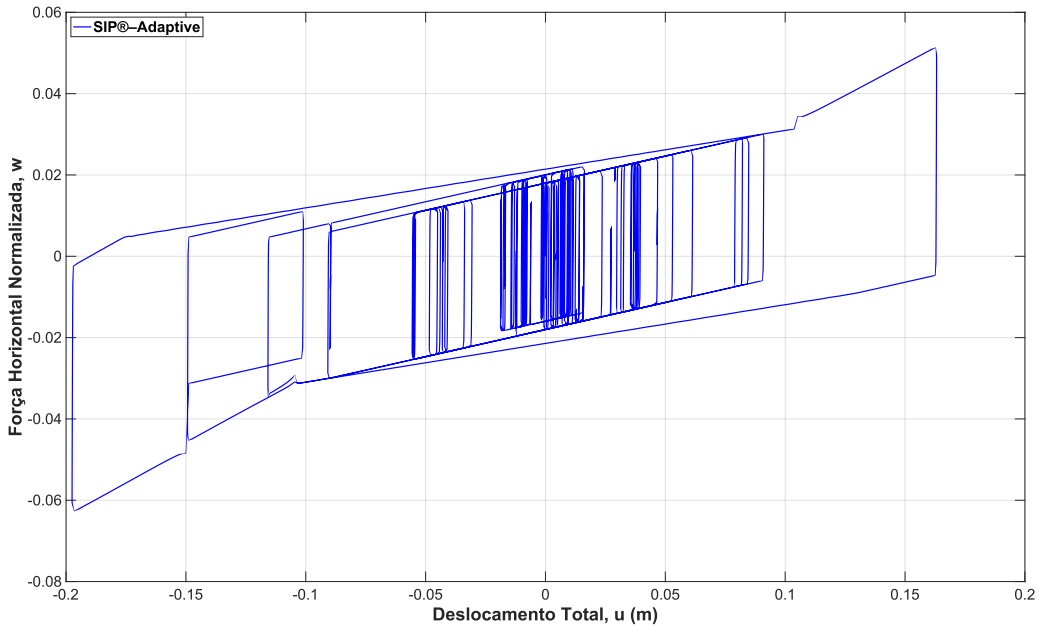


Figura 74 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1940 em El Centro

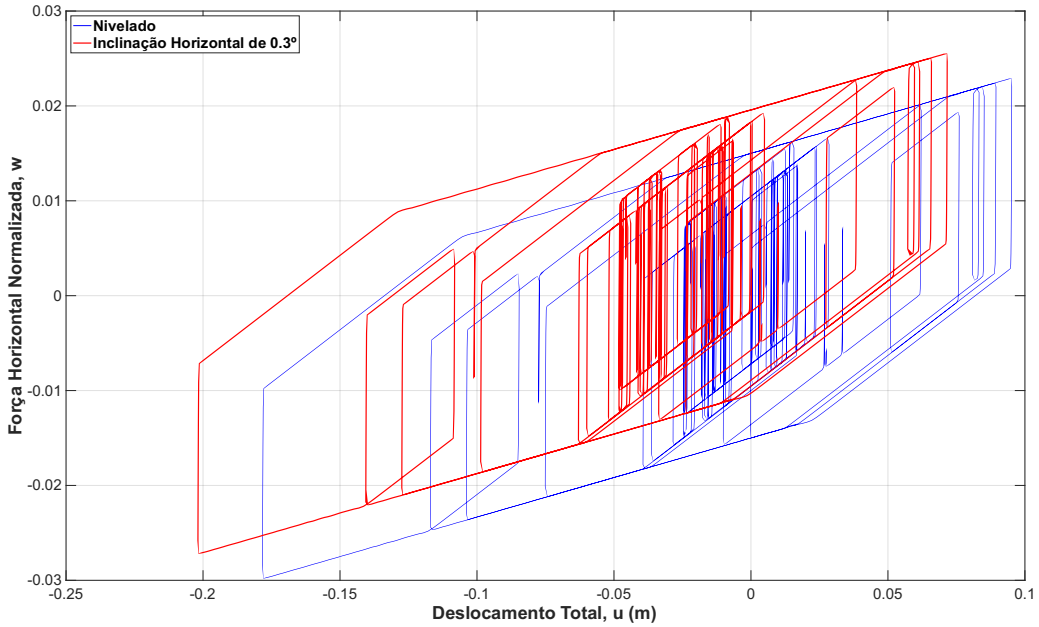


Figura 75 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive nos Regimes de Deslize I e II quando submetidos ao sismo de 1940 em El Centro

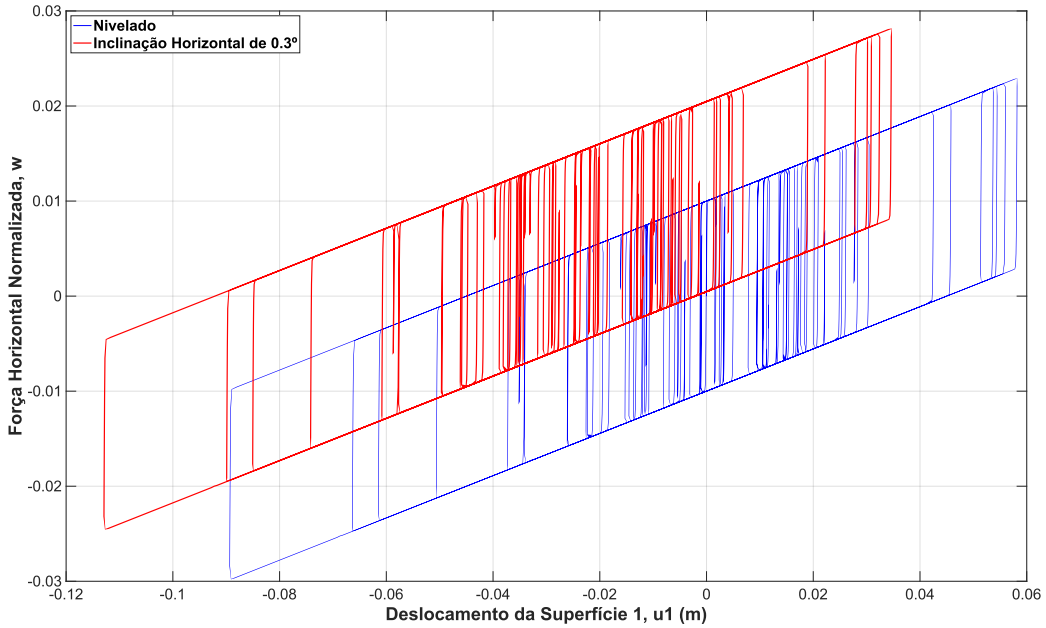


Figura 76 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Inferior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1940 em El Centro

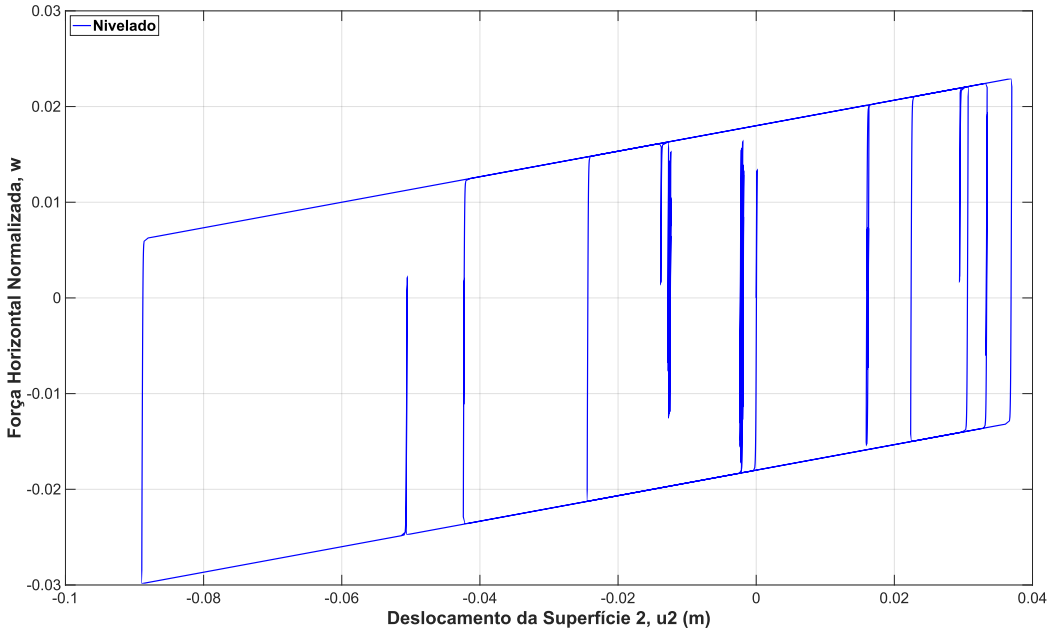


Figura 77 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Superior do SIP®–Adaptive, quando submetida ao sismo de 1940 em El Centro

Pela análise dos ciclos de histerese presentes da Figura 75 à Figura 77, é possível concluir que o aparelho de apoio, sob ação dinâmica, tem um comportamento compatível com o especificado, quer na configuração nivelada quer na configuração inclinada.

Para o efeito do controlo da capacidade de recentramento, a análise da melhoria desta condição não pode ser efetuada e calculada diretamente, pois o deslocamento máximo, na configuração inclinada, não é

representativo do deslocamento máximo real do aparelho de apoio. Isto deve-se ao facto do deslocamento inicial no ciclo de histerese da Figura 75 não começar a partir da posição descentrada.

Deste modo, é possível concluir que, visualmente, há uma melhoria no recentramento do dispositivo, não podendo esta ser calculada pelas razões apresentadas na Secção 4.2.4.

Todavia, é evidente que há um aumento da força horizontal exibida pelo aparelho de apoio, de onde a força de restituição será menor e, portanto, a reversão do movimento acontecerá de forma antecipada face à implementação sem inclinação do aparelho de apoio.

Adicionalmente, também foi efetuada uma comparação entre as forças exibidas pelo aparelho de apoio em função do tempo (ver Figura 78), quer para a configuração nivelada, quer para o cenário proposto com uma inclinação da base de $+0{,}005\ rad$.

A partir da análise da Figura 78, é possível estabelecer duas ilações:

Em primeiro lugar, quando o sismo tem a maior intensidade, isto é, nos primeiros dez segundos do registo sísmico, o aparelho de apoio tem um comportamento completo, ou seja, é formada a envolvente exterior do ciclo de histerese apresentado na Figura 75, composta pelo Regime de Deslize II. Em contraste, quando a ação imposta é menos intensa, mas mais frequente, o aparelho de apoio funciona de forma global no Regime de Deslize I, pontualmente atingindo o Regime de Deslize II.

