



**Andreia Sofia Barreto Antunes**

Licenciada em Ciências de Engenharia

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL  
DE LIGAÇÕES DISSIPATIVAS  
EM PAINÉIS DE FACHADA  
PRÉ-FABRICADOS**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Professor Doutor Carlos Chastre Rodrigues, FCT-UNL

Co-orientador: Professor Doutor Valter José da Guia Lúcio, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu

Arguente: Prof. Doutor Jorge Miguel Proença

Vogais: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues

Prof. Doutor Valter José da Guia Lúcio



Dezembro 2011



“Copyright” de Andreia Sofia Barreto Antunes, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Expresso aqui o meu sincero agradecimento a todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Em particular:

Ao Professor Doutor Carlos Chastre Rodrigues pela sua orientação ao longo deste trabalho, pela disponibilidade, incentivo e interesse demonstrado na realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Valtér Lúcio e ao Engenheiro Rui Marreiros pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

Às empresas Concremat e A. M. Rato Varanda, nas pessoas dos Engenheiros Romeu Reguengo e Rato Varanda, pelo fornecimento de material, mão-de-obra e disponibilidade mostradas.

À Engenheira Ana Martins e Professor Marco Marques pela cedência da máquina de ensaios do Laboratório de Estruturas e Construção da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, e por toda a disponibilidade e ajuda.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas do DEC, por toda a ajuda prestada.

A todos os amigos, em especial às colegas que me acompanharam nesta fase, pela amizade e espírito de entreaajuda.

Aos meus pais, à minha irmã e avós, agradeço todo o apoio incondicional, compreensão e as palavras de incentivo, tanto no meu percurso académico, como pessoal.

Ao Orlando pelo incentivo, por toda a ajuda e apoio dados, pela paciência e por todo o carinho demonstrado.

A todos, embora apenas palavras não cheguem para mostrar toda a gratidão, um MUITO OBRIGADA!



# Resumo

A pré-fabricação como técnica construtiva apresenta diversas vantagens, entre as quais se destacam, a maior resistência e durabilidade do betão, a redução do tempo em obra e a menor necessidade de trabalhadores no local que conduzem a uma diminuição dos custos globais da obra. Contudo, estas vantagens dependem da simplicidade e eficiência das ligações entre os elementos da estrutura e podem ser colocadas em risco se no dimensionamento da estrutura e das ligações não se prestar especial atenção aos elementos que são considerados não estruturais mas contribuem para a resposta dinâmica da estrutura.

Este estudo surgiu da necessidade de encontrar soluções para as ligações dos painéis de fachada à estrutura, no sentido de que estes possam contribuir para um melhor comportamento do edifício, dissipando energia no caso de ocorrência de um sismo.

O trabalho desenvolvido foca-se essencialmente na ligação dos painéis de fachada à estrutura, tendo sido testado, através de ensaios quasi-estáticos, o comportamento de ligações realizadas com diferentes modelos de dispositivos mecânicos dissipadores de energia. Os dispositivos mecânicos utilizados variam essencialmente em termos de dimensões, entre dois tipos de configurações geométricas e dois tipos de aço.

A análise dos resultados dos ensaios experimentais é realizada em função de parâmetros básicos de resistência, tais como a força de cedência e a força de rotura, e de desempenho, como a energia dissipada ao longo dos ciclos desenvolvidos pelo dispositivo e a sua ductilidade.

Propõe-se um modelo numérico multi-linear simples e de fácil aplicação para simular o comportamento histerético de dispositivos mecânicos dissipadores de energia com uma geometria semelhante aos ensaiados.

## Palavras Chave

- Estruturas pré-fabricadas
- Painéis de Fachada
- Ligações
- Dissipação de energia



# Abstract

The precast as a construction technique has several advantages, such as the increased strength and durability of concrete, the reduction of time and the necessity of fewer workers in the construction site, which leads to the reduction of the global cost of the construction. However, these advantages depend on the simplicity and efficiency of the connections between the structure elements, and can be jeopardized if the structure and connections design do not pay particular attention to the elements that are considered non-structural but contribute for the dynamic response of the structure.

This study resulted from the need to find solutions for cladding panels connections to the structure, in order to enable them to contribute to a better performance of the building, by energy dissipation, during an earthquake.

This research focuses mainly in the cladding to frame connection, and the behavior of connections made with different models of mechanical energy dissipating devices has been tested through quasi-static tests. The mechanical devices used vary mainly in terms of dimensions, between two types of geometric configurations and two classes of steel.

The results from the laboratory tests are analyzed according to basic parameters of resistance, such as yield and ultimate force, and performance parameters, as the energy dissipated over the cycles developed by the device and its ductility.

It is proposed a multi-linear numerical model with simple and easy application to simulate the hysteretic behavior of mechanical energy dissipators with a geometry similar to tested devices.

## Keywords

- Precast Concrete Structures
- Cladding
- Connections
- Energy Dissipation



# Índice de Matérias

Índice de Matérias	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Quadros	xix
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objectivo	2
1.2 Organização da dissertação	3
<b>2 Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão</b>	<b>5</b>
2.1 Estruturas pré-fabricadas	5
2.1.1 Sistemas estruturais	7
2.1.1.1 Sistemas reticulados	7
2.1.1.2 Lajes de pavimento e de cobertura	9
2.1.1.3 Sistemas de paredes resistentes	9
2.1.1.4 Painéis de fachada	10
2.1.1.5 Estruturas Celulares	11
2.2 Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão	12
2.2.1 Tipos de ligações	13
2.2.1.1 Ligação Pilar - Fundação	13
2.2.1.2 Ligação Viga - Pilar	15
2.2.1.3 Ligação Pilar - Pilar	18
2.2.1.4 Ligação Viga - Viga	19
2.2.1.5 Ligação Laje - Viga	20
2.2.1.6 Ligação Laje - Laje	21
2.2.1.7 Ligação Parede - Parede	22
2.2.1.8 Ligação dos painéis de fachada à estrutura	24
2.3 Ligações dissipativas em painéis pré-fabricados	31
2.4 Regulamentação para estruturas pré-fabricadas resistentes a acções sísmicas	39

<b>3</b>	<b>Programa experimental</b>	<b>41</b>
3.1	Introdução . . . . .	41
3.2	Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural . . . . .	42
3.2.1	Geometria . . . . .	42
3.2.2	Sistema de Ensaio . . . . .	45
3.2.3	Instrumentação e aquisição de dados . . . . .	50
3.3	Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia . . . . .	53
3.3.1	Geometria dos dispositivos e modelo de ensaio . . . . .	53
3.3.2	Sistema de ensaio . . . . .	56
3.3.3	Instrumentação e aquisição de dados . . . . .	59
3.4	Caracterização dos materiais . . . . .	61
3.4.1	Betão . . . . .	61
3.4.2	Aço . . . . .	61
3.4.3	Perfis de Inserção . . . . .	63
3.4.4	Parafusos . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Apresentação de resultados dos ensaios</b>	<b>65</b>
4.1	Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural . . . . .	65
4.1.1	Ensaio da ligação com dispositivos DC 50x5 . . . . .	67
4.1.2	Ensaio da ligação com dispositivos DR 50x5 . . . . .	69
4.1.3	Ensaio da ligação com dispositivos DR 50x10-1 . . . . .	71
4.2	Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia . . . . .	74
4.2.1	Panorâmica geral dos ensaios . . . . .	75
4.2.2	Particularização dos ensaios . . . . .	77
4.2.3	Modos de rotura dos dispositivos . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Análise de resultados dos ensaios</b>	<b>93</b>
5.1	Ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural . . . . .	93
5.2	Dispositivos mecânicos dissipadores de energia . . . . .	94
5.2.1	Força e deslocamento de cedência . . . . .	94
5.2.2	Energia dissipada . . . . .	96
5.2.3	Taxa de amortecimento viscoso equivalente . . . . .	99
5.2.4	Ductilidade em deslocamento . . . . .	102
5.2.5	Análise dos resultados . . . . .	103
<b>6</b>	<b>Modelo numérico multi-linear do comportamento hysterético dos dispositivos dissipadores de energia</b>	<b>107</b>
6.1	Estimativa da força de cedência . . . . .	107
6.2	Proposta de modelo numérico multi-linear de comportamento hysterético . . . . .	110
6.2.1	Modelo multi-linear . . . . .	110
6.2.2	Definição dos troços do modelo multi-linear . . . . .	111
6.2.3	Parâmetros definidores do modelo multi-linear . . . . .	112
6.3	Simulação dos ensaios experimentais . . . . .	114
6.4	Comparação do modelo numérico com os ensaios experimentais . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros</b>	<b>123</b>
7.1	Conclusões . . . . .	124
7.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	126

Bibliografia	127
A Pormenorização das armaduras dos elementos de betão	131



# Índice de Figuras

1.1	Edifício pré-fabricado em construção, onde os painéis de fachada colapsaram durante o sismo . . . . .	2
2.1	Sistema de estrutura reticulada de um edifício de um piso . . . . .	7
2.2	Estrutura reticulada de um edifício industrial com três pisos . . . . .	8
2.3	Estrutura reticulada de vários pisos contraventada por núcleos de paredes resistentes . . . . .	8
2.4	Exemplos de lajes pré-fabricadas, a) alveoladas, b) nervuradas em duplo T . . . . .	9
2.5	Sistema estrutural de paredes resistentes . . . . .	10
2.6	Exemplo de utilização de painéis de fachada ( <i>Painéis Sandwich</i> ) em edifícios com vários pisos . . . . .	11
2.7	Estruturas celulares pré-fabricadas . . . . .	11
2.8	Componentes de uma ligação estrutural . . . . .	12
2.9	Ligação pilar - fundação: a) pedestal saliente do bloco de fundação, b) encaixe do pilar no bloco auxiliado por cunhas . . . . .	13
2.10	Ligação pilar - fundação com chumbadouros . . . . .	14
2.11	Ligação pilar - fundação com armadura saliente: a) da fundação, b) do pilar . . . . .	14
2.12	Ligação viga - pilar com a viga apoiada numa consola curta . . . . .	15
2.13	Ligação viga - pilar com betonagem da junta dos elementos . . . . .	16
2.14	Ligação viga - pilar com cantoneira metálica soldada às chapas existentes . . . . .	16
2.15	Ligação viga - pilar por aparafusamento . . . . .	17
2.16	Ligação viga - pilar com pré-esforço . . . . .	17
2.17	Ligação pilar - pilar com chumbadouros: a) aparafusados nos cantos do pilar, b) aparafusados no meio das faces do pilar (solução articulada) . . . . .	18
2.18	Ligação pilar - pilar com amarração por emenda: a) através de bainha metálica, b) através de um acoplador . . . . .	18
2.19	Ligação viga - viga (articulada): a) entre vigas coaxiais, b) viga secundária ligada por aparafusamento de peças metálicas à viga principal . . . . .	19
2.20	Ligação laje - viga simplesmente apoiada . . . . .	20
2.21	Ligação laje - viga com betonagem da zona superior . . . . .	20
2.22	Ligação laje - laje com betonagem da junta longitudinal . . . . .	21

## Índice de Figuras

---

2.23	Ligação laje - laje por soldadura de chapas metálicas e posterior betonagem da lâmina superior . . . . .	21
2.24	Pormenor de armaduras de continuidade salientes de uma parede . . . . .	22
2.25	Ligação parede - parede - laje com armaduras de continuidade . . . . .	23
2.26	Ligação parede - parede com betonagem da junta vertical . . . . .	23
2.27	Localização das ligações num: a) painel pendurado, b) painel apoiado . . . . .	24
2.28	Ligação painel de fachada - laje por betonagem . . . . .	25
2.29	Ligação painel de fachada - viga: a) com soldadura, b) com aparafusamento . . . . .	25
2.30	Exemplos de ligações comerciais aparafusadas . . . . .	26
2.31	PHILIPP Power Box . . . . .	26
2.32	Secção transversal do PHILIPP Power Box System . . . . .	27
2.33	Ligação entre painéis de fachada e sua ligação à laje . . . . .	27
2.34	Ligação entre painéis de fachada através de aparafusamento e ligação à laje . . . . .	27
2.35	Ligações ao corte numa direcção . . . . .	28
2.36	Vários tipos de mecanismos para ligações ao corte numa direcção . . . . .	28
2.37	Mecanismos para ligações ao corte: a) numa direcção, b) em duas direcções perpendiculares, c) produtos comercializados pela empresa HALFEN . . . . .	29
2.38	Ligação painéis sandwich - laje por sobreposição de armadura . . . . .	29
2.39	Ligação painel sandwich - laje nervurada em T por soldadura . . . . .	30
2.40	Ligação painel sandwich - fundação por soldadura . . . . .	30
2.41	Sistema da ligação . . . . .	32
2.42	Dispositivo de ligação . . . . .	32
2.43	Pormenores do aparafusamento da solução avançada de ligação . . . . .	33
2.44	<i>Notched Shear Plate</i> . . . . .	34
2.45	<i>Slotted Flexure Plate</i> . . . . .	34
2.46	<i>Inclined Flat Bar</i> . . . . .	35
2.47	<i>Pinned Tension Strut</i> . . . . .	36
2.48	<i>Brass Friction Device</i> . . . . .	36
2.49	<i>U-Shaped Flexure Plate</i> . . . . .	36
2.50	Sistema híbrido . . . . .	37
2.51	a) Esquema do sistema de ligação dos painéis, b) Pormenor do dispositivo de ligação em forma de U . . . . .	37
2.52	Chapa furada soldada proposta para a ligação . . . . .	38
2.53	Chapa de ligação depois dos ensaios . . . . .	38
3.1	Dimensões dos painéis de fachada (mm) . . . . .	42
3.2	Dimensões do bloco de betão (mm) . . . . .	43
3.3	Vistas e dimensões do dispositivo DC 50x5 (mm) . . . . .	43
3.4	Vistas e dimensões do dispositivo DR 50x5 (mm) . . . . .	44
3.5	Vistas e dimensões do dispositivo DR 50x10-1 (mm) . . . . .	44
3.6	Aplicação do pré-esforço no varão do bloco de betão . . . . .	45
3.7	Perfis metálicos a ligar os dois painéis de fachada . . . . .	46
3.8	Sistema de rolamentos aplicados na base dos painéis . . . . .	46
3.9	Esquema de ensaio visto de cima . . . . .	47
3.10	Planta da configuração do ensaio . . . . .	47
3.11	a) Peça que limita o dispositivo, b) Aplicação da peça no dispositivo . . . . .	48
3.12	Planta do esquema de ensaio com dispositivos DC 50x5 . . . . .	49
3.13	Esquema de ensaio com dispositivos DC 50x5 - Corte A-A . . . . .	49

3.14	Esquema de ensaio com dispositivos: a) DC 50x5, b) DR 50x5 e c) DR 50x10-1 . . . . .	50
3.15	Posicionamento da Célula de Carga 1 . . . . .	50
3.16	Posicionamento dos transdutores de deslocamento utilizados nos três ensaios . . . . .	51
3.17	Posicionamento dos transdutores de deslocamento CDP-100 . . . . .	51
3.18	Posicionamento do transdutor de deslocamento DP-500E . . . . .	52
3.19	Vista geral do sistema de ensaio com o Datalogger Spider 8, computador portátil e Bomba hidráulica - Enerpac GPEW 2020 WSN (direita) . . . . .	52
3.20	Esquema do modelo de ensaio . . . . .	54
3.21	Parte superior do modelo de ensaio . . . . .	54
3.22	Modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x10-2 . . . . .	54
3.23	Dimensões do modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x10-2 (mm) . . . . .	55
3.24	Modelo de ensaio dos dispositivos DR 70x10-1 e DR 70x10-2 . . . . .	55
3.25	Dimensões do modelo de ensaio dos dispositivos DR 70x10-1 e DR 70x10-2 (mm) . . . . .	55
3.26	Modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x15-1 e DR 50x15-2 . . . . .	56
3.27	Dimensões do modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x15-1 e DR 50x15-2 (mm) . . . . .	56
3.28	Sistema de ensaio com o modelo DR 50x10-2 . . . . .	57
3.29	Sistema de ensaio com o modelo DR 70x10-2 . . . . .	57
3.30	Sistema de ensaio com o modelo DR 50x15-1 . . . . .	58
3.31	Cantoneiras aparafusadas à barra inferior para eliminar escorregamentos na maxila inferior da máquina . . . . .	58
3.32	Máquina de ensaios Servosis ME 408/60 e respectivo sistema de aquisição de dados (direita) . . . . .	59
3.33	Célula de carga PCI-100 e o seu posicionamento na máquina de ensaios . . . . .	60
3.34	Diagrama de tensão - deformação das barras ensaiadas . . . . .	62
3.35	Ensaio de tracção da barra 50x15 mm: a) no início, b) na rotura . . . . .	62
3.36	Perfis de inserção da marca Jordahl: a) JTA W 50/30, b) JXA W 38/23 . . . . .	63
3.37	Força pontual admissível nos perfis de inserção: a) tracção pura ou oblíqua, b) corte, c) axial . . . . .	63
3.38	Parafusos da marca Jordahl: a) JB, b) JXH . . . . .	64
4.1	Convenções do deslocamento e da força no esquema de ensaio . . . . .	66
4.2	História de deslocamentos na ligação com DC 50x5 . . . . .	67
4.3	Diagrama força - tempo da ligação com DC 50x5 . . . . .	67
4.4	Diagrama força - deslocamento da ligação com DC 50x5 . . . . .	67
4.5	Aparência da ligação com os DC 50x5 na posição: a) inicial, b) de deslocamento máximo negativo, c) de deslocamento máximo positivo, d) inicial (depois de ter completado o ciclo) . . . . .	68
4.6	História de deslocamentos na ligação com DR 50x5 . . . . .	69
4.7	Diagrama força - tempo da ligação com DR 50x5 . . . . .	69
4.8	Diagrama força - deslocamento da ligação com DR 50x5 . . . . .	69
4.9	Aparência da ligação com os DR 50x5 na posição: a) inicial, b) de deslocamento máximo negativo, c) de deslocamento máximo positivo, d) inicial (depois de ter completado o ciclo) . . . . .	70
4.10	História de deslocamentos na ligação com DR 50x10-1 . . . . .	71
4.11	Diagrama força - tempo da ligação com DR 50x10-1 . . . . .	71
4.12	Diagrama força - deslocamento da ligação com DR 50x10-1 . . . . .	72
4.13	Ligação com os DR 50x10-1 na posição inicial . . . . .	72
4.14	Ligação com os DR 50x10-1 na posição de deslocamento máximo positivo . . . . .	72

## Índice de Figuras

---

4.15	Ligação com os DR 50x10-1 na posição de deslocamento máximo negativo . . . .	73
4.16	Ligação com os DR 50x10-1 na posição inicial (depois de ter completado o ciclo)	73
4.17	a) Descascamento da lâmina de betão no limiar do perfil de inserção, b) Deformação do perfil de inserção na zona do parafuso . . . . .	73
4.18	Diagrama de deslocamentos-tempo programado na máquina de ensaio . . . . .	74
4.19	Convenção do sentido do deslocamento e da força . . . . .	75
4.20	a) História de deslocamentos dos modelos ensaiados, b) Diagramas força-tempo dos modelos ensaiados . . . . .	76
4.21	Diagramas força - deslocamento dos modelos ensaiados . . . . .	77
4.22	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 10 mm . . . . .	78
4.23	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 20 mm . . . . .	78
4.24	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 30 mm . . . . .	78
4.25	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 40 mm . . . . .	79
4.26	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 50 mm . . . . .	79
4.27	Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 50x10-2 . . .	79
4.28	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 10 mm . . . . .	80
4.29	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 20 mm . . . . .	80
4.30	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 30 mm . . . . .	81
4.31	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 40 mm . . . . .	81
4.32	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos imediatamente antes da rotura nos ciclos de 50 mm	81
4.33	Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 70x10-1 . . .	82
4.34	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 10 mm . . . . .	82
4.35	a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 20 mm . . . . .	83

4.36 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 30 mm . . . . .	83
4.37 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 40 mm . . . . .	83
4.38 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos imediatamente antes da rotura nos ciclos de 50 mm	84
4.39 Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 70x10-2 . . .	84
4.40 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 10 mm . . . . .	85
4.41 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 20 mm . . . . .	85
4.42 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 30 mm . . . . .	85
4.43 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 40 mm . . . . .	86
4.44 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos imediatamente antes da rotura nos ciclos de 50 mm	86
4.45 Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 50x15-1 . . .	86
4.46 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 10 mm . . . . .	87
4.47 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 20 mm . . . . .	87
4.48 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 30 mm . . . . .	88
4.49 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 40 mm . . . . .	88
4.50 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 50 mm . . . . .	88
4.51 a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 60 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos quando a porca do varão inferior se soltou . . . .	89
4.52 Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 50x15-2 . . .	89
4.53 Rotura do dispositivo do lado esquerdo do modelo . . . . .	90
4.54 Rotura do dispositivo do lado direito do modelo e deformação de todo o esquema de ensaio . . . . .	90
4.55 Rotura do dispositivo do lado direito do modelo e deformação de todo o esquema de ensaio . . . . .	91

## Índice de Figuras

---

4.56	Rotura do dispositivo do lado direito do modelo e encurvadura do varão inferior da ligação . . . . .	91
4.57	Pormenor da rotura do dispositivo pelo furo do varão inferior da ligação . . . . .	92
4.58	a) Deformada dos dispositivos com a porca esquerda do varão inferior solta (vista de frente), b) Pormenor do início da rotura do dispositivo do lado esquerdo (visto de trás) . . . . .	92
5.1	Esquema para determinação da força e deslocamento de cedência . . . . .	95
5.2	Energia dissipada por ciclo, $W_d$ , em cada dispositivo . . . . .	97
5.3	Energia dissipada por ciclo, $W_d$ , em todos os dispositivos . . . . .	97
5.4	Diagrama da energia dissipada em cada conjunto de 3 ciclos de igual amplitude . . . . .	98
5.5	Energia dissipada acumulada em todos os ciclos, $W_{acum}$ , em todos os dispositivos . . . . .	99
5.6	Taxa de amortecimento viscoso equivalente, $\xi_{eq}$ , de ciclos histeréticos não simétricos . . . . .	100
5.7	Taxa de amortecimento viscoso equivalente, $\xi_{eq}$ , por ciclo, para cada dispositivo . . . . .	101
6.1	Mecanismo parcial de colapso do dispositivo e secção transversal da barra . . . . .	108
6.2	Modelo multi-linear do comportamento histerético dos dispositivos . . . . .	110
6.3	Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 50x10-2 . . . . .	114
6.4	Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 70x10-1 . . . . .	114
6.5	Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 70x10-2 . . . . .	115
6.6	Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 50x15-1 . . . . .	115
6.7	Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 50x15-2 . . . . .	115
6.8	Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 50x10-2 . . . . .	118
6.9	Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 70x10-1 . . . . .	118
6.10	Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 70x10-2 . . . . .	119
6.11	Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 50x15-1 . . . . .	119
6.12	Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 50x15-2 . . . . .	119
A.1	Pormenorização das armaduras dos painéis de fachada (mm) . . . . .	131
A.2	Armaduras dos painéis de fachada . . . . .	132
A.3	Pormenorização das armaduras do bloco de betão (mm) . . . . .	133
A.4	Armaduras do bloco de betão . . . . .	133

# Índice de Quadros

3.1	Tipo de parafusos utilizados em cada ensaio . . . . .	48
3.2	Caracterização do betão . . . . .	61
3.3	Resultados dos ensaios de caracterização das barras de aço . . . . .	62
3.4	Características dos perfis de inserção da marca Jordahl . . . . .	64
3.5	Características dos parafusos da marca Jordahl . . . . .	64
5.1	Resumo dos ciclos em que ocorreu a rotura dos dispositivos . . . . .	94
5.2	Força e deslocamento de cedência e respectivos parâmetros de cálculo . . . . .	95
5.3	Energia dissipada em todos os ciclos exercidos pelos dispositivos . . . . .	96
5.4	Taxa de amortecimento viscoso equivalente, $\xi_{eq}$ , por ciclo, para cada dispositivo .	100
5.5	Resumo dos parâmetros de resistência e de desempenho dos ensaios . . . . .	103
6.1	Parâmetros resultantes do modelo numérico multi-linear . . . . .	116
6.2	Rácio dos parâmetros resultantes do modelo numérico sobre os parâmetros resultantes dos ensaios . . . . .	120



# Capítulo 1

## Introdução

As estruturas pré-fabricadas de betão armado têm, cada vez mais, uma posição de destaque na indústria da construção devido às vantagens que apresentam comparativamente às soluções moldadas em obra. Deste conjunto de vantagens, destacam-se a maior velocidade de construção, a possibilidade de redução do custo global da obra e os factores intrínsecos ao conceito de pré-fabricação, como a maior resistência e durabilidade do betão. Dentro do conjunto de elementos que constituem uma estrutura pré-fabricada, as ligações merecem uma atenção especial, porque definem o comportamento da estrutura promovendo ou evitando a interacção entre os elementos, conforme o pretendido.

Em zonas de elevada sismicidade, as ligações entre os elementos pré-fabricados devem ser dimensionadas e executadas tendo em conta os requisitos base de qualquer ligação, como a resistência aos esforços resultantes de diferentes acções a que a estrutura possa estar sujeita, aliados à ductilidade e capacidade de dissipar energia. Se as ligações estiverem dotadas destas características permitirão um melhor controlo de danos estruturais e não estruturais, depois de assegurado o mínimo risco de colapso e de perda de vidas humanas.

Um dos casos particulares destas ligações é a ligação entre os painéis de fachada e os elementos estruturais, cujo comportamento é o objecto de estudo principal do presente trabalho.

A experiência retirada da observação do que tem acontecido durante determinados eventos sísmicos, como o relatado por Menegotto [13] sobre o sismo de L'Aquila em Abril de 2009, mostra que mesmo em casos em que a estrutura principal do edifício não sofreu danos graves, as ligações dos painéis de fachada à estrutura não resistiram, provocando o colapso dos painéis (Figura 1.1). Não incluir os painéis de fachada no modelo estrutural de dimensionamento da estrutura, por serem considerados elementos não estruturais, pode ser considerada uma das razões que originaram este comportamento. De facto, os painéis e as suas ligações contribuem, mesmo que de forma não intencional, para a rigidez lateral da estrutura, porque existe interacção entre estes elementos, e portanto, esta interacção não poderá ser negligenciada de futuro.



Figura 1.1: Edifício pré-fabricado em construção, onde os painéis de fachada colapsaram durante o sismo [13]

O interesse no estudo de sistemas de ligação, que permitam atenuar a resposta dinâmica do edifício, nasce da premissa anteriormente descrita. A promoção da interacção entre a estrutura e o painel de fachada pode beneficiar a dissipação de energia, não desprezando o aumento de rigidez lateral da estrutura que daí resulta.

### 1.1 Objectivo

Neste trabalho pretende-se fazer um levantamento do tipo de ligações existentes para os vários elementos da estrutura de uma forma geral e divulgar as características e o comportamento de algumas das soluções estruturais dissipativas de energia existentes para as ligações entre o painel de fachada e o elemento estrutural de uma forma particular.

O objectivo principal deste estudo prende-se com o desenvolvimento de uma solução para a ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural, cujo comportamento permita a dissipação de energia da estrutura.

### 1.2 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos distintos.

No Capítulo 1 faz-se uma breve introdução aos assuntos abordados neste trabalho, referindo as principais razões que levaram à sua realização.

No Capítulo 2 é feito um enquadramento dos elementos pré-fabricados mais utilizados em vários sistemas estruturais, seguido de uma apresentação geral e descrição dos tipos de ligações estruturais mais importantes presentes nas estruturas pré-fabricadas. Por último, faz-se um levantamento mais particular, referente ao tema principal do estudo, das ligações dissipativas em painéis de fachada.

No Capítulo 3 descreve-se o programa experimental dos ensaios realizados para testar um modelo de dispositivos que permita dissipar energia. Este programa experimental divide-se em dois tipos de ensaio distintos, o primeiro estuda a interacção de todos os elementos envolvidos na ligação (painéis de fachada, pilar de betão e os dispositivos de ligação) e o segundo analisa apenas o comportamento dos dispositivos.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados.

No Capítulo 5 faz-se uma análise dos resultados, para o primeiro tipo de ensaio esta análise é meramente qualitativa enquanto que para o segundo tipo de ensaio já se analisam os resultados obtidos comparando-se o seu comportamento através de vários parâmetros de resistência e de desempenho. Dos parâmetros de resistência, constam a força de cedência, a força máxima positiva e negativa e a força de rotura. Os parâmetros de desempenho englobam a energia dissipada ao longo dos ciclos, a taxa de amortecimento viscoso equivalente, o coeficiente de ductilidade convencional e o coeficiente de ductilidade plástica monotónica equivalente.

No Capítulo 6 propõe-se um modelo numérico multi-linear que pretende simular o comportamento histerético dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia, para deste modo, criar uma ferramenta que permita analisar os principais parâmetros de resistência e de desempenho de dispositivos semelhantes aos dispositivos ensaiados, sem a necessidade de recorrer a ensaios experimentais.

No Capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões retiradas dos ensaios desenvolvidos e ao modelo numérico criado, e são feitas considerações acerca de desenvolvimentos que se consideram necessários com o objectivo de um melhor comportamento do tipo de ligação estudada.



## Capítulo 2

# Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

Neste Capítulo faz-se um levantamento do estado da arte das estruturas pré-fabricadas de betão e as respectivas ligações estruturais, englobando os elementos que compõem os sistemas estruturais pré-fabricados e a regulamentação existente para este tipo de estruturas resistentes a acções sísmicas. A última parte deste Capítulo trata da divulgação de algumas soluções em termos de ligações dissipativas para painéis de fachada existentes na bibliografia.

### 2.1 Estruturas pré-fabricadas

As exigências cada vez maiores no campo da construção promovem o desenvolvimento de novas soluções construtivas, que permitam uma maior rapidez de execução e conduzam a uma maior economia. A pré-fabricação em estruturas de edifícios constitui uma boa resposta a este desafio competindo com estruturas moldadas em obra, resultado das vantagens a seguir enumeradas:

- Rapidez de execução das estruturas em obra - conseguida com um planeamento adequado das operações a realizar em obra e com uma menor dependência das condições atmosféricas;
- Maior resistência e durabilidade do betão, conferindo melhor qualidade global do produto - fruto da produção em unidades industriais com mão-de-obra especializada para esse fim, e possibilitando um controlo de qualidade mais eficiente;
- Maior precisão geométrica dos elementos - proporcionada pelo controlo dimensional dado pelo equipamento disponível na fábrica;
- Melhor acabamento das superfícies de betão - devido à elevada qualidade da cofragem e dos moldes;
- Redução da área do estaleiro e do número de horas de trabalho em estaleiro;
- Maior facilidade de aplicação de pré-esforço por pós-tensão ou pré-tensão aos elementos de betão;

## Capítulo 2. Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

---

- Boa alternativa à crescente escassez de mão-de-obra habilitada e experiente em obra;
- Boa relação custo / qualidade / prazo.

No entanto, apesar de todas as vantagens inerentes ao processo da pré-fabricação ainda existem alguns inconvenientes que dificultam a implementação desta solução construtiva, dos quais se salientam:

- O transporte, manutenção e montagem dos elementos pré-fabricados - dadas as dimensões e pesos consideráveis;
- Tolerâncias muito reduzidas - o projecto de dimensionamento e a pormenorização das estruturas pré-fabricadas têm de ser regidas por um elevado rigor;
- As ligações entre os elementos representa o desafio mais problemático existente nas estruturas pré-fabricadas, por duas ordens de razões: i) Os pressupostos assumidos no projecto para o comportamento estrutural das ligações podem estar desfasados do comportamento real da ligação; ii) As ligações não serem executadas de acordo com o projecto;
- Situações que exigem maior atenção dada a menor redundância das ligações em estruturas pré-fabricadas.

De acordo com o PCI Design Handbook [21], as vantagens da utilização das estruturas pré-fabricadas são ainda maiores quando o seu dimensionamento é optimizado, adoptando os seguintes critérios:

- Maximizar a repetição e o uso de elementos modulares;
- Utilização de vãos simples sempre que possível;
- Standardizar o tamanho e o local das aberturas nos elementos;
- Minimizar o número de tipos diferentes de elementos e a variação de dimensões;
- Minimizar o número de diferentes tipos de ligação;
- Utilizar a técnica do pré-esforço nos elementos pré-fabricados quando os vãos a vencer são grandes, quando se pretende reduzir a espessura dos elementos, ou sempre que é solicitado um controlo da fendilhação apertado.

### 2.1.1 Sistemas estruturais

Antes de se iniciar a descrição das ligações em estruturas pré-fabricadas será feito um levantamento dos tipos de elementos mais utilizados, inserindo-os em sistemas estruturais básicos. Estes sistemas podem ser combinados de modo a completar as exigências do edifício em questão. Os sistemas estruturais mais comuns, segundo Silva [30], são os seguintes:

- Estruturas reticuladas (vigas e pilares);
- Lajes de pavimento e de cobertura;
- Paredes resistentes;
- Painéis de fachada;
- Estruturas celulares.

#### 2.1.1.1 Sistemas reticulados

Os sistemas reticulados são compostos por vigas e pilares pré-fabricados e pelas respectivas ligações estruturais. Dentro deste sistema estrutural podem encontrar-se algumas variantes em função da altura e do tipo de utilização do edifício. As estruturas reticuladas mais simples correspondem aos edifícios de um piso, normalmente não contraventados, onde os pilares se encontram encastrados na fundação e as vigas estão simplesmente apoiadas nos pilares (Figura 2.1). Este tipo de estrutura é bastante frequente em edifícios industriais.

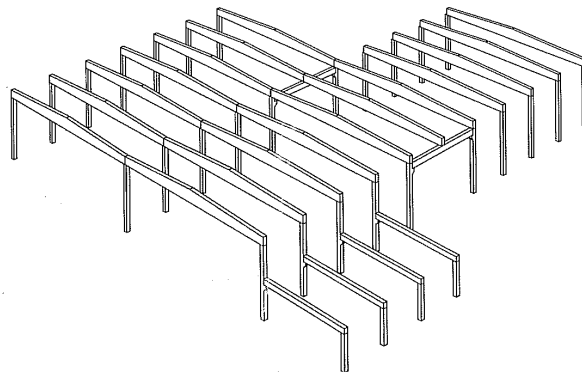


Figura 2.1: Sistema de estrutura reticulada de um edifício de um piso [6]

No caso de edifícios industriais, que contam com um ou mais pisos intermédios (Figura 2.2), o sistema estrutural é similar ao anterior, porém, os elementos estruturais são mais robustos de modo a resistir às acções gravíticas e às acções sísmicas, naturalmente superiores, devido ao desenvolvimento em altura destes edifícios.



Figura 2.2: Estrutura reticulada de um edifício industrial com três pisos [21]

Por último, os edifícios destinados à habitação e/ou escritórios são constituídos por vários pisos, havendo a necessidade de serem contraventados por paredes e núcleos resistentes, conforme está ilustrado na Figura 2.3.



Figura 2.3: Estrutura reticulada de vários pisos contraventada por núcleos de paredes resistentes [21]

### 2.1.1.2 Lajes de pavimento e de cobertura

A principal função das lajes de pavimento e de cobertura é resistir às acções verticais distribuindo-as pelos elementos estruturais, e conferir estabilidade lateral funcionando como um diafragma rígido ao transmitir as acções horizontais devidas ao vento e ao sismo aos elementos de suporte estrutural.



Figura 2.4: Exemplos de lajes pré-fabricadas, a) alveoladas, b) nervuradas em duplo T [25]

Na Figura 2.4 apresentam-se dois exemplos de lajes pré-fabricadas, sendo as mais comuns do tipo alveoladas ou nervuradas (em forma de T, duplo T e U). Por outro lado, as lajes mistas podem ser constituídas por perfis pré-esforçados (isolados ou combinados com elementos aligeirados) ou por pré-lajes, sendo depois cobertas por uma camada de betão aplicado in situ.

Os painéis de lajes alveoladas devem ser projectados de modo a resistir às acções de corte entre os painéis adjacentes e assim resistirem à aplicação de cargas concentradas sem sofrer deslocamentos diferenciais nas juntas longitudinais.

### 2.1.1.3 Sistemas de paredes resistentes

As paredes resistentes apresentam funções estruturais de suporte (de pavimentos, coberturas ou vigas) e de resistência às acções horizontais no seu plano. A sua implantação em planta pode ser transversal, longitudinal ou mista (Figura 2.5), sendo a última opção representativa do caso dos núcleos que constituem as caixas de escadas e de elevadores.

De um sistema de paredes resistentes podem fazer parte os seguintes elementos estruturais: paredes maciças pré-fabricadas (com ou sem aberturas para portas e janelas), paredes maciças mistas de betão pré-fabricado e betão moldado em obra, painéis sandwich, muros de suporte e paredes de caves.



Figura 2.5: Sistema estrutural de paredes resistentes [33]

### 2.1.1.4 Painéis de fachada

Os painéis de fachada desempenham várias funções, podendo destacar-se as seguintes:

- Funções estruturais - quando ligados aos restantes elementos da estrutura apresentam um comportamento idêntico ao das paredes resistentes;
- Funções estéticas - devido à existência de uma grande variedade de formas, texturas, cores e materiais de revestimento;
- Funções de isolamento acústico - atendendo ao princípio de quanto maior a massa de um material melhor isolamento acústico este confere, e também, através da colocação de materiais isolantes no interior das pranchas de betão constituindo os painéis sandwich;
- Funções de isolamento térmico - fazendo um revestimento exterior adequado ao painel, ou através da realização de um pano de parede interior separado do painel por uma caixa de ar e/ou por material isolante.

Como o próprio nome indica, os painéis de fachada são implementados nas fachadas dos edifícios, e por este motivo, normalmente são providos de aberturas para a incorporação de portas e janelas (Figura 2.6).



Figura 2.6: Exemplo de utilização de painéis de fachada (*Painéis Sandwich*) em edifícios com vários pisos [5]

### 2.1.1.5 Estruturas Celulares

As estruturas celulares podem ser compostas por elementos fechados ou abertos, conforme a função a desempenhar. Este tipo de estruturas são utilizadas em partes do edifício, em pequenas unidades independentes e que por algum motivo é mais vantajoso produzir em fábrica já dotadas de todos os acabamentos e equipamentos necessários ao seu desempenho. Os exemplos mais correntes destas estruturas são as casas-de-banho, cozinhas e garagens (Figura 2.7).



Figura 2.7: Estruturas celulares pré-fabricadas [21]

## 2.2 Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

As estruturas pré-fabricadas são compostas por elementos pré-fabricados de betão e pelas respectivas ligações. A resposta estrutural depende do comportamento e das características das ligações, que por sua vez, representam o maior desafio no dimensionamento duma estrutura pré-fabricada.

Segundo o Bulletin 43 da fib [6], uma ligação estrutural é constituída por vários elementos que interagem quando a ligação é solicitada, fazendo parte destes elementos o material que preenche as juntas (argamassa, grout, ou betão), as armaduras e as zonas que envolvem a ligação (Figura 2.8). Estas zonas devem ser dimensionadas de modo a transferir as forças provenientes da junta para o sistema estrutural principal.

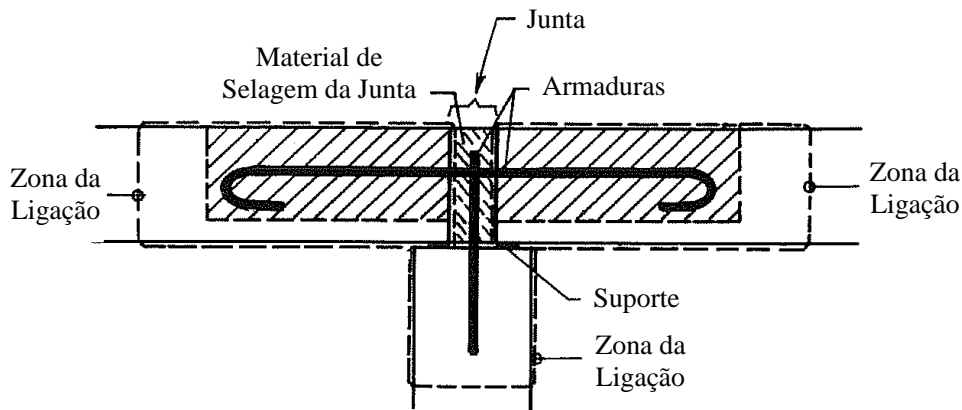


Figura 2.8: Componentes de uma ligação estrutural, adaptado de [6]

O dimensionamento das ligações deve ter em consideração, para além do fluxo de forças resultante do tipo de carregamento aplicado à estrutura, as combinações acidentais, as diferentes fases de construção da estrutura (manuseamento, transporte, armazenamento e montagem), a exposição ao fogo, a durabilidade e a acção sísmica no caso da estrutura estar inserida numa zona sísmica.

A classificação das ligações normalmente é feita pelo tipo de elementos a ligar ou pelos esforços predominantes a que deve resistir.

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

### 2.2.1 Tipos de ligações

O método mais utilizado para classificar o tipo de ligação baseia-se nos elementos a ligar. Desta forma, serão identificados alguns tipos de ligações para cada caso.

#### 2.2.1.1 Ligação Pilar - Fundação

As ligações entre estes elementos têm como função principal transmitir esforços do pilar à fundação, sejam eles de compressão ou a combinação destes com outros esforços.

O tipo de ligação pilar - fundação mais simples consiste no encaixe do pilar no maciço da fundação, estando este dotado de um pedestal saliente da sua face superior (Figura 2.9) ou contendo uma cavidade que permite o alojamento do pilar, ficando a junta selada com uma argamassa ou com grout.



a)



b)

Figura 2.9: Ligação pilar - fundação: a) pedestal saliente do bloco de fundação, b) encaixe do pilar no bloco auxiliado por cunhas [36]

Outra forma de efectuar esta ligação é através de chumbadouros devidamente embebidos na fundação com a extremidade saliente que posteriormente encaixam numa chapa metálica fixada na base do pilar, podendo esta ser maior que a da dimensão do pilar, como mostra a Figura 2.10.

Por último, a ligação do pilar à fundação pode ser executada através de armaduras de continuidade salientes de um dos elementos, fazendo a sua amarração ao outro elemento através de argamassa ou resina epóxidica. A Figura 2.11 ilustra este tipo de ligação. O elemento que vai embeber as armaduras dispõe de furos ou bainhas metálicas com superfícies rugosas concordantes com as armaduras para garantir uma melhor aderência.

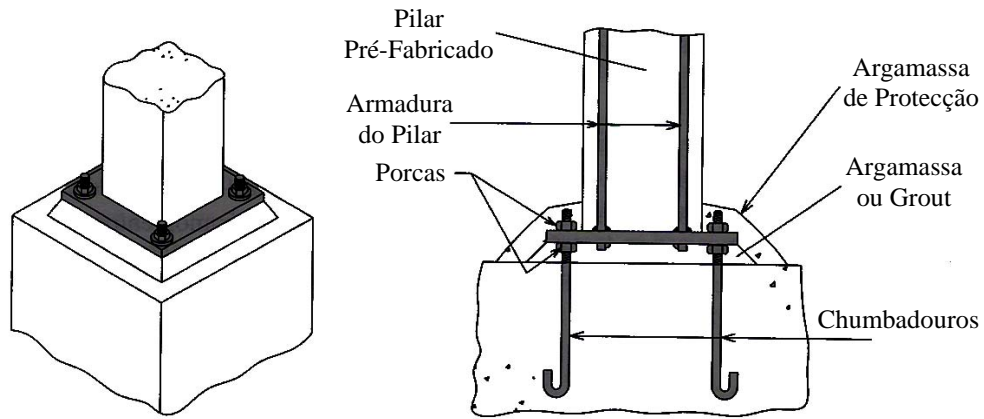


Figura 2.10: Ligação pilar - fundação com chumbadouros, adaptado de [7]

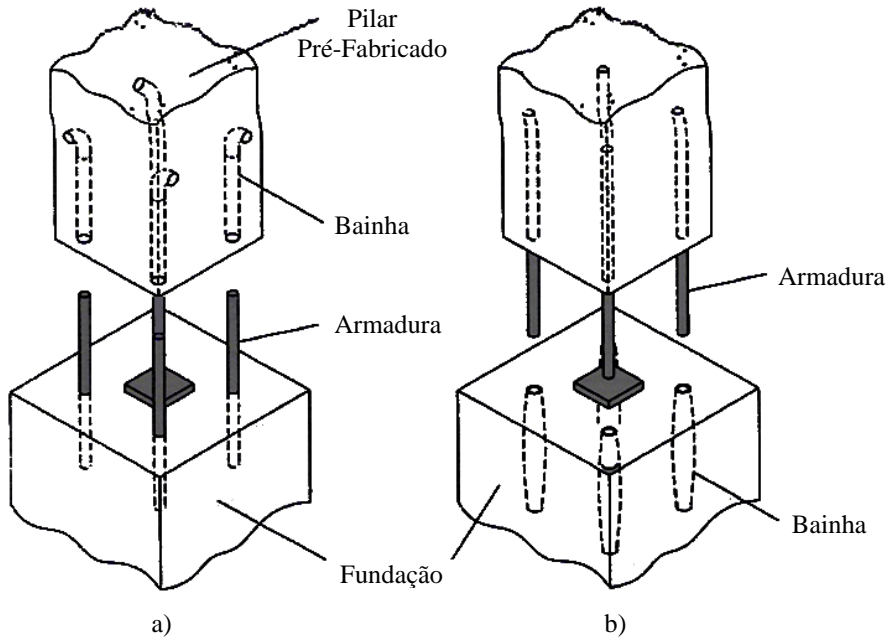


Figura 2.11: Ligação pilar - fundação com armadura saliente: a) da fundação, b) do pilar, adaptado de [7]

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

### 2.2.1.2 Ligação Viga - Pilar

A ligação entre vigas e pilares é a mais recorrente numa estrutura pré-fabricada reticulada, destinando-se a obter o efeito mais próximo possível da continuidade entre elementos. A ligação entre estes elementos engloba dois grupos distintos quanto ao seu comportamento estrutural em flexão: monolítica ou articulada.

O caso mais comum para esta ligação é o da viga apoiada numa consola curta saliente do pilar (Figura 2.12). De acordo com Silva [30] a viga deve estar apoiada numa base uniformizada de argamassa, ou assentar sobre um aparelho de apoio (em neoprene simples ou com chapas metálicas). Por vezes, a transmissão de forças horizontais está garantida apenas por atrito entre as superfícies de apoio, no entanto, é conveniente como medida de segurança, em especial em zonas sísmicas, complementar a ligação com um ferrolho vertical que atravessa a junta de ligação, impedindo assim, maiores deslocamentos horizontais da viga relativamente ao pilar.

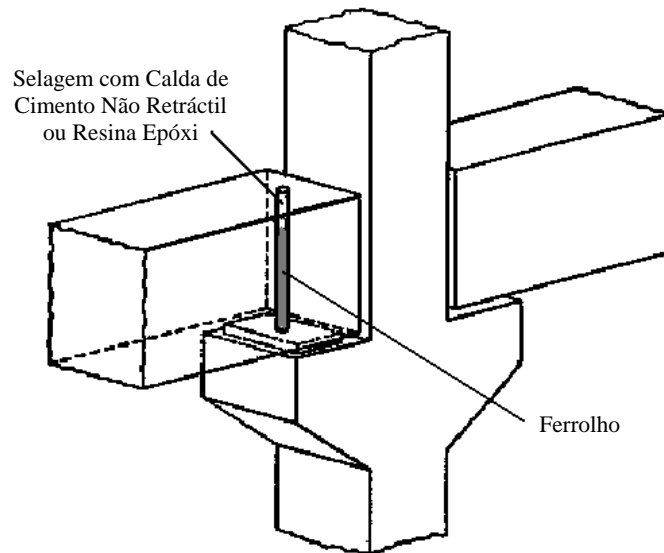


Figura 2.12: Ligação viga - pilar com a viga apoiada numa consola curta, adaptado de [30]

Outro modo de executar a ligação entre a viga e o pilar, obtendo uma ligação próxima do monolitismo, é através da utilização de vigas denteadas com armaduras salientes da viga, que são posteriormente complementadas com armaduras de continuidade e cujas juntas são posteriormente betonadas com betão moldado em obra, conforme esquematizado na Figura 2.13, utilizando-se para apoiar a viga consolas curtas provisórias ou definitivas. Para assegurar a aderência entre os betões, as faces dos elementos envolventes na ligação devem ser rugosas ou denteadas, obtendo assim um melhor comportamento ao corte da ligação.

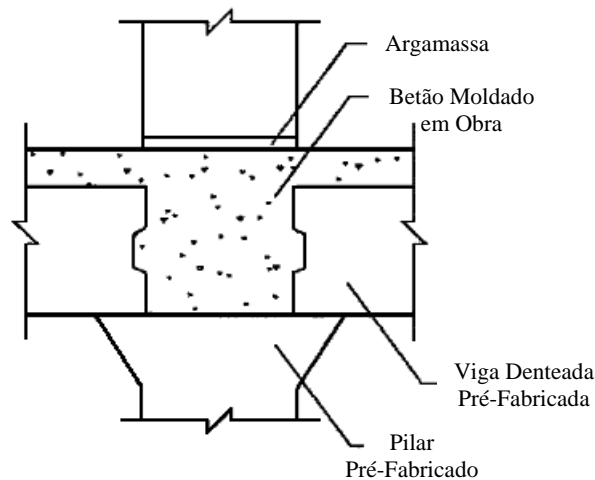


Figura 2.13: Ligação viga - pilar com betonagem da junta dos elementos, adaptado de [30]

A ligação entre a viga e o pilar também pode ser realizada através da utilização de elementos metálicos (varões, chapas, perfis de aço ou chumbadouros). Neste caso, os elementos pré-fabricados vêm providos de determinados elementos metálicos, e posteriormente em obra, a ligação é feita através da soldadura de um componente metálico que solidariza os elementos envolventes. Na Figura 2.14 a ligação apresentada é composta pela soldadura de uma cantoneira metálica às chapas previamente fixadas nas vigas e no pilar, e por perfis metálicos que servem de apoio à viga. Ou, por outro lado, a ligação pode ser executada recorrendo ao aparafusamento dos elementos metálicos envolventes na ligação, como se pode observar na Figura 2.15.

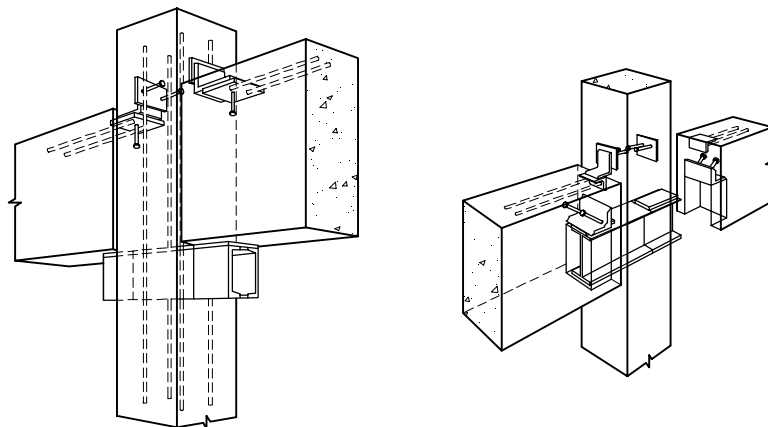


Figura 2.14: Ligação viga - pilar com cantoneira metálica soldada às chapas existentes [21]

A técnica do pré-esforço pode igualmente ser utilizada, como solução para a ligação entre vigas e pilar, sendo esta operação efectuada por pós-tensão. Os cabos de pré-esforço são previamente inseridos nas bainhas existentes nas vigas e no pilar, e após a aplicação do pré-esforço, selam-se as bainhas com calda de cimento e procede-se à betonagem das caixas de ancoragens existentes nas vigas. A Figura 2.16 exemplifica este tipo de ligação.

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

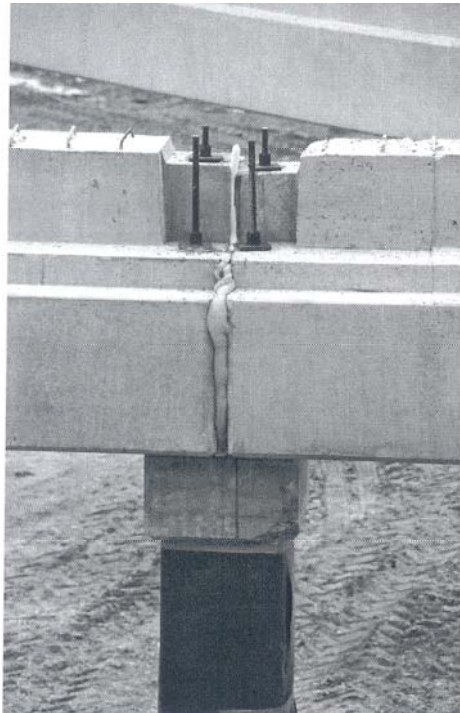


Figura 2.15: Ligação viga - pilar por aparafusamento [6]

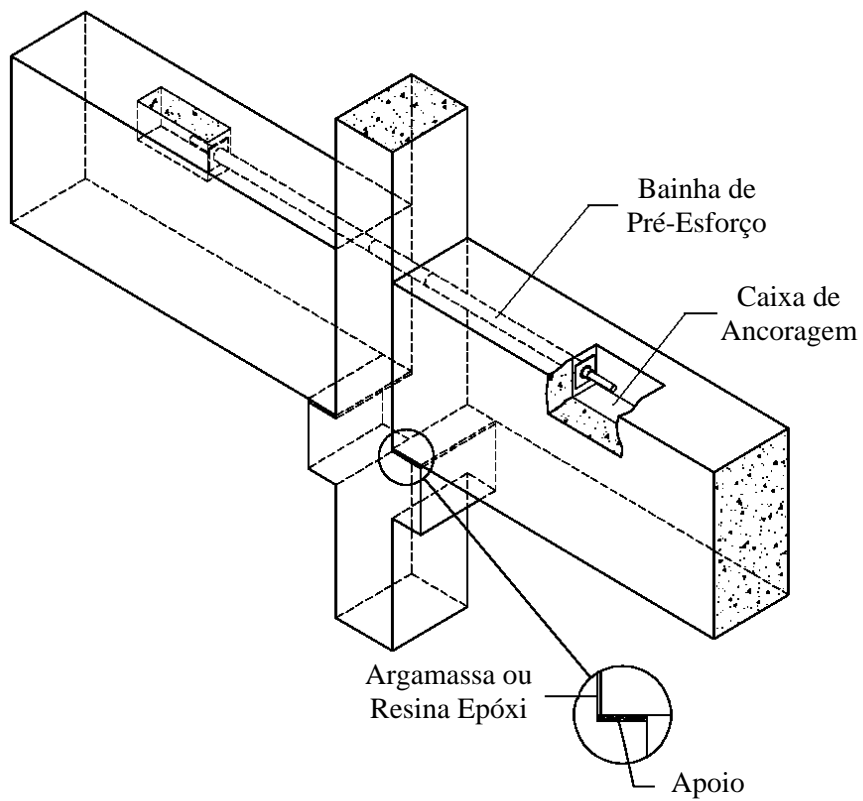


Figura 2.16: Ligação viga - pilar com pré-esforço, adaptado de [21]

### 2.2.1.3 Ligação Pilar - Pilar

As ligações entre pilares regem-se pelo mesmo princípio das ligações entre o pilar e a fundação, estando normalmente a ligação sujeita a esforços de flexão composta ou desviada.

Os tipos de ligação mais comuns entre dois pilares são com chumbadouros e as respectivas chapas metálicas, representada esquematicamente na Figura 2.17, ou através de armaduras de continuidade. A Figura 2.18 ilustra este último tipo de ligação com emenda de varões, no primeiro exemplo a emenda é efectuada através de uma bainha metálica selada com uma calda de cimento ou *grout* de alta resistência e no segundo exemplo a emenda faz-se por acoplamento dos varões.

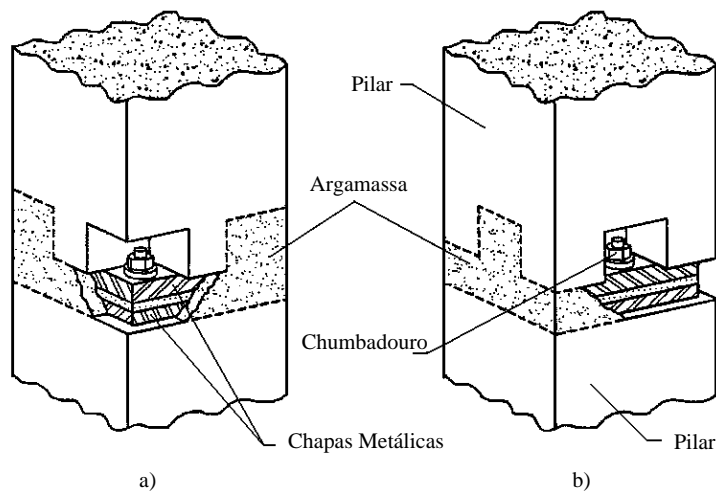


Figura 2.17: Ligação pilar - pilar com chumbadouros: a) aparafusados nos cantos do pilar, b) aparafusados no meio das faces do pilar (solução articulada), adaptado de [30]

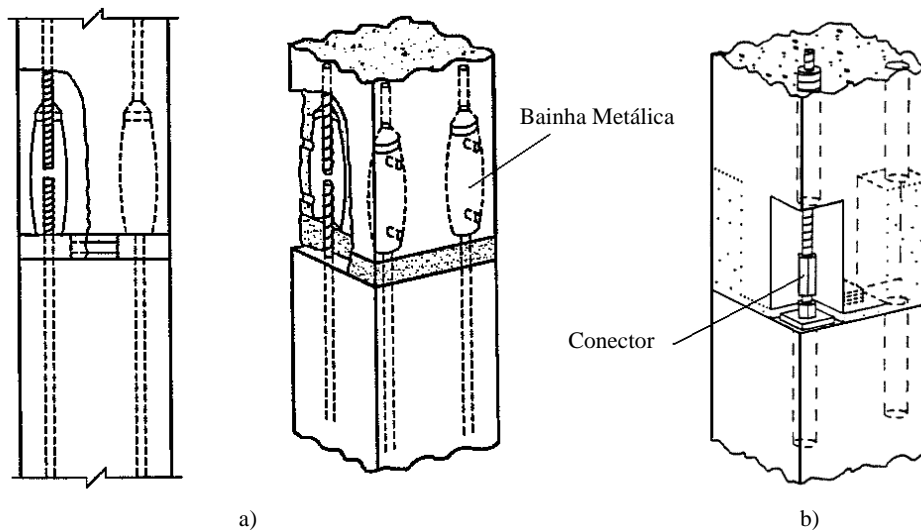


Figura 2.18: Ligação pilar - pilar com amarração por emenda: a) através de bainha metálica, b) através de um acoplador, a) adaptado de [30], b) adaptado de [6]

### 2.2.1.4 Ligação Viga - Viga

Este processo de ligação é muito idêntico ao das ligações entre vigas e pilares. Um aspecto desta ligação que importa salientar prende-se com a posição relativa das vigas, que podem estar localizadas no mesmo eixo (Figura 2.19 (a)) ou pode-se tratar do apoio de uma viga secundária numa viga do sistema principal (Figura 2.19 (b)). Normalmente, a ligação entre vigas coaxiais faz-se quando se pretende desviar a ligação de uma zona crítica (nó entre a viga e o pilar).

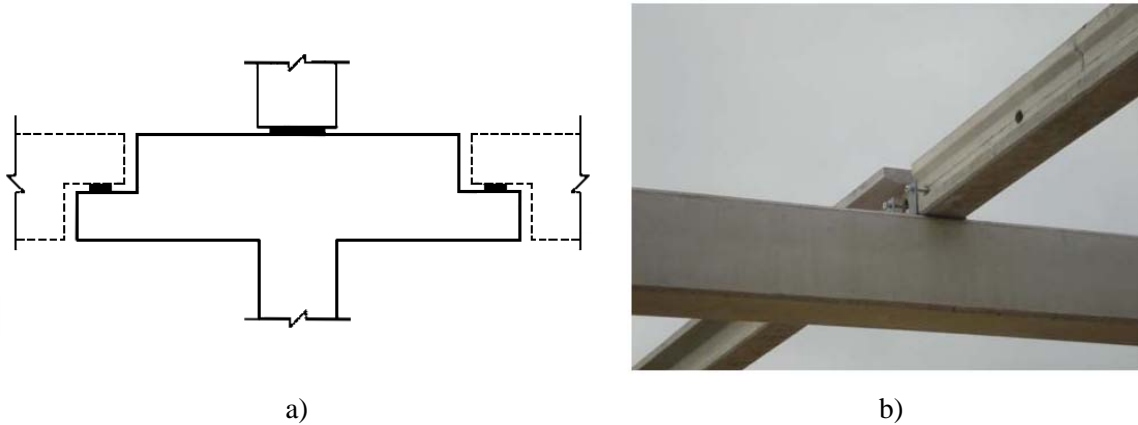


Figura 2.19: Ligação viga - viga (articulada): a) entre vigas coaxiais, b) viga secundária ligada por aparafusamento de peças metálicas à viga principal, a) [30], b) [26]

### 2.2.1.5 Ligação Laje - Viga

A ligação de uma laje pré-fabricada à viga depende do processo construtivo da laje. Para uma laje alveolada, a ligação à viga pode ser simplesmente apoiada, ficando a laje assente sobre uma camada de argamassa ou num aparelho de apoio de neoprene, à semelhança do que acontece na ligação de uma viga a uma consola curta de um pilar, como se pode ver na Figura 2.20.

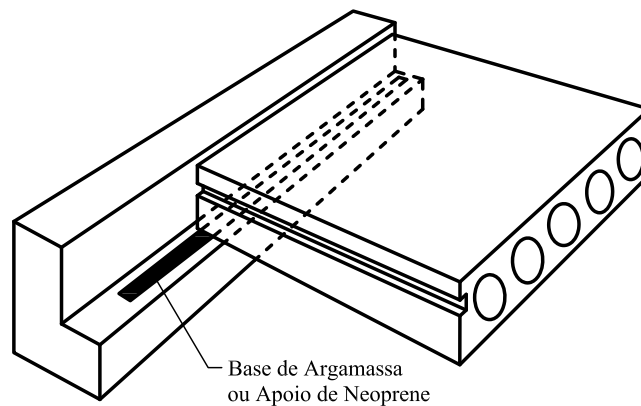


Figura 2.20: Ligação laje - viga simplesmente apoiada, adaptado de [6]

Outro método para ligar os elementos de laje alveolada a uma viga, esquematizado na Figura 2.21, consiste no seu apoio numa viga com armaduras salientes na sua face superior. Em obra, é colocada armadura paralela à direcção longitudinal dos elementos, procedendo-se depois à betonagem da junta da camada complementar de betão, que permitirá o funcionamento da laje como diafragma rígido.

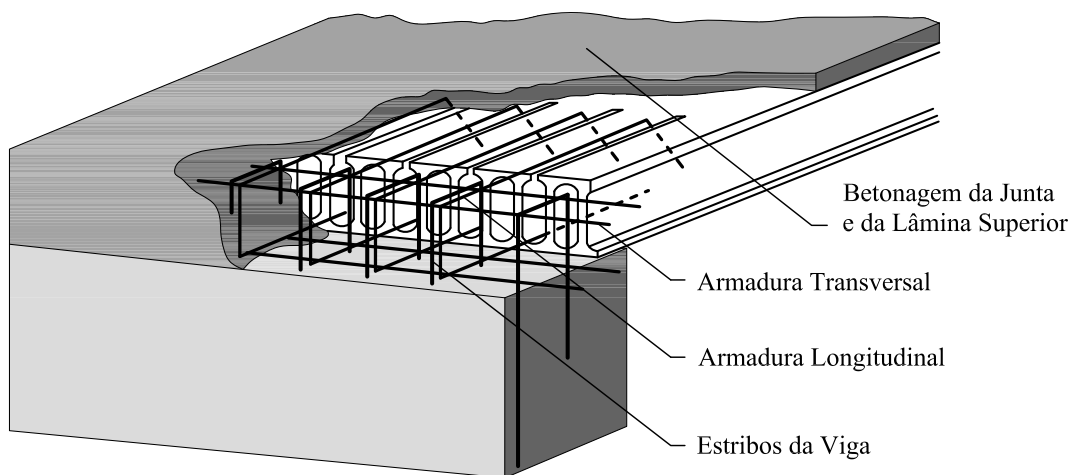


Figura 2.21: Ligação laje - viga com betonagem da zona superior, adaptado de [6]

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

### 2.2.1.6 Ligação Laje - Laje

A ligação lateral entre painéis de laje adjacentes é solicitada por esforços de corte. Para resistir a esta solicitação, as juntas longitudinais das lajes alveoladas devem apresentar uma superfície rugosa e/ou ser indentadas para conduzir a uma melhor aderência do agente de preenchimento (por exemplo, um *grout*) ao betão das lajes. É de uso corrente, incluir armadura nestas juntas longitudinais, como ilustra a Figura 2.22.

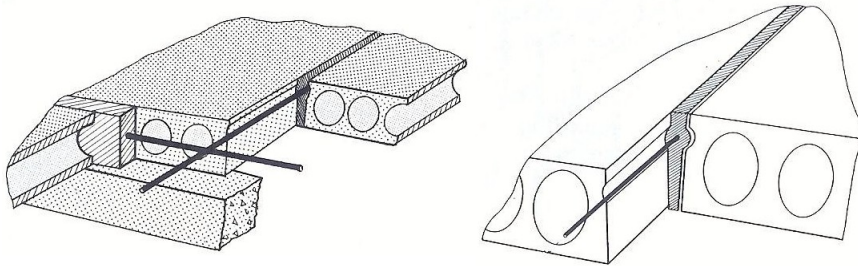


Figura 2.22: Ligação laje - laje com betonagem da junta longitudinal [6]

No caso da ligação entre painéis de lajes nervuradas, esta pode ser efectuada através de uma betonagem complementar na face superior do painel de laje onde se insere uma rede de armadura que solidariza os painéis entre si (Figura 2.23). Esta solução de ligação também pode ser utilizada em lajes alveoladas.

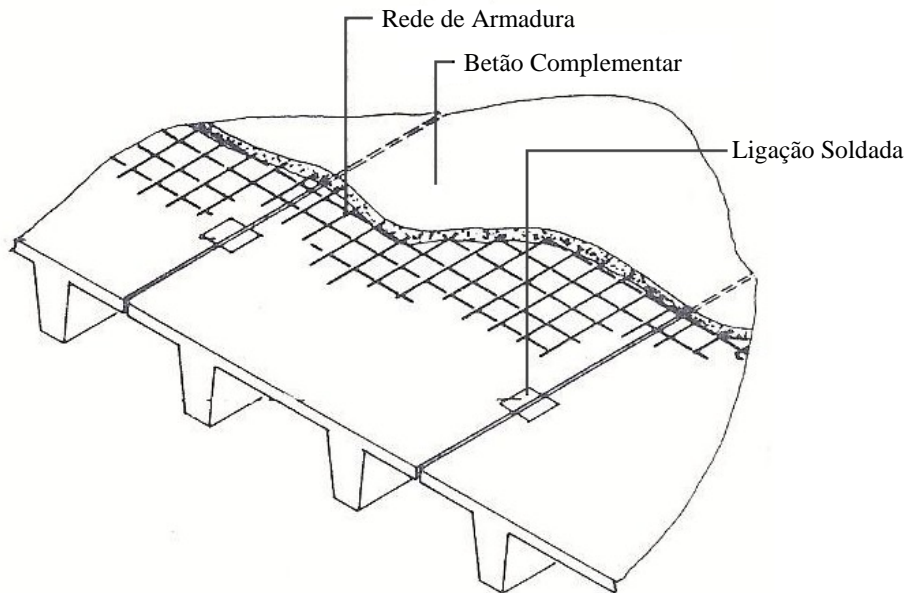


Figura 2.23: Ligação laje - laje por soldadura de chapas metálicas e posterior betonagem da lâmina superior, adaptado de [6]

### 2.2.1.7 Ligação Parede - Parede

As paredes são elementos que conferem uma grande rigidez à estrutura, sendo a sua principal função, para além da transmissão de cargas gravíticas, resistir às acções horizontais devidas ao vento e ao sismo.

Este tipo de ligação realiza-se em dois níveis distintos: nas juntas horizontais, que normalmente também envolvem a ligação aos pavimentos e nas juntas verticais, destinadas a ligar painéis adjacentes.

Uma das formas de ligar duas paredes ao nível da junta horizontal é utilizando armaduras de continuidade (Figura 2.24), cujo processo construtivo é semelhante ao da ligação pilar - fundação que já foi referido anteriormente. A Figura 2.25 esquematiza a ligação da junta horizontal de duas paredes, contando também com a ligação ao pavimento.



Figura 2.24: Pormenor de armaduras de continuidade salientes de uma parede [4]

Caso se pretenda a ligação na junta vertical entre paredes, pode optar-se por introduzir armadura horizontal nas faces das paredes envolventes na ligação, de acordo com os esforços a que deve resistir, e posteriormente, em obra, introduzir a armadura vertical e fazer a betonagem da junta, estabelecendo assim, a continuidade entre estes elementos. A Figura 2.26 ilustra este tipo de ligação.

Por último, a ligação entre este tipo de elementos, quer na junta horizontal ou na vertical, pode ser obtida através de soldadura ou aparafusamento de elementos metálicos fixos previamente às paredes.

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

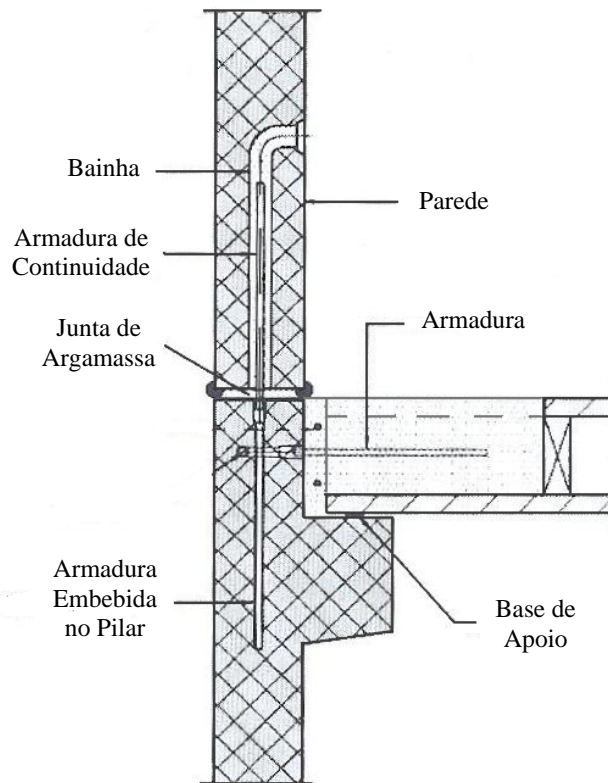


Figura 2.25: Ligação parede - parede - laje com armaduras de continuidade, adaptado de [6]

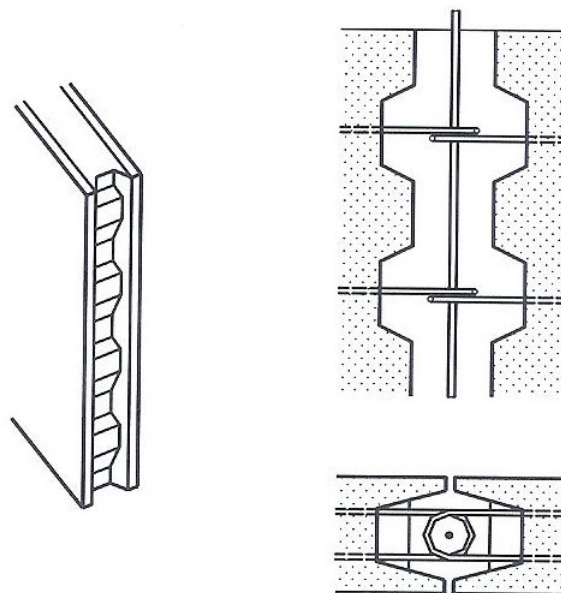


Figura 2.26: Ligação parede - parede com betonagem da junta vertical [6]

### 2.2.1.8 Ligação dos painéis de fachada à estrutura

Conforme a função a desempenhar no edifício, os painéis de fachada podem exercer funções não resistentes ou resistentes, e ser compostos por apenas um pano ou por dois panos (painéis sandwich).

Habitualmente as ligações são posicionadas nos cantos dos painéis (permitindo uma melhor acessibilidade e melhor distribuição do binário de forças), aplicando-se a denominação de painel pendurado quando as ligações de gravidade estão no topo e as ligações de contraventamento estão na base, e painel apoiado no caso das ligações de gravidade se encontrarem na base e as ligações de contraventamento no topo (Figura 2.27). Em regiões com sismicidade considerável, os painéis devem ser pendurados de forma a evitar a sua queda caso as ligações de contraventamento falhem devido à acção sísmica.

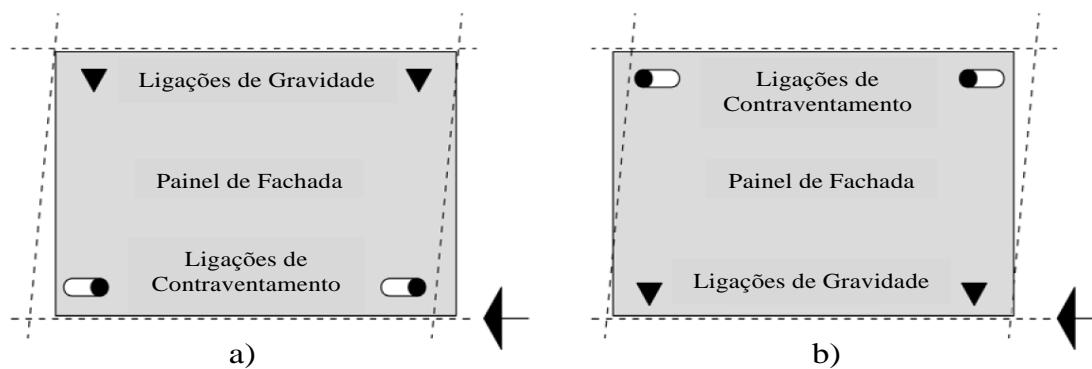


Figura 2.27: Localização das ligações num: a) painel pendurado, b) painel apoiado, adaptado de [11]

Os painéis de fachada não resistentes servem normalmente para revestir a estrutura, distinguindo-se duas formas para o seu suporte: assegurado pela estrutura ou os próprios painéis a desempenhar essa função. No primeiro caso, o peso dos painéis é suportado através da sua ligação aos pilares, vigas de bordadura ou lajes da estrutura. A ligação dos painéis à estrutura pode ser efectuada por betonagem, por exemplo, quando o painel possui uma consola curta que apoia na viga de bordadura, complementado por armaduras salientes da consola e armaduras longitudinais dispostas em obra e posterior betonagem até à zona superior da viga simultaneamente com a betonagem da laje, ficando a ligação a possuir um maior monolitismo (Figura 2.28).

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão



Figura 2.28: Ligação painel de fachada - laje por betonagem [34]

Outro tipo de ligação possível é através da soldadura ou aparafusamento de uma cantoneira metálica a chapas fixadas ao painel e ao outro elemento a ligar, havendo inúmeras variantes deste tipo de ligação, função da geometria do painel e dos próprios elementos metálicos que compõem a ligação. A Figura 2.29 (a) ilustra uma ligação em que o painel possui uma consola curta e está ligado à viga de bordadura através da soldadura de uma cantoneira e a Figura 2.29 (b) ilustra a ligação através do aparafusamento de uma cantoneira directamente aos elementos a ligar, respectivamente.

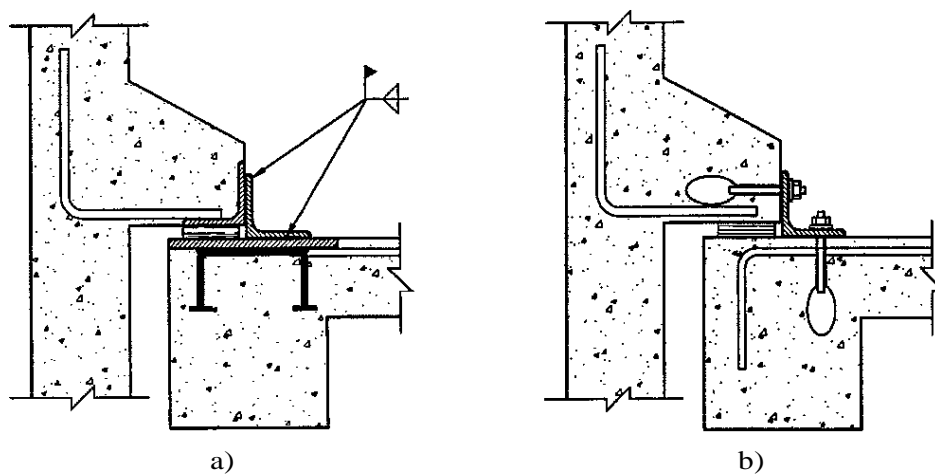


Figura 2.29: Ligação painel de fachada - viga: a) com soldadura, b) com aparafusamento [30]

## Capítulo 2. Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

---

Existem várias marcas no mercado a comercializar dispositivos que permitem a ligação do painel pré-fabricado à estrutura, sendo estes dispositivos constituídos maioritariamente por elementos metálicos (como por exemplo, chapas e/ou cantoneiras) e aparafusamento. A Figura 2.30 exemplifica alguns destes tipos de ligação.

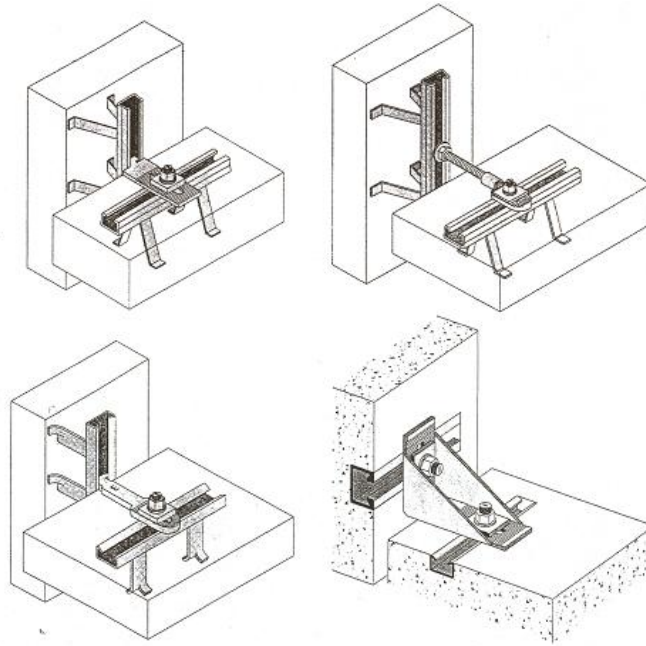


Figura 2.30: Exemplos de ligações comerciais aparafusadas [27]

Para o caso da ligação na junta vertical do painel com o pilar ou entre painéis existe no mercado uma solução denominada *PHILIPP Power Box System* [37], tratando-se de uma caixa em chapa de aço galvanizado com 2 laços integrados (Figura 2.31), aplicada em número suficiente e com um determinado afastamento ao longo de cada face a ligar. Depois da sobreposição dos laços coloca-se um varão de reforço no meio deles, como se ilustra na Figura 2.32, e faz-se a betonagem com uma argamassa especificada pelo fornecedor.

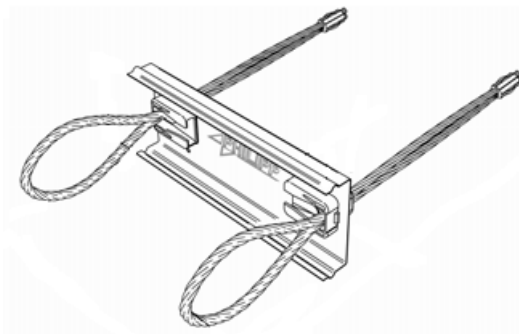


Figura 2.31: PHILIPP Power Box [37]

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

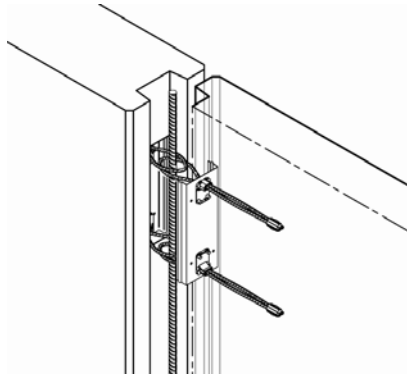


Figura 2.32: Secção transversal do PHILIPP Power Box System [37]

No caso em que os painéis suportam o seu peso próprio, as ligações são semelhantes às ligações na junta horizontal das paredes abordadas anteriormente (Figuras 2.28 e 2.29), simplesmente contactando com a estrutura através de uma ligação aos elementos horizontais, como se pode ver na Figura 2.33 e na Figura 2.34.