O segundo aspeto assenta no facto de o aparelho de apoio, na configuração inclinada, apresentar um incremento da força horizontal total exibida. Tal é concordante com o que foi apresentado até então, justificando que, para uma ação cíclica, há um aumento da força exibida pelo aparelho de apoio na configuração inclinada, face ao aparelho nivelado.

De notar que, caso a inclinação tivesse sido efetuada no sentido horário, não se iria verificar um acréscimo na força exibida, mas uma diminuição global da força horizontal que o aparelho de apoio desenvolve durante uma ação cíclica, como o sismo de 1940 em El Centro.

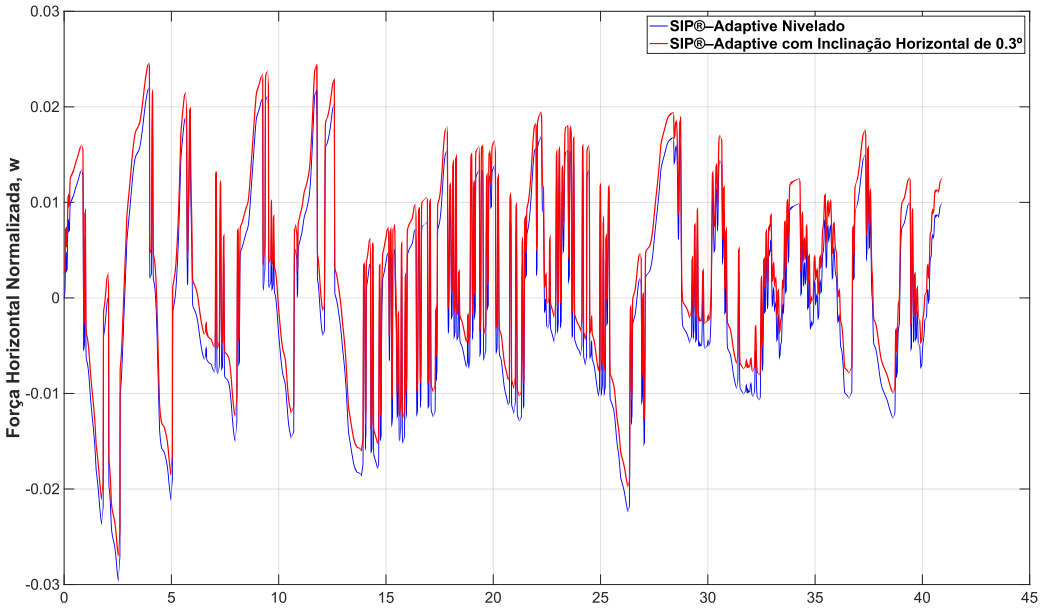


Figura 78 – Comparação da Força Horizontal exibida pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1940 em El Centro

Por análise da Figura 79, observa-se também que a variação dos deslocamentos do aparelho de apoio e de cada superfície de deslize também varia consoante a aceleração que lhes é imposta. Isto é concordante com o desenvolvimento das forças horizontais no aparelho de apoio (ver Figura 78), onde no início do registo sísmico, mais intenso, é desenvolvida a força máxima do dispositivo de isolamento e também é desenvolvido o deslocamento máximo.

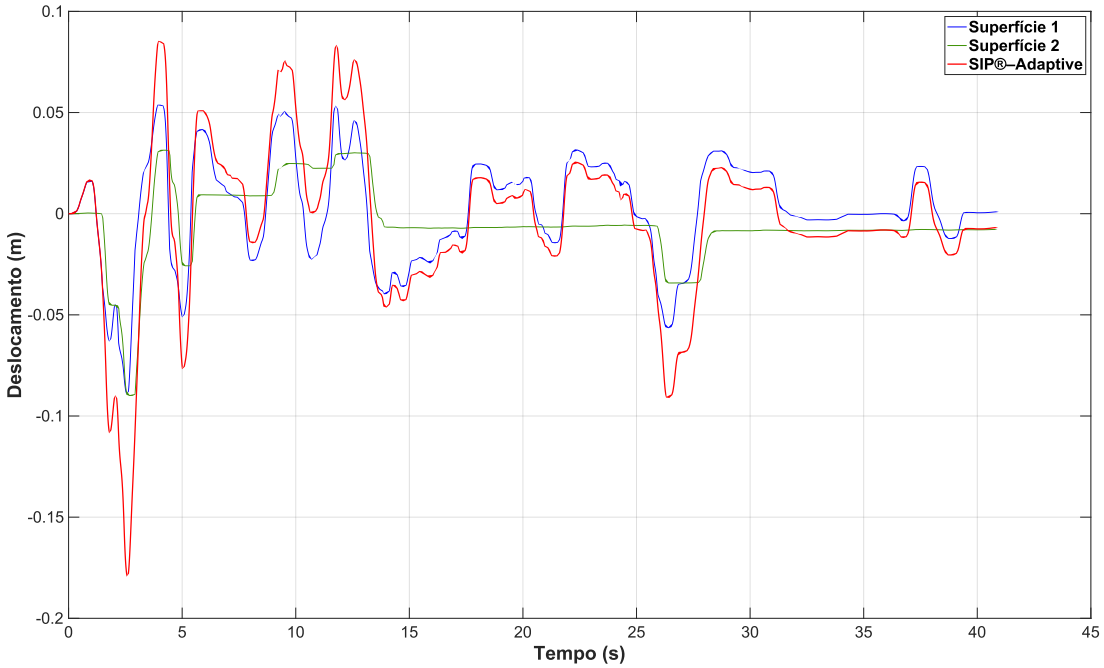


Figura 79 – Variação dos Deslocamentos do SIP®–Adaptive e das suas Superfícies de Deslize em função do tempo, para o sismo de 1940 El Centro

Para concluir, analogamente ao que foi analisado na Figura 78 para o desenvolvimento das forças horizontais entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, é de destacar, também, a variação dos deslocamentos horizontais do aparelho de apoio na Figura 80. A existência de uma inclinação na superfície de deslize inferior provoca um desvio da posição de equilíbrio da articulação interna de $2{,}4cm$, que fica materializado na forma como o aparelho de apoio desenvolve os deslocamentos subsequentes.

Por análise da Figura 80, pode observar-se que há um desvio descendente na posição inicial dos deslocamentos do aparelho de apoio de $2{,}4\ cm$, mantendo-se este desvio relativo em relação ao cenário nivelado constante durante todo o decurso da ação sísmica.

Na realidade, a variação deste desvio entre a configuração nivelada e inclinada, não deveria ser totalmente constante com o tempo. Isto deve-se ao facto de o aparelho de apoio ter sido modelado em série. Será de esperar um aumento generalizado e constante da força exibida pelo aparelho de apoio. Porém, a variação dos deslocamentos não tem, necessariamente, de ser proporcional a este aumento.

Como foi abordado nas secções anteriores, a variação dos deslocamentos devido ao efeito da inclinação não consegue ser captada diretamente pelo modelo em série. Este, pela sua formulação em 4.2.3, define elementos de folga que têm um comportamento unidirecional, ou seja, exibem uma determinada força a partir de um deslocamento pré-definido.

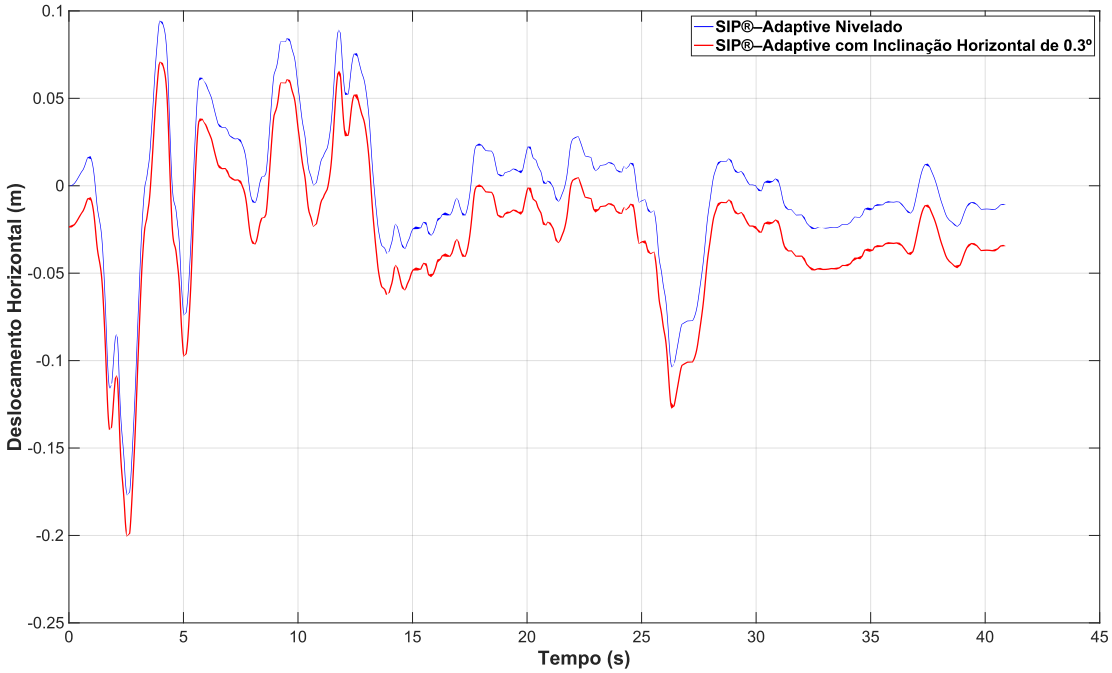


Figura 80 – Comparação do Deslocamento desenvolvido pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1940 em El Centro

Ora, ao aplicar uma inclinação na base do aparelho de apoio, estaremos a introduzir uma condição adicional no sistema de equações diferenciais, que não é materializada de forma direta pela formulação apresentada na Secção 4.2.3.

A capacidade de deslocamento da superfície inferior do aparelho de apoio, isto é, a superfície à qual foi aplicada uma inclinação, deixou de ser simétrica e, por consequência, o elemento de folga que a representa, passaria a ter comportamentos diferentes para cada direção do movimento. Quer isto mostrar que a representação numérica dos deslocamentos e forças desenvolvidas no aparelho de apoio só será a mais aproximada ao resultado estático se forem incorporados elementos de folga multidirecionais.

É do conhecimento do Autor que, o único programa de acesso público que consegue materializar este comportamento de forma correta é o OpenSees (PEER, 2024), que contém elementos de folga multidirecionais (Kim & Constantinou, 2023).

Em todo o caso, o que foi acima discutido não inviabiliza quer a utilização da modelação em série, quer os resultados apresentados. Esta nota é realizada para evidenciar ao leitor que os deslocamentos produzidos por este tipo de modelação poderão não ser exatamente os representados pela Figura 80. Porém, estes tudo indicam ser representativos e coerentes com o desenvolvimento das forças horizontais no aparelho de apoio, pelo que os modelos em série de dois FPS continua a poder ser utilizados para a análise do efeito da inclinação da base de aparelhos de apoios pendulares do tipo SIP®–Adaptive.