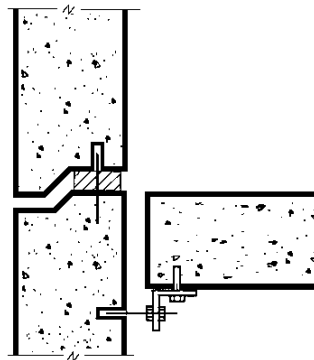


Figura 2.33: Ligação entre painéis de fachada e sua ligação à laje, adaptado de [35]

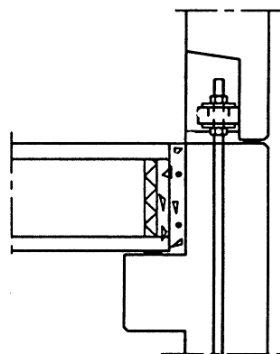


Figura 2.34: Ligação entre painéis de fachada através de aparafusamento e ligação à laje [33]

## Capítulo 2. Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

A rotura das ligações dos painéis de fachada à estrutura não compromete a sua resistência global, embora quando mal dimensionadas possam causar danos graves, pois são elementos de dimensões consideráveis que normalmente estão posicionados a diferentes alturas.

Os painéis de fachada resistentes normalmente suportam as cargas verticais provenientes dos pavimentos e dos painéis superiores e contribuem para a estabilidade horizontal do edifício. Os painéis sandwich são um exemplo típico deste tipo de painéis, sendo constituídos por dois panos de betão (por vezes, o pano exterior pode ser de outro material) e uma camada de isolamento entre eles. É o pano interior que realiza a função estrutural (painel com comportamento não compósito), podendo actuar independentemente do pano exterior ou estar solidarizado com este, formando um elemento único através de mecanismos que permitam a total transferência dos esforços de corte entre os dois panos (painéis com comportamento compósito). De acordo com o PCI, no seu documento sobre *Sandwich Wall Panels* [20], estes mecanismos também servem para transmitir o peso do pano não estrutural (exterior) ao painel estrutural, e podem ser rígidos apenas numa direcção ou em duas direcções perpendiculares. A Figura 2.35 exemplifica um mecanismo de transferência do esforço de corte numa direcção, que também pode ser obtido através de outras formas dadas a varões de aço (Figura 2.36). A Figura 2.37 mostra dois mecanismos de transferência do esforço de corte, comercializados pela empresa HALFEN, numa direcção e em direcções perpendiculares, respectivamente.

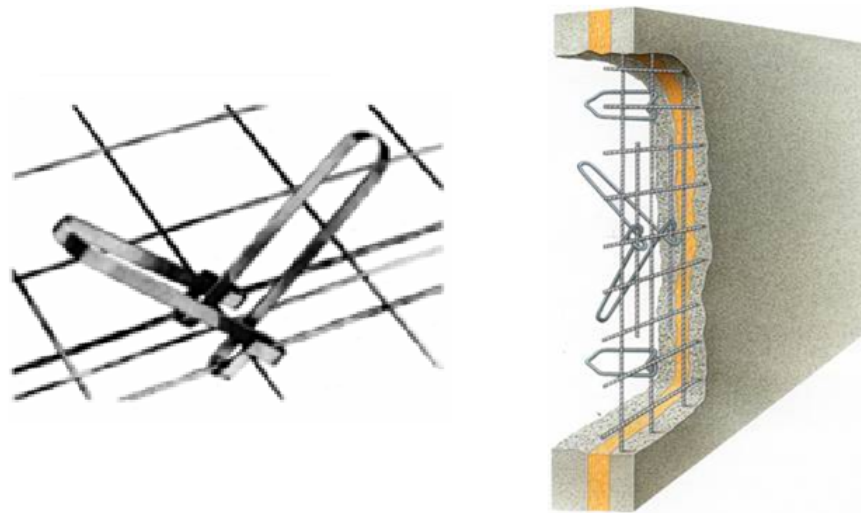


Figura 2.35: Ligações ao corte numa direcção [34]

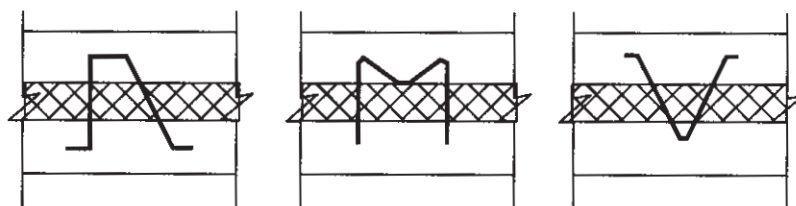


Figura 2.36: Vários tipos de mecanismos para ligações ao corte numa direcção [20]

## 2.2. Ligações estruturais entre elementos pré-fabricados de betão

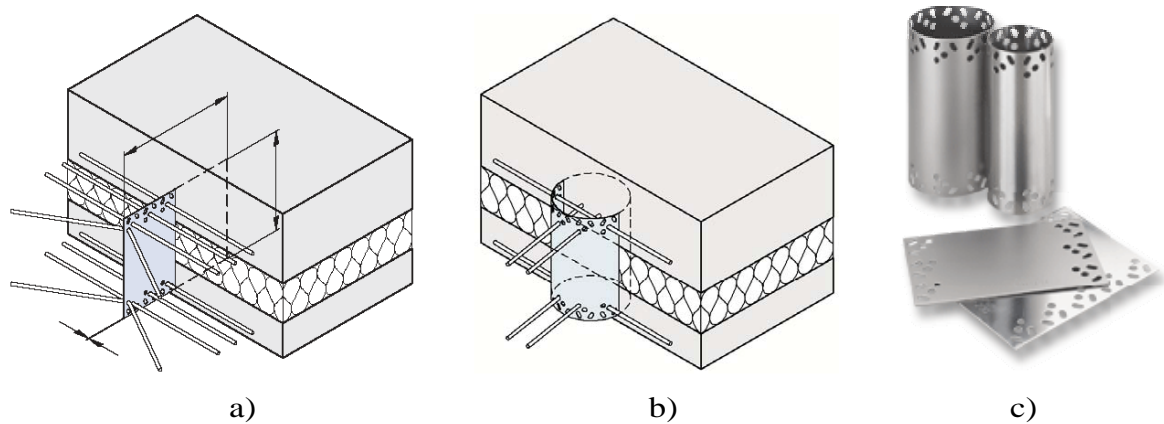


Figura 2.37: Mecanismos para ligações ao corte: a) numa direcção, b) em duas direcções perpendiculares, c) produtos comercializados pela empresa HALFEN [9]

A ligação dos painéis sandwich à estrutura realiza-se através dos mesmos métodos referidos anteriormente, isto é, por sobreposição de armadura (Figura 2.38) ou por soldadura (Figura 2.39 e Figura 2.40) ou aparafusamento de cantoneiras a elementos metálicos fixados nos elementos intervenientes na ligação.

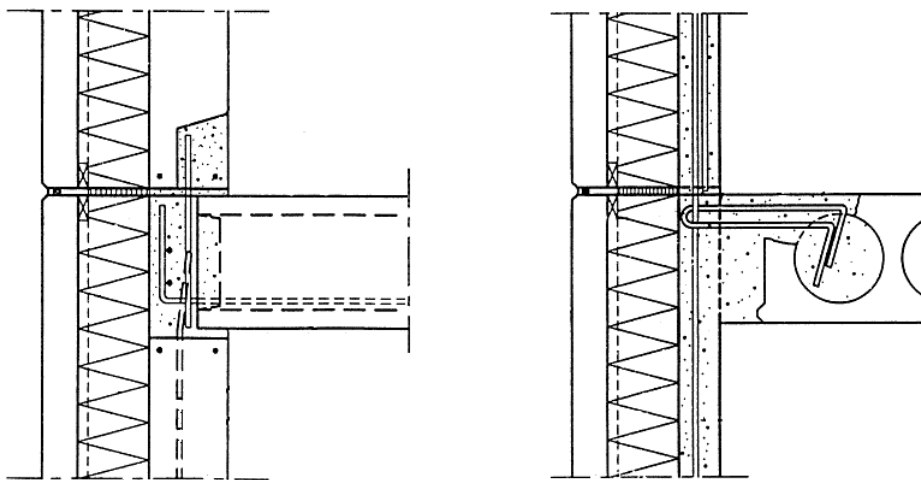


Figura 2.38: Ligação painéis sandwich - laje por sobreposição de armadura, adaptado de [31]

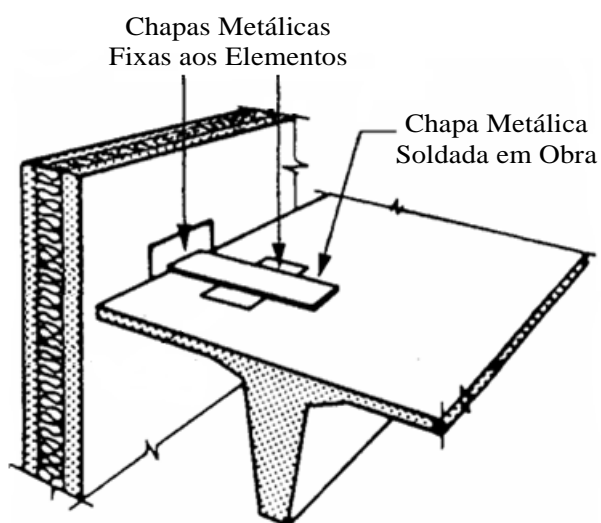


Figura 2.39: Ligação painel sandwich - laje nervurada em T por soldadura, adaptado de [32]

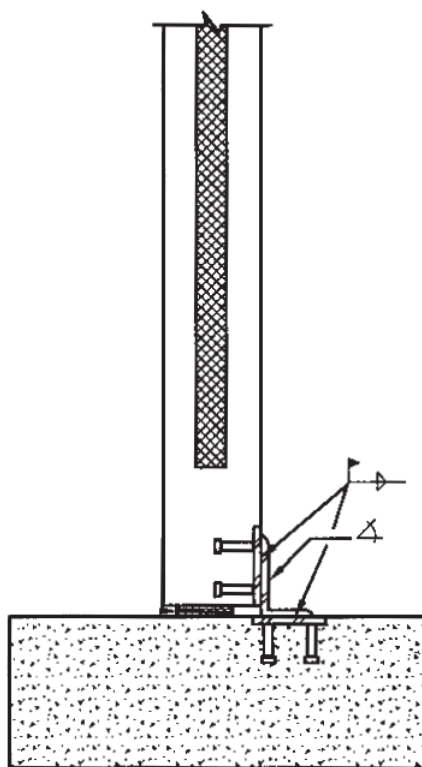


Figura 2.40: Ligação painel sandwich - fundação por soldadura, adaptado de [20]

### 2.3 Ligações dissipativas em painéis pré-fabricados

Em zonas sísmicas, as estruturas pré-fabricadas têm que ser dimensionadas para resistir às acções sísmicas, bem como as suas ligações. Para este efeito, a ligação deve ser robusta e apresentar um comportamento dúctil.

A ductilidade de uma ligação confere a capacidade de uma estrutura atingir grandes deslocamentos sem colapsar, e auxilia a dissipação de energia permitindo uma maior amplitude de ciclos de deformação.

No levantamento do tipo de ligações existentes realizado anteriormente foram dados exemplos para ligações entre vários elementos, mas no estudo que se segue apenas se vai abordar as ligações dissipativas entre os elementos da estrutura e painéis pré-fabricados para utilização em fachada ou para utilização como paredes resistentes. Durante a ocorrência de um sismo, no primeiro caso os dispositivos são essencialmente mobilizados pelos deslocamentos relativos entre pisos, enquanto no segundo caso os dispositivos apresentados são essencialmente mobilizados por corte entre as extremidades laterais dos painéis. Em ambos os casos e independentemente de como são mobilizados os dispositivos, os mesmos respondem por flexão ou corte.

De acordo com Goodno e Craig [8], durante um sismo, as ligações entre os painéis de fachada e a estrutura estão simultaneamente sujeitos a três efeitos primários: forças de inércia geradas pela aceleração do painel, transmitidas do painel à estrutura através de forças de corte na sua ligação; deslocamento horizontal entre pisos, resultando em forças de corte horizontais nas ligações; e o peso próprio dos painéis suportado pelas ligações dimensionadas para desempenhar essa função.

Segundo Pinelli(1995) [22], durante a ocorrência de sismos a inexistência de interacção entre os elementos estruturais e os painéis de fachada tem conduzido à sua queda. A rotura destes elementos com a estrutura representa um elevado risco para a vida humana, e custos substanciais na reconstrução do edifício. Para contrariar esta tendência, promove-se a interacção entre estes elementos, o que é vantajoso visto que, os elementos não estruturais actuam como ligações entre diferentes membros estruturais, que por sua vez, têm deslocamentos diferentes quando ocorre um sismo, desencadeando dissipação de energia nestas ligações induzida pelos deslocamentos das diferentes partes da estrutura. Seguindo esta filosofia, os elementos não estruturais podem ser responsáveis por dissipar a maior parte da energia absorvida pela estrutura devido ao sismo, protegendo a estrutura principal da plastificação.

As ligações entre os painéis de fachada e a estrutura estão sujeitas às forças de corte geradas pelos deslocamentos relativos entre pisos. Convencionalmente, tentava-se combater este efeito ao isolar o painel da estrutura principal utilizando ligações flexíveis, mas estudos experimentais provam que mesmo desta forma, os painéis interagem significativamente com a estrutura.

## Capítulo 2. Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

A solução desenvolvida por Pinelli(1995) [22] consiste num sistema com propriedades de ductilidade e amortecimento elevadas, composto por três componentes principais como se ilustra na Figura 2.41: o ponto de inserção no painel, o dispositivo de ligação (Figura 2.42), e o ponto de inserção na estrutura. Dos elementos que compõem a ligação, apenas o dispositivo da ligação deve entrar em cedência, de forma a servir os seguintes propósitos: produzir a dissipação de energia necessária e proteger os pontos de inserção na estrutura, limitando a carga que é transmitida através da ligação. A solução avançada de ligação que Pinelli(1996) [23] desenvolveu, ilustrada na Figura 2.43, consiste no dispositivo de ligação referido anteriormente aparafusado ao painel e à estrutura de suporte. Esta ligação é composta por duas partes: uma flexível, constituída pelo dispositivo de ligação e uma parte rígida, que pode ser um perfil metálico quadrangular ou outro dispositivo equivalente. A parte rígida actua como uma restrição à rotação que evita a encurvadura lateral do dispositivo de ligação.

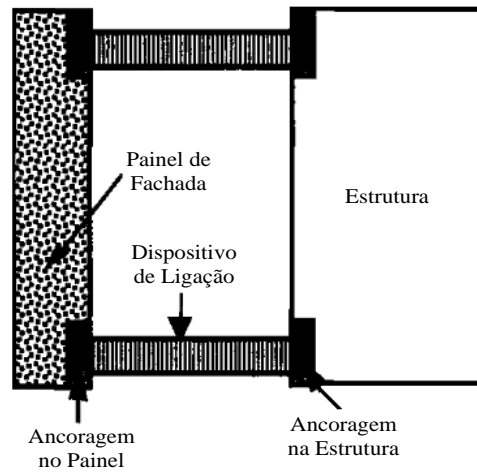


Figura 2.41: Sistema da ligação, adaptado de [22]

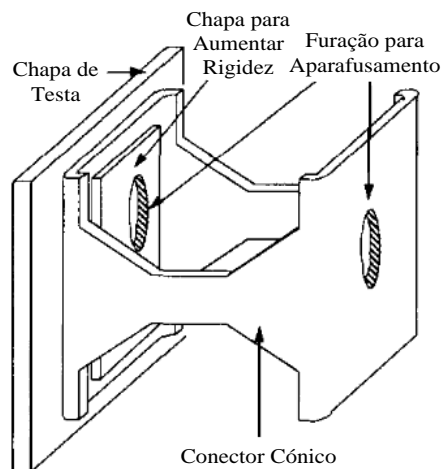


Figura 2.42: Dispositivo de ligação, adaptado de [22]

### 2.3. Ligações dissipativas em painéis pré-fabricados

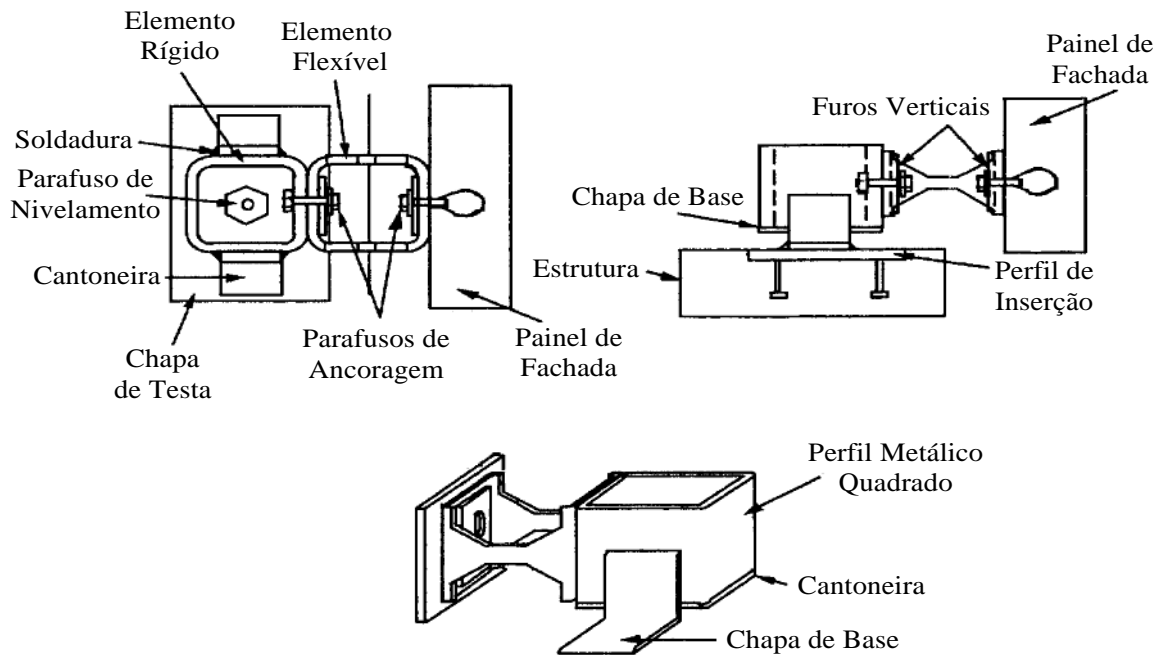


Figura 2.43: Pormenores do aparafusamento da solução avançada de ligação, adaptado de [23]

Do Programa PRESSS (*Precast Seismic Structural Systems*) faz parte um estudo desenvolvido na Universidade de Nebraska-Lincoln que pretendeu analisar o comportamento de um edifício de escritórios pré-fabricado de seis pisos sujeito a uma sismicidade moderada (Schultz [29]). Neste estudo, as ligações na junta vertical entre painéis pré-fabricados são desenvolvidas com o intuito de melhorar o comportamento dos painéis pré-fabricados através da dissipação de energia nas ligações.

Neste programa experimental são estudadas seis tipos de ligações para a junta vertical entre painéis pré-fabricados, que se dividem em dois grupos. O primeiro grupo inclui as ligações que são apenas soldadas, enquanto o segundo grupo engloba as ligações aparafusadas e a combinação de aparafusamento e soldadura.

Em todas as ligações o dispositivo de conexão (chapa metálica) é considerado o elo mais fraco, enquanto as soldaduras, os parafusos e as chapas embebidas no painel são dimensionados para resistir aos esforços a que a ligação está sujeita sem entrar em cedência ou rotura. Cada chapa embebida no painel contém quatro varões normais à sua face interior (que não são visíveis nas Figuras 2.44 a 2.49) dimensionados para resistir à força vertical associada ao dispositivo de ligação, e dois varões (visíveis nas Figuras 2.44 a 2.49) dispostos de modo a que a componente horizontal da sua força resista à torção gerada pela força vertical máxima na ligação.

Os três tipos apresentados de ligações soldadas partilham a mesma espessura de chapa de ligação, variando na sua forma e/ou orientação.

## Capítulo 2. Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

Na primeira ligação soldada - *Notched Shear Plate* (Figura 2.44)- a chapa de ligação possui entalhes de modo a promover a resistência ao corte aquando da cedência. A forma mais alargada das extremidades da chapa impede a utilização de cordões de soldadura suficientemente largos para que a resistência da soldadura seja superior à da chapa.

Na segunda ligação soldada - *Slotted Flexure Plate* (Figura 2.45)- a chapa de ligação é formada por três barras que possuem duas aberturas entre elas, de modo a fomentar a resistência à flexão da própria chapa aquando a cedência.

A terceira ligação soldada - *Inclined Flat Bar* (Figura 2.46)- é uma tentativa para que a chapa de ligação resista axialmente, daí ter sido rodada de modo a fazer um ângulo de  $20^\circ$  com a junta vertical.

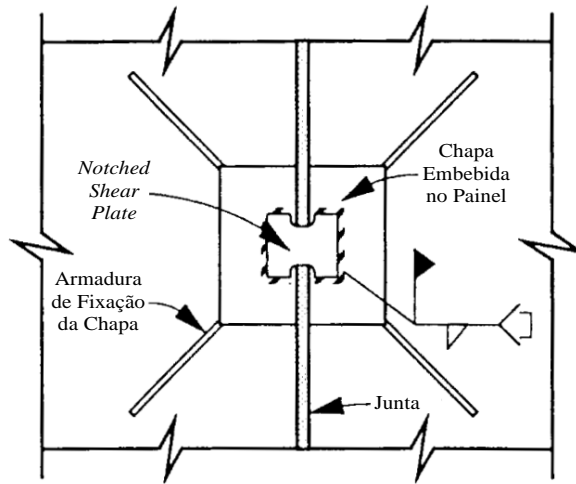


Figura 2.44: *Notched Shear Plate*, adaptado de [29]

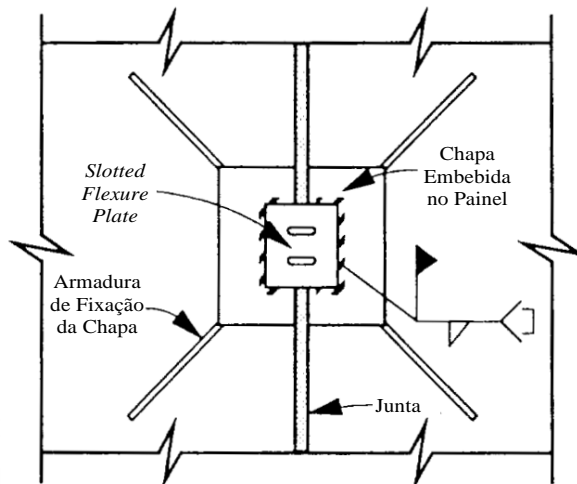


Figura 2.45: *Slotted Flexure Plate*, adaptado de [29]

### 2.3. Ligações dissipativas em painéis pré-fabricados

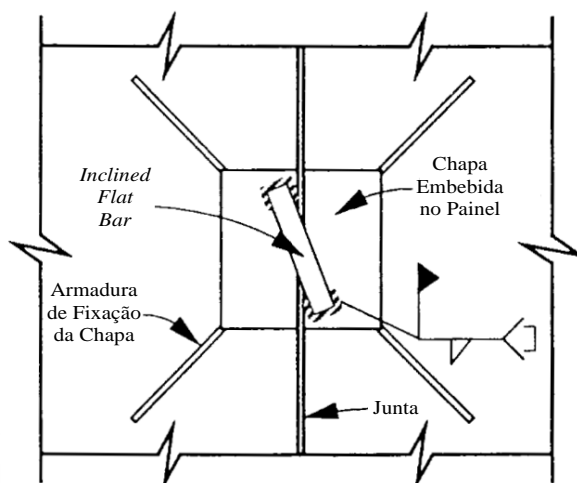


Figura 2.46: *Inclined Flat Bar*, adaptado de [29]

Do segundo grupo de ligações, a primeira ligação - *Pinned Tension Strut* - encontra-se pormenorizada na Figura 2.47 e consiste numa tentativa de melhorar a ligação representada na Figura 2.46 através do aparafusamento das extremidades da chapa, permitindo assim, eliminar os potenciais esforços de flexão induzidos na chapa durante o carregamento. O dispositivo de ligação é constituído por três chapas, das quais duas são aparafusadas às chapas embebidas no painel e a terceira chapa, dotada de dois entalhes, é soldada às chapas aparafusadas.

A segunda ligação deste grupo - *Brass Friction Device* - esquematizada na Figura 2.48 fornece uma resposta através da mobilização do atrito entre as chapas da ligação, ao longo de vários ciclos de carga. O elemento chave desta ligação são duas chapas de uma liga de cobre e zinco de 3mm de espessura, estando uma delas posicionada entre as chapas embebidas nos painéis e a chapa furada (que, por sua vez, se encontra soldada a uma das chapas embebidas no painel) e a outra encontra-se entre a chapa furada e a chapa de topo (que está aparafusada às outras chapas). Portanto, esta ligação é realizada num dos painéis através da soldadura à chapa embebida e no outro painel através de aparafusamento à chapa embebida, permitindo a dissipação de energia através da fricção dos elementos constituintes da ligação.

A terceira ligação do grupo das ligações aparafusadas - *U-Shaped Flexure Plate* (Figura 2.49)- consiste num dispositivo de dissipação de energia desenvolvido por Kelly [10]. A resistência e a dissipação histerética de energia deste dispositivo têm origem na deformação do mesmo por flexão da barra em forma de U.

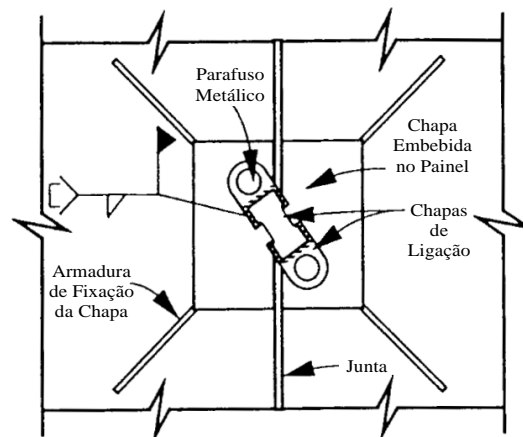


Figura 2.47: *Pinned Tension Strut*, adaptado de [29]

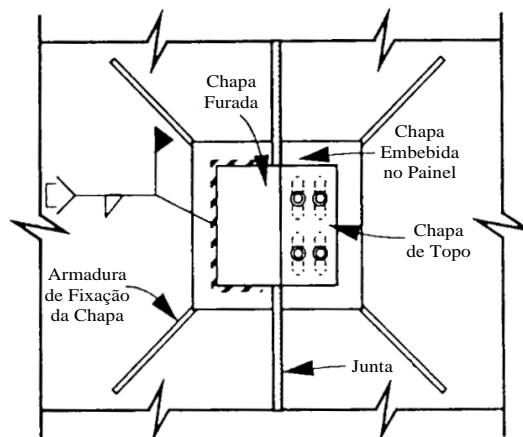


Figura 2.48: *Brass Friction Device*, adaptado de [29]

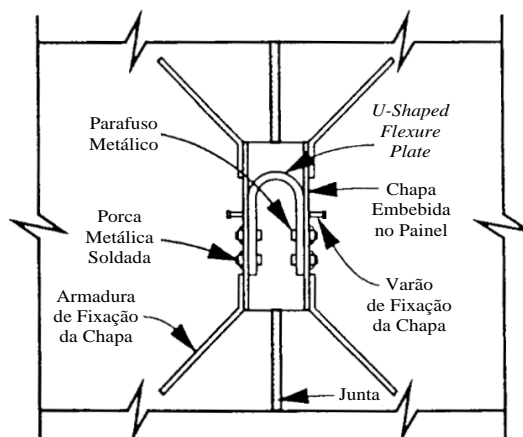


Figura 2.49: *U-Shaped Flexure Plate*, adaptado de [29]

### 2.3. Ligações dissipativas em painéis pré-fabricados

Concluiu-se neste estudo, elaborado por Schultz [29], que os dispositivos das Figuras 2.44 e 2.45 são adequados para uma união sólida entre painéis de parede, passando a comportarem-se como uma unidade monolítica. Os dispositivos das Figuras 2.48 e 2.49 são mais adequados quando se requer capacidade de dissipar energia, e quando são também solicitadas boas condições para uma eventual reparação do dispositivo.

Pampanin [18] desenvolveu um sistema híbrido de dissipação de energia baseado no dispositivo em forma de U representado na Figura 2.49. Este sistema, apresentado na Figura 2.50, é composto por pré-esforço longitudinal aplicado nos painéis e ligações nas juntas verticais através da conjugação de dois dispositivos em forma de U (Figura 2.51), que permitem dissipar energia.

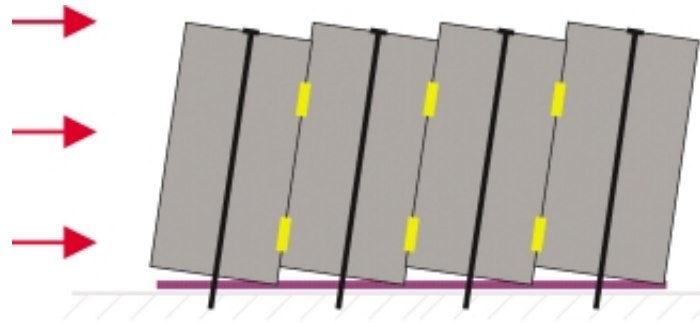


Figura 2.50: Sistema híbrido [19]

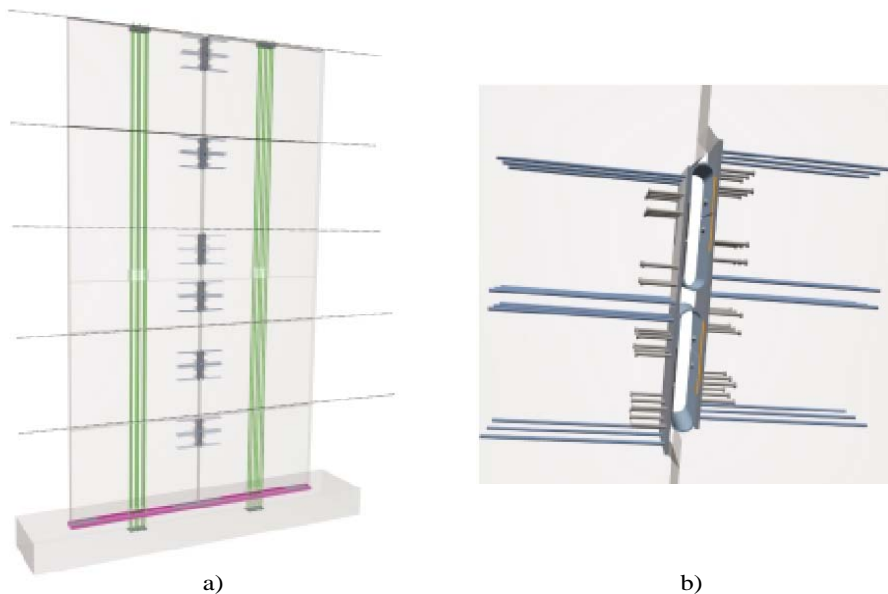


Figura 2.51: a) Esquema do sistema de ligação dos painéis, b) Pormenor do dispositivo de ligação em forma de U [19]

## Capítulo 2. Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

---

Dentro do mesmo segmento da ligação soldada furada apresentada por Schultz [29] na Figura 2.44, Crisafulli e Restrepo [1] propõe uma ligação para a junta longitudinal de painéis pré-fabricados composta por uma chapa rectangular em aço com um furo circular concêntrico soldada às chapas de ancoragem incorporadas nos painéis (Figura 2.52). Esta chapa é dimensionada como o elemento mais fraco do sistema de ligação de forma a dar lugar à dissipação de energia.

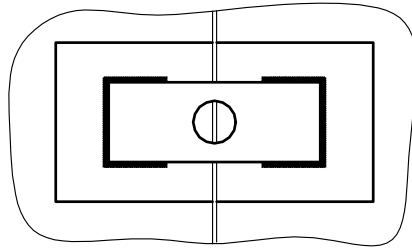


Figura 2.52: Chapa furada soldada proposta para a ligação [1]

Depois de ensaiar a ligação em ciclos de forças de corte, concluiu-se que para além de ser um dispositivo muito simples de fabricar, apresenta uma excelente capacidade de deformação devido à sua ductilidade, sem redução significativa de rigidez. As deformações plásticas ficam concentradas na zona do furo - no centro da chapa, como se pode ver na Figura 2.53, portanto não se verificam danos nas extremidades da chapa nem nas soldaduras.

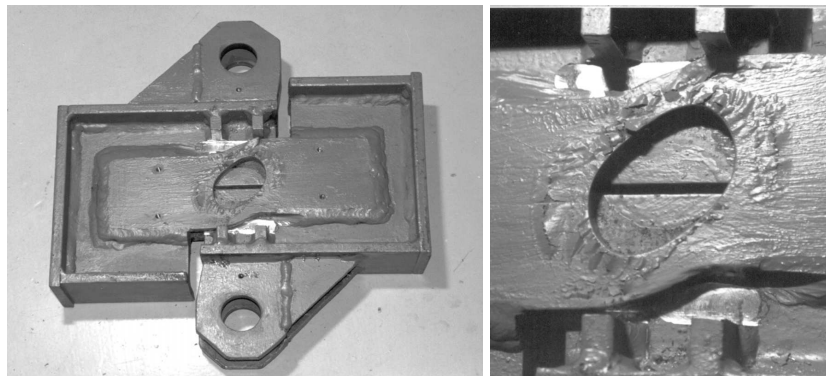


Figura 2.53: Chapa de ligação depois dos ensaios [1]

## 2.4. Regulamentação para estruturas pré-fabricadas resistentes a acções sísmicas

### 2.4 Regulamentação para estruturas pré-fabricadas resistentes a acções sísmicas

As estruturas pré-fabricadas são cada vez mais utilizadas em zonas de elevada sismicidade em todo o mundo, pois têm mostrado um comportamento adequado, desde que no seu dimensionamento seja tido em conta os princípios a que uma estrutura solicitada por acções horizontais devidas ao sismo deve obedecer.

Para o bom desempenho das estruturas em geral e das ligações pré-fabricadas em particular, é fundamental que as estruturas e as suas ligações sejam bem projectadas e executadas de acordo com o projecto e regulamentação em vigor no país.

Até ao início da segunda década do século XXI, em Portugal, a regulamentação aplicável às estruturas pré-fabricadas consistia no Regulamento de Segurança e Acções [2] que define as acções a aplicar à estrutura (inclusive a acção sísmica), e no Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado [3] que não contempla especificamente as estruturas pré-fabricadas de betão armado.

A partir de 2010, o dimensionamento dos elementos de betão que constituem as estruturas pré-fabricadas passou a ser regulado pelo Eurocódigo 2 [15], mais especificamente a sua secção 10, que fornece as regras adicionais necessárias ao dimensionamento deste tipo de estruturas e das respectivas ligações.

Relativamente ao dimensionamento de estruturas resistentes às acções sísmicas, o Eurocódigo 8 [16] constitui uma base de orientação, mais conservativa que o RSA [2], apresentando na secção 5.11 regras específicas para estruturas pré-fabricadas em betão.

O EC8 [16] estabelece um coeficiente de comportamento para as estruturas pré-fabricadas igual ao das estruturas moldadas no local caso as ligações se localizem fora das zonas críticas, ou se esta condição não se verificar, as ligações estejam sobredimensionadas ou capazes de dissipar a mesma energia que uma ligação monolítica de igual resistência. Nos restantes tipos de ligações, o coeficiente de comportamento deverá ser reduzido para metade do coeficiente apresentado para as estruturas moldadas no local.

## Capítulo 2. Ligações em estruturas pré-fabricadas de betão

---

Com o objectivo de reduzir os danos durante a acção sísmica, o EC8 [16] propõe uma limitação do deslocamento entre pisos, que consiste:

- a) para os edifícios com elementos não estruturais constituídos por materiais frágeis fixos à estrutura:

$$d_r \nu \leq 0,005 h \quad (2.1)$$

- b) para os edifícios com elementos não estruturais dúcteis:

$$d_r \nu \leq 0,0075 h \quad (2.2)$$

- c) para os edifícios com elementos não estruturais fixos de forma a não interferir com as deformações estruturais ou sem elementos não estruturais:

$$d_r \nu \leq 0,010 h \quad (2.3)$$

Em que:

$d_r$  - valor de cálculo do deslocamento entre pisos;

$h$  - altura entre pisos;

$\nu$  - coeficiente de redução que tem em conta o mais baixo período de retorno da acção sísmica associada ao requisito de limitação de danos.

## Capítulo 3

# Programa experimental

### 3.1 Introdução

O objectivo do trabalho desenvolvido nesta dissertação é o estudo do comportamento de um dispositivo mecânico capaz de efectuar a ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural e que tenha capacidade de dissipar energia. Os dispositivos elaborados para este estudo basearam-se no dispositivo em forma de U desenvolvido por Kelly [10]. O dispositivo desenvolvido permite dissipar energia através da deformação da barra por flexão, com as devidas adaptações relativas ao tipo de elementos a ligar, alterando a sua configuração geométrica em forma de U de circular a rectangular, e variando as dimensões da barra de aço com que os dispositivos foram fabricados.

Para o desenvolvimento desse estudo recorreu-se a dois sistemas de ensaio distintos. No primeiro sistema de ensaio pretendeu-se simular a ligação do painel de fachada ao elemento estrutural de forma mais aproximada do real, isto é, com todos os elementos que compõe esta ligação presentes - painel de fachada, pilar, dispositivo de ligação. O segundo sistema de ensaio debruçou-se apenas sobre o dispositivo mecânico de ligação, sendo ensaiado apenas este elemento.

No primeiro sistema de ensaio realizaram-se três ensaios, variando do primeiro para o segundo a geometria dos dispositivos mecânicos de ligação, e no terceiro alteraram-se a geometria e dimensões do dispositivo e também o tipo de transdutor de deslocamentos. No segundo sistema de ensaio efectuaram-se cinco ensaios, variando apenas as dimensões dos dispositivos. No primeiro ensaio experimental utilizou-se um conjunto de dois dispositivos de 50mm de largura por 10mm de espessura, no segundo e terceiro ensaios utilizaram-se, em cada um, um conjunto de dois dispositivos de 70mm de largura por 10mm de espessura e no quarto e quinto ensaios foram utilizados, em cada ensaio, um conjunto de dois dispositivos de 50mm de largura por 15mm de espessura.

O conjunto de ensaios da ligação entre o painel de fachada e o pilar foram realizados no Laboratório de Estruturas (LabDEC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa e o grupo de ensaios do dispositivo mecânico teve lugar no Laboratório de Estruturas e Construção da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do IPS.

## Capítulo 3. Programa experimental

Neste capítulo apresentam-se, separadamente para cada tipo de ensaio experimental, todos os componentes envolvidos na sua realização, começando pela caracterização da geometria dos elementos utilizados no ensaio, seguidos da descrição do sistema de ensaio e da instrumentação utilizada. Por fim, caracterizam-se os materiais utilizados nos dois tipos de ensaio, sem diferenciação entre eles, dado que os modelos dos dispositivos em aço foram utilizados em ambos os ensaios.

### 3.2 Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

#### 3.2.1 Geometria

Para a realização deste ensaio foram pré-fabricados dois painéis em betão - painéis de fachada - e um bloco de betão - pilar. Nos painéis de fachada foram aplicados oito perfis de inserção JXA W 38/23 - 150 da marca Jordahl, em aço e em conjuntos de dois, posicionados de acordo com a Figura 3.1. Também foram deixados os moldes para os painéis ficarem com quatro furos ovalizados a meio de cada extremidade. A pormenorização das armaduras dos painéis de fachada encontra-se na Figura A.1 do Anexo A, juntamente com uma fotografia ilustrativa da pormenorização - Figura A.2.