6.3.2. Desempenho para Sismos Tipo-Impulso – 1999 Gebze

O sismo de 1999 em Gebze tem o acelerograma representado pela Figura 81. Este sismo, apesar de ter uma intensidade global reduzida, apresenta uma aceleração de pico de 2,6 m/s^2 num período temporal muito curto.

Esta intensidade é cerca de 17 vezes superior à intensidade média de todo o registo, e é típica de sismos do tipo-impulso (*pulse-type*), presentes em falhas inversas (*thrust faults*) e falhas de deslize (*strike-slip faults*). Estes costumam ter uma pequena duração, muito embora apresentem acelerações de pico bastante elevadas.

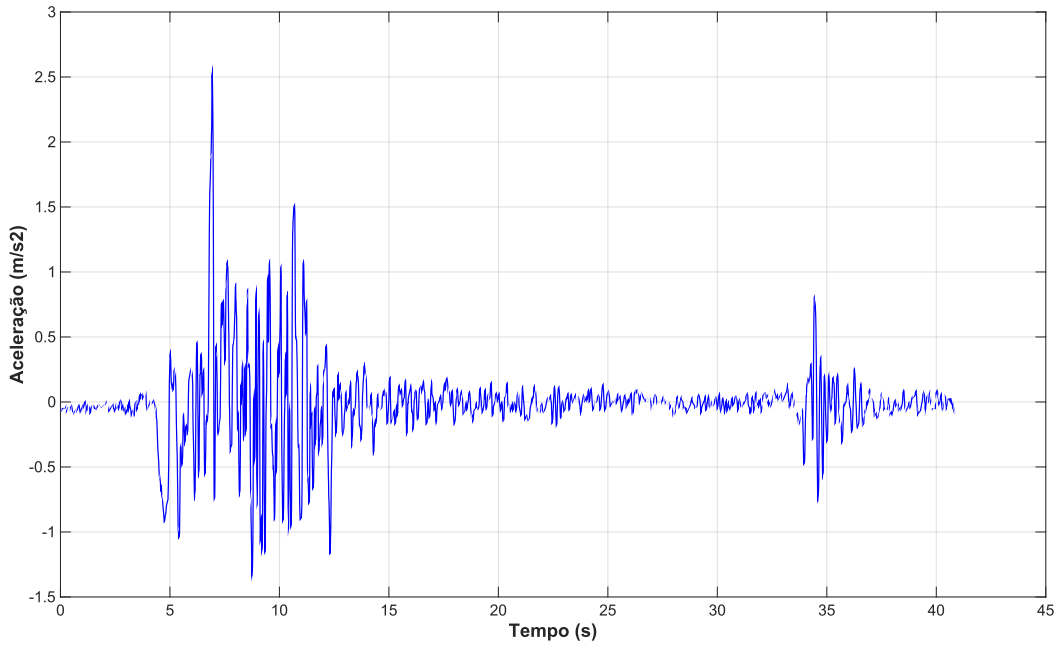


Figura 81 – Acelerograma do sismo de 1999 em Gebze

O estudo do desempenho do aparelho de apoio para este tipo de registo sísmico tem particular interesse. Estes aparelhos de apoio, apesar do seu comportamento adaptativo, costumam ter um fraco desempenho para este tipo de solicitações, como é descrito na análise experimental efetuada por Bao et al. (2017) para DFPS. Sendo a zona de Sines afetada principalmente por falhas de deslize e falhas inversas, devido à interação entre as placas Euroasiática e Africana, é imperativo o estudo do comportamento deste aparelho de apoio quando solicitado a um sismo deste tipo.

Deste modo, a Figura 82 revela a envolvente do ciclo de histerese do SIP®–Adaptive quando solicitado a uma interação deste tipo.

Por análise do ciclo de histerese, é possível comprovar que o aparelho de apoio muito rapidamente passa do Regime de Deslize II para o III, presumivelmente, devido à elevada intensidade sísmica no início do acelerograma.

Este facto pode ser evidenciado por esta envolvente ser singular. Por outras palavras, o comportamento do isolador ocorre essencialmente na superfície de deslize com menor coeficiente de atrito. Quando ocorre o impulso, desenvolvem-se forças horizontais que mobilizam o prato superior, criando uma única envolvente no ciclo de histerese da Figura 82.

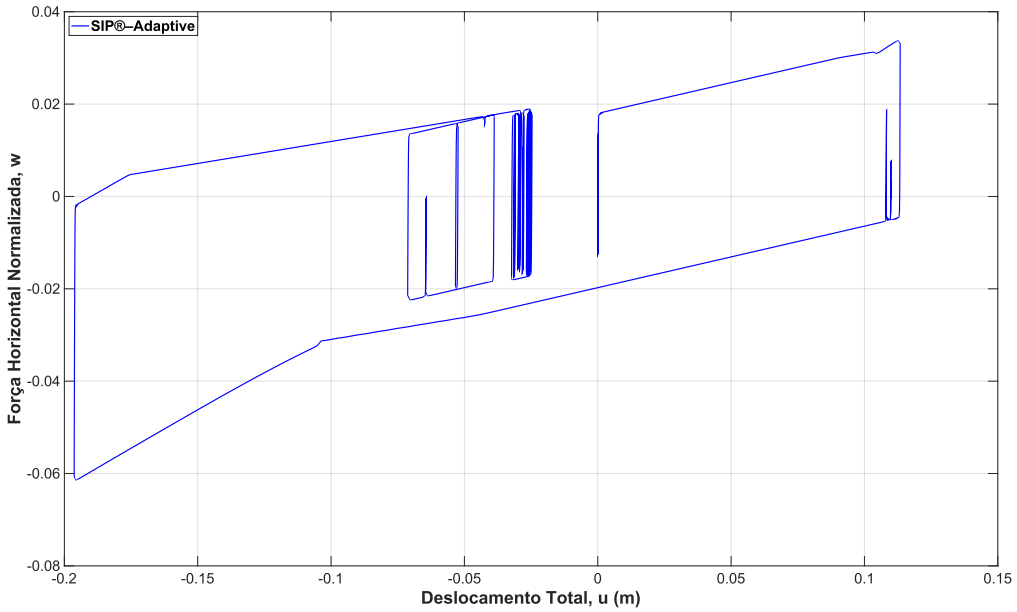


Figura 82 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze

Comparando agora com o ciclo de histerese na configuração nivelada e inclinada para os Regimes de Deslize I e II (ver Figura 83), volta a evidenciar-se que o aparelho de apoio tem um comportamento predominante na superfície de deslize inferior. Aliado a este comportamento, volta-se a salientar o efeito do impulso no aparelho de apoio.

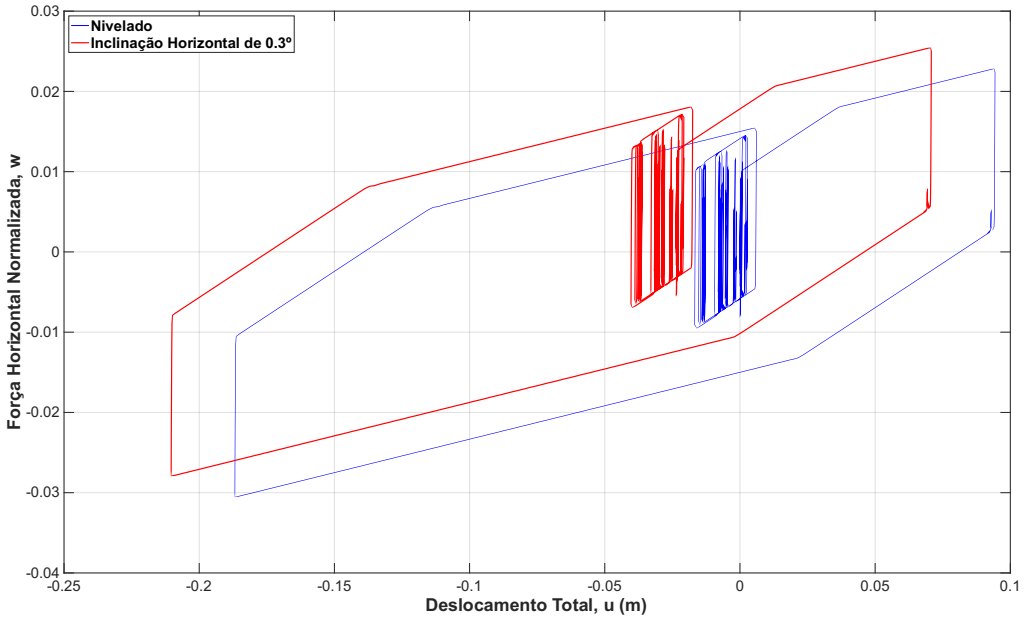


Figura 83 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive nos Regimes de Deslize I e II quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze

Apesar da predominância do comportamento ocorrer no prato inferior, o ciclo de histerese total fica definido, também, com uma única envolvente, reforçando o comportamento observado na Figura 82.

Adicionalmente, a Figura 84 reforça o que acabou de ser discutido, ao ser possível observar que o prato inferior tem um comportamento predominante na interação com este sismo (1999, Gebze), desenvolvendo grandes deslocamentos, presumivelmente, quando ocorre o impulso. A Figura 85 é reveladora do comportamento do aparelho de apoio em deslize duplo, de onde se observa que este praticamente não desenvolve qualquer tipo de deslocamento, se não quando ocorre a aceleração de pico.