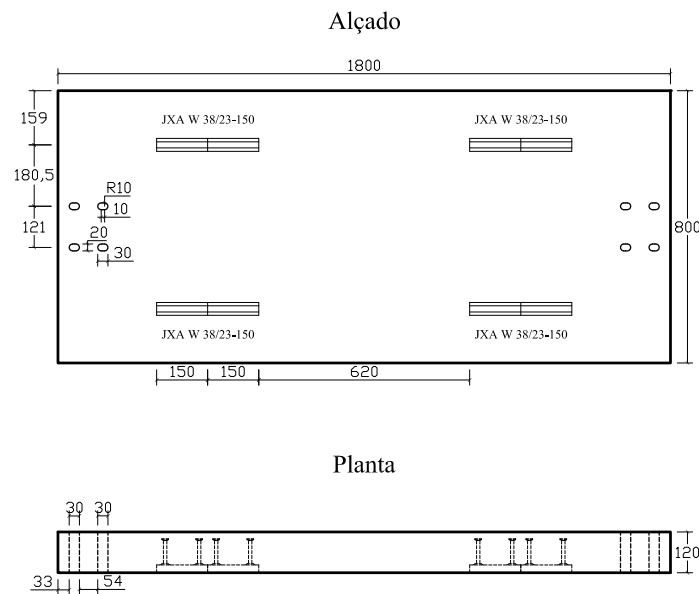


Figura 3.1: Dimensões dos painéis de fachada (mm)

No bloco de betão ficou embutida uma estrutura tubular de aço constituída por três tubos circulares, um tubo de 100 mm de diâmetro posicionado verticalmente e dois tubos de 30 mm de diâmetro posicionados horizontalmente. Foram aplicados oito perfis de inserção JTA W 50/30 - 250 em aço, da marca Jordahl, dois na parte superior de cada face vertical do bloco de betão, como está ilustrado na Figura 3.2. Na Figura A.3 do Anexo A encontra-se esquematizada a pormenorização das armaduras do bloco de betão, e a Figura A.4 mostra as armaduras presentes no bloco antes da betonagem.

### 3.2. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

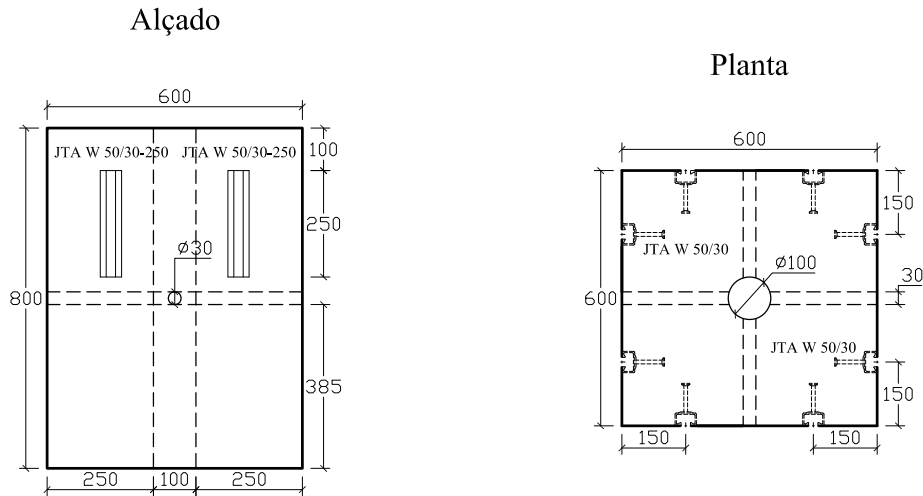


Figura 3.2: Dimensões do bloco de betão (mm)

Em cada ensaio experimental realizado utilizou-se um conjunto de dois dispositivos mecânicos de ligação. Para designar cada conjunto de dispositivos atribuiu-se a letra D referente aos dispositivos, seguida da letra C quando os dispositivos apresentam uma configuração circular ou da letra R quando os dispositivos têm uma configuração rectangular. Os números que aparecem depois das letras dizem respeito às dimensões da barra de aço utilizada para fabricar o dispositivo - largura x espessura em mm. No caso de haver dois conjuntos de dispositivos iguais, a distinção é feita através da presença do número 1 ou 2 à frente da designação referida.

O primeiro conjunto de dispositivos ensaiado foi o DC 50x5 (Figura 3.3), produzidos a partir de uma barra de aço S235 com 50 mm de largura por 5 mm de espessura. Cada dispositivo apresenta uma configuração circular e dois furos para permitir a sua fixação ao pilar (abertura com 14 mm de diâmetro para o parafuso JB M 12) e ao painel (abertura com 18 mm de diâmetro para o parafuso JXH M 16).

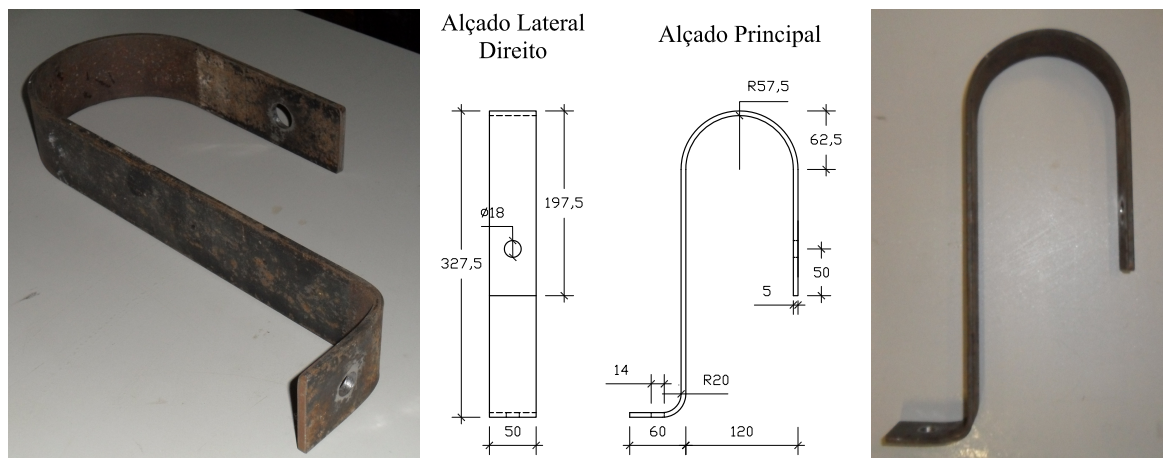


Figura 3.3: Vistas e dimensões do dispositivo DC 50x5 (mm)

### Capítulo 3. Programa experimental

De seguida ensaiou-se o conjunto de dispositivos DR 50x5 (Figura 3.4), executados a partir de uma barra de aço S235 com 50 mm de largura por 5 mm de espessura. Cada dispositivo apresenta uma configuração quadrangular e dois furos para permitir a sua fixação ao pilar (abertura com 14 mm de diâmetro para o parafuso JB M 12) e ao painel (abertura com 18 mm de diâmetro para o parafuso JXH M 16).

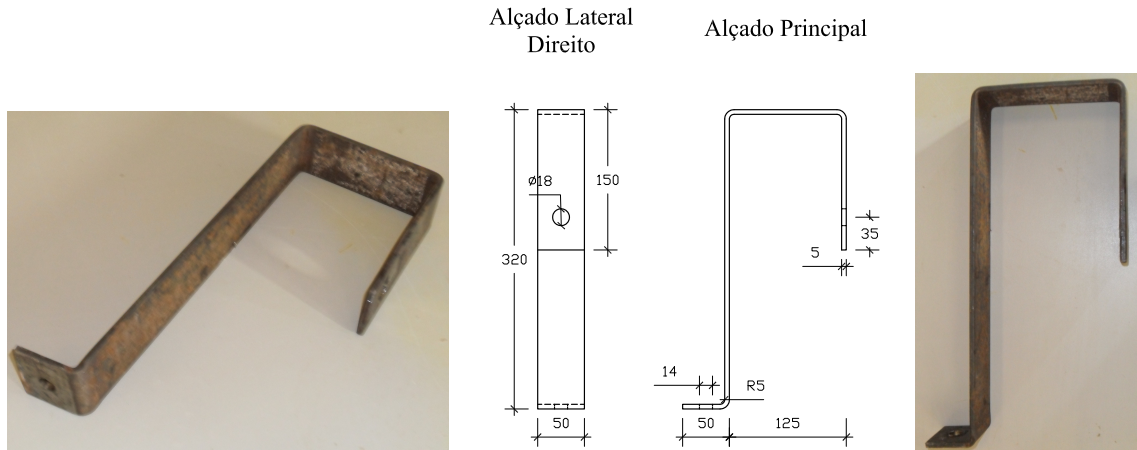


Figura 3.4: Vistas e dimensões do dispositivo DR 50x5 (mm)

No último ensaio realizado neste sistema de ensaio utilizou-se um conjunto de dispositivos DR 50x10-1 (Figura 3.5), produzidos a partir de uma barra de aço S275 com 50 mm de largura por 10 mm de espessura. Cada dispositivo apresenta uma configuração quadrangular e dois furos para permitir a sua fixação ao pilar (abertura com 18 mm de diâmetro para o parafuso JB M 16) e ao painel (abertura com 18 mm de diâmetro para o parafuso JXH M 16).

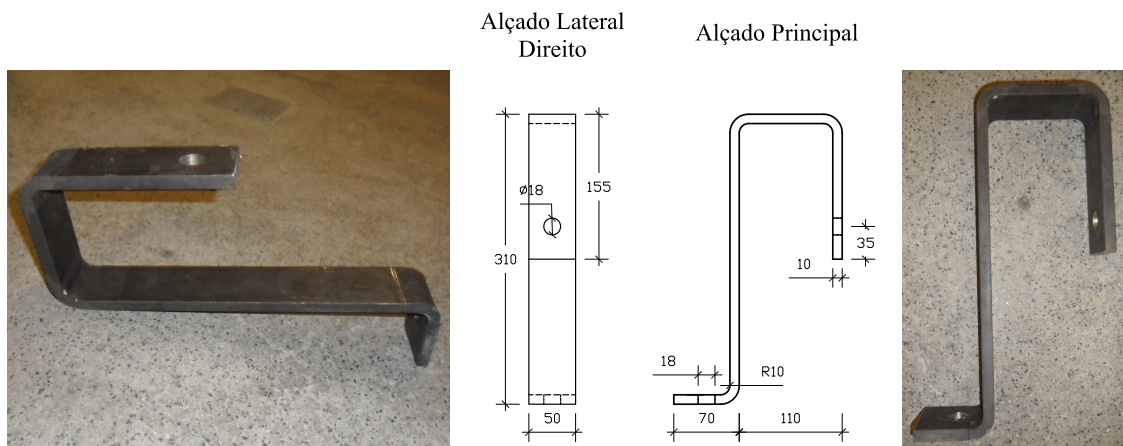


Figura 3.5: Vistas e dimensões do dispositivo DR 50x10-1 (mm)

## 3.2. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

### 3.2.2 Sistema de Ensaio

Com o sistema de ensaio concebido, pretendeu-se simular o tipo de deslocamentos horizontais no plano do painel de fachada a que este fica sujeito durante a acção do sismo. Mais especificamente, o *drift* ou deslocamento horizontal máximo entre os pisos da estrutura. Os painéis de fachada, colocados normalmente entre dois elementos estruturais (por exemplo: pilares), aquando da ocorrência de um sismo têm dificuldade em acompanhar o movimento destes elementos, as ligações podem ceder ou mesmo colapsar e levar ao colapso do painel, originando danos materiais e humanos consideráveis. Neste sistema de ensaio pretende-se testar o comportamento de um elemento de ligação específico - os dispositivos atrás referidos, através da imposição de deslocamentos horizontais aos painéis de fachada, mas mantendo o pilar fixo, representando desta forma o deslocamento horizontal relativo que ocorre entre os elementos estruturais.

#### Preparação do ensaio

Começa-se por fixar o bloco de betão à laje do laboratório para que este não se movesse. Esta fixação foi executada através de um varão Dywidag roscado de 26 mm de diâmetro que foi inserido num orifício central existente no meio do bloco, o qual foi posteriormente tensionado (Figura 3.6) com uma força de 150 kN, através de um cilindro hidráulico perfurado (Enerpac RRH 307).



Figura 3.6: Aplicação do pré-esforço no varão do bloco de betão

Por uma questão de simetria do ensaio foram utilizados dois painéis de fachada ligados através de dois perfis metálicos, um em cada extremidade, fixados aos painéis através de varões roscados de 16 mm de diâmetro (Figura 3.7). Estes perfis serviram para solidarizar os painéis, fazendo com que os deslocamentos impostos fossem iguais em ambos os painéis. Através do auxílio de uma chapa de aço furada, os perfis metálicos serviam igualmente de batente ao êmbolo do cilindro horizontal, apresentando rigidez suficiente para resistir à força exercida pelo êmbolo do cilindro hidráulico sem deformações aparentes.



Figura 3.7: Perfis metálicos a ligar os dois painéis de fachada

Para minimizar o atrito entre a base dos painéis de fachada e o pavimento do laboratório optou-se por aplicar dois conjuntos de dois rolamentos na base de cada painel (Figura 3.8).



Figura 3.8: Sistema de rolamentos aplicados na base dos painéis

### Sistema de ensaio

O principal objectivo desta estrutura do ensaio é conseguir que os painéis se desloquem apenas numa direcção - horizontal, mas nos dois sentidos. Para isso colocou-se um varão roscado de 26 mm de diâmetro a atravessar horizontalmente o bloco de betão, tendo como principal função suportar dois cilindros hidráulicos perfurados (Enerpac RRH 307), um de cada lado do bloco, que são accionados por uma bomba hidráulica (Enerpac GPEW 2020 WSN). A Figura 3.9 mostra o esquema de ensaio, antes da montagem das células de carga.

### 3.2. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

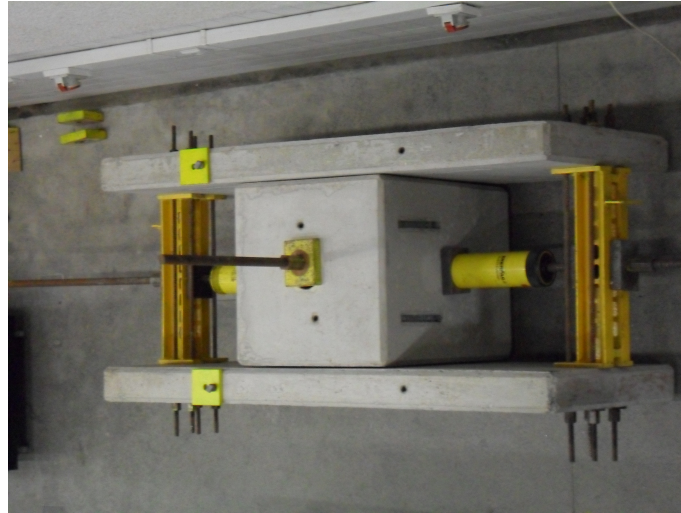


Figura 3.9: Esquema de ensaio visto de cima

O funcionamento dos cilindros é independente, isto é, quando se quer aplicar um deslocamento com o sentido da esquerda para a direita é accionado o cilindro 2 e da direita para a esquerda acciona-se o cilindro 1. O êmbolo do cilindro accionado ao bater na chapa do perfil metálico começa a exercer pressão, provocando um deslocamento horizontal nesse perfil e consequentemente nos painéis a ele ligados.

Na parte exterior dos perfis metálicos encontram-se as células de carga (HBM C6A/200 kN), uma de cada lado, seguras pelo varão roscado e apertadas entre duas chapas de aço. O seu funcionamento é idêntico ao dos cilindros, isto é, quando o deslocamento tem o sentido da esquerda para a direita funciona a célula de carga 2 e no deslocamento com o sentido da direita para a esquerda funciona a célula de carga 1. A Figura 3.10 é exemplificativa do esquema de ensaio.

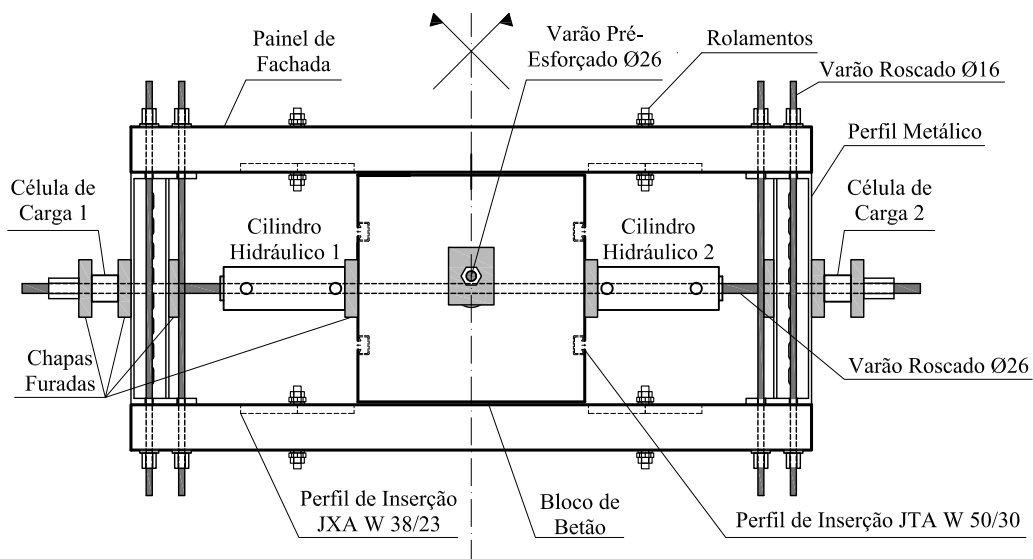


Figura 3.10: Planta da configuração do ensaio

### Capítulo 3. Programa experimental

---

No que respeita aos dispositivos mecânicos, cada um está fixo a um painel de fachada e ao pilar através de parafusos especiais para cada tipo de perfil de inserção. O Quadro 3.1 identifica o tipo e dimensão de parafusos utilizados em cada perfil de inserção.

Com o objectivo de melhor controlar a encurvadura lateral do dispositivo produziu-se uma peça a partir de um perfil de aço HEA 160, em que se cortaram a parte dos banzos posteriores à alma e se furou um dos banzos de forma a poder fixá-la através do mesmo parafuso que fixa o dispositivo ao perfil de inserção do painel de fachada. Foi soldada uma cantoneira à alma do perfil da peça de modo a delimitar o andamento do dispositivo. As Figuras 3.11 a) e b) mostram a configuração desta peça e a sua aplicação a um dispositivo.

Quadro 3.1: Tipo de parafusos utilizados em cada ensaio

Perfis de Inserção		Ensaio com os dispositivos:		
		DC 50x5	DR 50x5	DR 50x10-1
Painel de fachada	<b>JXA W 38/23</b>	JXH M 16	JXH M 16	JXH M 16
Pilar	<b>JTA W 50/30</b>	JB M 12	JB M 12	JB M 16



a)



b)

Figura 3.11: a) Peça que limita o dispositivo, b) Aplicação da peça no dispositivo

Para uma melhor percepção do esquema de ensaio completo, com os dispositivos aplicados, apresentam-se as Figuras 3.12 e 3.13 que esquematizam a configuração do primeiro ensaio realizado, onde foram utilizados um conjunto de dois dispositivos DC 50x5. Para os outros ensaios o esquema é igual mas alteram-se os dispositivos. Na Figura 3.14 a), b), c) aparece a parte da estrutura de ensaio onde estão fixos os dispositivos que vão ser testados, respectivamente DC 50x5, DR 50x5 e DR 50x10-1.

### 3.2. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

#### Planta

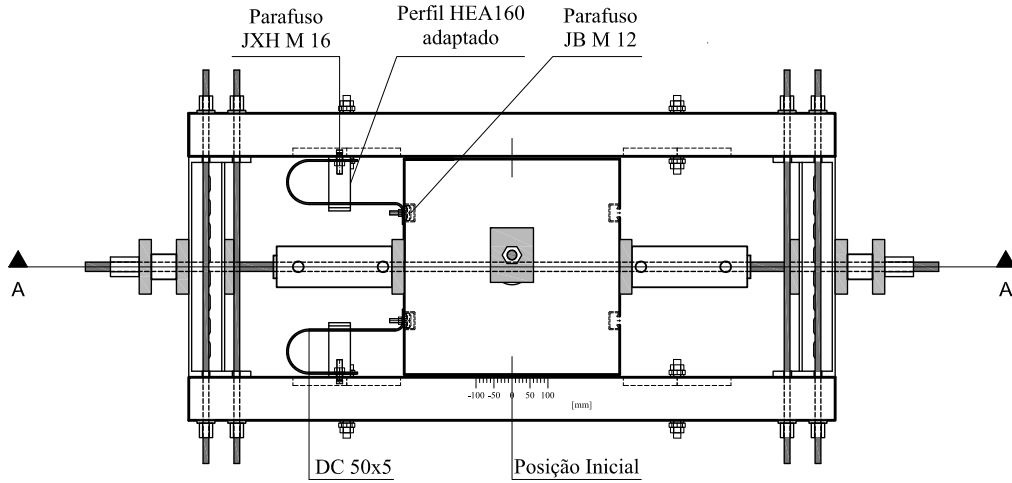


Figura 3.12: Planta do esquema de ensaio com dispositivos DC 50x5

#### Corte A-A

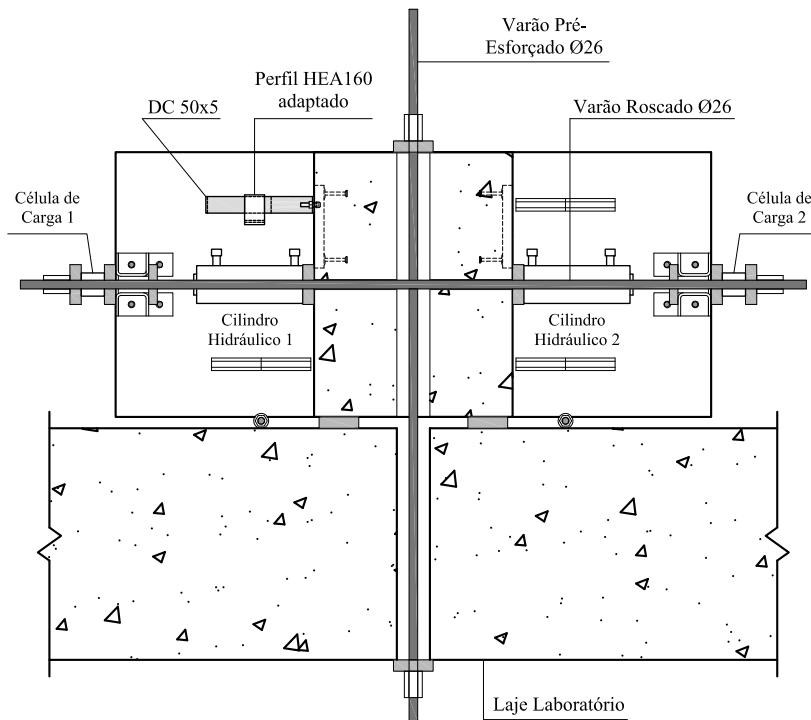


Figura 3.13: Esquema de ensaio com dispositivos DC 50x5 - Corte A-A

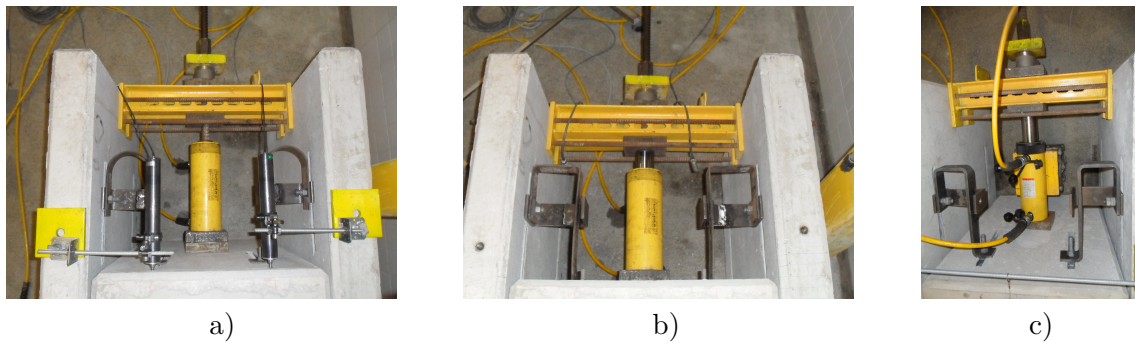


Figura 3.14: Esquema de ensaio com dispositivos: a) DC 50x5, b) DR 50x5 e c) DR 50x10-1

#### 3.2.3 Instrumentação e aquisição de dados

As células de carga da marca HBM e modelo C6A/200 kN foram colocadas entre o perfil metálico onde o cilindro hidráulico faz pressão e uma chapa furada apertada de encontro à célula por uma porca, como se pode visualizar na Figura 3.15. O posicionamento das duas células de carga manteve-se constante, contudo nos dois primeiros ensaios, para o terceiro foram alterados os transdutores de deslocamento.

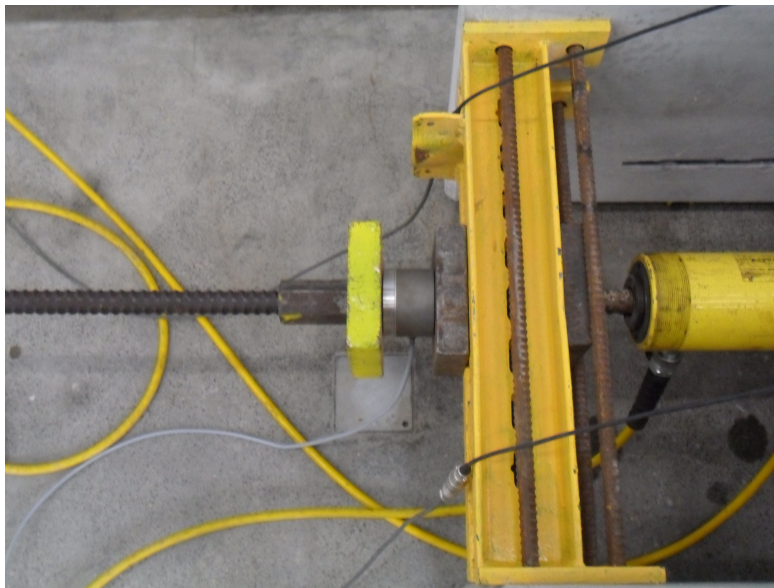


Figura 3.15: Posicionamento da Célula de Carga 1

No primeiro e segundo ensaio, dos dispositivos DC 50x5 e DR 50x5 respectivamente, utilizaram-se dois transdutores de deslocamento da marca TML - modelo CDP-100, por cima de cada dispositivo. Estes transdutores foram posicionados horizontalmente de encontro ao bloco de betão, sendo seguros por um suporte metálico aparafusado ao topo de cada painel, de modo a medir o deslocamento horizontal dos painéis relativamente ao bloco de betão, como se mostra no lado esquerdo da Figura 3.16 e na Figura 3.17.

### 3.2. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

No terceiro ensaio, realizado com os dispositivos DR 50x10-1, utilizou-se apenas um transdutor de grandes deslocamentos da marca TML e modelo DP-500E, fixo a meio do topo do bloco de betão. A argola de ponta do fio do transdutor prendeu-se num varão roscado fixo aos dois painéis, de modo a obter leituras do deslocamento horizontal no meio dos painéis em relação ao bloco de betão. No lado direito da Figura 3.16 e na Figura 3.18 é possível visualizar o posicionamento deste transdutor.

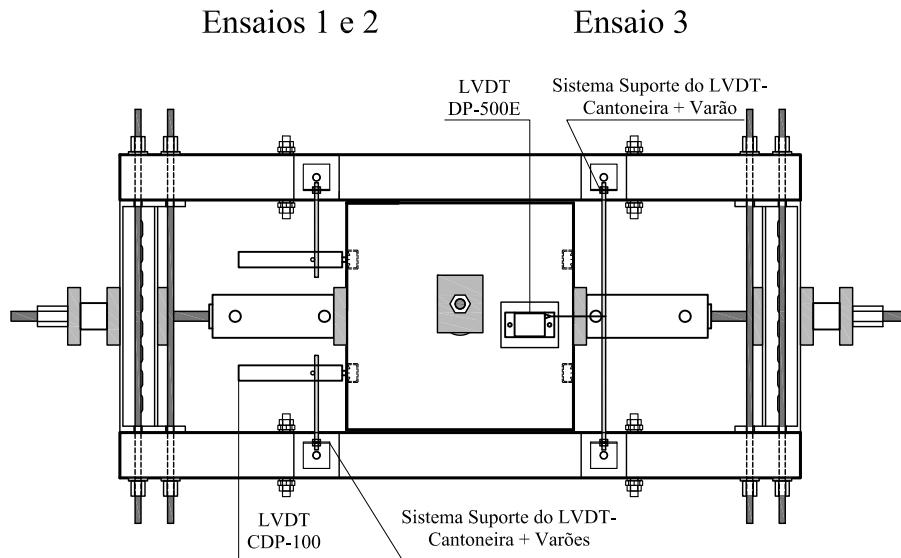


Figura 3.16: Posicionamento dos transdutores de deslocamento utilizados nos três ensaios



Figura 3.17: Posicionamento dos transdutores de deslocamento CDP-100

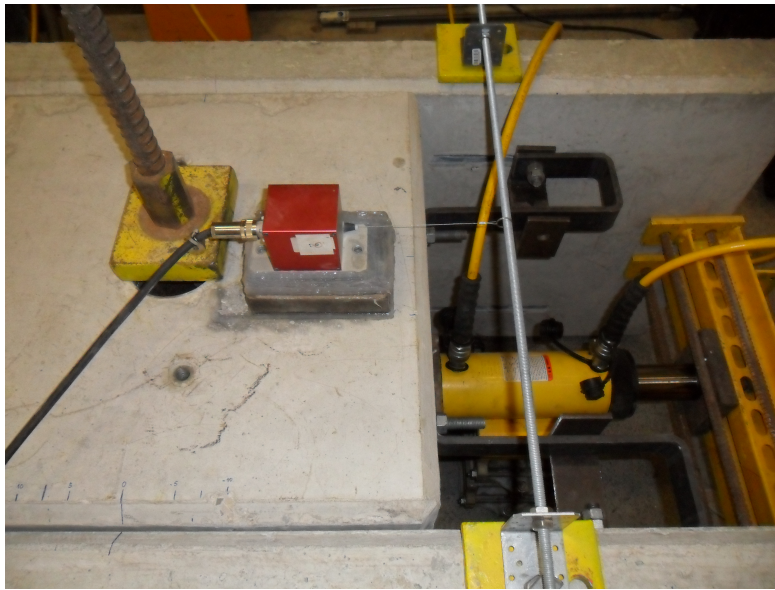


Figura 3.18: Posicionamento do transdutor de deslocamento DP-500E

O sistema de aquisição de dados para efectuar a leitura das células de carga (HBM C6A/200 kN) e dos transdutores de deslocamentos (TML CDP-100 e DP-500E) é composto por um DataLogger's Spider 8 (HBM) e um computador portátil com o *software* CATMAN (HBM) instalado (Figura 3.19). Este *software* permitiu fazer a recolha dos dados e posteriormente exportá-los para uma folha de cálculo para se proceder ao seu tratamento.



Figura 3.19: Vista geral do sistema de ensaio com o Datalogger Spider 8, computador portátil e Bomba hidráulica - Enerpac GPEW 2020 WSN (direita)

## 3.3 Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

### 3.3.1 Geometria dos dispositivos e modelo de ensaio

No ensaio individualizado dos dispositivos mecânicos pretende-se estudar essencialmente o seu comportamento como dissipadores de energia. Neste sentido, concebeu-se um modelo de ensaio, composto por dois dispositivos, colocados de forma simétrica e ligados a outras peças metálicas para que possam ser ensaiados numa máquina de tracção universal. Nos dispositivos utilizados no modelo de ensaio apenas se variaram as dimensões da secção transversal das barras de aço por forma a aquilatar o efeito da variação da secção transversal no comportamento dos dispositivos, mantendo-se, na medida do possível, o tipo de aço (S275) e a geometria global do dispositivo. No total para este tipo de ensaio, foram produzidos dez dispositivos, tendo sido testados em cada ensaio, por uma questão de simetria, um conjunto de dois dispositivos.

A geometria global do dispositivo é igual em todos os ensaios. Contudo, as suas dimensões relativas alteram-se uma vez que a secção transversal dos mesmos variou atendendo a que se utilizaram três barras de aço S275 diferentes, a primeira com 50 mm x 10 mm de área, a segunda com 70 mm x 10 mm de área e a terceira com 50 mm x 15 mm de área. Dando a primeira barra origem ao conjunto de dois dispositivos DR 50x10-2, a segunda a dois conjuntos formados por dois dispositivos cada um, DR 70x10-1 e DR 70x10-2, e por fim a terceira barra originou também dois conjuntos de dois dispositivos cada um, o DR 50x15-1 e o DR 50x15-2.

O modelo de ensaio concebido para ensaiar os dispositivos mecânicos, encontra-se representado na Figura 3.20. Como se pode observar nesta Figura, os dispositivos são colocados simetricamente e ligados na parte inferior a uma barra de aço S275 com 50x15 mm<sup>2</sup> de área, a qual será posteriormente introduzida na garra inferior da máquina de tracção universal. A ligação entre os dispositivos e a barra de aço é executada através de dois varões de aço roscados de 16 mm de diâmetro e classe 8.8. De forma a rigidificar a ligação, foram colocadas na parte exterior da ligação dois elementos de barra 50x10 (mm) de aço S275.

Na parte superior do modelo de ensaio (Figura 3.21), os dispositivos ligam a um perfil SHS100 através de varões de aço roscados de 16 mm de diâmetro e classe 8.8. Por sua vez, do perfil SHS 100 saem dois varões de 16 mm de diâmetro roscados com porcas ao perfil e que vão ligar à garra superior da máquina de tracção.

A Figura 3.22 mostra e a Figura 3.23 esquematiza a parte inferior do modelo de ensaio com os dispositivos DR 50x10-2. Nas Figuras 3.24 e 3.25 ilustra-se e esquematiza-se, respectivamente, a parte inferior do modelo de ensaio com os dispositivos DR 70x10-1 e DR 70x10-2. A Figura 3.26 mostra e a Figura 3.27 esquematiza a parte inferior do modelo de ensaio com os dispositivos DR 50x15-1 e DR 50x15-2.

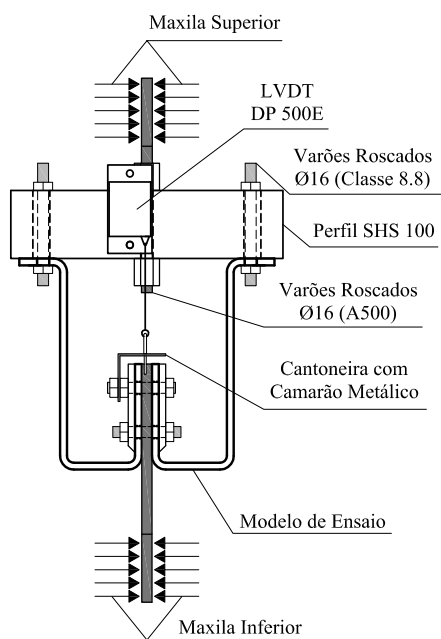


Figura 3.20: Esquema do modelo de ensaio

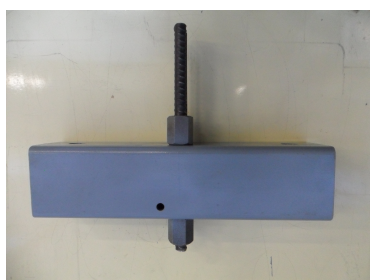


Figura 3.21: Parte superior do modelo de ensaio



Figura 3.22: Modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x10-2

### 3.3. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

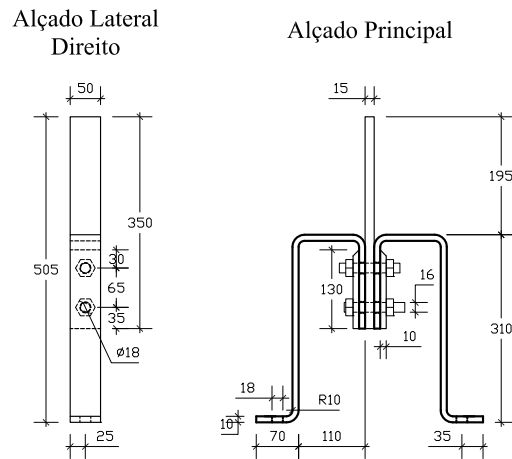


Figura 3.23: Dimensões do modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x10-2 (mm)



Figura 3.24: Modelo de ensaio dos dispositivos DR 70x10-1 e DR 70x10-2

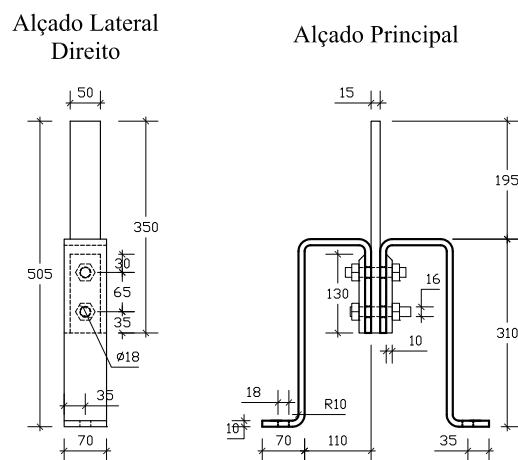


Figura 3.25: Dimensões do modelo de ensaio dos dispositivos DR 70x10-1 e DR 70x10-2 (mm)

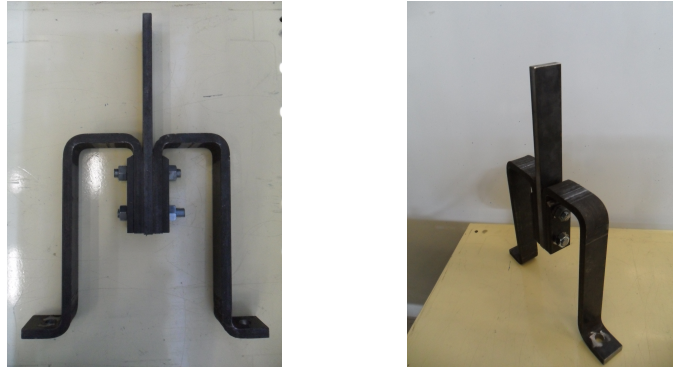


Figura 3.26: Modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x15-1 e DR 50x15-2

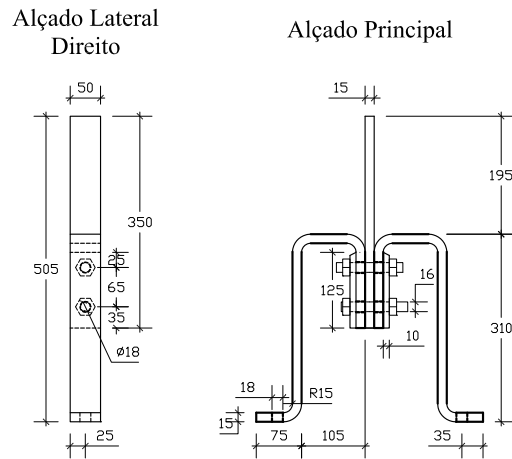


Figura 3.27: Dimensões do modelo de ensaio dos dispositivos DR 50x15-1 e DR 50x15-2 (mm)

#### 3.3.2 Sistema de ensaio

Para melhor estudar o comportamento dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia resolveu-se fazer testes aplicando aos dispositivos deslocamentos cíclicos a uma velocidade relativamente baixa (2 mm/s), isto é, fazendo ensaios quasi-estáticos.

O modelo de ensaio foi elaborado de forma a adequar-se à máquina universal de tracção disponível (Servosis - ME 408/60) e ao tipo de ensaios pretendidos. A máquina de tracção universal que permite aplicar deslocamentos ou forças em tracção ou compressão dispõe de duas maxilas, uma superior e outra inferior, para fixar a peça a ensaiar. Com esta premissa fabricaram-se os modelos de ensaio anteriormente descritos.

### 3.3. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

O modelo de ensaio colocado entre as maxilas da máquina está representado na Figura 3.20. As Figuras 3.28, 3.29 e 3.30 mostram o sistema de ensaio dos modelos de dispositivos DR 50x10-2, DR 70x10-2 e DR 50x15-1, respectivamente.

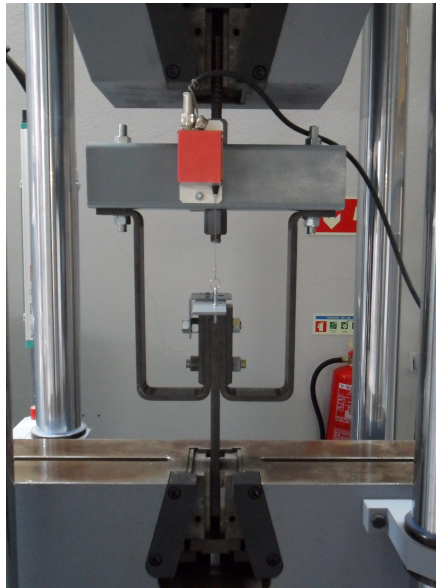


Figura 3.28: Sistema de ensaio com o modelo DR 50x10-2



Figura 3.29: Sistema de ensaio com o modelo DR 70x10-2

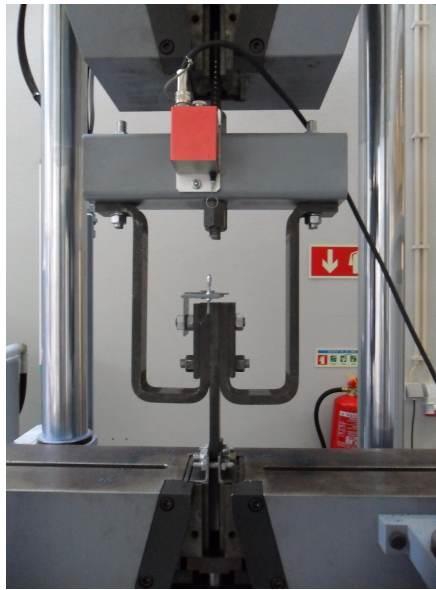


Figura 3.30: Sistema de ensaio com o modelo DR 50x15-1

Alguns elementos presentes no modelo de ensaio provêm da experiência adquirida em ensaios anteriores, exemplo disso são as barras de 50x10 mm posicionadas no interior de cada dispositivo que servem para melhorar a rigidez na zona da ligação dos dois dispositivos através dos parafusos / varões roscados.

Após o segundo ensaio utilizou-se um conjunto de duas cantoneiras aparafusadas na parte inferior do modelo por forma a que não se verificasse escorregamento do mesmo quando em compressão, fazendo com que a totalidade do modelo de ensaio ficasse apoiado quando a maxila inferior está fechada. A Figura 3.31 permite visualizar este componente.



Figura 3.31: Cantoneiras aparafusadas à barra inferior para eliminar escorregamentos na maxila inferior da máquina

### 3.3. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

#### 3.3.3 Instrumentação e aquisição de dados

A instrumentação utilizada foi igual para os cinco ensaios realizados e consistiu num transdutor de grandes deslocamentos, posicionado verticalmente, da marca TML e modelo DP-500E. O transdutor fixou-se a meio do perfil SHS 100 através de dois varões roscados e respectivas porcas, ficando a argola de ponta do fio do transdutor presa num camarão metálico. Este camarão está fixo a uma cantoneira furada, que está apertada por uma porca do lado esquerdo do segundo varão que liga os dispositivos. O posicionamento do transdutor pode ser visto nas Figuras 3.28 a 3.30.

A força actuante no modelo de ensaio foi obtida através da célula de carga da marca Servosis e modelo PCI-100 (Figura 3.33) que faz parte da máquina de ensaios (Servosis - ME 408/60), representada na Figura 3.32, e que está colocada por cima da sua maxila superior.



Figura 3.32: Máquina de ensaios Servosis ME 408/60 e respectivo sistema de aquisição de dados (direita)

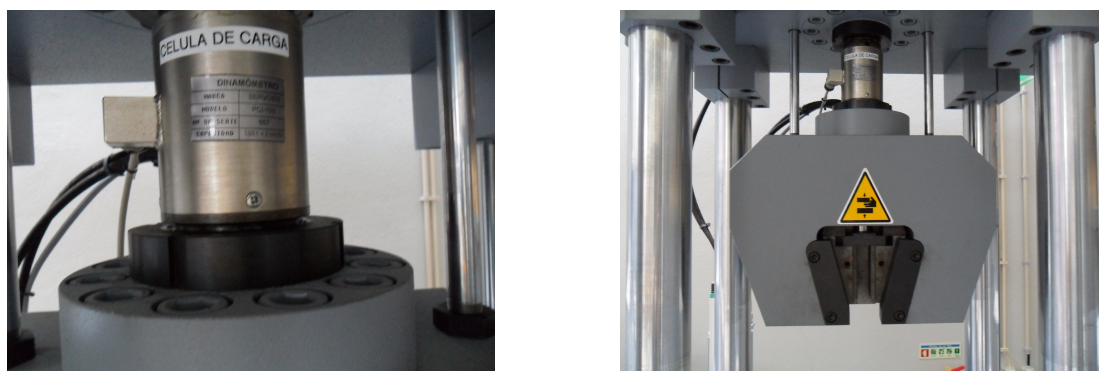


Figura 3.33: Célula de carga PCI-100 e o seu posicionamento na máquina de ensaios

Nos ensaios utilizaram-se dois sistemas de aquisição de dados distintos. No primeiro, a recolha dos dados da célula de carga foi realizada pelo *software* PCD2K da Servosis instalado no computador posicionado ao lado da máquina de ensaios (Figura 3.32). O sistema de aquisição de dados do transdutor de deslocamentos foi composto por um *Datalogger's Spider 8* (HBM) ligado a um computador portátil, recolhendo-se os dados através do *software* CATMAN (HBM).

### 3.4 Caracterização dos materiais

Apresentam-se nesta secção os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos ensaios. Os materiais testados foram o betão dos painéis de fachada e do pilar e o aço de três das barras com que se fabricaram os dispositivos mecânicos. Referem-se também as características técnicas e de resistência dos perfis de inserção e dos respectivos parafusos, fornecidas pela marca Jordahl.

#### 3.4.1 Betão

A betonagem dos dois painéis de fachada e do bloco de betão foi realizada na Concremat, sendo os três elementos betonados ao mesmo tempo com a mesma qualidade de betão. Foram recolhidos seis provetes cúbicos de 150 mm, dos quais três foram ensaiados à compressão para proceder à caracterização das suas propriedades mecânicas. Utilizou-se o Critério 1 de conformidade para a resistência à compressão, da NP EN 206-1 [17] e a relação analítica para determinar os valores médios da resistência à tracção da Tabela 3.1 do Eurocódigo 2 - Parte 1-1 [15]. No Quadro 3.2 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão ( $f_{cm,cube}$ ), obtida do ensaio de provetes cúbicos, bem como a respectiva extrapolação para provetes cilíndricos ( $f_{cm}$ ) de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (expressão (3.1)), os valores médios da resistência à tracção ( $f_{ctm}$ ) e o valor característico da resistência à compressão do betão ( $f_{ck}$ ).

$$f_{cm} = 0,8 \times f_{cm,cube} \quad (3.1)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 4 \quad (3.2)$$

$$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} \text{ para } f_{ctm} \leq C50/60 \quad (3.3)$$

Quadro 3.2: Caracterização do betão

Provete	Idade	$f_{ci,cube}$	$f_{cm,cube}$	$f_{cm}$	$f_{ctm}$	$f_{ck}$
Cúbico	(dias)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	28	33,5	36,7	29,4	2,6	25,4
2		40,0				
3		36,5				

#### 3.4.2 Aço

O aço das barras utilizadas na fabricação dos dispositivos mecânicos foi fornecido como sendo da classe S235 para a barra 50x5 mm, que não foi ensaiada, e da classe S275 para as barras 50x10 mm, 70x10 mm e 50x15 mm. Para a caracterização do aço das barras foram ensaiados provetes representativos, de acordo com a norma europeia EN 10 002-1 [14].

### Capítulo 3. Programa experimental

No Quadro 3.3 indicam-se os valores médios da tensão de cedência ( $f_{ym}$ ), tensão de rotura à tracção ( $f_{tm}$ ), módulo de elasticidade ( $E_{sm}$ ) e da extensão total na força máxima ( $\varepsilon_{sum}$ ) e na rotura ( $\varepsilon_{srm}$ ). Na Figura 3.34, apresenta-se o diagrama de tensão - deformação para os três tipos de barras ensaiadas.

Quadro 3.3: Resultados dos ensaios de caracterização das barras de aço

Barra	$f_{ym}$	$f_{tm}$	$E_{sm}$	$\varepsilon_{sum}$	$\varepsilon_{srm}$
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	%	%
50x10	360,0	514,9	218	15,48	23,48
70x10	329,3	435,3	198	17,08	24,74
50x15	293,3	420,6	187	18,36	28,64

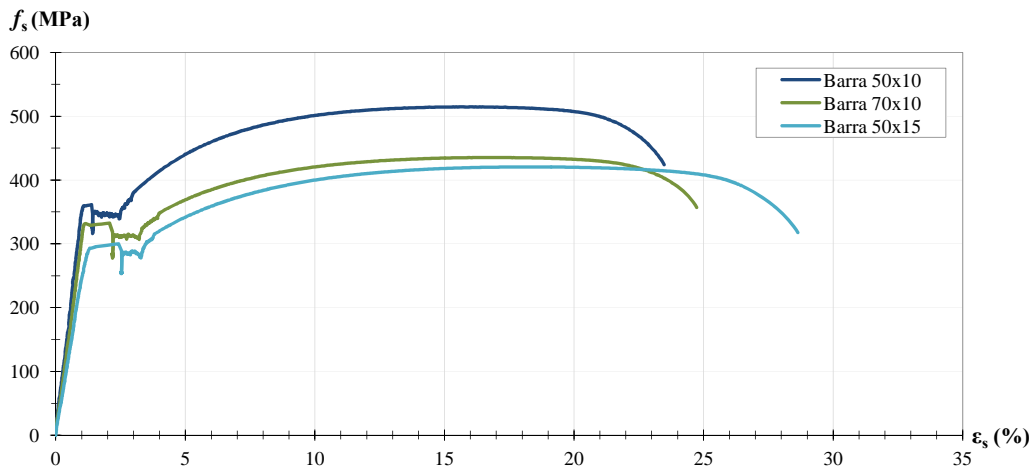
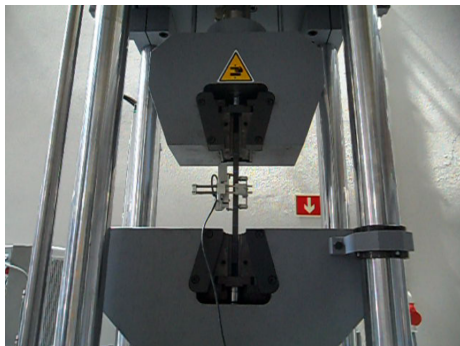
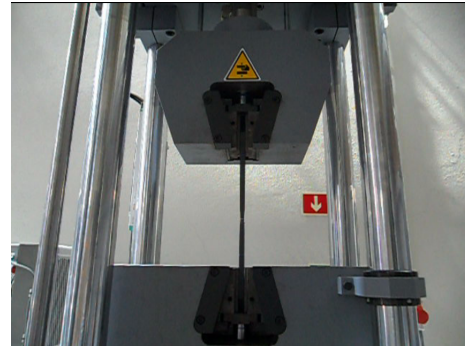


Figura 3.34: Diagrama de tensão - deformação das barras ensaiadas

A Figura 3.35 mostra o ensaio de tracção para a barra 50x15 mm, no início em que se medem as extensões na fase elástica com o extensómetro, e no final do ensaio, quando se deu a rotura da barra.



a)



b)

Figura 3.35: Ensaio de tracção da barra 50x15 mm: a) no início, b) na rotura

### 3.4.3 Perfis de Inserção

Os perfis de inserção utilizados nos painéis de fachada e no pilar não foram ensaiados, sendo as suas características técnicas fornecidas pelo fabricante - Jordahl. Na Figura 3.36 a) e b) encontram-se esquematizados os perfis de inserção JTA W 50/30 utilizados no pilar e JXA W 38/23 utilizados nos painéis de fachada, respectivamente. As forças pontuais admissíveis nos perfis de inserção ( $F_{perm}$ ) podem ser, de tracção pura ou tracção oblíqua em que  $\alpha \leq 150^\circ$  (Figura 3.37 a)), de corte em que  $\beta \leq 15^\circ$  (Figura 3.37 b)) ou axiais (Figura 3.37 c)).

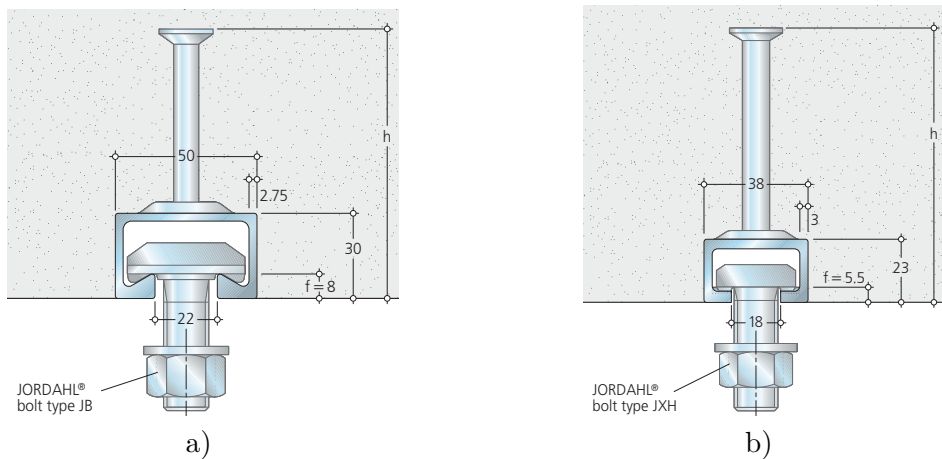


Figura 3.36: Perfis de inserção da marca Jordahl: a) JTA W 50/30, b) JXA W 38/23

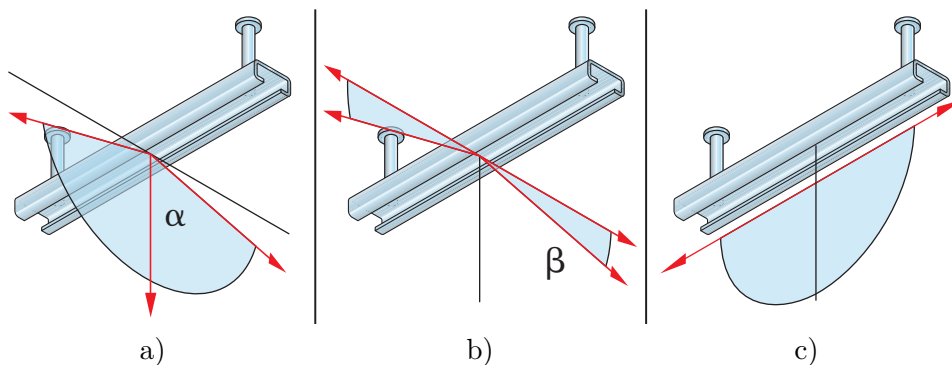


Figura 3.37: Força pontual admissível nos perfis de inserção: a) tracção pura ou oblíqua, b) corte, c) axial

O Quadro 3.4 mostra as características dos perfis de inserção, laminados a quente, utilizados. A força resistente de cálculo, é designada por  $F_{Rd}$ , e o comprimento necessário para a instalação do perfil, é designado por  $h$ .

Quadro 3.4: Características dos perfis de inserção da marca Jordahl

Localização	Tipo de Perfil	Classe de Aço	$F_{perm}$	$F_{Rd}$	$h$
			kN	kN	mm
Pilar	JTA W 50/30	S 235 JR	12,0	16,8	95
Painel de Fachada	JXA W 38/23	S 275 JR	12,0	16,8	100

### 3.4.4 Parafusos

Os parafusos utilizados na ligação dos dispositivos mecânicos aos painéis de fachada e ao pilar não foram ensaiados, sendo as suas características técnicas fornecidas pelo fabricante - Jordahl. Na Figura 3.38 a) e b) estão ilustrados os dois tipos de parafusos, JB e JXH, utilizados na ligação do dispositivo ao pilar e aos painéis de fachada, respectivamente. Variou-se o diâmetro dos parafusos JB, de M12 para M16, utilizando-se parafusos JB M 12 no ensaio dos dispositivos DC 50x5 e DR 50x5 e JB M 16 no ensaio dos dispositivos DR 50x10-1.

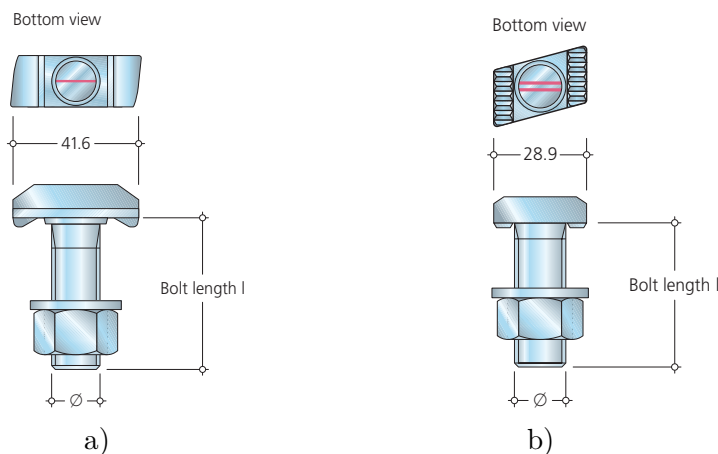


Figura 3.38: Parafusos da marca Jordahl: a) JB, b) JXH

O Quadro 3.5 mostra as características dos parafusos utilizados. A força admissível no parafuso é designada por  $F_{perm}$ , a força resistente de cálculo é designada por  $F_{Rd}$ , o momento flector admissível no parafuso é designado por  $M_{perm}$  e o momento flector resistente de cálculo é designado por  $M_{Rd}$ . O comprimento do parafuso é designado por  $l$ .

Quadro 3.5: Características dos parafusos da marca Jordahl

Localização	Tipo de Parafuso	Classe de Aço	$F_{perm}$	$F_{Rd}$	$M_{perm}$	$M_{Rd}$	$l$
			kN	kN	kN.mm	kN.mm	mm
Pilar	JB M 12	4.6	9,3	13,0	17,5	24,5	50
Pilar	JB M 16	4.6	17,2	24,2	44,4	62,2	80
Painel de Fachada	JXH M 16	8.8	36,1	50,5	111,0	155,4	60

## Capítulo 4

# Apresentação de resultados dos ensaios

### 4.1 Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

Nestes ensaios pretendeu-se estudar o comportamento do dispositivo mecânico de ligação e a sua interacção com o painel de fachada e o bloco de betão. Para isso, programou-se um ciclo de ensaios quasi-estáticos, cuja amplitude deriva da limitação do deslocamento entre pisos proposta pelo Eurocódigo 8 [16]. Para efectuar este cálculo considerou-se a equação (2.1), dado que apresenta o maior limite de deslocamento entre pisos. Admitiu-se uma altura  $h = 6$  m (altura entre pisos corrente num edifício industrial) e uma classe de importância de nível III -  $\nu = 0,4$ .

$$d_r \nu \leq 0,005 h \quad d_r \leq 0,075(m) \quad d_r \leq 75(mm)$$

Como a amplitude do ciclo foi controlada apenas visualmente, não se conseguiu igualar os deslocamentos máximos para a esquerda e para a direita, portanto, a amplitude varia entre os 50 mm e os 75 mm para os três ensaios.

As convenções do sentido do deslocamento e da força estão esquematizadas na Figura 4.1. O deslocamento efectuado da esquerda para a direita apresenta valores crescentes e o deslocamento da direita para a esquerda apresenta valores decrescentes. As células de carga só apresentam valores de força diferentes de zero quando, no caso da CC1 o deslocamento se efectua da direita para a esquerda e no caso da CC2 o deslocamento se realiza da esquerda para a direita. Portanto admitem-se forças negativas para valores de deslocamentos decrescentes e forças positivas para valores de deslocamento crescentes.

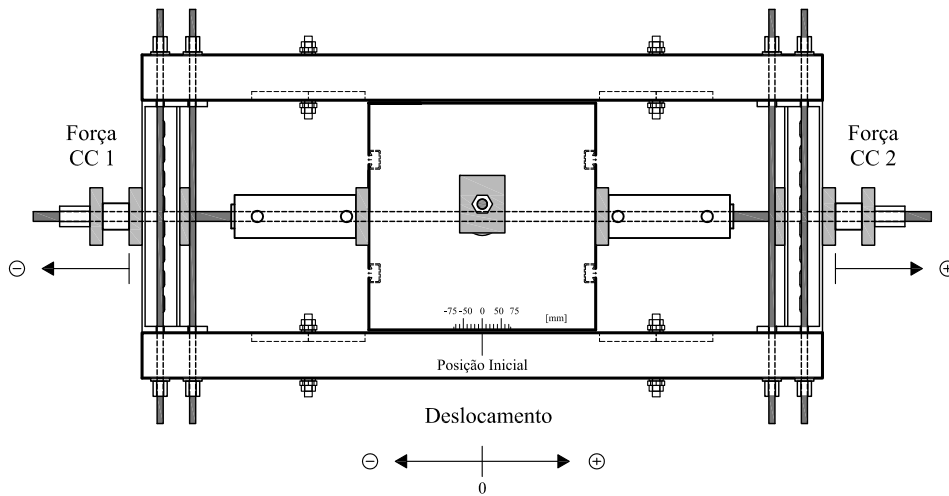


Figura 4.1: Convenções do deslocamento e da força no esquema de ensaio

Os ensaios decorreram com algumas paragens devido a duas razões principais: a primeira prende-se com o facto da ligação dos cilindros à bomba hidráulica só permitir o funcionamento de um de cada vez, ou seja, o êmbolo de um dos cilindros só começa a recolher quando o êmbolo do outro cilindro tocou no batente. O outro motivo, apenas condicionante no ensaio dois primeiros ensaios, foi o facto de os transdutores de deslocamento só efectuarem medições até 100 mm, portanto, teve de se alterar o seu posicionamento a meio do ciclo.

Para cada ensaio os resultados apresentam-se na forma de diagrama força - tempo, diagrama força - deslocamento e a título informativo também se mostram as histórias de deslocamentos. Mas para este tipo de ensaios, revela-se de maior importância a forma como interagiram todos os elementos que compõem a ligação e as deformadas que o dispositivo foi apresentando ao longo do ciclo, portanto, fundamentalmente a partir de imagens estes aspectos estão representados.

## 4.1. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

### 4.1.1 Ensaio da ligação com dispositivos DC 50x5

Neste ensaio foi o cilindro hidráulico 1 que começou a empurrar os painéis de fachada, como se pode constatar pelo diagrama força - tempo da Figura 4.3. Assim, o movimento iniciou-se da direita para a esquerda, portanto, no sentido negativo do deslocamento (Figura 4.2). Na Figura 4.4 apresenta-se o diagrama de força - deslocamento.

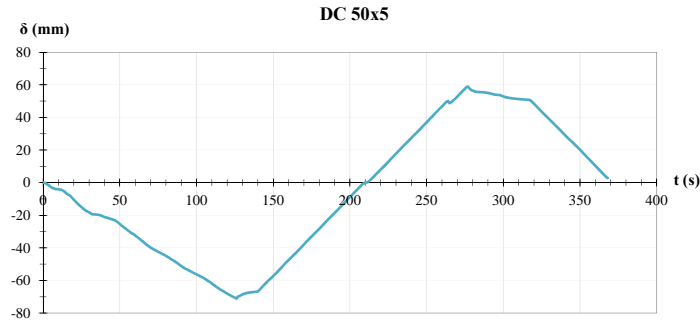


Figura 4.2: História de deslocamentos na ligação com DC 50x5

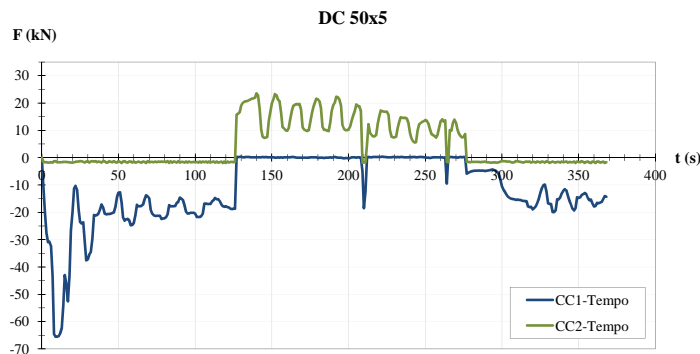


Figura 4.3: Diagrama força - tempo da ligação com DC 50x5

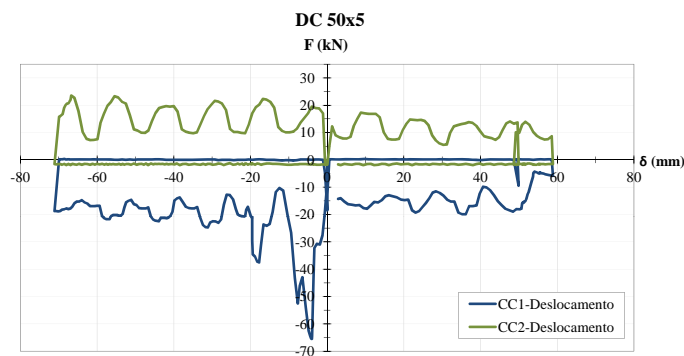


Figura 4.4: Diagrama força - deslocamento da ligação com DC 50x5

## Capítulo 4. Apresentação de resultados dos ensaios

---

De modo a mostrar o que sucedeu na zona da ligação durante o ciclo completo de ensaio evidenciaram-se quatro fases importantes: a da posição inicial - ligação indeformada, quando atinge o deslocamento máximo negativo e o deslocamento máximo positivo e por fim a retoma da posição inicial - ligação deformada. Estas fases estão representadas por esta ordem na Figura 4.5.

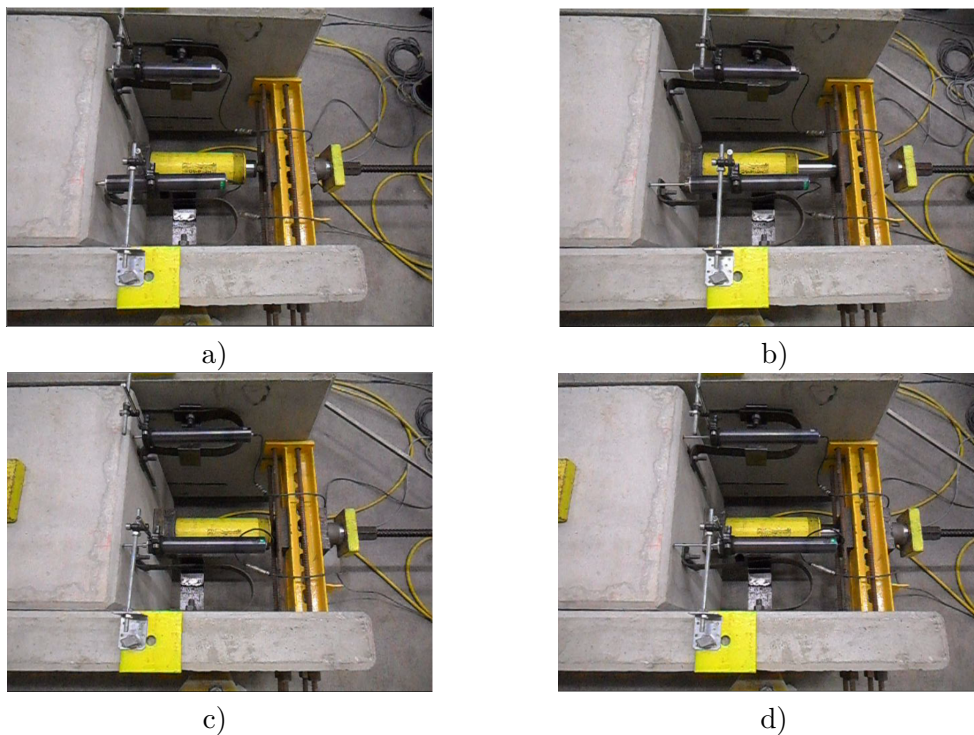


Figura 4.5: Aparência da ligação com os DC 50x5 na posição: a) inicial, b) de deslocamento máximo negativo, c) de deslocamento máximo positivo, d) inicial (depois de ter completado o ciclo)

## 4.1. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

### 4.1.2 Ensaio da ligação com dispositivos DR 50x5

Neste ensaio, assim como o anterior, o movimento iniciou-se da direita para a esquerda, no sentido negativo do deslocamento (Figura 4.6). Foi o cilindro hidráulico 1 que começou a empurrar os painéis de fachada, como se pode ver pelo diagrama força - tempo da Figura 4.7. Na Figura 4.8 apresenta-se o diagrama de força - deslocamento.

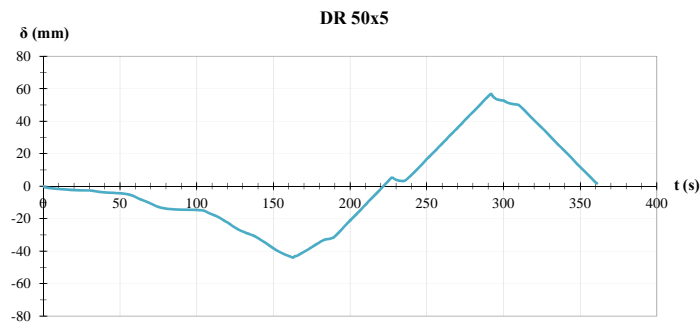


Figura 4.6: História de deslocamentos na ligação com DR 50x5

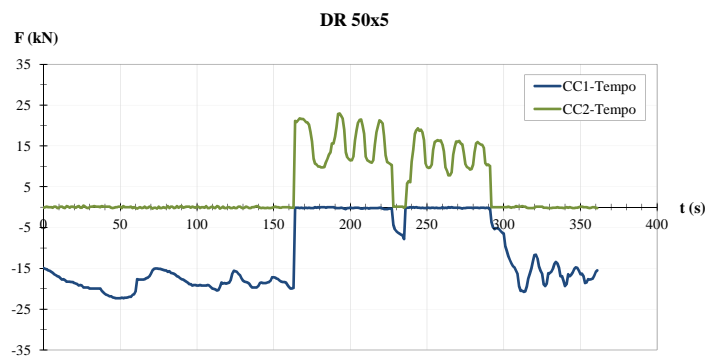


Figura 4.7: Diagrama força - tempo da ligação com DR 50x5

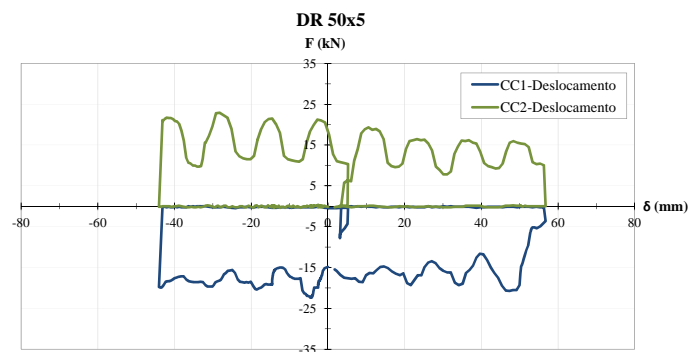


Figura 4.8: Diagrama força - deslocamento da ligação com DR 50x5

## Capítulo 4. Apresentação de resultados dos ensaios

---

De seguida mostra-se a zona da ligação durante quatro fases importantes do ciclo de ensaio: a da posição inicial - ligação indeformada, quando atinge o deslocamento máximo negativo e o deslocamento máximo positivo e por fim a retoma da posição inicial - ligação deformada. Estas fases estão representadas por esta ordem na Figura 4.9.

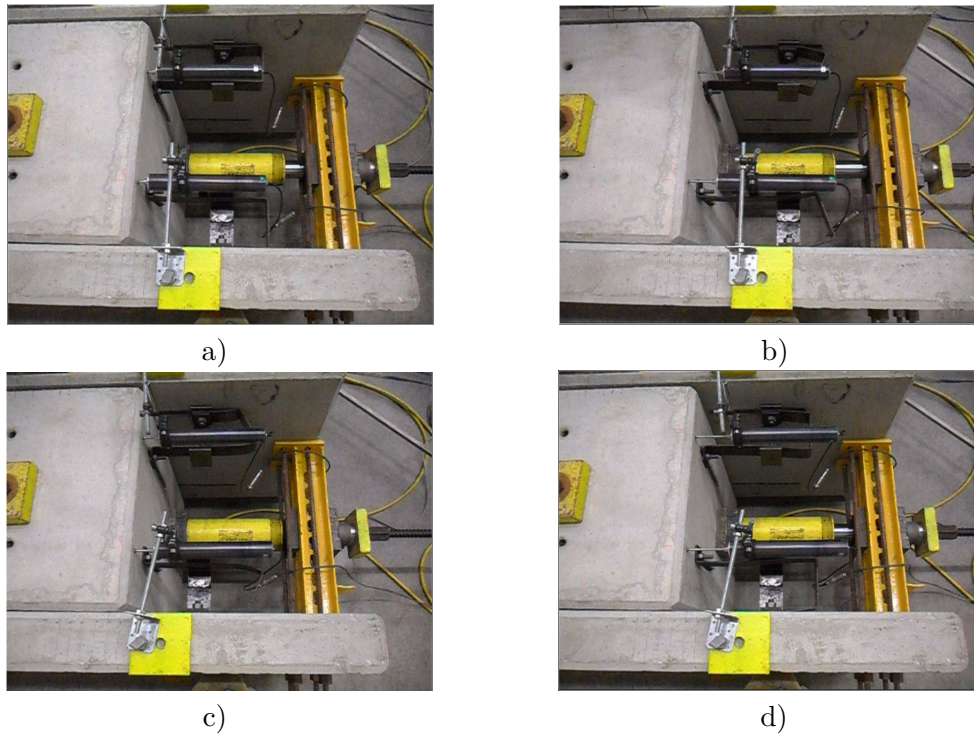


Figura 4.9: Aparência da ligação com os DR 50x5 na posição: a) inicial, b) de deslocamento máximo negativo, c) de deslocamento máximo positivo, d) inicial (depois de ter completado o ciclo)

### 4.1.3 Ensaio da ligação com dispositivos DR 50x10-1

Neste ensaio já se notam várias diferenças relativamente aos anteriores, começando pelos aspectos que dizem respeito à configuração do ensaio, como por exemplo, o sentido de deslocamento dos painéis no início do ensaio foi da esquerda para a direita (Figura 4.10), pois foi o cilindro hidráulico 2 que começou a empurrar os painéis de fachada, como se pode ver pelo diagrama força - tempo da Figura 4.11. Os dispositivos foram fixados na parte direita do esquema de ensaio, ao contrário do que aconteceu nos primeiros dois ensaios, em que os dispositivos ficaram na parte esquerda do esquema de ensaio. Outra das diferenças prende-se com o aparecimento de problemas na envolvente da ligação, e a própria configuração da deformada dos dispositivos tornou-se mais pronunciada. Também o diagrama de força - deslocamento (Figura 4.12) se tornou mais lógico que os dos outros ensaios, não em termos de valores da força exercida nos dispositivos, mas no aspecto em que a força efectuada quando o dispositivo está a ser traccionado (força registada pela célula de carga 2) é maior do que a força efectuada quando o dispositivo está a ser comprimido (força registada pela célula de carga 1).

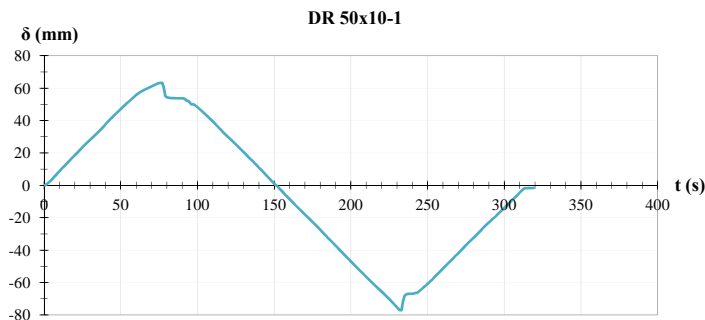


Figura 4.10: História de deslocamentos na ligação com DR 50x10-1

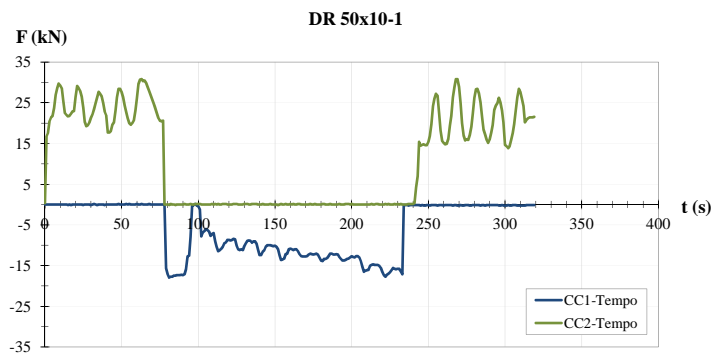


Figura 4.11: Diagrama força - tempo da ligação com DR 50x10-1

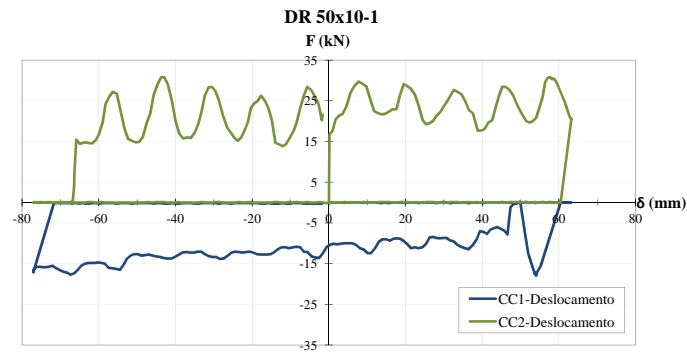


Figura 4.12: Diagrama força - deslocamento da ligação com DR 50x10-1

Neste ensaio mostra-se a zona da ligação nas quatro fases mais importantes do ciclo de ensaio de forma mais pormenorizada. A fase da posição inicial, em que a ligação tem configuração indeformada, pode ser vista na Figura 4.13. Na Figura 4.14 pode-se ver a ligação na fase em que atinge o deslocamento máximo positivo e na Figura 4.15 vê-se a ligação quando atinge o deslocamento máximo negativo. Quando o ciclo acaba, os dispositivos apresentam a deformada exposta na Figura 4.16.



Figura 4.13: Ligação com os DR 50x10-1 na posição inicial



Figura 4.14: Ligação com os DR 50x10-1 na posição de deslocamento máximo positivo

#### 4.1. Ensaio da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural



Figura 4.15: Ligação com os DR 50x10-1 na posição de deslocamento máximo negativo

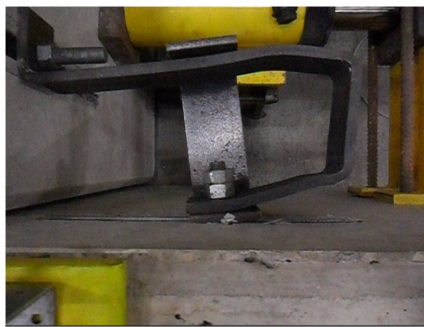


Figura 4.16: Ligação com os DR 50x10-1 na posição inicial (depois de ter completado o ciclo)

Por fim, voltando aos problemas que surgiram na envolvente da ligação, pode visualizar-se na Figura 4.17 a) e b) o descascamento da lâmina superficial de betão no limiar do perfil de inserção e a deformação que este sofreu no local do parafuso.



a)



b)

Figura 4.17: a) Descascamento da lâmina de betão no limiar do perfil de inserção, b) Deformação do perfil de inserção na zona do parafuso

## 4.2 Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

Estes ensaios podem ser tratados como uma particularização dos ensaios da ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural, pois o estudo debruça-se sobre o comportamento do dispositivo mecânico que efectua a ligação. Fizeram-se ensaios quasi-estáticos, através da aplicação de deslocamentos cíclicos com amplitudes crescentes e a uma velocidade baixa (2mm/s) aos dispositivos a testar numa máquina de ensaios.