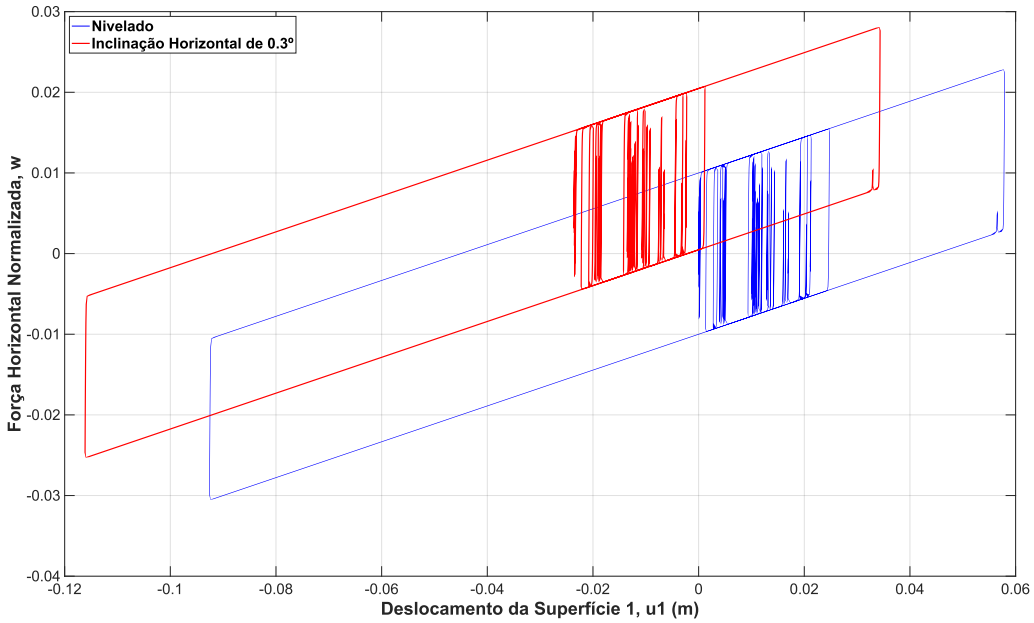


Figura 84 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Inferior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze

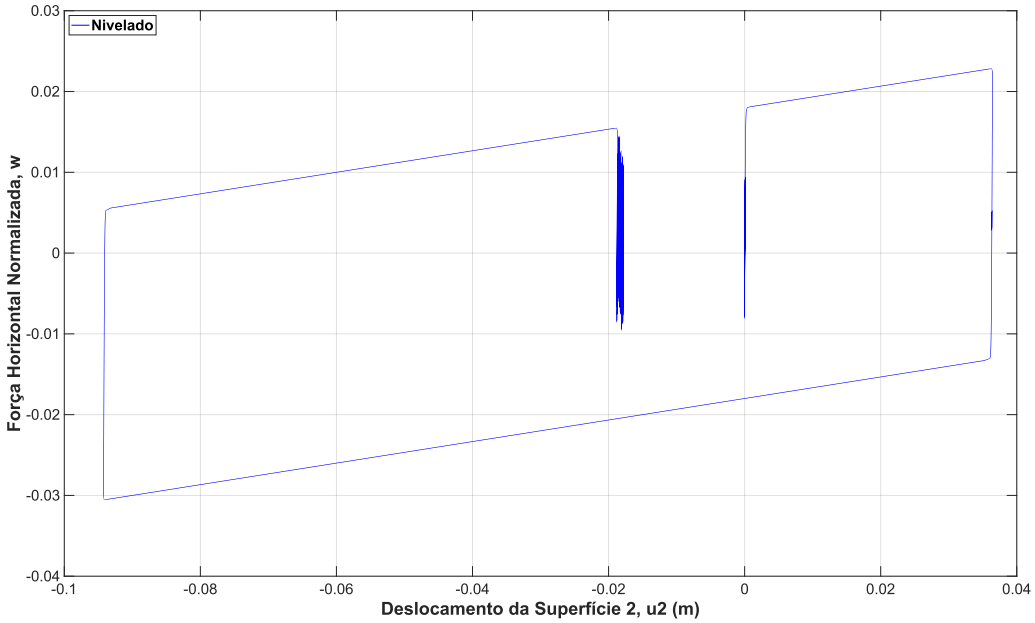


Figura 85 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Superior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1999 em Gebze

Atendendo agora ao efeito da inclinação da base do aparelho de apoio, independentemente da interação expressiva que o impulso proporciona, volta-se a observar o aumento de força no ciclo de histerese, como descrito para o sismo de El Centro em 6.3.1. Há um claro aumento na força exibida no ciclo de histerese, que advém da inclinação de $+0{,}005\ rad$ aplicada na base do aparelho de apoio.

Um aspeto importante relativo à inclinação da base, é o facto de a histerese, energia dissipada pelo sistema de isolamento, permanecer a mesma, muito embora o ciclo de histerese ter um aumento global da força horizontal inicial que exibe.

Quer isto demonstrar que a incorporação da inclinação da base, quer seguindo uma análise estática, quer segundo uma análise dinâmica, não tende a alterar a energia dissipada pelo sistema. Este facto carece de confirmação experimental neste trabalho, porém, tudo indica a que a energia dissipada irá permanecer a mesma ao inclinar o aparelho de apoio.

Por fim, a Figura 86 mostra a variação dos deslocamentos do aparelho de apoio na configuração nivelada, de onde é claro o comportamento das diversas superfícies em função da aceleração do sismo de Gebze (ver Figura 81).

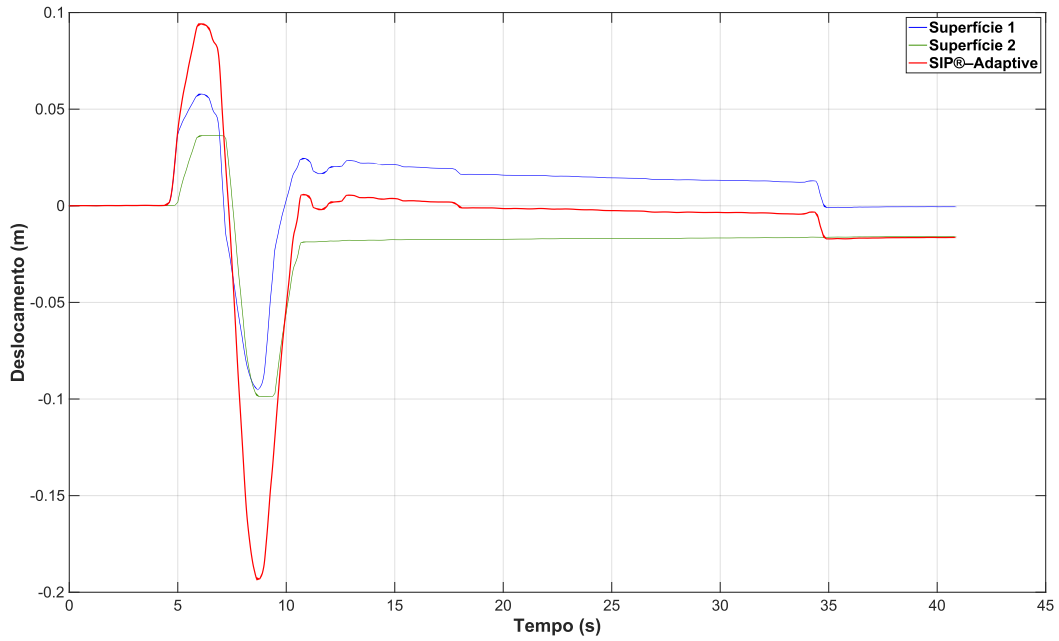


Figura 86 – Variação dos Deslocamentos do SIP®–Adaptive e das suas Superfícies de Deslize em função do tempo, para o sismo de 1999 em Gebze

O aparelho de apoio desenvolve a maioria dos deslocamentos nos períodos onde a aceleração é maior, nomeadamente, no pico de aceleração aos 7 segundos e na réplica aos 35 segundos. No intervalo entre estas duas acelerações, a variação dos deslocamentos no aparelho de apoio é praticamente nula, onde só ocorre deslize, essencialmente, na superfície inferior.

Este facto realça o que foi discutido nesta secção ao provar que a envolvente singular do ciclo de histerese da Figura 83 à Figura 85 ocorre somente para os períodos de aceleração de pico. Também, fica assegurado que o deslocamento da superfície de deslize superior, representativa do Regime de Deslize II, ocorre maioritariamente e com maior variação para a aceleração de pico, com deslocamento nulo a partir de então.

Adicionalmente, a Figura 87 e a Figura 88 salientam a comparação dos deslocamentos e da força do aparelho de apoio na configuração nivelada e inclinada, respetivamente. Estes comprovam dois pontos que merecem ser salientados.

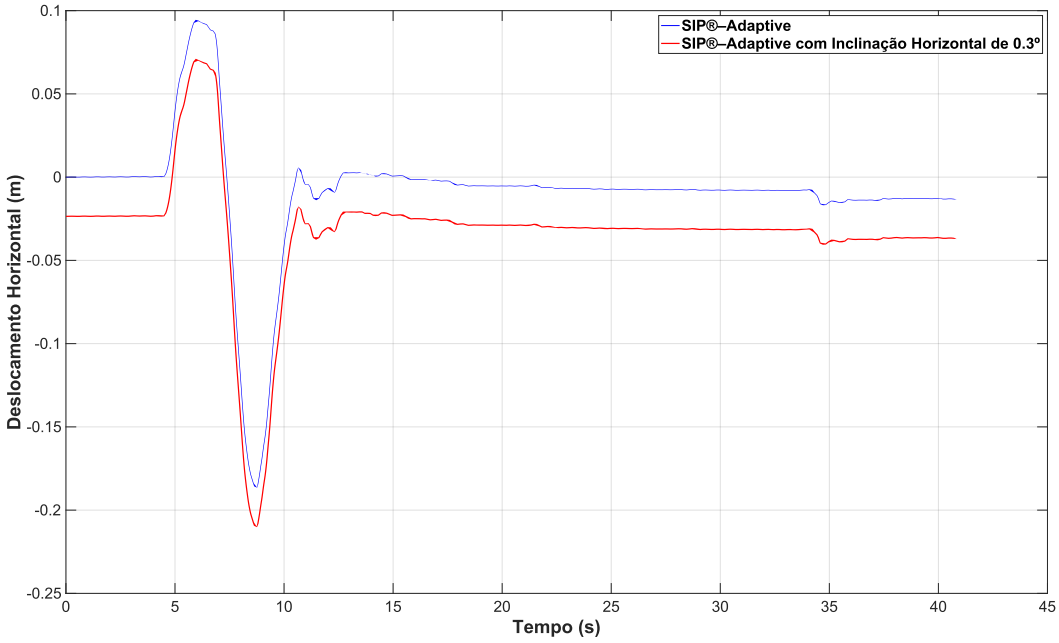


Figura 87 – Comparação do Deslocamento desenvolvido pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1999 em Gebze

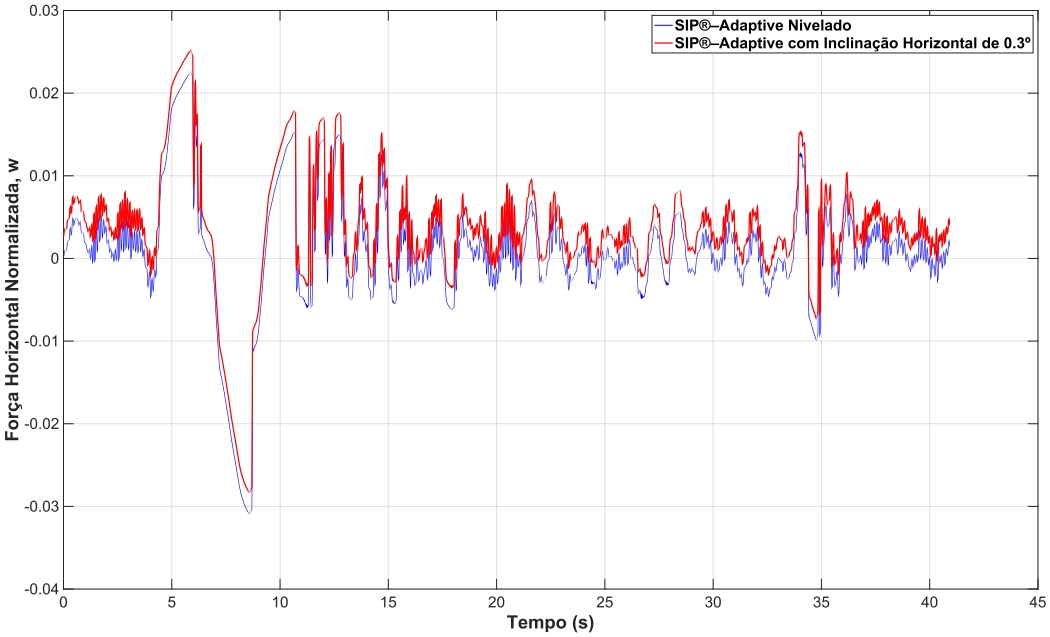


Figura 88 – Comparação da Força Horizontal exibida pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1999 em Gebze

Em primeiro lugar, o desenvolvimento das forças no aparelho de apoio em função do tempo segue a variação da aceleração do sismo de Gebze (ver Figura 81), havendo uma variação da força do aparelho de apoio com os picos de aceleração que ocorrem aos 7 segundos e aos 35 segundos, comprovando e reforçando o que foi discutido para o formato dos ciclos de histerese apresentados anteriormente.