Programou-se na máquina de ensaio duas histórias de deslocamentos, representadas no diagrama deslocamento - tempo da Figura 4.18. A diferença entre as séries do diagrama residem no início de cada ciclo, uma começa com deslocamentos positivos e a outra começa com deslocamentos negativos. O primeiro modelo de dispositivos testado como não tem outro par para ser ensaiado começou, de forma aleatória, com os deslocamentos negativos. Já no segundo e quarto modelo de dispositivos, como têm um conjunto par cada um, fez-se questão de começar o ciclo de ensaio com deslocamentos negativos e nos seus conjuntos pares, começar com deslocamentos positivos.

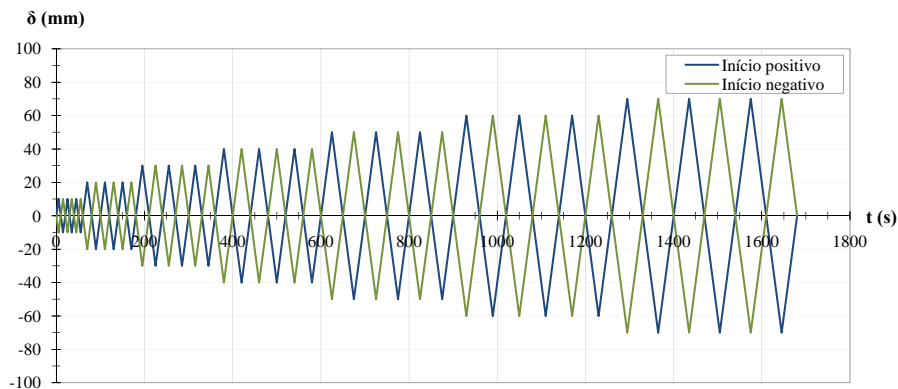


Figura 4.18: Diagrama de deslocamentos-tempo programado na máquina de ensaio

As convenções do sentido do deslocamento e da força estão esquematizadas na Figura 4.19. O deslocamento efectuado de baixo para cima apresenta valores decrescentes e o deslocamento de cima para baixo apresenta valores crescentes. Admitem-se forças crescentes quando o modelo está a ser traccionado e forças decrescentes quando o modelo está a ser comprimido.

Para cada ensaio os resultados apresentam-se na forma de diagrama força - tempo, diagrama força - deslocamento e a título informativo também se mostram as histórias de deslocamentos, dado que são diferentes da história de deslocamentos programada devido aos escorregamentos que ocorreram. A força representada refere-se sempre a um dispositivo.

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

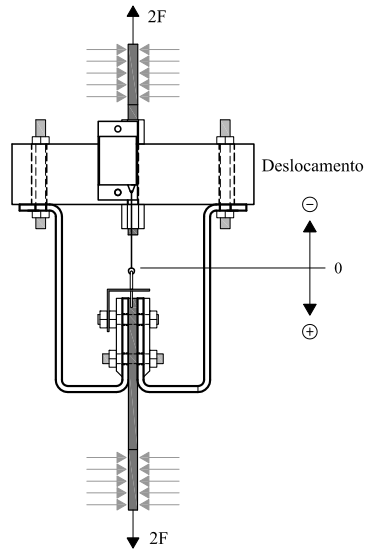


Figura 4.19: Convenção do sentido do deslocamento e da força

### 4.2.1 Panorâmica geral dos ensaios

Para uma melhor visualização e comparação dos resultados obtidos nos ensaios realizados, começa-se por apresentar a história de deslocamentos e os diagramas força - tempo de todos os ensaios, na Figura 4.20 a) e b), respectivamente.

De seguida, na Figura 4.21 apresentam-se os diagramas força - deslocamento de todos os ensaios.

## Capítulo 4. Apresentação de resultados dos ensaios

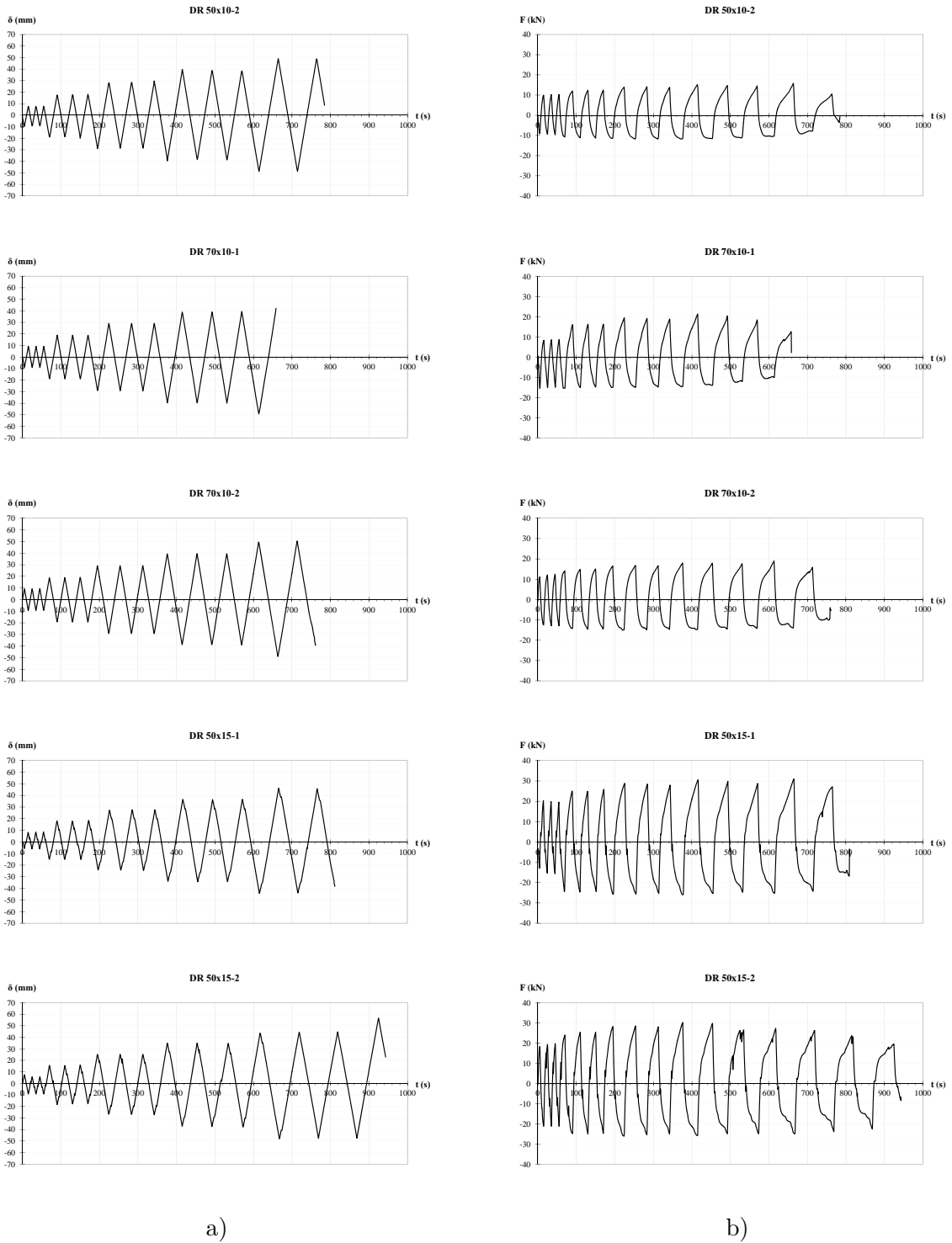


Figura 4.20: a) História de deslocamentos dos modelos ensaiados, b) Diagramas força-tempo dos modelos ensaiados

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

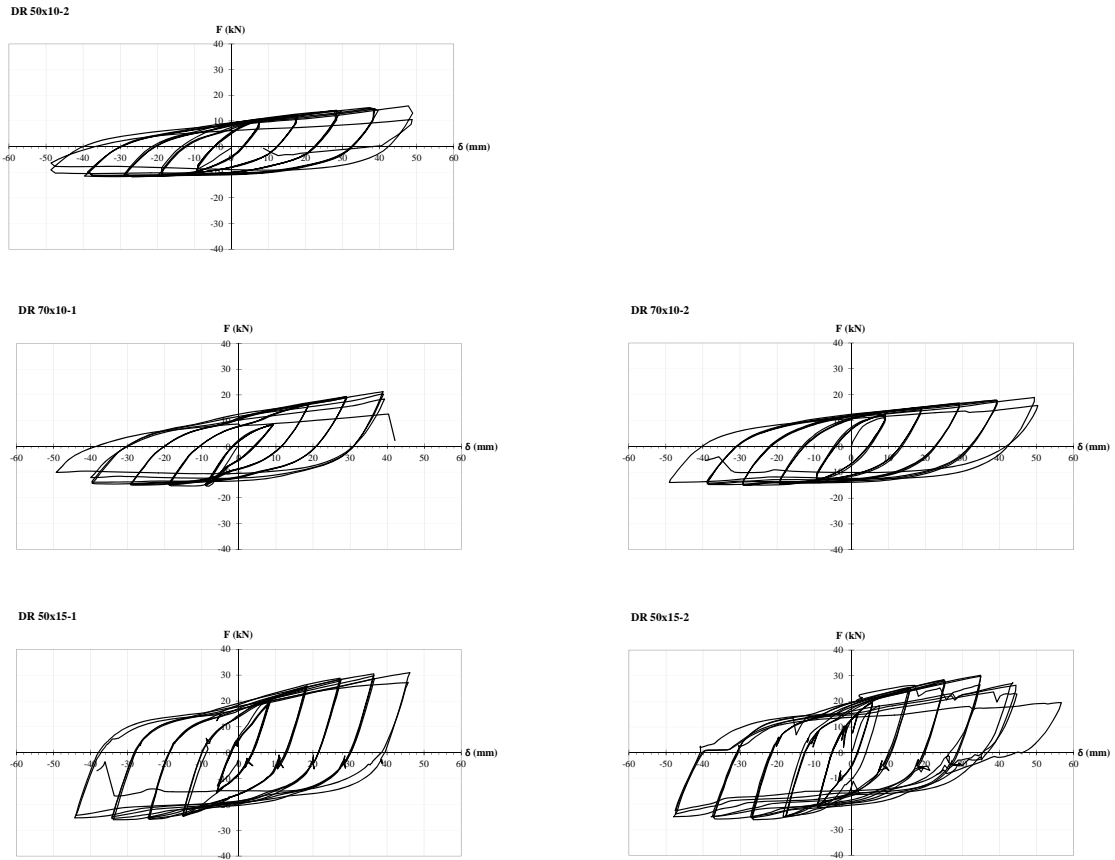


Figura 4.21: Diagramas força - deslocamento dos modelos ensaiados

### 4.2.2 Particularização dos ensaios

#### Dispositivos DR 50x10-2

Este modelo de ensaio foi o único em que não se utilizou o sistema de cantoneiras para apoiar o modelo na maxilar inferior, pois houve apenas um pequeno escorregamento inicial que não se voltou a verificar. O diagrama força - deslocamento do ensaio completo encontra-se na Figura 4.27.

Ao lado dos diagramas força - deslocamento de cada conjunto de ciclos com a mesma amplitude (Figuras 4.22 a 4.26 a)) mostra-se a deformada mais significativa do dispositivo que ocorreu durante esse conjunto de ciclos (Figuras 4.22 a 4.26 b)).

## Capítulo 4. Apresentação de resultados dos ensaios

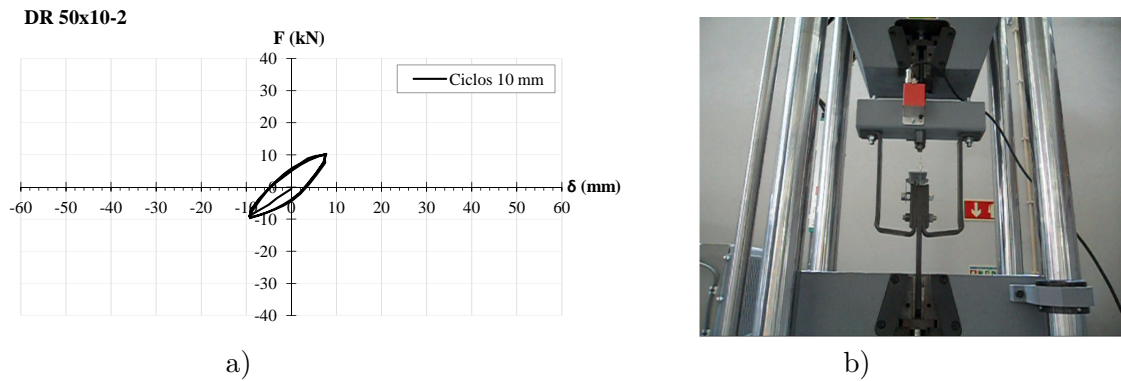


Figura 4.22: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 10 mm

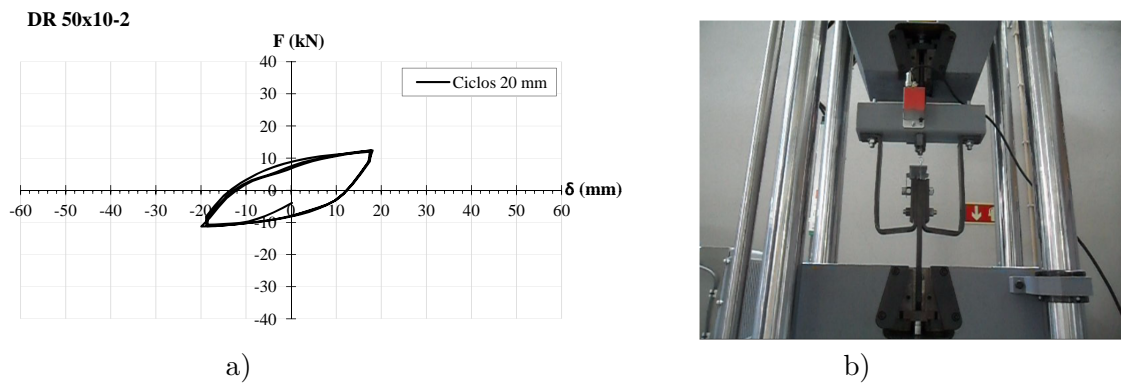


Figura 4.23: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 20 mm

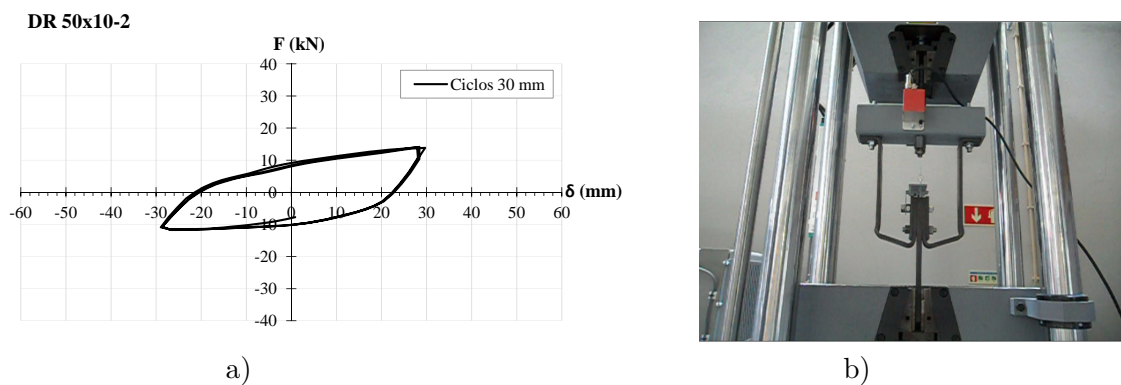


Figura 4.24: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 30 mm

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

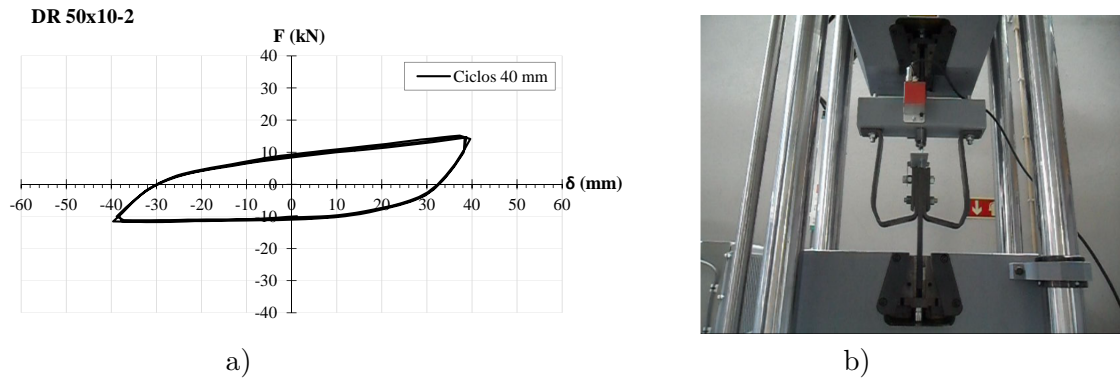


Figura 4.25: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 40 mm

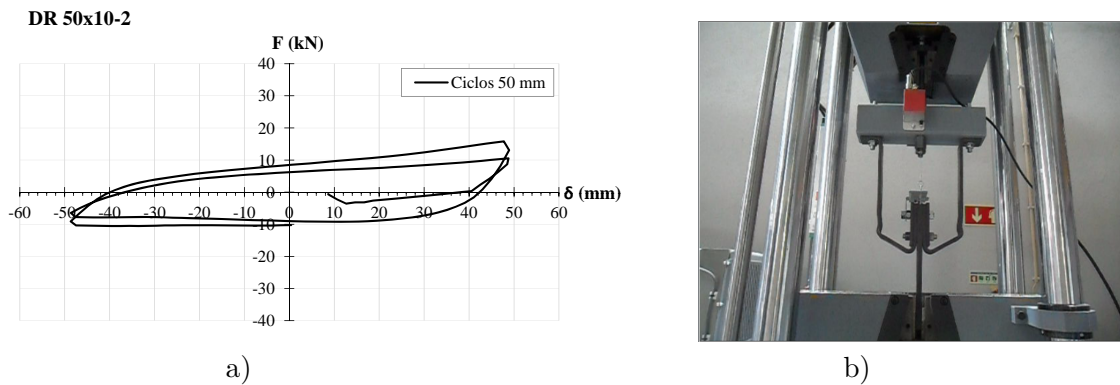


Figura 4.26: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 50x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 50 mm

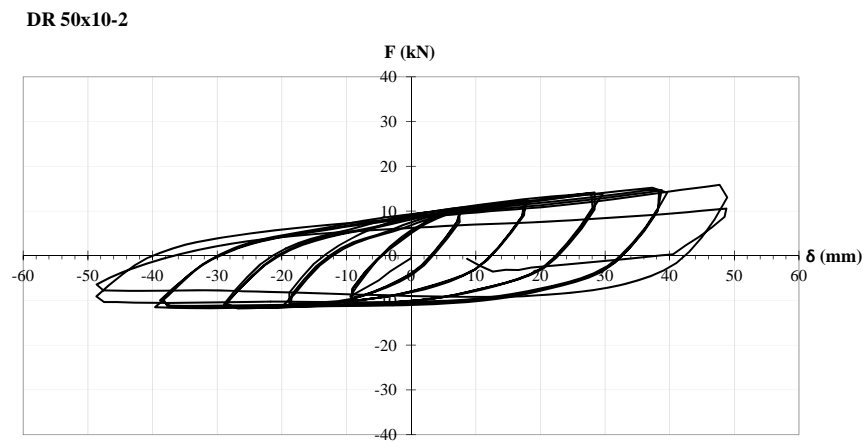


Figura 4.27: Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 50x10-2

### Dispositivos DR 70x10-1

Na primeira tentativa de realização do ensaio com este modelo, depois do modelo completar o segundo ciclo dos 20 mm, verificou-se que existia um escorregamento da barra de aço (saliente do modelo) na maxila inferior da máquina de ensaios. Adaptou-se o sistema de cantoneiras, referido anteriormente, à barra e iniciou-se o ensaio desde o princípio, mas com isto, o modelo não começou o ensaio com uma configuração indeformada.

Ao lado dos diagramas força - deslocamento de cada conjunto de ciclos com a mesma amplitude (Figuras 4.28 a) 4.32 a)) mostra-se a deformada mais significativa do dispositivo que ocorreu durante esse conjunto de ciclos (Figuras 4.28 b) 4.32 b)).

Nas Figura 4.33 está representado o diagrama força - deslocamento com todos os ciclos efectuados até à rotura.

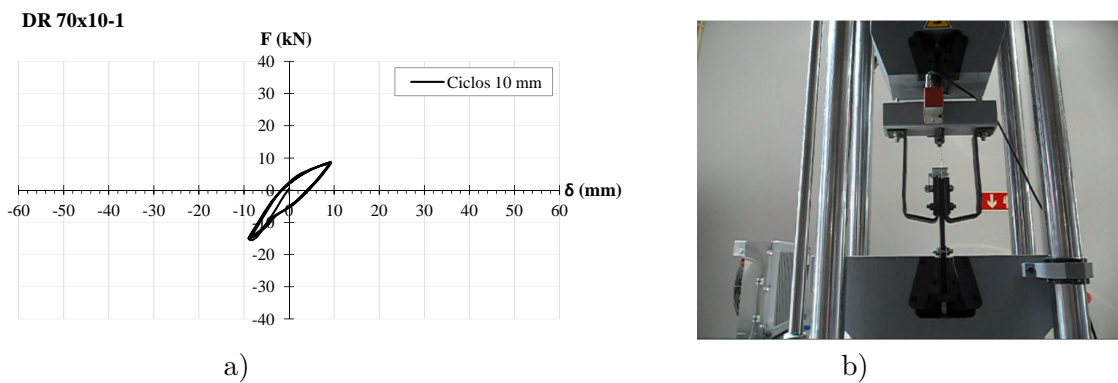


Figura 4.28: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 10 mm

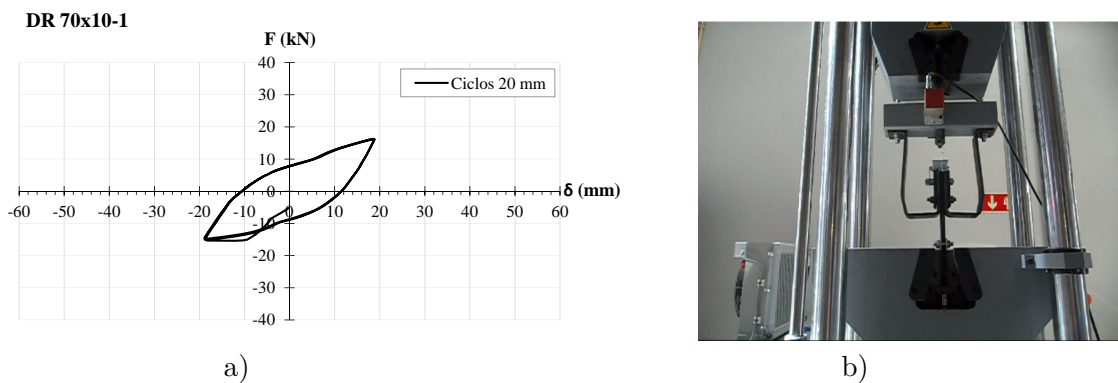


Figura 4.29: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 20 mm

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

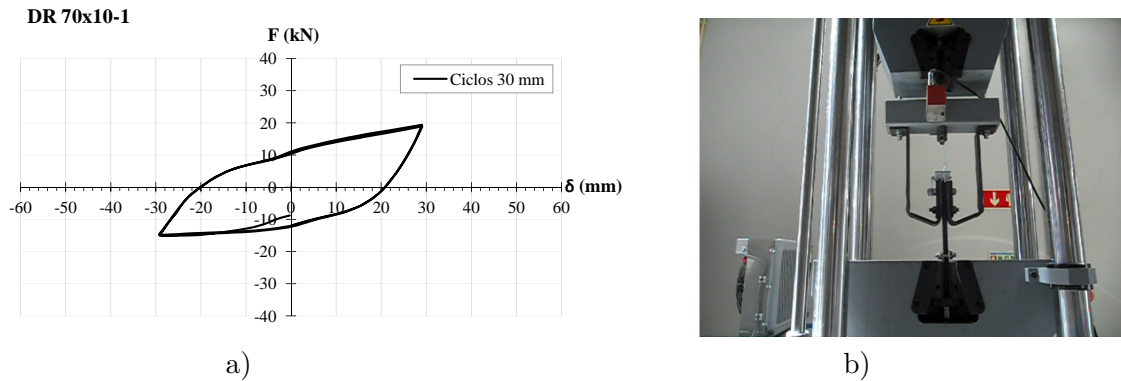


Figura 4.30: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 30 mm

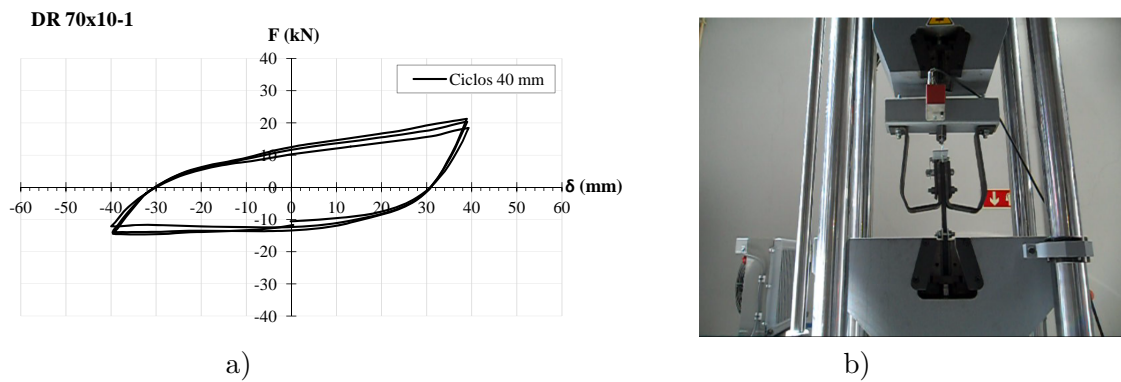


Figura 4.31: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 40 mm

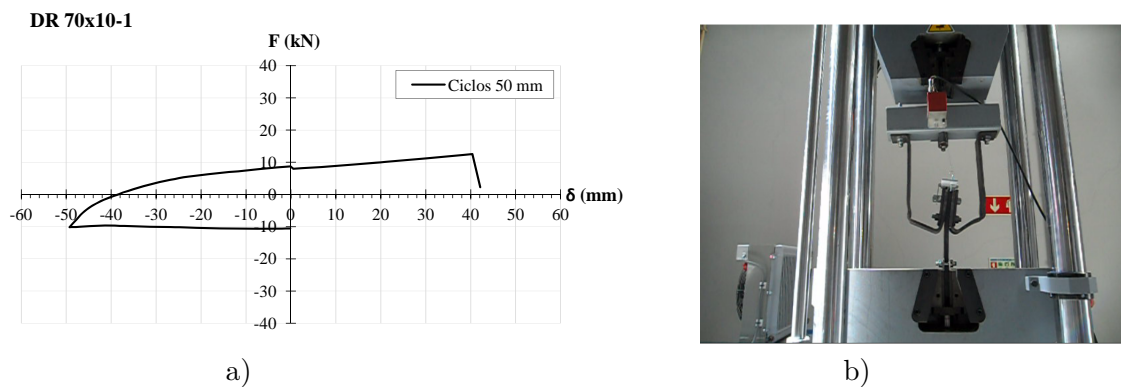


Figura 4.32: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 70x10-1, b) Deformada dos dispositivos imediatamente antes da rotura nos ciclos de 50 mm

DR 70x10-1

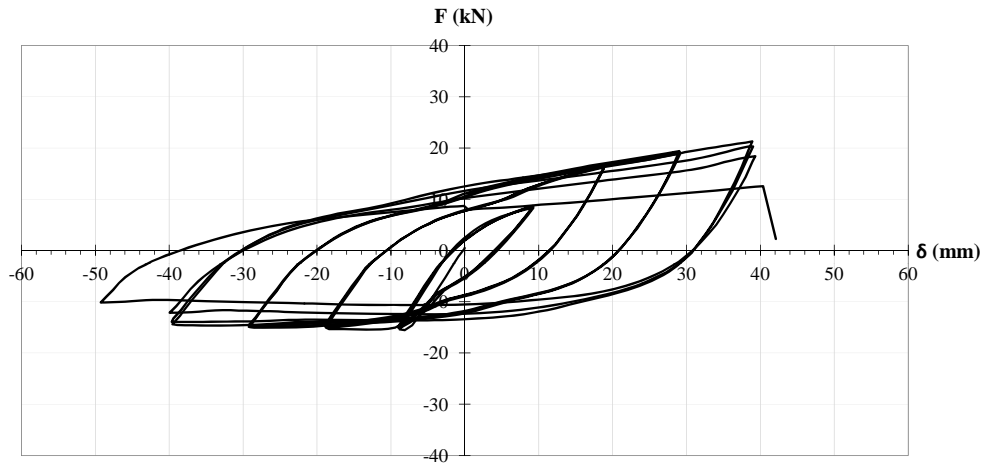
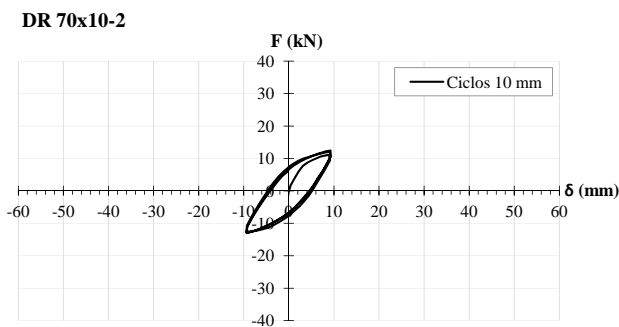


Figura 4.33: Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 70x10-1

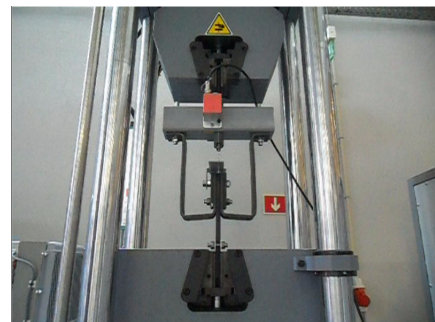
### Dispositivos DR 70x10-2

Este modelo de ensaio é o par do modelo testado anteriormente - DR 70x10-1, mas neste ensaio não ocorreram escorregamentos.

Ao lado dos diagramas força - deslocamento de cada conjunto de ciclos com a mesma amplitude (Figuras 4.34 a 4.38 a)) mostra-se a deformada mais significativa do dispositivo que ocorreu durante esse conjunto de ciclos (Figuras 4.34 a 4.38 b)). Na Figura 4.39 está representado o diagrama força - deslocamento com todos os ciclos efectuados até à rotura.



a)



b)

Figura 4.34: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 10 mm

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

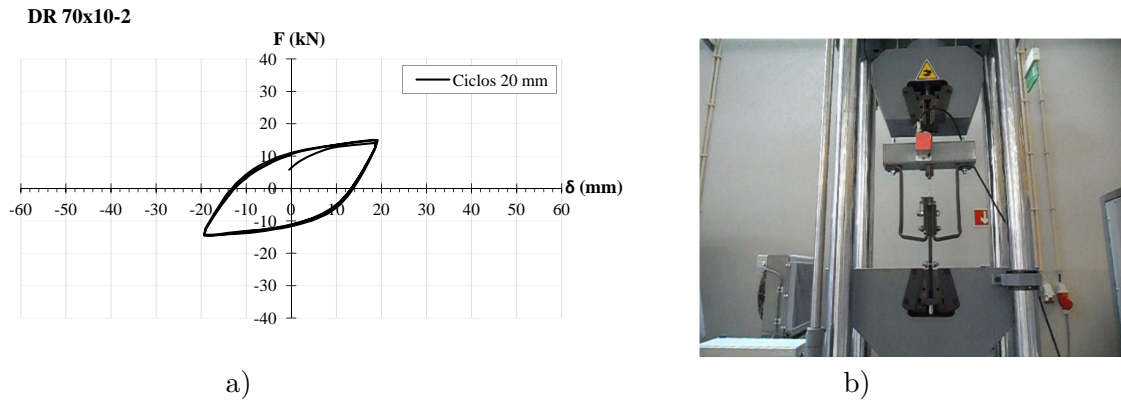


Figura 4.35: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 20 mm



Figura 4.36: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 30 mm

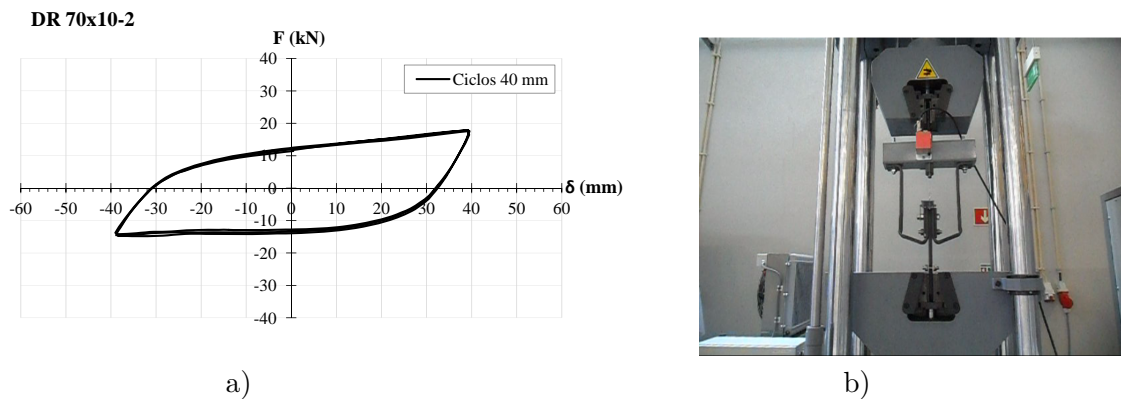


Figura 4.37: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 40 mm

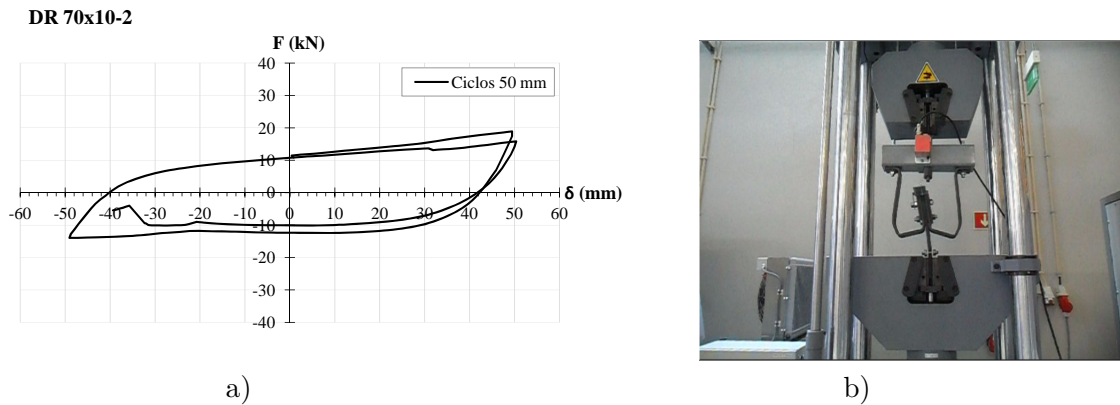


Figura 4.38: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 70x10-2, b) Deformada dos dispositivos imediatamente antes da rotura nos ciclos de 50 mm

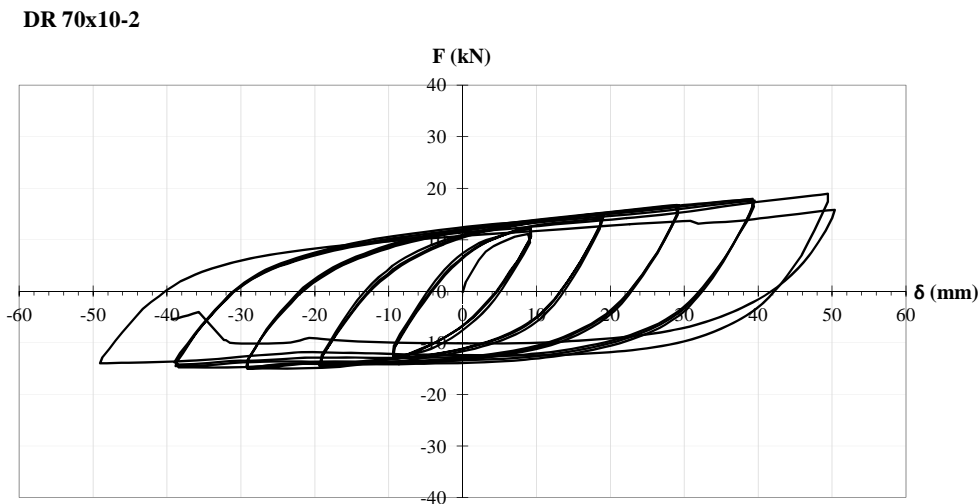


Figura 4.39: Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 70x10-2

### Dispositivos DR 50x15-1

Quando se iniciou o ensaio, verificou-se que a amplitude de deslocamentos que o modelo estava a descrever eram muito menores que o programado na máquina de ensaio. Devido a esta incorrecção decidiu-se parar o ensaio para investigar a causa deste diferencial de deslocamentos. Percebeu-se que isto acontecia porque existia escorregamento na zona da ligação entre a barra fixa na maxila inferior da máquina e os dispositivos. Este escorregamento dá-se devido à tolerância dos furos em relação aos parafusos utilizados. Depois desta constatação começou-se o ensaio desde o princípio, mas, com a condição que o modelo de dispositivos não estava com uma configuração totalmente indeformada.

Ao lado dos diagramas força - deslocamento de cada conjunto de ciclos com a mesma amplitude (Figuras 4.40 a 4.44 a)) mostra-se a deformada mais significativa do dispositivo que ocorreu durante esse conjunto de ciclos (Figuras 4.40 a 4.44 b)). Na Figura 4.45 está representado o diagrama força - deslocamento com todos os ciclos efectuados até à rotura.

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

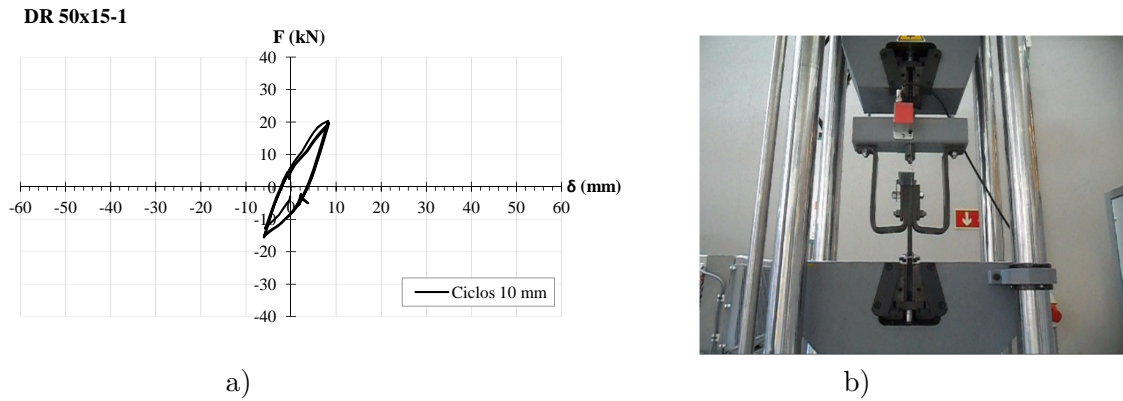


Figura 4.40: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 10 mm

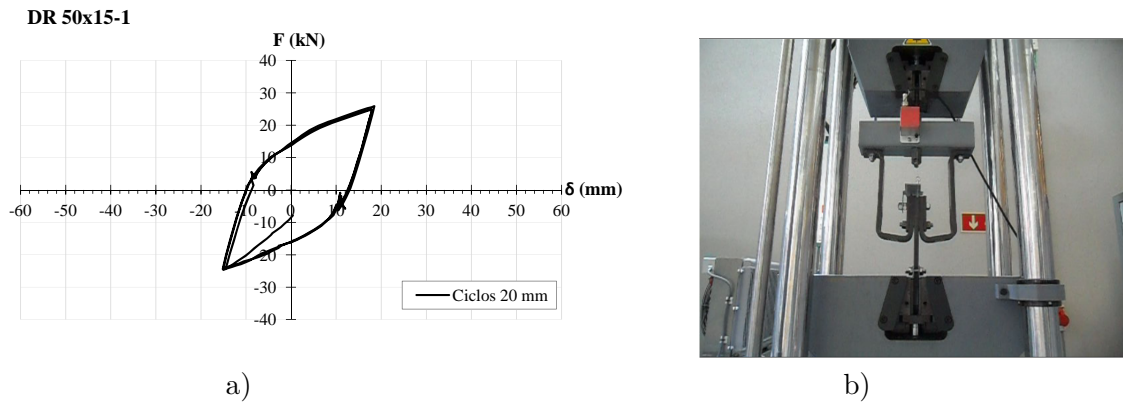


Figura 4.41: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 20 mm

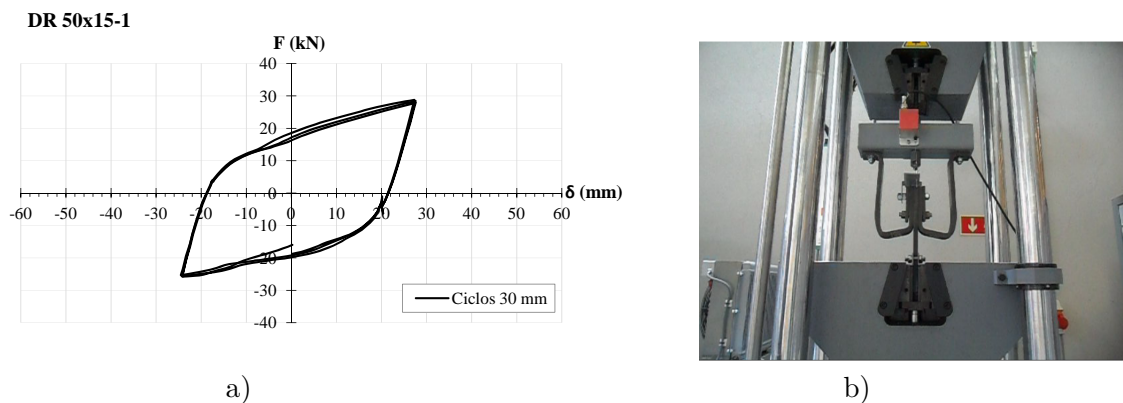


Figura 4.42: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 30 mm

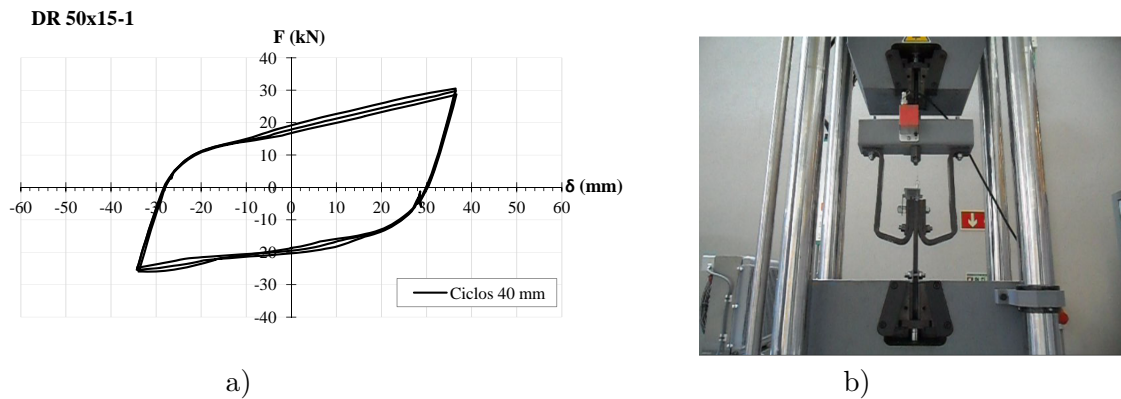


Figura 4.43: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 40 mm

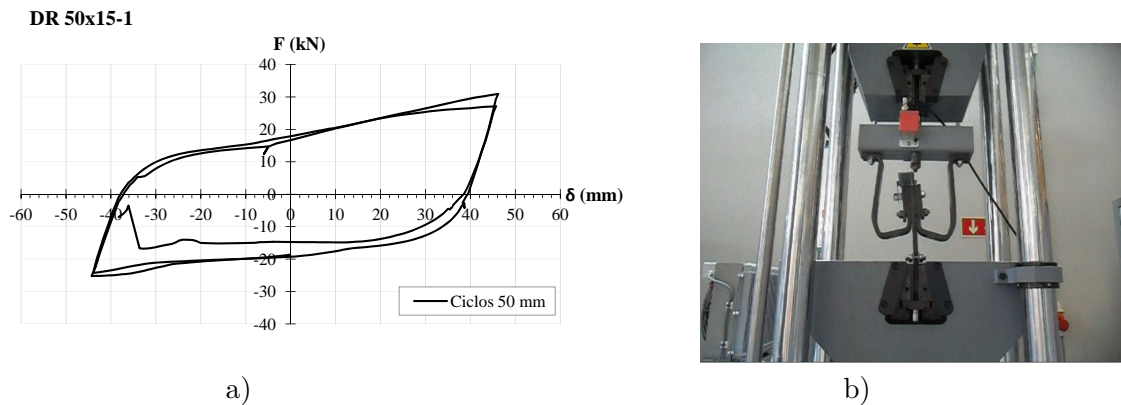


Figura 4.44: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 50x15-1, b) Deformada dos dispositivos imediatamente antes da rotura nos ciclos de 50 mm

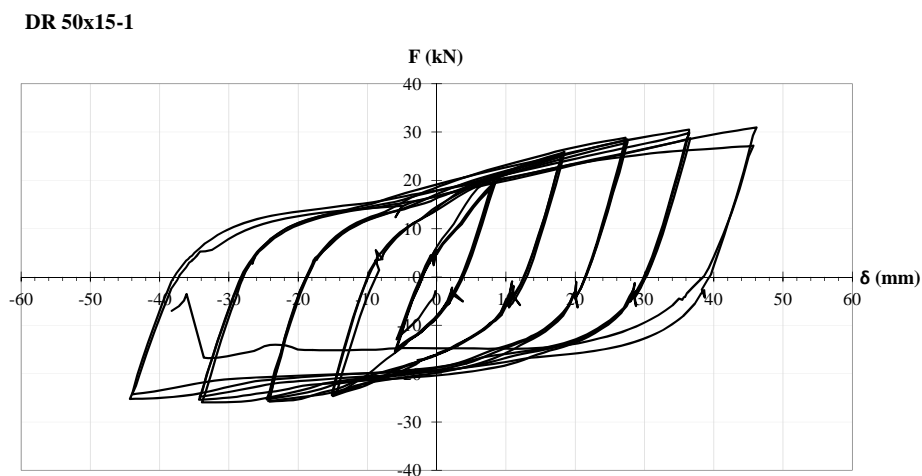


Figura 4.45: Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 50x15-1

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

### Dispositivos DR 50x15-2

Este modelo de ensaio é o par do modelo testado anteriormente - DR 50x15-1, e também neste ensaio ocorreram escorregamentos na zona da ligação entre a barra e os dispositivos, devido à tolerância dos furos em relação ao diâmetro dos varões utilizados.

Ao lado dos diagramas força - deslocamento de cada conjunto de ciclos com a mesma amplitude (Figuras 4.46 a 4.51 a)) mostra-se a deformada mais significativa do dispositivo que ocorreu durante esse conjunto de ciclos (Figuras 4.46 a 4.51 b)). Na Figura 4.52 está representado o diagrama força - deslocamento com todos os ciclos efectuados até à rotura.

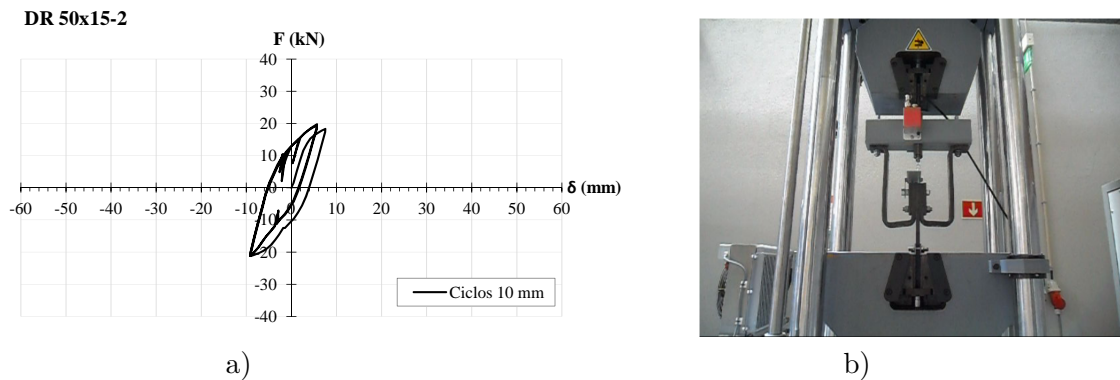


Figura 4.46: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 10 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 10 mm

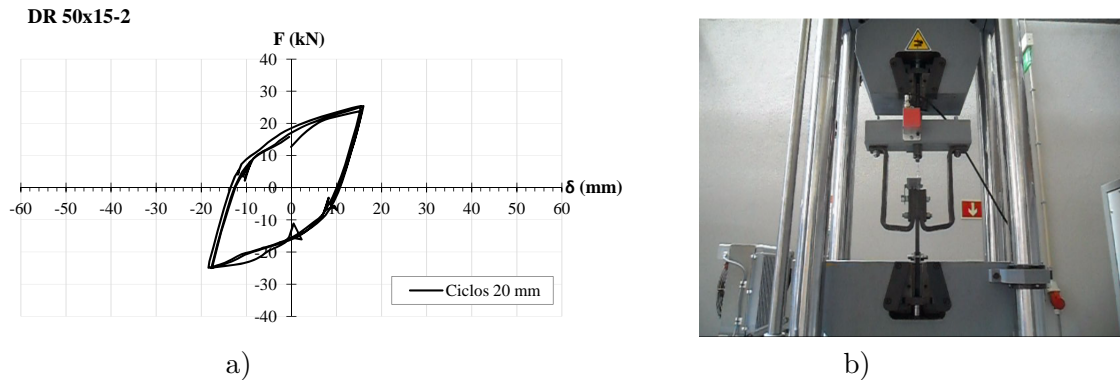


Figura 4.47: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 20 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 20 mm

## Capítulo 4. Apresentação de resultados dos ensaios

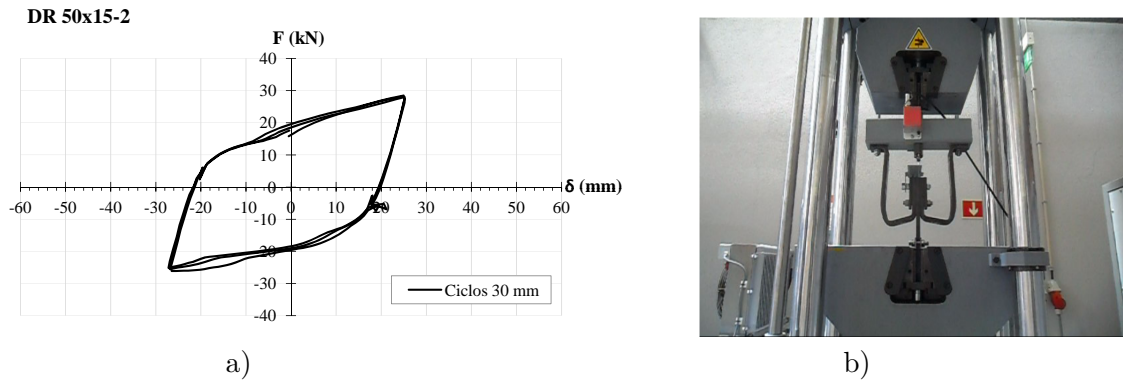


Figura 4.48: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 30 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 30 mm

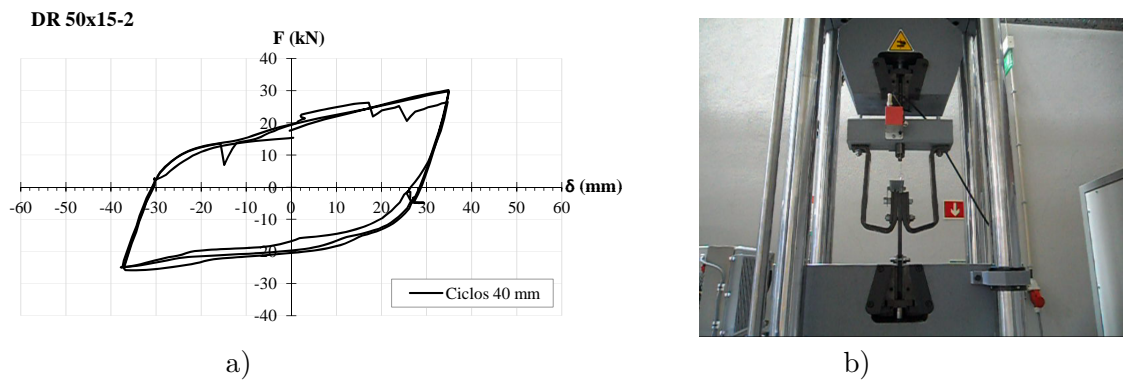


Figura 4.49: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 40 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo positivo nos ciclos de 40 mm

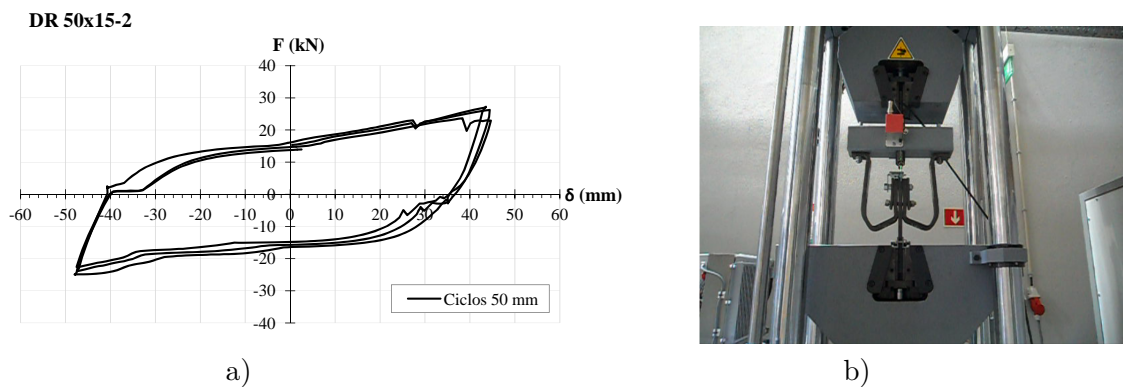


Figura 4.50: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 50 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos para deslocamento máximo negativo nos ciclos de 50 mm

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

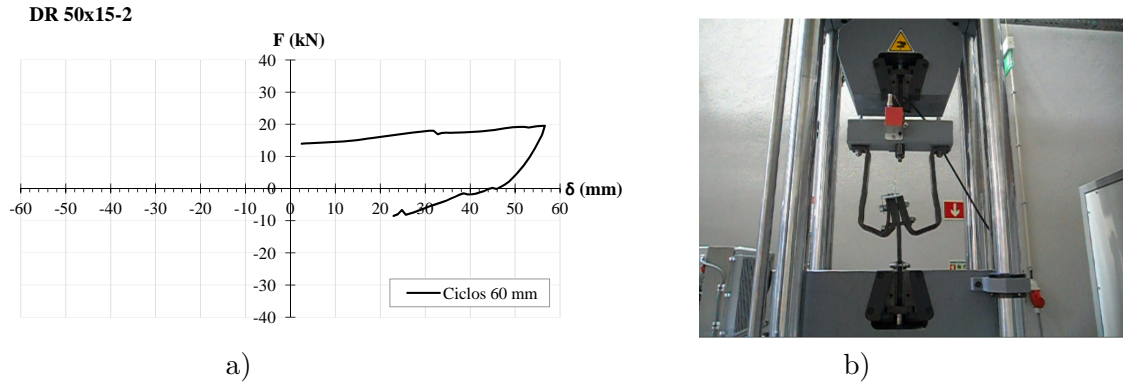


Figura 4.51: a) Diagrama força - deslocamento dos ciclos de 60 mm no modelo de DR 50x15-2, b) Deformada dos dispositivos quando a porca do varão inferior se soltou

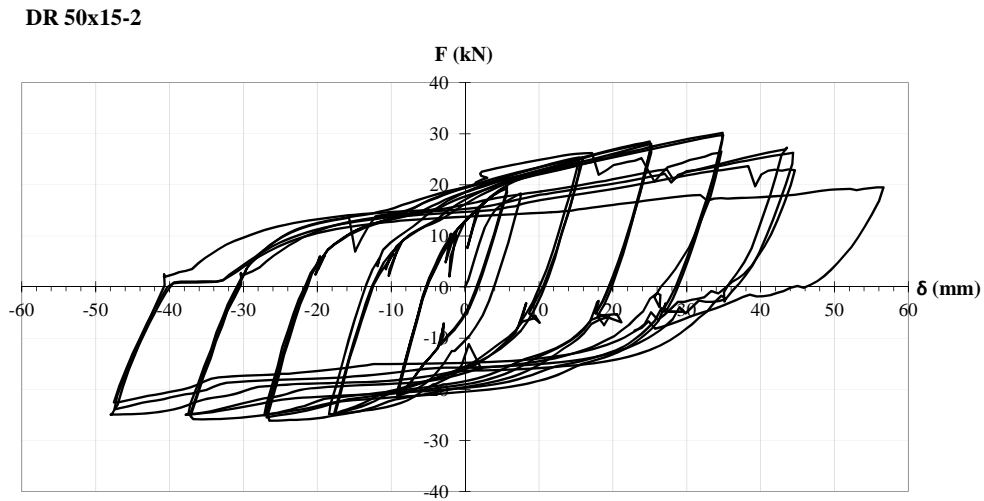


Figura 4.52: Diagrama força - deslocamento de todos os ciclos no modelo de DR 50x15-2

### 4.2.3 Modos de rotura dos dispositivos

#### Dispositivos DR 50x10-2

O dispositivo do lado esquerdo entrou em rotura quando estava quase a acabar o segundo ciclo de 50 mm. Na Figura 4.53 é possível visualizar o local em que se deu a rotura, imediatamente a seguir à chapa 50x10 que confere rigidez à zona de ligação dos dispositivos.



Figura 4.53: Rotura do dispositivo do lado esquerdo do modelo

#### Dispositivos DR 70x10-1

O modelo atingiu a rotura pelo dispositivo do lado direito do sistema de ensaio, quando estava quase a chegar ao deslocamento máximo positivo do primeiro ciclo de 50 mm. O local da rotura foi idêntico ao do primeiro ensaio, imediatamente a seguir à chapa 50x10 que confere rigidez à zona de ligação dos dispositivos, mas neste caso, para além da zona imediatamente abaixo da chapa ser uma zona crítica, houve também uma deformação bem visível, na Figura 4.54, em todo o esquema de ensaio que pode ter ajudado à rotura do dispositivo.

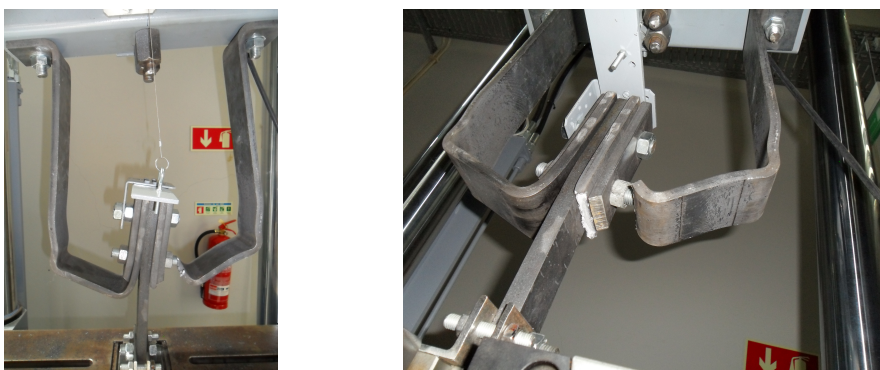


Figura 4.54: Rotura do dispositivo do lado direito do modelo e deformação de todo o esquema de ensaio

## 4.2. Ensaio dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia

### Dispositivos DR 70x10-2

O modelo atingiu a rotura pelo dispositivo situado no lado direito do sistema de ensaio, quando estava próximo de atingir o deslocamento máximo negativo do segundo ciclo de 50 mm. O valor do deslocamento na rotura não corresponde inteiramente ao valor real, pois também neste teste o sistema de ensaio se começou a deformar, portanto o fio do transdutor de deslocamentos deixou de estar numa posição completamente vertical. A zona da rotura, visível na Figura 4.55, situa-se a seguir à chapa 50x10 que confere rigidez à zona de ligação dos dispositivos, à semelhança do que aconteceu nos ensaios anteriores.

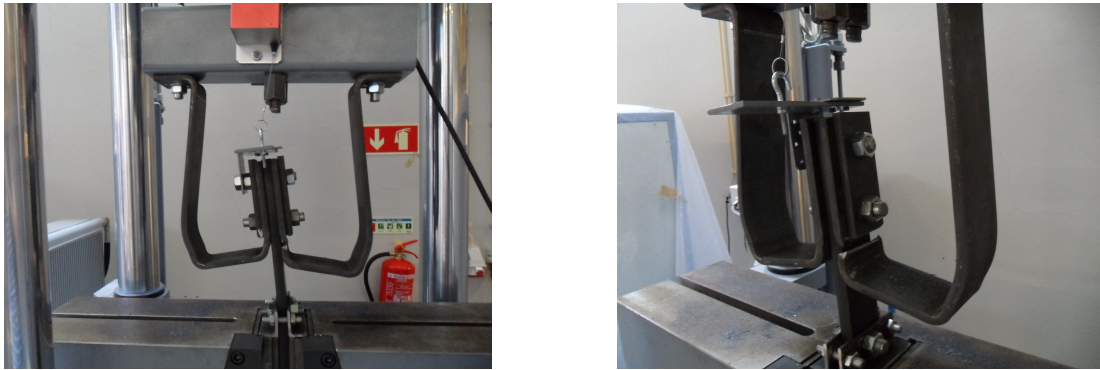


Figura 4.55: Rotura do dispositivo do lado direito do modelo e deformação de todo o esquema de ensaio

### Dispositivos DR 50x15-1

O modelo atingiu a rotura pelo dispositivo situado no lado direito do sistema de ensaio, pouco depois do início do terceiro ciclo de 50 mm. O valor do deslocamento na rotura não corresponde inteiramente ao valor real, pois também neste teste o sistema de ensaio se começou a deformar, portanto o fio do transdutor de deslocamentos deixou de estar numa posição completamente vertical. O varão inferior de ligação dos dispositivos ficou visivelmente encurvado (Figura 4.56), e a rotura do dispositivo deu-se pelo furo deste varão, nas imediações da extremidade da chapa de 50x10 (Figura 4.57).



Figura 4.56: Rotura do dispositivo do lado direito do modelo e encurvadura do varão inferior da ligação



Figura 4.57: Pormenor da rotura do dispositivo pelo furo do varão inferior da ligação

### Dispositivos DR 50x15-2

Observou-se que, durante o ensaio, as chapas de 50x10 mm não tiveram grande influência na rigidez da ligação pois deformaram-se solidariamente aos dispositivos, quando deviam impedir as deformações dos dispositivos naquela zona. Também se verificou que as porcas que apertavam o varão inferior começaram a ganhar folga nos ciclos de 30 mm.

Neste modelo, parou-se o ensaio não por algum dos dispositivos ter atingido totalmente a rotura, mas sim, pelo facto da porca do lado esquerdo do varão inferior se ter soltado (Figura 4.58 a)), depois de atingir o deslocamento máximo positivo do primeiro ciclo de 60 mm. A Figura 4.58 b) permite visualizar a encurvadura do varão inferior de ligação dos dispositivos e o início da rotura do dispositivo do lado esquerdo pelo furo deste varão.

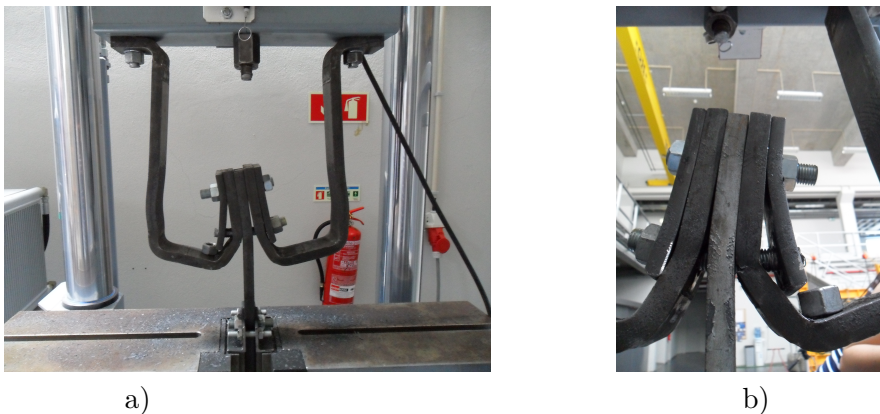


Figura 4.58: a) Deformada dos dispositivos com a porca esquerda do varão inferior solta (vista de frente), b) Pormenor do início da rotura do dispositivo do lado esquerdo (visto de trás)

## Capítulo 5

# Análise de resultados dos ensaios

Neste Capítulo procede-se a uma análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados. Para o primeiro tipo de ensaios, em que se testou o dispositivo de ligação está ao painel de fachada e ao pilar, será feita apenas uma análise qualitativa dos resultados. O segundo tipo de ensaios, nos quais se testaram apenas os dispositivos, permite uma análise mais completa. Partindo dos resultados obtidos em termos de valores de forças e deslocamentos, comparam-se parâmetros de resistência ( $F_y$  - força de cedência,  $F_{máx}$  - força máxima positiva e negativa e  $F_u$  - força de rotura) e de desempenho ( $W_d$  - energia dissipada por ciclo,  $W_{acum}$  - energia dissipada acumulada ao longo dos ciclos,  $\xi_{eq}$  - taxa de amortecimento viscoso equivalente,  $\mu_{\Delta}$  - ductilidade convencional e  $\mu_p$  - ductilidade plástica monotónica equivalente) dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia.

### 5.1 Ligação entre o painel de fachada e o elemento estrutural

Para estes ensaios, não se irá realizar uma análise em termos de forças e deslocamentos obtidos, dado a elevada oscilação detectada nos valores da força do ciclo completo (com amplitude média de 70 mm) desenvolvido por todos os dispositivos. Durante a fase do ciclo em que o deslocamento ocorre apenas num sentido, os valores da força deveriam apresentar-se crescentes ou decrescentes conforme o sentido do deslocamento, facto que não se verificou devido à oscilação. Este factor condicionou a fiabilidade dos resultados e por este motivo, apenas se irá comentar o comportamento dos elementos que constituem a ligação em termos qualitativos.

No que diz respeito às diferentes geometrias dos dispositivos, o melhor comportamento obteve-se com o dispositivo com a configuração circular - DC 50x5, que mostrou melhor capacidade de se deformar e de recuperar das deformações plásticas, visto que a sua forma deformada no final do ensaio não apresentava diferenças acentuadas relativamente à sua configuração indeformada. Comparativamente, o dispositivo DR 50x10-1 foi o que apresentou maiores deformações plásticas, estando este resultado relacionado com o facto de este dispositivo possuir o dobro da espessura dos outros dispositivos ensaiados.

Os elementos constituintes da ligação só exibiram sinais de deterioração no ensaio dos dispositivos DR 50x10-1. Neste ensaio, o perfil de inserção do painel de fachada começou a deformar-se na zona do parafuso. Como estes dispositivos apresentaram maiores deformações que os outros dispositivos testados, acabaram por atingir uma configuração deformada que os fazia roçar no painel de fachada, desgastando-o de forma a provocar a delaminação da camada superficial de betão junto ao perfil de inserção.

### 5.2 Dispositivos mecânicos dissipadores de energia

De modo a resumir o sucedido em cada ensaio realizado, apresenta-se no Quadro 5.1, para cada modelo de dispositivo, o sentido do deslocamento inicial ( $\delta_0$ ), o número, a amplitude máxima e a fase do ciclo em que ocorreu a rotura. Um ciclo completo divide-se em quatro fases, se começar com deslocamentos negativos, a primeira fase começa com  $\delta = 0$  e acaba no  $\delta_{máx}^-$ , a segunda fase começa com  $\delta_{máx}^-$  e acaba quando  $\delta = 0$ , a terceira fase começa com  $\delta = 0$  e acaba no  $\delta_{máx}^+$  e a quarta fase começa com  $\delta_{máx}^+$  e acaba quando  $\delta = 0$ .

Quadro 5.1: Resumo dos ciclos em que ocorreu a rotura dos dispositivos

Modelo de Dispositivos	Sentido do $\delta_0$	Amplitude Máx. Ciclo (mm)	N.º Ciclo Rotura	Fase do Ciclo na Rotura
DR 50x10-2	-	50	14	4ª Fase do Ciclo
DR 70x10-1	-	50	13	3ª Fase do Ciclo
DR 70x10-2	+	50	14	3ª Fase do Ciclo
DR 50x15-1	-	50	15	1ª Fase do Ciclo
DR 50x15-2	+	60	16	2ª Fase do Ciclo

Para proceder à análise dos resultados dos ensaios determinaram-se os parâmetros de resistência e de desempenho com base nos diagramas força - deslocamento dos ensaios elaborados.

#### 5.2.1 Força e deslocamento de cedência

A determinação da força e do deslocamento de cedência baseou-se na hipótese de que na fase inicial, o diagrama força - deslocamento se pode aproximar a um diagrama equivalente composto por um troço inicial elástico linear e por um outro troço linear correspondente ao endurecimento do aço, conforme se pode observar na Figura 5.1.

O deslocamento de cedência é dado pela intersecção do troço elástico inicial, de rigidez  $k_0$ , com o troço com endurecimento em tracção ou com o troço com endurecimento em compressão, conforme o ciclo inicial comece em tracção (expressão (5.1)) ou compressão (expressão (5.2)). A força de cedência é calculada pela expressão (5.3).

$$\delta_y = \frac{F_2}{k_0 - k_2} \quad (5.1)$$

$$\delta_y = \frac{F_3}{k_0 - k_3} \quad (5.2)$$

## 5.2. Dispositivos mecânicos dissipadores de energia

$$F_y = k_0 \times \delta_y \quad (5.3)$$

Os parâmetros que permitem definir os troços do diagrama equivalente são, no caso do troço elástico inicial, a rigidez  $k_0$ , no troço com endurecimento em tracção, a rigidez  $k_2$  e a força quando o deslocamento é nulo  $F_2$ , e no caso do troço com endurecimento em compressão, a rigidez  $k_3$  e a força quando o deslocamento é nulo  $F_3$ .

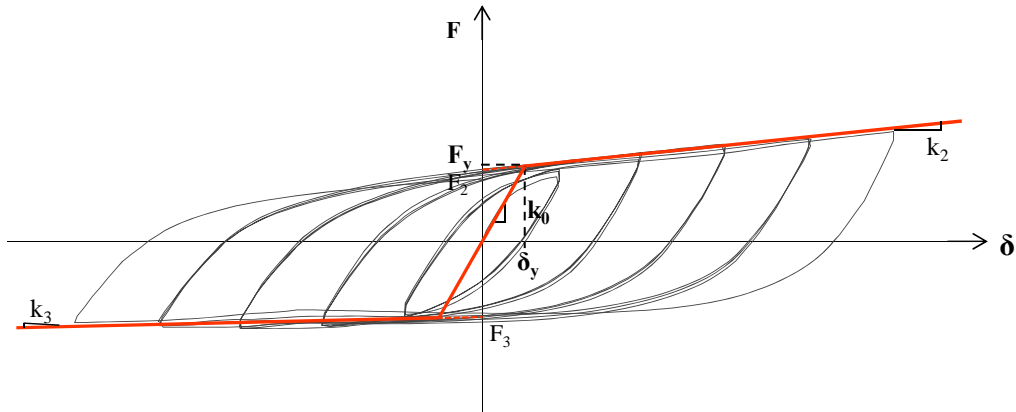


Figura 5.1: Esquema para determinação da força e deslocamento de cedência

A rigidez  $k_0$  obteve-se através do declive de uma recta secante ao troço inicial (que começa na origem do diagrama e acaba a 70% do ponto de deslocamento máximo absoluto do primeiro ciclo). As rigidezes  $k_2$  e  $k_3$  foram calculadas pelo declive da envolvente criada pelos pontos de deslocamento máximo positivo e negativo de cada ciclo, respectivamente, contando como último ciclo, o que não apresente perdas de energia significativas relativamente ao ciclo subsequente.

A força e o deslocamento de cedência, bem como os respectivos parâmetros de cálculo encontram-se indicados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2: Força e deslocamento de cedência e respectivos parâmetros de cálculo

Dispositivos	50x10-2	70x10-1	70x10-2	50x15-1	50x15-2	Observações
$k_0$ (kN/mm)	1,100	2,000	2,100	3,800	4,400	rigidez inicial elástica
$k_2$ (kN/mm)	0,145	0,229	0,167	0,262	0,308	rigidez pós-cedência
$F_2$ (kN)	9,4	12,1	11,3	19,5	19,2	força ( $\delta = 0$ ) (T)
$k_3$ (kN/mm)	0,042	0,005	0,039	0,125	0,132	rigidez pós-cedência
$F_3$ (kN)	-9,8	-14,6	-13,1	-21,0	-21,2	força ( $\delta = 0$ ) (C)
$F_y$ (kN)	-10,2	-14,6	12,3	-21,7	20,6	força de cedência
$\delta_y$ (mm)	-9,3	-7,3	5,8	-5,7	4,7	desloc. de cedência

### 5.2.2 Energia dissipada

Como o diagrama força - deslocamento dos dispositivos ensaiados apresenta um comportamento histerético, um dos parâmetros de desempenho mais importantes para proceder à análise de resultados é a energia dissipada em cada ciclo pelos dispositivos. Para calcular a energia dissipada em cada ciclo calculou-se a área circunscrita pela envolvente do diagrama força - deslocamento desse ciclo.

O Quadro 5.3 apresenta os valores da energia dissipada por cada ciclo desenvolvido pelos dispositivos mecânicos -  $W_d$  e da energia dissipada acumulada ao longo de todos os ciclos desempenhados pelos dispositivos -  $W_{acum}$ . A Figura 5.2 apresenta a evolução da energia dissipada por ciclo para cada dispositivo e a Figura 5.3 permite comparar a evolução da energia dissipada por ciclo dos diferentes dispositivos. A Figura 5.4 compara a energia dissipada em cada conjunto de 3 ciclos de igual amplitude para cada dispositivo. A Figura 5.5 compara a energia dissipada acumulada em todos os ciclos nos dispositivos mecânicos dissipadores de energia.

Quadro 5.3: Energia dissipada em todos os ciclos exercidos pelos dispositivos

Modelo de Dispositivos		DR 50x10-2		DR 70x10-1		DR 70x10-2		DR 50x15-1		DR 50x15-2	
		$W_d$	$W_{acum}$	$W_d$	$W_{acum}$	$W_d$	$W_{acum}$	$W_d$	$W_{acum}$	$W_d$	$W_{acum}$
		kNm		kNm		kNm		kNm		kNm	
10 mm	1º Ciclo	0,10	0,10	0,08	0,08	0,17	0,17	0,12	0,12	0,24	0,24
	2º Ciclo	0,11	0,21	0,10	0,17	0,18	0,35	0,13	0,25	0,19	0,43
	3º Ciclo	0,11	0,32	0,08	0,26	0,17	0,52	0,13	0,38	0,18	0,61
20 mm	1º Ciclo	0,44	0,76	0,47	0,73	0,61	1,13	0,71	1,08	0,88	1,49
	2º Ciclo	0,43	1,20	0,47	1,21	0,61	1,74	0,77	1,85	0,82	2,31
	3º Ciclo	0,42	1,62	0,47	1,68	0,60	2,33	0,77	2,62	0,80	3,11
30 mm	1º Ciclo	0,84	2,46	1,00	2,68	1,13	3,46	1,57	4,19	1,63	4,74
	2º Ciclo	0,83	3,29	1,01	3,69	1,11	4,57	1,54	5,72	1,58	6,32
	3º Ciclo	0,81	4,10	0,99	4,68	1,09	5,66	1,49	7,22	1,54	7,86
40 mm	1º Ciclo	1,27	5,37	1,58	6,25	1,64	7,30	2,33	9,55	2,34	10,20
	2º Ciclo	1,23	6,61	1,51	7,76	1,59	8,89	2,25	11,79	2,31	12,51
	3º Ciclo	1,18	7,79	1,34	9,10	1,53	10,43	2,15	13,94	2,09	14,60
50 mm	1º Ciclo	1,54	9,33	1,08	<b>10,18</b>	1,98	12,40	2,97	16,91	2,62	17,22
	2º Ciclo	0,92	<b>10,25</b>			1,29	<b>13,69</b>	2,71	19,62	2,45	19,67
	3º Ciclo							0,55	<b>20,16</b>	2,24	21,91
60 mm	1º Ciclo									0,97	<b>22,88</b>

## 5.2. Dispositivos mecânicos dissipadores de energia

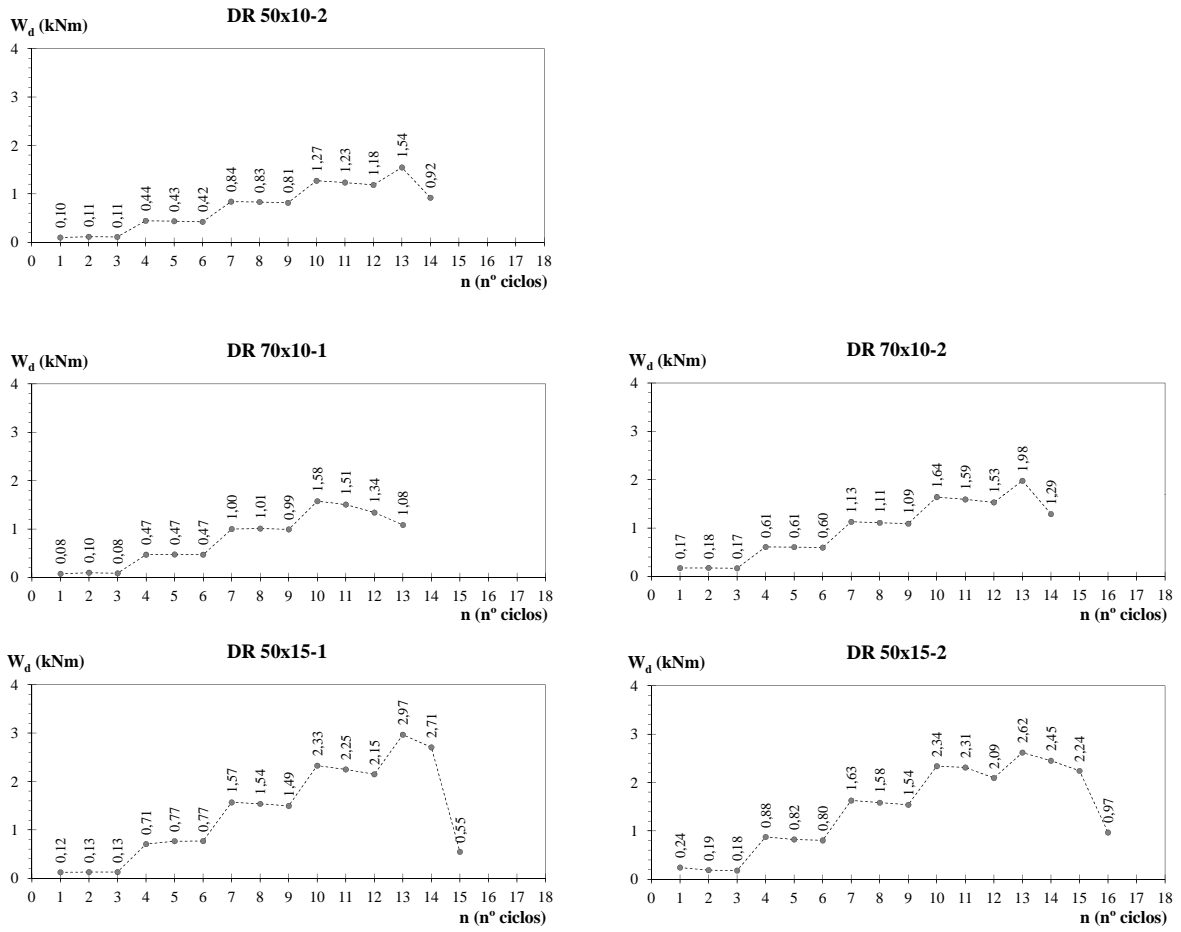


Figura 5.2: Energia dissipada por ciclo,  $W_d$ , em cada dispositivo

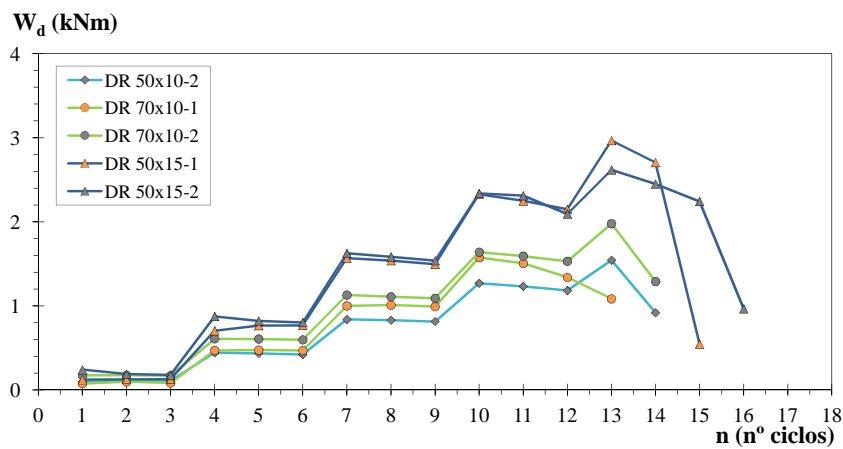


Figura 5.3: Energia dissipada por ciclo,  $W_d$ , em todos os dispositivos

## Capítulo 5. Análise de resultados dos ensaios

As Figuras 5.2 e 5.3 permitem constatar, na maioria dos casos, uma maior dissipação de energia no primeiro ciclo de cada amplitude de deslocamentos diferente. Esta ocorrência deve-se ao facto de que quando se varia de uma amplitude de deslocamentos mais baixa para uma mais elevada, as deformações instaladas nos dispositivos aumentam consideravelmente em relação às deformações verificadas de um ciclo para o outro de igual amplitude, e resultam numa maior dissipação de energia.