Por fim, denota-se o aumento da força e a redução global dos deslocamentos no aparelho de apoio, quando a este é aplicada uma inclinação da base, concordante com os resultados observados, quer no ciclo de histerese global (ver Figura 83), quer no ciclo de histerese do prato inferior (ver Figura 84). Ressalva-se, como descrito para o sismo de El Centro na secção 6.3.1, que esta é representativa do comportamento do aparelho de apoio, porventura podendo não ser a aproximação exata do efeito da inclinação sob ação dinâmica.

6.3.3. Desempenho para Sismos Moderados e Contínuos – 1985 Cidade do México

A Figura 89 apresenta o acelerograma do sismo de 1985 na Cidade do México, que, em comparação aos registos sísmicos já apresentados nesta secção, apresenta uma intensidade relativamente constante no tempo, com dois picos de aceleração aos 10 e 17 segundos.

O estudo do comportamento do aparelho de apoio à ação imposta por este sismo é importante dada a variabilidade na aceleração a que o dispositivo estará sujeito. Comparativamente aos dois registos sísmicos estudados, será de esperar que o aparelho de apoio esteja em constante movimento, sem entrar em equilíbrio relativo como foi observado para o sismo de Gebze entre os dois picos de aceleração.

Por esta mesma razão, de um ponto de vista numérico, o algoritmo apresentado na Secção 4.2.3 estará sujeito a uma maior variabilidade, dificultando o processo de cálculo, podendo dar origem a erros numéricos nas análises efetuadas.

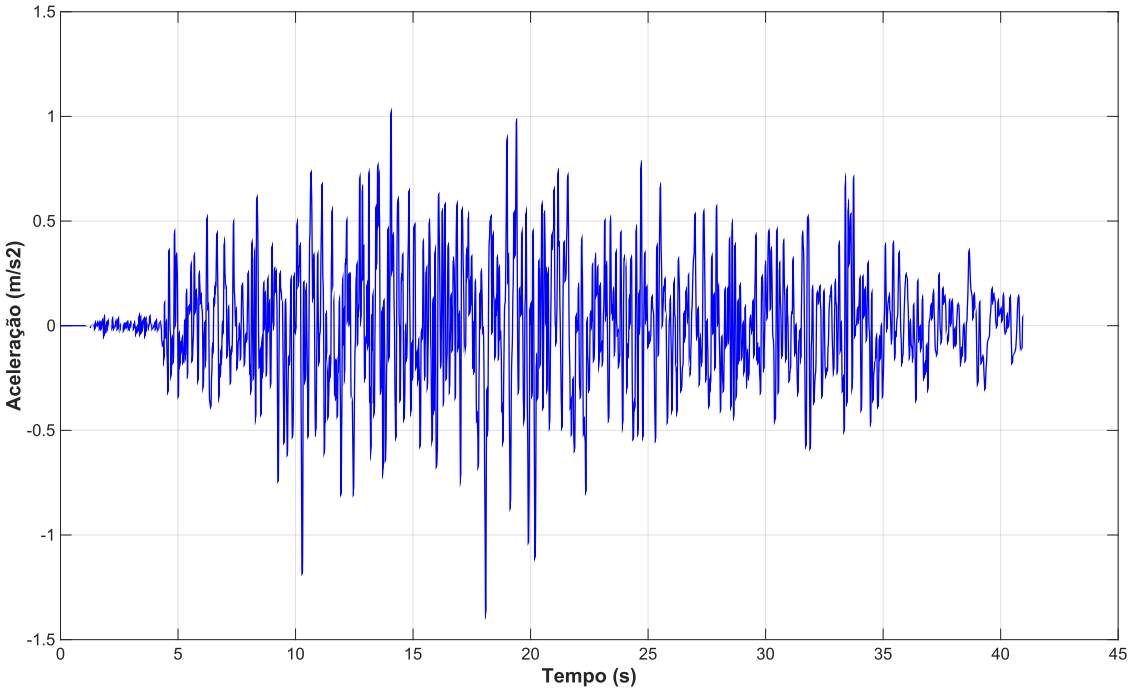


Figura 89 – Acelerograma do sismo de 1985 na Cidade do México

Avaliando o comportamento global do aparelho de apoio – isto é, o ciclo de histerese composto pelos Regimes de Deslize II e III (a), observa-se na Figura 90, tal como no sismo de El Centro (ver Figura 74), um comportamento histerético completo sob análise dinâmica.

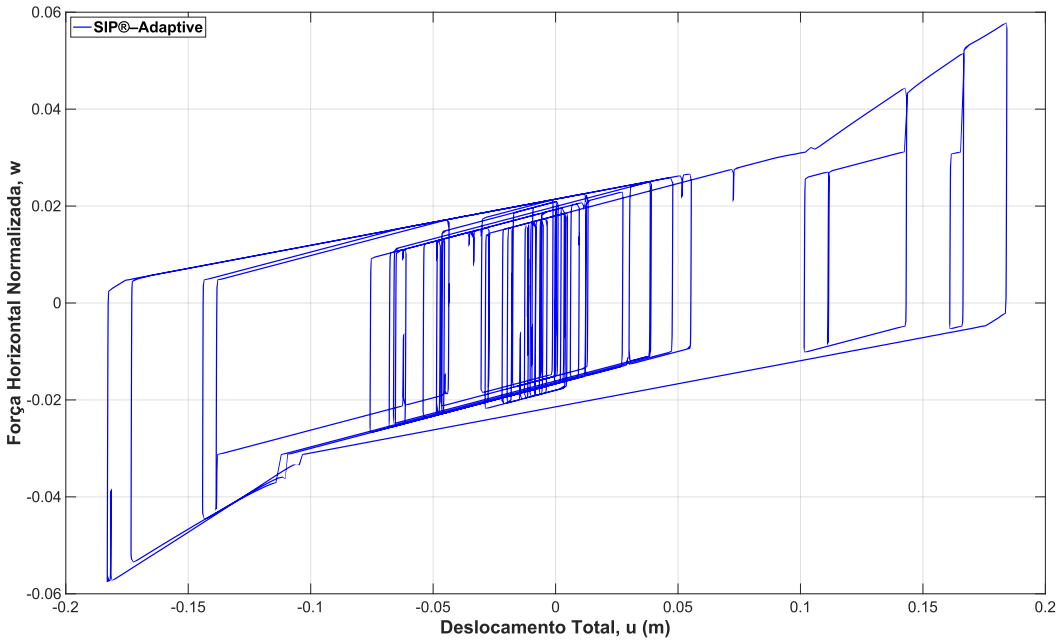


Figura 90 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1985 na Cidade do México

Como previsto, dada a continuidade da ação sísmica, o ciclo de histerese do aparelho de apoio sob análise dinâmica é mais preenchido, havendo uma maior variabilidade entre as forças e os deslocamentos para as duas superfícies. Todavia, também se consegue observar a dificuldade no processo de cálculo, quer pela transição abrupta entre o Regime de Deslize II e III (a) para $u = -0{,}12\ m$, quer pelos dois ciclos em $u = 0{,}12\ m$ e $u = 0{,}17\ m$ onde, após a reversão do movimento, são criados dois ciclos de histerese internos com a rigidez da superfície inferior, todavia, sem que o deslocamento reverta totalmente.

A transição entre regimes de deslize denota a dificuldade em calcular a variável Z_i em cada passo de integração, devido à variação da velocidade entre instantes de integração subsequentes. Esta dificuldade provoca, nas zonas de transição de regime, variações menos suaves entre -1 e 1 para Z_i, que conduzem a um resultado menos fidedigno.

Todavia, analisando o ciclo de histerese do aparelho de apoio nos Regimes de Deslize I e II (ver Figura 91), observa-se um resultado semelhante, ainda que com menor intensidade, ao observado para o sismo de El Centro (ver Figura 75 e Figura 76). Dada a variabilidade das acelerações do sismo, sob análise dinâmica, o comportamento histerético torna-se mais contínuo e completo, salientando-se as várias reversões do movimento que ocorrem com a mudança da solicitação provocada pelo sismo.

Este comportamento fica mais visível ao analisar o ciclo de histerese da superfície inferior, a partir da Figura 92, bem como o efeito da inclinação da base, onde há um aumento da força inicial exibida pelo aparelho de apoio. Também a superfície superior tem uma contribuição completa, com toda a sua capacidade de deslocamento, no comportamento final do apoio, como comprova a Figura 93.

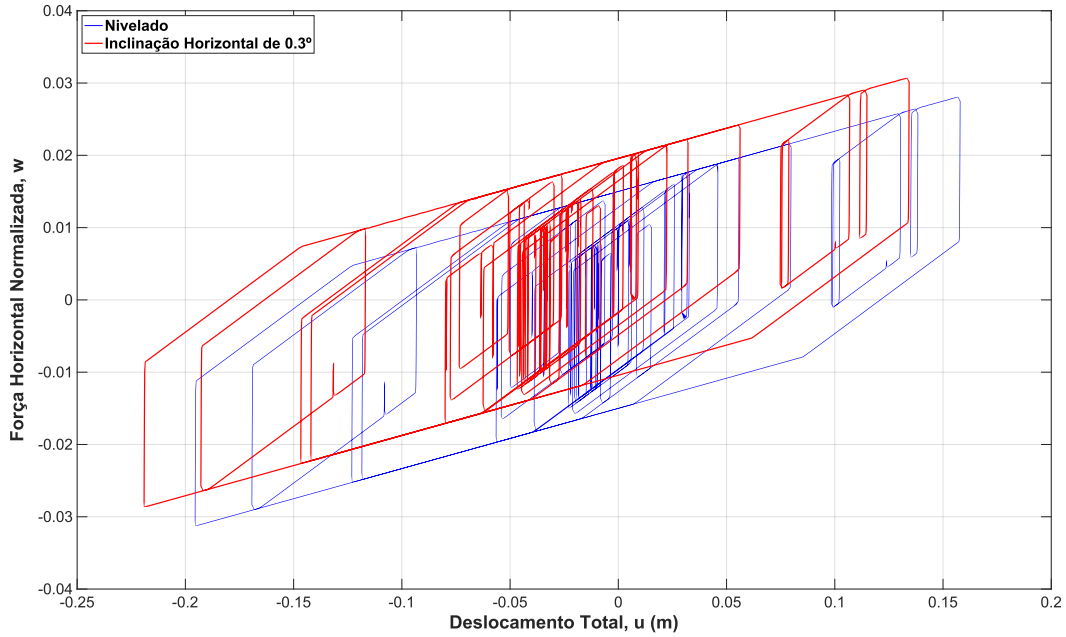


Figura 91 – Ciclo de Histerese do SIP®–Adaptive nos Regimes de Deslize I e II quando submetidos ao sismo de 1985 na Cidade do México

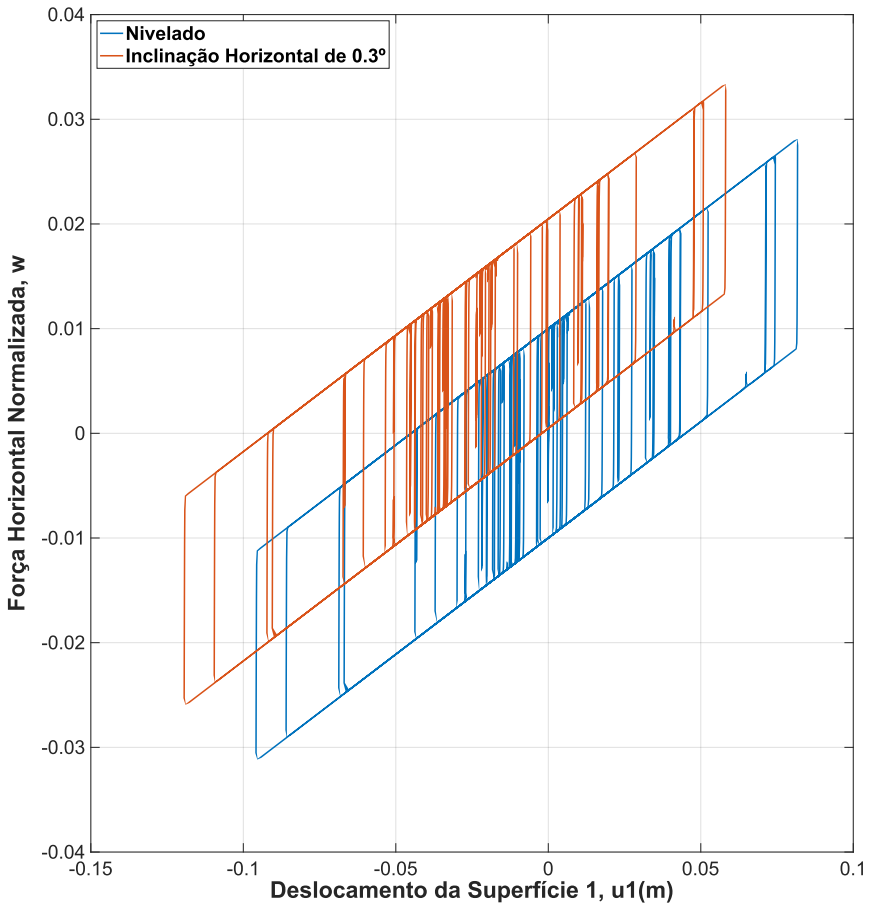


Figura 92 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Inferior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1985 na Cidade do México

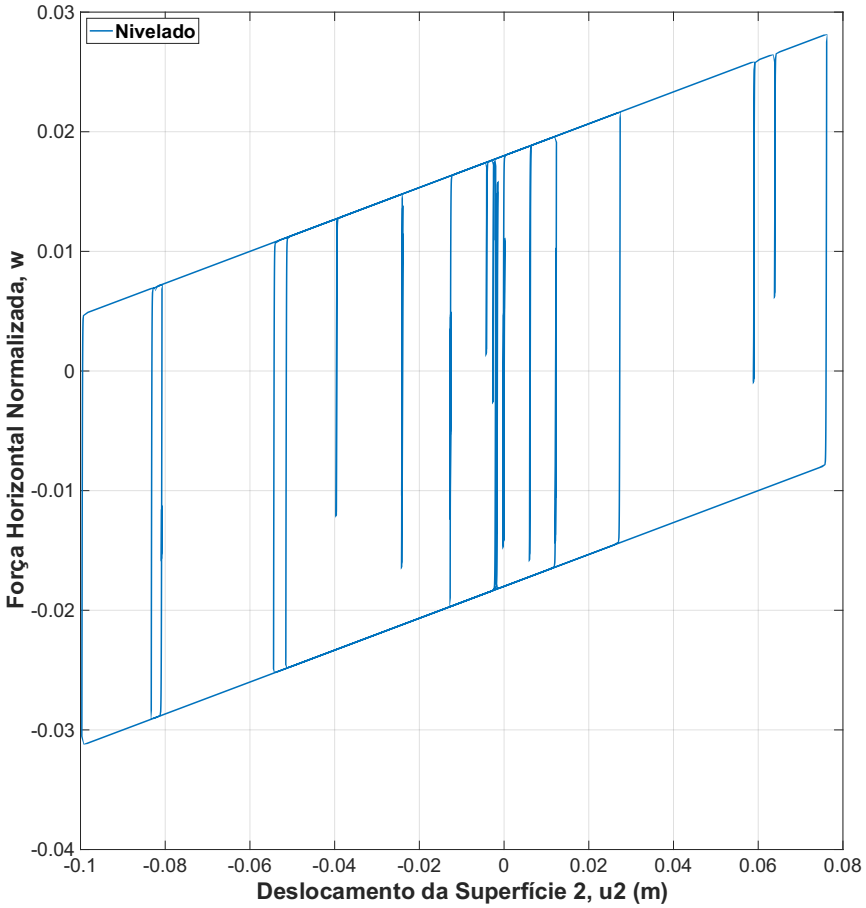


Figura 93 – Ciclo de Histerese da Superfície de Deslize Superior do SIP®–Adaptive quando submetido ao sismo de 1985 na Cidade do México

Analogamente ao que foi observado para o sismo de El Centro, a variação dos deslocamentos individuais de cada superfície de deslize, bem como do aparelho de apoio como um todo, têm uma variabilidade concordante com as acelerações que lhe são impostas, como mostra a Figura 94.

A variação dos deslocamentos é concordante com a intensidade do sismo que lhe é imposto. À medida que o sismo se vai desenvolvendo, as interações desenvolvem-se primeiro na superfície inferior, de menor atrito, sendo o gráfico da superfície inferior e o gráfico do aparelho de apoio concordantes nos primeiros instantes.

Com o aparecimento do primeiro pico de acelerações aos 10 segundos, a superfície superior entra em deslize e o deslocamento total do aparelho de apoio passa a ser definido pelos deslocamentos relativos das duas superfícies.

É relevante salientar que, enquanto não existam grandes variações das acelerações impostas ao aparelho de apoio, o comportamento predominante será definido somente pela superfície de deslize inferior, dada a concordância entre o deslocamento total e o deslocamento relativo do prato inferior. Sendo o deslocamento global definido pela soma dos deslocamentos relativos – dada a formulação em série, este seguirá o movimento da superfície inferior quando não houver qualquer deslocamento da superfície superior, tal como se observa na Figura 94.

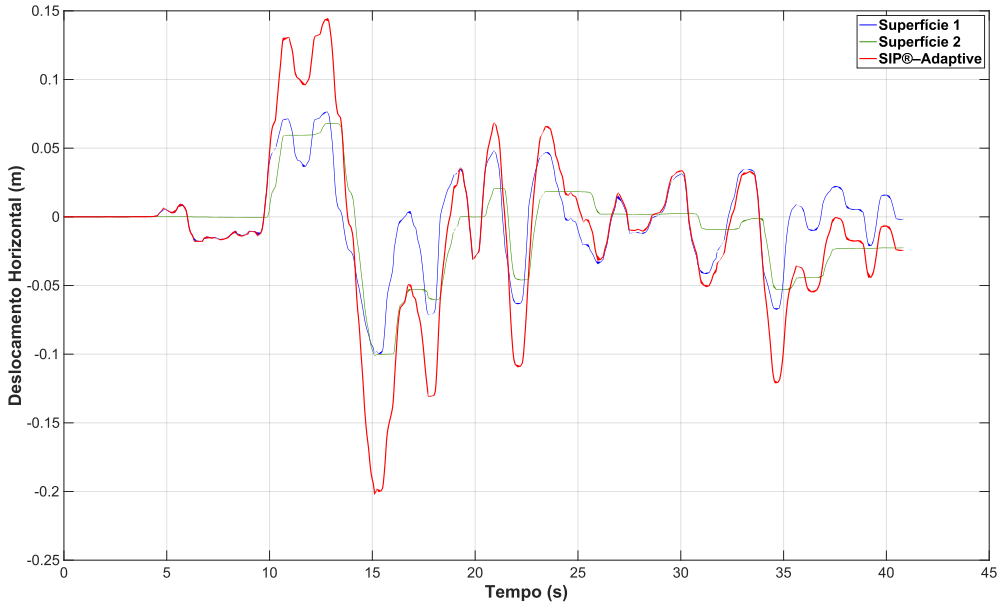


Figura 94 – Variação dos Deslocamentos do SIP®–Adaptive e das suas Superfícies de Deslize em função do tempo, para o sismo de 1985 na Cidade do México

A variação do deslocamento global da configuração nivelada, quando comparada com o deslocamento do aparelho de apoio quando aplicada uma inclinação da base é dada pela Figura 95.

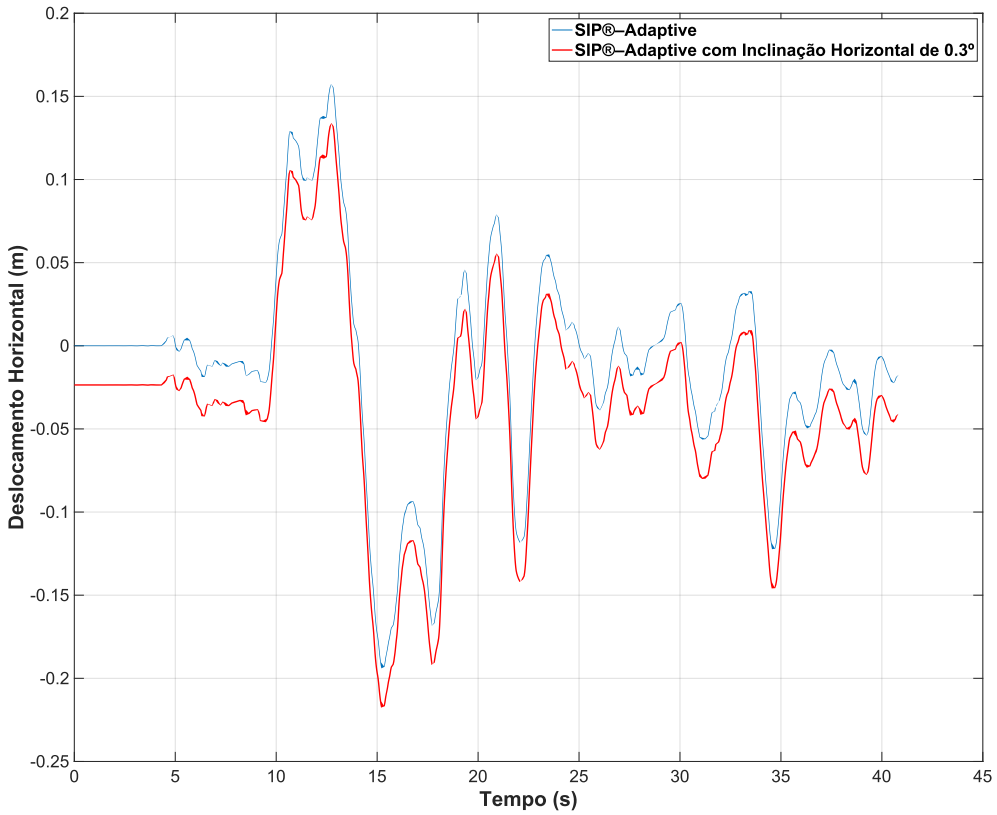


Figura 95 – Comparação do Deslocamento desenvolvido pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, entre a configuração nivelada e a configuração inclinada, para o sismo de 1985 na Cidade do México

Em concordância com o que foi discutido para os sismos de El Centro e Gebze nas Secções 6.3.1 e 6.3.2, respetivamente, há uma diminuição no deslocamento do aparelho de apoio. Na configuração nivelada (ver Figura 94), para o fim do evento sísmico, o aparelho de apoio fica com um deslocamento residual negativo, ou seja, no sentido da nova posição de equilíbrio na configuração inclinada.

Com o acréscimo da inclinação, a Figura 95 tende a indicar que este deslocamento residual irá aumentar, provocando um aumento aparente no deslocamento relativo do aparelho de apoio. Porém, ao observar a Figura 95, o deslocamento da superfície inferior no fim do sismo era nulo, sendo o descentramento caracterizado pelo deslize irrecuperável da superfície superior. Quer isto dizer que, na configuração inclinada, apesar do acréscimo do deslocamento residual, este é totalmente caracterizado pelo deslocamento induzido pela inclinação, u_r, e não incremental ao provocado pelo sismo.

Por fim, salienta-se na Figura 96 o desenvolvimento das forças horizontais no aparelho de apoio em função do tempo. De forma análoga ao que foi observado nos outros dois sismos, as forças horizontais desenvolvidas tendem a ser concordantes com o desenvolvimento das acelerações no tempo (ver Figura 89). Porém, é de reparar que o desenvolvimento das forças no tempo não é totalmente concordante com o ciclo de histerese global (ver Figura 90) ou parcial (ver Figura 91).

Esta discordância pode advir da dificuldade que o algoritmo tem em calcular a variável Z_i, associada à variabilidade que este registo sísmico provoca na velocidade de deslize, a qual esta variável é altamente dependente. Adicionalmente, esta discordância também foi observada no mesmo instante de tempo, na variação dos deslocamentos de cada superfície, para os Regimes de Deslize I e II.

De modo a obter um resultado mais aproximado, o passo de integração deve ser reduzido de modo a produzir uma integração no tempo mais fina, tal que a variabilidade do sismo não condicione a qualidade do cálculo efetuada. Esta alteração provocará uma maior exigência computacional, porém conduzirá a resultados mais corretos, menos sujeitos a erros de integração numérica.

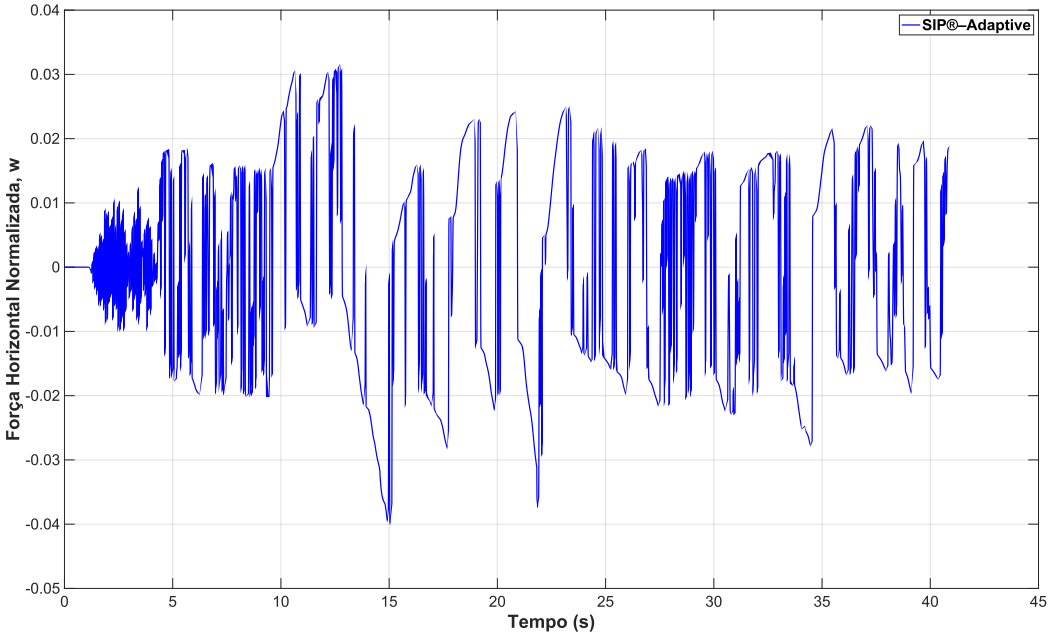


Figura 96 – Comparação da Força Horizontal exibida pelo SIP®–Adaptive em função do tempo, para o sismo de 1985 na Cidade do México

7
CONCLUSÕES

7.1. REFLEXÕES FINAIS

A presente dissertação resultou no desenvolvimento de uma metodologia de análise para o efeito da inclinação da base de aparelhos de apoio pendulares, implementada através de uma rotina em MATLAB, com dois objetivos principais: melhorar a condição de recentramento do aparelho de apoio por via da inclinação da base; e mostrar, que a partir da cooperação entre o tecido empresarial e o ambiente académico, é possível fomentar novas soluções na prática corrente da Engenharia Civil.

A fim de atingir este objetivo, foram investigadas práticas correntes sobre a modelação e implementação de sistemas de isolamento de base em programas de cálculo automático, como o SAP2000, bem como abordagens baseadas em rotinas iterativas que simulassem o comportamento destes sistemas.

Ao longo deste estudo, foi possível compreender os fundamentos do Isolamento de Base, abordando as vantagens e desvantagens da aplicação desta estratégia, quer em projetos de construção nova, quer em reabilitações. Foram analisados, também, os vários aparelhos de apoio que permitem a implementação desta estratégia no projeto estrutural, dando especial enfoque aos aparelhos de apoio pendulares adaptativos.

Para compreender o comportamento destes aparelhos de apoio, foi elaborada uma exposição detalhada dos princípios mecânicos por detrás do funcionamento destes apoios. Esta exposição foi fundamental para compreender como o implementar corretamente o comportamento dos aparelhos de apoio pendulares adaptativos em programas de cálculo dinâmico ou por via de rotinas em MATLAB ou da implementação em SAP2000.

Constatou-se que o SAP2000 utiliza uma associação em série de três FPS que não consegue captar corretamente o comportamento *start-stop-start* dos apoios pendulares adaptativos, tornando impraticável a análise da condição de recentramento por este programa. Em todo o caso, a modelação em série de dois FPS em MATLAB permitiu uma análise simplificada do comportamento e do recentramento destes, com e sem a inclinação da base. Esta modelação permitiu analisar o desempenho do aparelho de apoio sob a ação de registos sísmicos reais, criando um termo de comparação com os princípios mecânicos detalhados previamente.

No final deste estudo, constatou-se que a metodologia utilizada em MATLAB conduz a resultados satisfatórios, podendo ser uma simulação representativa do comportamento do aparelho de apoio pendular sob ação sísmica.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta as dificuldades na implementação destes aparelhos de apoio em programas de cálculo automático, é necessário o desenvolvimento de métodos numéricos que consigam captar adequadamente o comportamento adaptativo destes aparelhos de apoio. Em concreto, é necessário desenvolver e implementar elementos de folga que permitam ao utilizador definir um comportamento multi-direcional, podendo, assim, caracterizar o comportamento de sistemas de isolamento de base, como é o caso dos aparelhos de apoio pendulares.

Uma forma inicial de garantir este desenvolvimento seria modelar o comportamento dos aparelhos de apoio pendulares, não como uma associação em série, mas como uma associação em paralelo. Deste modo, é possível definir o comportamento start-stop-start por via de elementos de folga que não interagem diretamente entre si, conseguindo analisar corretamente, quer o comportamento adaptativo, quer o recentramento do aparelho de apoio.

Abordando o recentramento, recomenda-se que a condição de recentramento seja reavaliada, de modo a ser mais adequada para os aparelhos de apoio pendulares. Os apoios atuais têm uma capacidade de restituição bastante elevada, pelo que a condição presente na regulamentação atual não limita o projetista a qualquer restrição, quer no deslocamento residual, quer na capacidade máxima de deslocamento.

Por fim, dada a complexidade do tema abordado neste trabalho, sugere-se que sejam cada vez mais fomentadas as relações entre academia o tecido empresarial. Apesar da complexidade do tema, o estudo desta solução pode ser efetuado por unidades de investigação especializadas de onde a cooperação entre entidades potencia o aparecimento de soluções de projeto inovadoras que, de outro modo, seriam ignoradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (2014). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design.* American Association of State Highway and Transportation Officials. https://books.google.pt/books?id=EFqKk78OauAC

Autodesk. (2024a). *AutoCAD*. In (Version 2024) Autodesk. https://www.autodesk.com/pt/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription

Autodesk. (2024b). *Robot Structural Analysis*. In (Version 2024) Autodesk. https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview

Azevedo, J., & Guerreiro, L. (2007, 5). *Current Status of Seismic Isolation and Energy Dissipation R&D and Applications for Buildings, Bridges and Viaducts, in Portugal* http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/downloads/LESSLOSS_Workshop_Lisboa_Maio_2007/ComunicationsSP7/Paper_Joao_Azevedo_Luis_Guerreiro.doc

Bao, Y., Becker, T. C., & Hamaguchi, H. (2017). Failure of double friction pendulum bearings under pulse-type motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *46*(5), 715-732.

Becker, T. C. (2011). *Advanced modeling of the performance of structures supported on triple friction pendulum bearings* [Doctoral Thesis, University of California, Berkeley]. https://www.proquest.com/openview/06f53a4e1b70035eed0f5aa9c32af260/1?cbl=18750&pq-origsite=gscholar

Becker, T. C., & Mahin, S. A. (2013). Effect of support rotation on triple friction pendulum bearing behavior. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *42*(12), 1731-1748. https://doi.org/10.1002/eqe.2295

Calvi, P. M., & Calvi, G. M. (2018). Historical development of friction-based seismic isolation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *106*, 14-30. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.003

Cardone, D., Gesualdi, G., & Brancato, P. (2015). Restoring capability of friction pendulum seismic isolation systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *13*, 2449-2480.

CEN. (1997). *EN 1337-11:1997 Structural bearings - Part 11: Transport, storage and installation.* (EN 1337-11:1997). Comité Européen de Normalisation. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:110:0::::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:7361,6148&cs=15E3BC777ABF8784574AFD4F38614F8E7

CEN. (2004). *EN 1337-7:2004 Structural bearings - Part 7: Spherical and cylindrical PTFE bearings.* (EN 1337-7:2004). Comité Européen de Normalisation. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:110:0::::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:22907,6148&cs=1E305576C88DBFC0C77B77610BA8F8014

CEN. (2005a). *EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.* (EN 1998-1:2004). Comité Européen de Normalisation. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=205:110:0::::FSP_PROJECT:12452&cs=1F67D7894C69E2996FC3A868CEF0340CC

CEN. (2005b). *EN 1998-2:2005 Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges.* (EN 1998-2:2005). Comité Européen de Normalisation. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=205:110:0::::FSP_PROJECT:12461&cs=1749BE208F90C260794DB51D839801F9E

CEN. (2011). *Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges.* (EN 1998-2:2005+A1:2009+AC:2010+A2:2011 DIN EN 1998-2:2011-12). Comité Européen de Normalisation.

CEN. (2022). *Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos - Parte 2: Pontes.* (EN 1998-2:2005+A1:2009+AC:2010+A2:2011 CT115). Comité Européen de Normalisation.

CEN. (2023). *EN 1991-2:2023 Eurocode 1 - Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges and other civil engineering works.* (EN 1991-2:2023). Comité Européen de Normalisation. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=205:110:0::::FSP_PROJECT:72737&cs=193A0485A0F6BC7426C1CC1F357E37B2B

CEN. (2027). *Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges.* (FprEN 1998-2). Comité Européen de Normalisation. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:110:0::::FSP_PROJECT:76051&cs=1C8FF3DA4625E3506FD744B2EDE93A27C

Clarke, C. S., Buchanan, R., Efthymiou, M., & Shaw, C. (2005). Structural platform solution for seismic arctic environments-Sakhalin II offshore facilities. [https://www.researchgate.net/publication/241785619_Structural_Platform_Solution_For_Seismic_Arctic_Environments-Sakhalin_II_Offshore_Facilities]. Offshore Technology Conference,

Constantinou, M. (2004). Friction Pendulum double concave bearing. *NEES report*. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=48ee1beaeafe66aa29f15783f74e08d510f37c7e

Constantinou, M., & Fenz, D. (2008). *Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings* [Technical Report](MCEER-08-0007). MCEER. https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/08/08-0007.pdf

Constantinou, M., Mokha, A., & Reinhorn, A. (1990). Teflon bearings in base isolation II: Modeling. *Journal of Structural Engineering*, *116*(2), 455-474.

Constantinou, M., Mokha, A., & Reinhorn, A. (1991). Study of sliding bearing and helical-steel-spring isolation system. *Journal of Structural Engineering*, *117*(4), 1257-1275. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1257)

Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G. P. (2007). *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading* [Technical Report](Technical Rep. No. MCEER-07, Issue. MCEER. https://www.buffalo.edu/mceer/catalog.host.html/content/shared/www/mceer/publications/MCEER-07-0012.detail.html

CSI. (2024). *SAP2000*. In (Version 25.0) Computers and Structures, Inc. https://www.csiportugal.com/software/2/sap2000

Duan, L., & Li, F. (2003). Seismic Design Philosophies and Performance-Based Design Criteria. In C. P. LLC (Ed.), *Bridge Engineering Handbook*.

El-Bayoumi, K. (2015). Modelling of triple friction pendulum bearing in SAP2000. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, *8*(1), 1964.

Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2006). Behaviour of the double concave friction pendulum bearing. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *35*(11), 1403-1424. https://doi.org/10.1002/eqe.589

Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008a). *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical Sliding Bearings* [Technical Report]. MCEER. https://www.buffalo.edu/mceer/catalog.host.html/content/shared/www/mceer/publications/MCEER-08-0018.detail.html

Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008b). Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, *24*(4), 1011-1028.

Gino, D., Miceli, E., Giordano, L., Marano, G. C., & Castaldo, P. (2023). Influence of Masonry Infills on Seismic Performance of an Existing RC Building Retrofitted by Means of FPS Devices. *Applied Sciences*, *13*(6), 3509. https://www.mdpi.com/2076-3417/13/6/3509

Guerreiro, L. (1996). *Isolamento Sísmico de Edifícios* [Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico].

Guerreiro, L. (2007). Sistemas de Protecção Sísmica de Estruturas. *Texto de apoio do Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal*. http://www.civil.ist.utl.pt/~luisg/textos/DFA_Estruturas.pdf

Holmes, W. T. (2010). The evolution of seismic design provisions of US building codes. [https://www.caee.ca/10CCEEpdf/2010EQConf-001657.pdf]. Proceedings of 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, July,

Huygens, C. (1673). HOROLOGII OSCILLATORII: Pars Quarta. In.

Hyakuda, T., Saito, K., Matsushita, T., Tanaka, N., Yoneki, S., Yasuda, M., Miyazaki, M., Suzuki, A., & Sawada, T. (2001). The structural design and earthquake observation of a seismic isolation building using Friction Pendulum system. Proceedings, 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures,

Jordan, J., Betancour, N., & Cabral, R. (2020). Seismic Design of Bridges. https://www.pedelta.com/seismic-design-i-5-en

Kim, H. M., & Constantinou, M. C. (2023). Modeling frictional heating effects in triple friction pendulum isolators. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *52*(4), 979-997.

MAURER. (2019). *MAURER SIP ®-Adaptive Next generation of Sliding Isolation Pendulums forces in motion*. MAURER SE. https://www.maurer.eu/fileadmin/mediapool/downloads/MAU_SIP-Adaptive_A4_E_Ansicht_190306.pdf

Mayes, R., Brown, A., & Pietra, D. (2012). Using seismic isolation and energy dissipation to create earthquake-resilient buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, *45*(3), 117-122. https://bulletin.nzsee.org.nz/index.php/bnzsee/article/view/202

Mohammed, M., DeBisschop, L., Darling, S., & Ibrahim, A. (2022). Seismic isolation of bridges: Case studies. [https://repo.nzsee.org.nz/bitstream/handle/nzsee/2491/Mohammed%200084.pdf?sequence=1&isAllowed=y].

Mosqueda, G., Whittaker, A. S., Fenves, G. L., & Mahin, S. A. (2004). Experimental and analytical studies of the friction pendulum system for the seismic protection of simple bridges. *Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA*, 04-01. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1586.3923

PEER. (2024). *OpenSees*. In (Version 3.6.0) PEER. https://opensees.berkeley.edu

Priestley, M. J. N. (2000). Performance based seismic design. [https://www.bulletin.nzsee.org.nz/index.php/bnzsee/article/view/491]. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

Priestley, M. J. N., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. John Wiley & Sons, Inc.

Quaglini, V., Gandelli, E., & Dubini, P. (2017). Experimental investigation of the re-centring capability of curved surface sliders. *Structural Control and Health Monitoring*, *24*(2), e1870.

Sarlis, A., & Constantinou, M. (2010). *Modeling Triple Friction Pendulum Isolators in Program SAP2000* [Technical Report]. U. o. Buffalo. https://figshare.com/articles/presentation/Modeling_triple_friction_pendulum_isolators_in_program_SAP2000/25139669/1

Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley & Sons, Inc.

The MathWorks Inc. (2024). *MATLAB*. In (Version R2024a) The MathWorks Inc.,. https://www.mathworks.com

Tsai, C., Chiang, T. C., & Chen, B. J. (2005). Experimental evaluation of piecewise exact solution for predicting seismic responses of spherical sliding type isolated structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *34*(9), 1027-1046. https://doi.org/10.1002/eqe.430

Tsai, C., Lin, Y., & Su, H. (2010). Characterization and modeling of multiple friction pendulum isolation system with numerous sliding interfaces. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *39*(13), 1463-1491. https://doi.org/10.1002/eqe.1044

Tsai, C.-S. (2012). Advanced base isolation systems for light weight equipments. *Earthquake Resistant Structures—Design, Assessment and Rehabilitation*, 79-130. http://dx.doi.org/10.5772/28039

Weber, F., Braun, C., Distl, J., & Huber, P. (2018). *SIP-Adaptive: improved structural isolation, reduced base shear, reduced displacement capacity and improved rotation capability* https://www.researchgate.net/publication/327837767

Weber, F., Huber, P., & Milani, A. S. (2023). *Manual for Design and Modelling of MAURER SIP ®-Adaptive*. MAURER SE. https://www.maurer.eu/fileadmin/user_upload/Design_Modelling_MAURER_SIP_Adaptive__2023_10_26.pdf

Weber, F., Mano, T., Distl, H., & Braun, C. (2016, August). *Optimized Triple Friction Pendulum Versus Optimized Double Friction Pendulum* https://www.researchgate.net/publication/309134990_Optimized_Triple_Friction_Pendulum_Versus_Optimized_Double_Friction_Pendulum

Weber, F., Meier, L., Distl, J., & Braun, C. (2018). Optimum design of curved surface sliders based on site-specific seismic input and its sensitivity. *Geosciences*, *8*(3), 83. https://doi.org/10.3390/geosciences8030083

Zayas, V. A., Low, S. A., Bozzo, L., & Mahin, S. A. (1989). *Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction pendulum system*. Earthquake Engineering Research Center Berkeley, CA, USA. https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/PB92143064.pdf

Zayas, V. A., Low, S. S., & Mahin, S. A. (1990). A simple pendulum technique for achieving seismic isolation. *Earthquake Spectra*, *6*(2), 317-333. https://doi.org/10.1193/1.1585573