Outra informação importante que se pode retirar dos diagramas da Figura 5.2, prende-se com o ciclo em que a dissipação de energia decresce de forma notável relativamente ao ciclo anterior de mesma amplitude, e que significa, teoricamente, que o dispositivo está em vias de atingir a rotura (mesmo que a rotura do dispositivo só se verifique nos ciclos posteriores). Com estes dados, podem-se indicar em que ciclo, para cada conjunto de dispositivos, se verifica a força e o deslocamento de rotura. Para os dispositivos DR 50x10-2 o último ciclo desenvolvido é  $n = 13$ , para os dispositivos DR 70x10-1 é  $n = 10$ , para os dispositivos DR 70x10-2 é  $n = 13$ , para os dispositivos DR 50x15-1 é  $n = 12$ , e para os dispositivos DR 50x15-2 é  $n = 11$ .

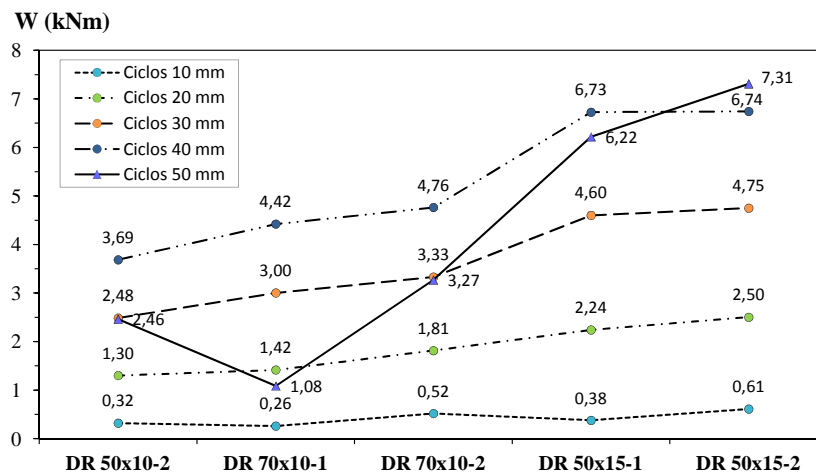


Figura 5.4: Diagrama da energia dissipada em cada conjunto de 3 ciclos de igual amplitude

Na Figura 5.4 é possível visualizar o andamento da energia dissipada a cada 3 ciclos de igual amplitude, que deveria ser constante para os conjuntos de dispositivos com a mesma secção e crescente dos dispositivos de menor secção para os dispositivos de maior secção. Para os ciclos até 40 mm de amplitude, esta condição é verificada, excepto para os ciclos de 10 mm dos dispositivos DR 70x10-1 e DR 50x15-1, devido ao facto de não terem começado o ensaio com uma configuração indeformada. Para os ciclos de 50 mm a energia dissipada decresce abruptamente em todos os dispositivos (excepto nos dispositivos DR 50x15-2), pois atingiram a rotura antes de completarem o conjunto dos 3 ciclos.

## 5.2. Dispositivos mecânicos dissipadores de energia

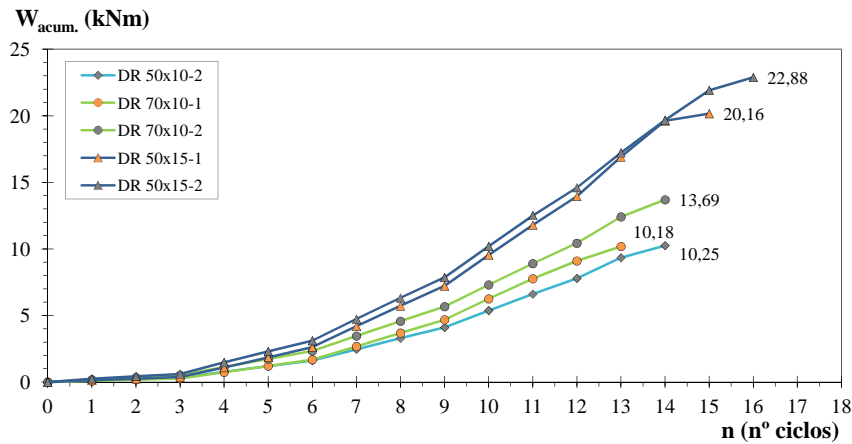


Figura 5.5: Energia dissipada acumulada em todos os ciclos,  $W_{acum.}$ , em todos os dispositivos

Na Figura 5.5 está representado o andamento da energia dissipada acumulada para os vários dispositivos, e o seu valor total, que se apresenta crescente dos dispositivos de menor secção para os dispositivos de maior secção, exceptuando o caso dos dispositivos DR 70x10-1, devido a ter desempenhado alguns ciclos de deslocamentos antes de começar o ensaio e ter atingido a rotura um ciclo antes dos dispositivos DR 70x10-2.

Uma outra constatação clara que ressalta da Figura 5.5 é a de que os dispositivos DR 50x15 acabam por dissipar cerca do dobro da energia dissipada pelos dispositivos DR 50x10 quando apresentam apenas um acréscimo de 50% da área desses dispositivos. Por outro lado, constata-se que o incremento de espessura de 10 mm para 15 mm e consequente aumento de inércia da barra do dispositivo (DR 50x15) é bastante mais eficiente em termos de dissipação de energia do que um incremento quase equivalente em termos de área mas mantendo a mesma espessura (DR 70x10).

### 5.2.3 Taxa de amortecimento viscoso equivalente

Segundo Chastre Rodrigues [28], a taxa de amortecimento viscoso equivalente é um parâmetro que se pode obter em cada nível de desempenho. Neste caso, como os dispositivos apresentam uma resposta não simétrica nas duas direcções de carga devido à sua geometria, o amortecimento hysterético ou energia dissipada em cada ciclo, encontra-se representado pelas áreas,  $W_{d1}$  e  $W_{d2}$ , na Figura 5.6 para um ciclo completo força - deslocamento. De acordo com Priestley et al. [24], o amortecimento hysterético, para deslocamentos com a mesma amplitude, pode ser convertido numa taxa de amortecimento viscoso equivalente:

$$\xi_{eq} = \frac{\xi_{eq1} + \xi_{eq2}}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{2W_{d1}}{4\pi W_{s1}} + \frac{2W_{d2}}{4\pi W_{s2}} \right) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{W_{d1}}{W_{s1}} + \frac{W_{d2}}{W_{s2}} \right) \quad (5.4)$$

## Capítulo 5. Análise de resultados dos ensaios

Em que as áreas,  $W_{s1}$  e  $W_{s2}$ , representam a energia de deformação elástica armazenada num sistema elástico e linear equivalente, actuando monotonicamente.

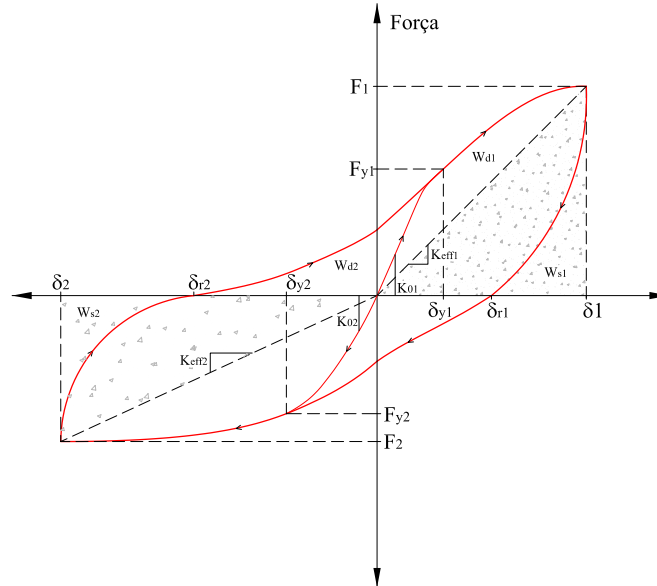


Figura 5.6: Taxa de amortecimento viscoso equivalente,  $\xi_{eq}$ , de ciclos histeréticos não simétricos [28]

O Quadro 5.4 e a Figura 5.7 mostram a taxa de amortecimento viscoso equivalente,  $\xi_{eq}$ , por ciclo, para cada dispositivo.

Quadro 5.4: Taxa de amortecimento viscoso equivalente,  $\xi_{eq}$ , por ciclo, para cada dispositivo

Modelo de Dispositivos		DR 50x10-2	DR 70x10-1	DR 70x10-2	DR 50x15-1	DR 50x15-2
		$\xi_{eq}$ %	$\xi_{eq}$ %	$\xi_{eq}$ %	$\xi_{eq}$ %	$\xi_{eq}$ %
10 mm	1º Ciclo	19,7	13,4	25,4	15,8	22,9
	2º Ciclo	21,8	15,2	24,3	15,9	19,5
	3º Ciclo	20,8	13,5	22,9	15,9	18,4
20 mm	1º Ciclo	34,3	25,6	36,1	27,3	33,4
	2º Ciclo	32,4	26,0	34,6	30,0	31,3
	3º Ciclo	29,9	26,2	33,6	29,7	30,4
30 mm	1º Ciclo	37,9	32,0	41,5	35,4	37,4
	2º Ciclo	37,3	32,7	38,3	34,9	36,1
	3º Ciclo	36,6	32,7	37,8	34,2	35,3
40 mm	1º Ciclo	39,7	36,5	41,2	37,3	37,5
	2º Ciclo	39,3	36,3	40,4	36,7	37,3
	3º Ciclo	40,4	<b>36,2</b>	39,9	37,0	35,8
50 mm	1º Ciclo	<b>42,8</b>		<b>39,1</b>	37,3	35,0
	2º Ciclo				<b>37,4</b>	33,9
	3º Ciclo					<b>34,1</b>

## 5.2. Dispositivos mecânicos dissipadores de energia

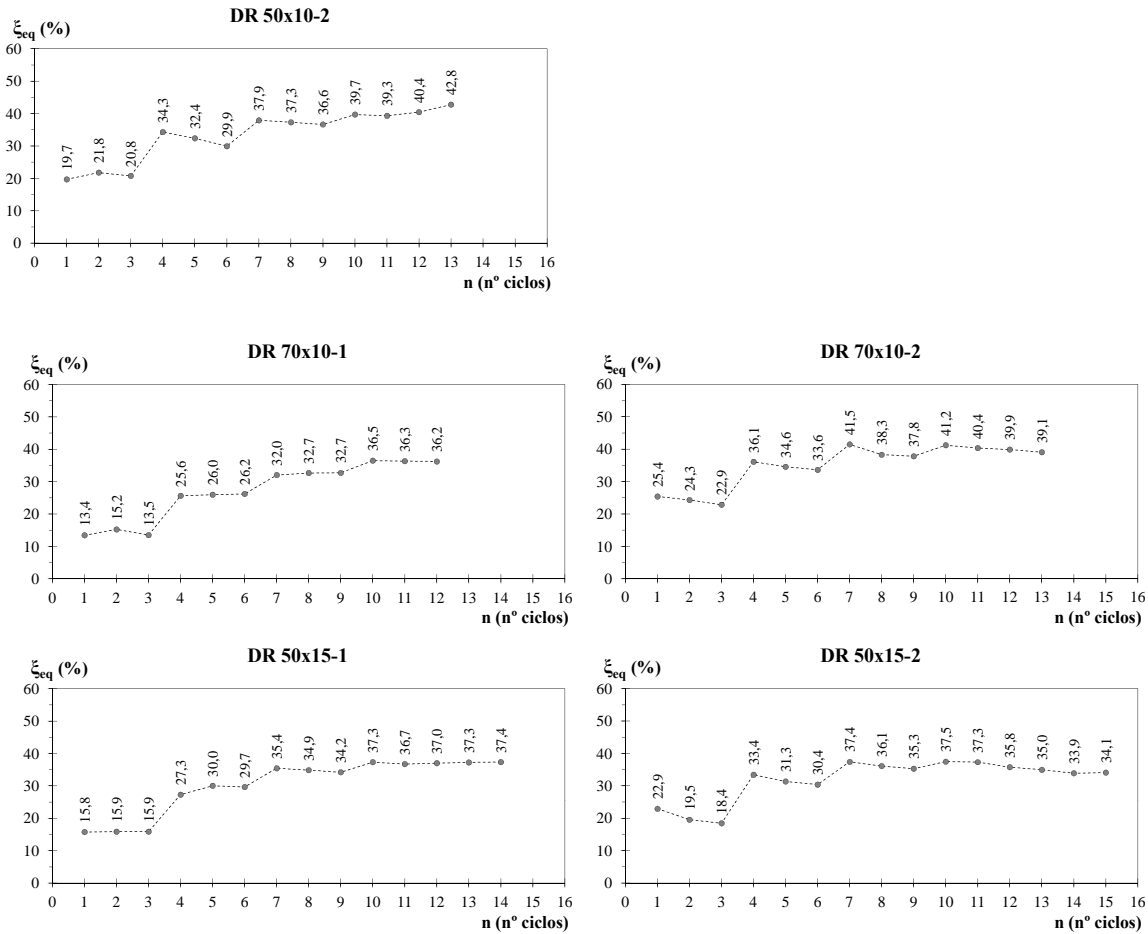


Figura 5.7: Taxa de amortecimento viscoso equivalente,  $\xi_{eq}$ , por ciclo, para cada dispositivo

Analisando o Quadro 5.4, verifica-se que a taxa de amortecimento viscoso equivalente apresenta valores mais elevados para os dispositivos de menor secção.

Pela apreciação dos diagramas da Figura 5.7, é notório que o crescimento da taxa de amortecimento viscoso equivalente mais evidente acontece do patamar dos ciclos de 10 mm de amplitude para o patamar dos ciclos de 20 mm de amplitude, seguida da taxa deste patamar para o patamar dos 30 mm de amplitude. A partir dos ciclos com 30 mm de amplitude o andamento do amortecimento viscoso não apresenta grandes variações.

### 5.2.4 Ductilidade em deslocamento

#### Ductilidade em deslocamento convencional

O coeficiente de ductilidade em deslocamento,  $\mu_{\Delta}$ , é um dos parâmetros de desempenho utilizados nesta análise de resultados, e está representado no Quadro 5.5. O coeficiente de ductilidade é definido pela expressão (5.5) como sendo a razão entre o deslocamento máximo realizado no ensaio,  $\delta_{m\acute{a}x}$ , e o deslocamento de cedência,  $\delta_y$ .

$$\mu_{\Delta} = \frac{\delta_{m\acute{a}x}}{\delta_y} \quad (5.5)$$

#### Ductilidade plástica monotónica equivalente

A ductilidade convencional fornece informação limitada no caso dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia, porque negligencia dados importantes como o número de ciclos descritos e a energia dissipada pelos dispositivos. McCabe and Hall [12] desenvolveram uma expressão que permite calcular a ductilidade plástica monotónica equivalente,  $\mu_p$ , para um sistema sujeito a ciclos de carga arbitrários. Esta ductilidade equivale à ductilidade máxima plástica que o sistema apresenta num ensaio monotónico, em que se dissipe a mesma quantidade de energia que se dissipa durante as acções cíclicas. A ductilidade plástica monotónica equivalente é dada pela expressão:

$$\mu_p = \frac{W_t}{F_y \delta_y (2N_f)^{0,4}} \quad (5.6)$$

Onde  $W_t$  corresponde à energia total dissipada no sistema durante  $N_f$  ciclos de carga, e  $F_y$  e  $\delta_y$  representam a força e o deslocamento de cedência do sistema. Os valores da ductilidade equivalente monotónica estão representados no Quadro 5.5.

## 5.2. Dispositivos mecânicos dissipadores de energia

### 5.2.5 Análise dos resultados

Para completar a lista de parâmetros que permitem definir os troços envolventes do diagrama força - deslocamento dos dispositivos, determinaram-se as rigidezes  $k_1$ , do troço elástico de descarga que começa em tracção, e  $k_4$ , do troço elástico de descarga que começa em compressão, através da média das rigidezes secantes observadas para cada ciclo.

Estabeleceu-se o critério de rotura, presente na expressão (5.7). A força de rotura,  $F_u$ , é dada pelo máximo absoluto das forças registadas no último ciclo, cuja força máxima obedeça ao critério de rotura. O deslocamento de rotura,  $\delta_u$ , é dado pelo máximo absoluto dos deslocamentos presentes no último ciclo que obedeça ao critério de rotura.

$$F_u \geq 0,85F_{m\acute{a}x} \quad (5.7)$$

As forças máximas positiva e negativa,  $F_{m\acute{a}x}^+$  e  $F_{m\acute{a}x}^-$ , correspondem aos valores máximo e mínimo das forças registadas ao longo de todos os ciclos desenvolvidos pelos dispositivos em cada ensaio. Os deslocamentos máximos positivo e negativo,  $\delta_{m\acute{a}x}^+$  e  $\delta_{m\acute{a}x}^-$ , correspondem aos valores máximo e mínimo dos deslocamentos registados ao longo de todos os ciclos desenvolvidos pelos dispositivos em cada ensaio.

Quadro 5.5: Resumo dos parâmetros de resistência e de desempenho dos ensaios

Dispositivos	50x10-2	70x10-1	70x10-2	50x15-1	50x15-2	Observações
$k_0$ (kN/mm)	1,100	2,000	2,100	3,800	4,400	rigidez inicial elástica
$k_1$ (kN/mm)	1,700	2,000	2,200	4,100	4,300	rigidez elástica
$k_2$ (kN/mm)	0,145	0,229	0,167	0,262	0,308	rigidez pós-cedência
$F_2$ (kN)	9,4	12,1	11,3	19,5	19,2	força ( $\delta = 0$ )
$k_3$ (kN/mm)	0,042	0,005	0,039	0,125	0,132	rigidez pós-cedência
$F_3$ (kN)	-9,8	-14,6	-13,1	-21,0	-21,2	força ( $\delta = 0$ )
$k_4$ (kN/mm)	1,200	1,750	1,800	3,800	4,200	rigidez elástica
$F_y$ (kN)	-10,2	-14,6	12,3	-21,7	20,6	força de cedência
$F_u$ (kN)	15,8	21,3	18,9	31,0	30,2	força de rotura
$F_u/F_y$	1,55	1,46	1,54	1,43	1,47	
$F_{m\acute{a}x}^+$ (kN)	15,8	21,3	18,9	31,0	30,2	força máx. positiva
$F_{m\acute{a}x}^-$ (kN)	-11,7	-15,5	-15,0	-25,9	-26,1	força máx. negativa
$\delta_y$ (mm)	-9,3	-7,3	5,8	-5,7	4,7	desloc. de cedência
$\delta_u$ (mm)	48,9	-39,6	49,4	36,6	-37,5	desloc. de rotura
$\delta_{m\acute{a}x}^+$ (mm)	48,9	40,4	50,4	46,2	56,6	desloc. máx. positivo
$\delta_{m\acute{a}x}^-$ (mm)	-48,7	-49,3	-49,1	-44,3	-48,0	desloc. máx. negativo
$\mu_\Delta$	5,3	6,8	8,7	8,1	12,0	ductilidade convencional
$\mu_p$	21,6	20,0	38,8	32,5	45,3	ductilidade plástica monotónica equivalente
$W_{acum}$ (kNm)	10,3	10,2	13,6	20,1	22,9	energia dissipada máx.
$\xi_{eq}$ (%)	42,8	36,2	39,1	37,4	34,1	taxa de amortecimento viscoso equivalente

## Capítulo 5. Análise de resultados dos ensaios

---

No Quadro 5.5, apresenta-se um resumo dos valores para os vários parâmetros calculados de modo a poder efectuar a análise dos resultados obtidos nos ensaios.

A força de cedência obtida para cada modelo de dispositivos apresenta valores coerentes com as dimensões da secção dos dispositivos, isto é, quanto maior a área da secção do dispositivo ou a sua espessura, maior é a sua força de cedência.

O valor da força de cedência dos dispositivos DR 70x10-1, pode estar ligeiramente desfasado do real, porque os dispositivos não começaram este ensaio com uma configuração indeformada, apresentando-se ligeiramente mais abaixo da posição inicial (deformada de tracção). Como este ensaio começou no sentido de deslocamento negativo (em compressão) foi necessária uma força maior em compressão para produzir o deslocamento inicial até à amplitude máxima deste ciclo.

A espessura da barra que constitui o dispositivo revela-se mais determinante para o valor da força de cedência do que a área da sua secção. Entre os dispositivos de igual espessura, DR 50x10 e DR 70x10, o aumento da área da secção é de 40%, e o aumento em termos de força de cedência ronda os 30%. Entre os dispositivos DR 70x10 e os dispositivos DR 50x15, em que há um aumento de espessura de 50%, o aumento da área da secção é menor que 10%, mas o aumento em termos de força de cedência ronda os 60%.

Em relação à força de rotura verifica-se o mesmo facto, isto é, a força de rotura apresenta um aumento de cerca de 95% dos dispositivos DR 50x10 para os DR 50x15, e de 50% dos dispositivos DR 70x10 para os DR 50x15, mas apresenta um aumento de apenas 25% dos dispositivos DR 50x10 para os DR 70x10. Portanto, a espessura da barra dos dispositivos condiciona mais o seu comportamento que a área da sua secção.

O rácio entre a força de rotura e a força de cedência, para os vários dispositivos, exhibe valores muito semelhantes, notando-se um ligeiro decréscimo desses valores para os dispositivos DR 50x15.

Os valores da força máxima positiva são sempre maiores (em módulo) que os da força máxima negativa, porque os diagramas histeréticos de força - deslocamento dos dispositivos revelam um maior endurecimento no troço em tracção do que no troço em compressão, como também se pode verificar pelo facto do valor da rigidez pós cedência em tracção,  $k_2$ , ser bastante mais elevado que o valor da rigidez pós cedência em compressão,  $k_3$ .

## 5.2. Dispositivos mecânicos dissipadores de energia

---

Os deslocamentos de rotura que manifestam maior diferença em relação aos deslocamentos máximos ocorrem para os dispositivos DR 50x15, que apresentam perdas significativas de energia a partir, sensivelmente, do final do conjunto de ciclos de 40 mm de amplitude.

Os deslocamentos máximos atingidos por cada conjunto de dispositivos apresentam valores muito semelhantes, sendo num dos ciclos de 50 mm de amplitude que todos os dispositivos ensaiados atingiram a rotura, com a excepção dos dispositivos DR 50x15-2, em que se terminou o ensaio no primeiro ciclo de 60 mm. Como este resultado foi constante conclui-se que a deformação que o dispositivo apresenta para estes valores de deslocamento é condicionante em termos da rotura.

Em relação à análise da ductilidade dos dispositivos, constata-se que os dispositivos DR 70x10-1 e DR 50x15-1 apresentam valores pouco coerentes em relação aos seus pares, estando este facto relacionado com o iniciar do ensaio destes dispositivos numa configuração indeformada, isto é, com tensões instaladas. Observando o Quadro 5.5, verifica-se que tanto a ductilidade convencional como a ductilidade plástica monotónica equivalente variam essencialmente com a área da secção transversal do dispositivo e não tanto apenas pela espessura da barra, constatando-se que quanto maior é a área da secção transversal da barra, maior é a ductilidade do dispositivo. A ductilidade plástica monotónica equivalente apresenta valores muito superiores à ductilidade convencional porque tem em conta a repetição e o faseamento dos ciclos por amplitudes diferentes, através da energia total dissipada e do número de ciclos de carga.



## Capítulo 6

# Modelo numérico multi-linear do comportamento histerético dos dispositivos dissipadores de energia

Neste Capítulo propõe-se um modelo multi-linear do comportamento histerético dos dispositivos dissipadores de energia baseado nas relações constitutivas do aço e na geometria dos dispositivos. Para tal, começa-se por estimar a força de cedência a utilizar no modelo e em seguida apresentam-se as relações constitutivas do modelo e os seus parâmetros definidores. Por fim, faz-se uma simulação dos ensaios com o modelo multi-linear proposto e comparam-se os resultados da simulação com os resultados dos ensaios experimentais.

### 6.1 Estimativa da força de cedência

Assumindo para o aço um comportamento elástico-plástico perfeito, o momento plástico ( $M_{pl}$ ) calculado através da secção transversal da barra é dado por:

$$M_{pl} = \frac{f_y \times b \times t^2}{4} \quad (6.1)$$

Em que  $f_y$  é a tensão de cedência,  $b$  a largura e  $t$  a espessura da secção transversal da barra.

O valor aproximado da força de cedência ( $F_y^*$ ) pode ser calculado utilizando o método da análise plástica.

## Capítulo 6. Modelo numérico multi-linear do comportamento hysterético dos dispositivos dissipadores de energia

A Figura 6.1 mostra o mecanismo parcial do dispositivo considerado para a obtenção da força, o qual verifica a condição de mecanismo, a condição de equilíbrio e a condição de cedência. Admitem-se neste modelo de cálculo, a formação de duas rótulas plásticas nas zonas de dobragem do dispositivo, e as condições de apoio são dadas por um encastramento numa extremidade do dispositivo (a que se fixou ao perfil SHS 100) e dois apoios móveis (rotulados) na zona de ligação dos dispositivos, correspondentes aos varões roscados.

Considera-se a simplificação de que as barras são indeformáveis até à cedência, porque apesar das barras verticais do dispositivo deformarem aquando dos deslocamentos impostos, e esta situação consistir num problema mais complexo de estabilidade, essas deformações são tão reduzidas que podem ser negligenciadas.

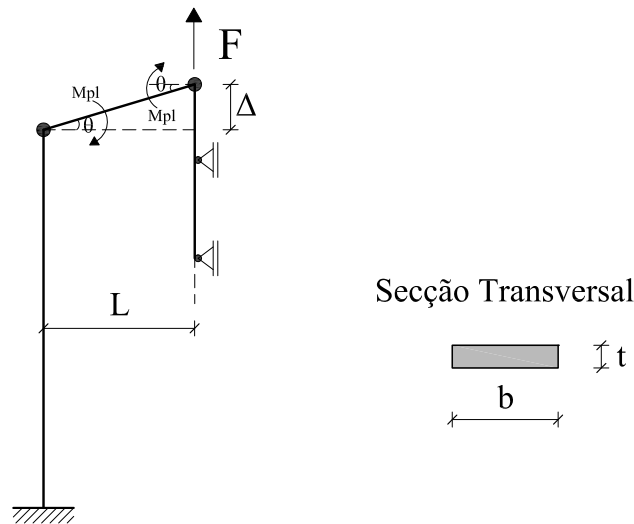


Figura 6.1: Mecanismo parcial de colapso do dispositivo e secção transversal da barra

Utilizando o princípio dos trabalhos virtuais (PTV), começa-se por determinar o trabalho interno ( $W_{int}$ ) e externo ( $W_{ext}$ ), em que:

$$W_{int} = 2 \theta M_{pl} \quad (6.2)$$

$$W_{ext} = L \theta F_y^* \quad (6.3)$$

Sendo  $\theta$  o ângulo de rotação,  $M_{pl}$  o momento plástico da secção,  $F_y^*$  a força aplicada que provoca a cedência e  $L$  o comprimento efectivo da barra horizontal do dispositivo, que é dado por:

$$L = 0,8 \times L_0 \quad (6.4)$$

Onde  $L_0$  representa o afastamento entre as linhas médias das barras laterais.

Igualando o trabalho interno ao trabalho externo, vem:

$$W_{int} = W_{ext} \quad (6.5)$$

Substituindo-se as expressões (6.2) e (6.3) na expressão (6.5), e resolvendo obtém-se o valor da força de cedência aproximada:

$$F_y^* = \frac{2M_{pl}}{L} \quad (6.6)$$

O momento plástico ( $M_{pl}$ ) calculado através da secção transversal da barra é dado pela expressão (6.1).

Por fim, substituindo a expressão (6.1) na expressão (6.6), obtém-se a força de cedência aproximada:

$$F_y^* = \frac{f_y \times b \times t^2}{2L} \quad (6.7)$$

## 6.2 Proposta de modelo numérico multi-linear de comportamento hysterético

### 6.2.1 Modelo multi-linear

Os diagramas força - deslocamento dos ensaios dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia apresentam um comportamento hysterético que pode ser aproximado a um modelo numérico multi-linear. O modelo elaborado consiste numa variante de um modelo elasto - plástico, que tem em conta o endurecimento do aço após a cedência, mas não tem em consideração o efeito de *Bauschinger* nem o endurecimento cíclico isotrópico (aumento da resistência que se verifica após a inversão da acção), pelo que conduz a resultados menos exactos que os observados experimentalmente, mas aceitáveis para um modelo de simples aplicação e rapidez de cálculo.

Os parâmetros que permitem definir o modelo numérico multi-linear são calculados com base nas propriedades resistentes e dimensões da barra de aço que constitui o dispositivo e na geometria do dispositivo.

Na Figura 6.2 estão esquematizados o modelo multi-linear desenvolvido e os parâmetros que o definem. O troço inicial elástico apresenta uma rigidez  $k_0$ , o troço de descarga com início em tracção tem rigidez  $k_1$ , e o troço de descarga com início em compressão apresenta uma rigidez  $k_4$ . A rigidez do troço com endurecimento (regime plástico) se o dispositivo de aço está em tracção representa-se por  $k_2$ , e se o dispositivo de aço estiver em compressão representa-se por  $k_3$ . Estão também esquematizados neste diagrama a força de cedência -  $F_y$ , a força de rotura -  $F_u$ , correspondente ao último ciclo desenvolvido sem perdas de energia significativas relativamente ao anterior, e os deslocamentos correspondentes, respectivamente, o deslocamento de cedência -  $\delta_y$  e o deslocamento de rotura -  $\delta_u$ .

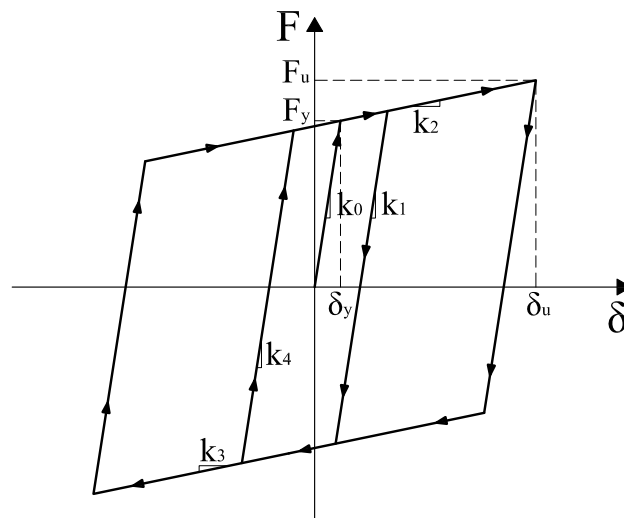


Figura 6.2: Modelo multi-linear do comportamento hysterético dos dispositivos

## 6.2. Proposta de modelo numérico multi-linear de comportamento histerético

### 6.2.2 Definição dos troços do modelo multi-linear

As expressões e condições da força implementadas no modelo desenvolvido são definidas nas expressões (6.8) a (6.10) no caso do ciclo inicial começar com a tracção do dispositivo, e são definidas nas expressões (6.11) a (6.13) no caso do ciclo inicial começar com a compressão do dispositivo.

O  $n$  designa o número do ciclo,  $k_0$  corresponde à rigidez do troço inicial elástico,  $F_2$  corresponde à força no troço com endurecimento em tracção, de rigidez  $k_2$ , quando o deslocamento é zero, e  $F_3$  corresponde à força no troço com endurecimento em compressão, de rigidez  $k_3$ , quando o deslocamento é zero. O  $\delta_{máx,n}^+$  consiste no deslocamento no troço de descarga, paralelo ao troço de rigidez  $k_1$ , quando a força é zero, para o ciclo  $n$  e  $\delta_{máx,n}^-$  consiste no deslocamento no troço de descarga, paralelo ao troço elástico de rigidez  $k_4$ , quando a força é zero, para o ciclo  $n$ .

#### Ciclo inicial em tracção

No caso de deslocamentos positivos ( $\delta_i > 0$ ) e crescentes ( $\delta_i > \delta_{i-1}$ ), a força no dispositivo vem dada de acordo com as condições:

$$F(\delta_i) = \begin{cases} k_0 \times \delta_i & \text{se } n = 1 \wedge k_0 \times \delta_i < k_2 \times \delta_i + F_2 \\ k_2 \times \delta_i + F_2 & \text{se } n = 1 \wedge k_0 \times \delta_i \geq k_2 \times \delta_i + F_2 \\ k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n-1}^- & \text{se } n > 1 \wedge k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n-1}^- < k_2 \times \delta_i + F_2 \\ k_2 \times \delta_i + F_2 & \text{se } n > 1 \wedge k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n-1}^- \geq k_2 \times \delta_i + F_2 \end{cases} \quad (6.8)$$

Para o caso de deslocamentos positivos ( $\delta_i > 0$ ), mas decrescentes ( $\delta_i \leq \delta_{i-1}$ ), correspondentes à fase do ciclo da descarga, e para o caso de deslocamentos negativos ( $\delta_i \leq 0$ ) e decrescentes ( $\delta_i < \delta_{i-1}$ ), correspondentes à fase do ciclo em carga, a força no dispositivo vem dada de acordo com as seguintes condições, para todos os ciclos ( $n \geq 1$ ):

$$F(\delta_i) = \begin{cases} k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^+ & \text{se } k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^+ > k_3 \times \delta_i + F_3 \\ k_3 \times \delta_i + F_3 & \text{se } k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^+ \leq k_3 \times \delta_i + F_3 \end{cases} \quad (6.9)$$

Para o caso de deslocamentos negativos ( $\delta_i \leq 0$ ) e crescentes ( $\delta_i \geq \delta_{i-1}$ ), correspondentes à fase do ciclo da descarga, a força no dispositivo vem dada de acordo com as seguintes condições, para todos os ciclos ( $n \geq 1$ ):

$$F(\delta_i) = \begin{cases} k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^- & \text{se } k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^- < k_2 \times \delta_i + F_2 \\ k_2 \times \delta_i + F_2 & \text{se } k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^- \geq k_2 \times \delta_i + F_2 \end{cases} \quad (6.10)$$

## Capítulo 6. Modelo numérico multi-linear do comportamento hysterético dos dispositivos dissipadores de energia

---

### Ciclo inicial em compressão

No caso de deslocamentos negativos ( $\delta_i < 0$ ) e decrescentes ( $\delta_i < \delta_{i-1}$ ), a força no dispositivo vem dada de acordo com as condições:

$$F(\delta_i) = \begin{cases} k_0 \times \delta_i & \text{se } n = 1 \wedge k_0 \times \delta_i > k_3 \times \delta_i + F_3 \\ k_3 \times \delta_i + F_3 & \text{se } n = 1 \wedge k_0 \times \delta_i \leq k_3 \times \delta_i + F_3 \\ k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n-1}^+ & \text{se } n > 1 \wedge k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n-1}^+ > k_3 \times \delta_i + F_3 \\ k_3 \times \delta_i + F_3 & \text{se } n > 1 \wedge k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n-1}^+ \leq k_3 \times \delta_i + F_3 \end{cases} \quad (6.11)$$

Para o caso de deslocamentos negativos ( $\delta_i < 0$ ), mas crescentes ( $\delta_i \geq \delta_{i-1}$ ), correspondentes à fase do ciclo da descarga, e para o caso de deslocamentos positivos ( $\delta_i \geq 0$ ) e crescentes ( $\delta_i > \delta_{i-1}$ ), correspondentes à fase do ciclo em carga, a força no dispositivo vem dada de acordo com as seguintes condições, para todos os ciclos ( $n \geq 1$ ):

$$F(\delta_i) = \begin{cases} k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^- & \text{se } k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^- < k_2 \times \delta_i + F_2 \\ k_2 \times \delta_i + F_2 & \text{se } k_4 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^- \geq k_2 \times \delta_i + F_2 \end{cases} \quad (6.12)$$

Para o caso de deslocamentos positivos ( $\delta_i \geq 0$ ) e decrescentes ( $\delta_i \leq \delta_{i-1}$ ), correspondentes à fase do ciclo da descarga, a força no dispositivo vem dada de acordo com as seguintes condições, para todos os ciclos ( $n \geq 1$ ):

$$F(\delta_i) = \begin{cases} k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^+ & \text{se } k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^+ > k_3 \times \delta_i + F_3 \\ k_3 \times \delta_i + F_3 & \text{se } k_1 \times \delta_i + \delta_{máx,n}^+ \leq k_3 \times \delta_i + F_3 \end{cases} \quad (6.13)$$

### 6.2.3 Parâmetros definidores do modelo multi-linear

Para a elaboração do modelo numérico multi-linear do comportamento hysterético dos dispositivos, assumiu-se que as rigidezes do modelo ( $k_0$  a  $k_4$ ) são dependentes da relação  $E_i I / L^3$ . Afectou-se esta expressão com um coeficiente  $\alpha$ , que tem em conta a geometria e o comportamento dos dispositivos. As rigidezes dos troços que constituem o modelo estão definidas nas expressões (6.14) a (6.18).

$$k_0 = \alpha_0 \times \frac{E_1 I}{L^3} \quad (6.14)$$

$$k_1 = \alpha_1 \times \frac{E_1 I}{L^3} \quad (6.15)$$

$$k_2 = \alpha_2 \times \frac{E_2 I}{L^3} \quad (6.16)$$

## 6.2. Proposta de modelo numérico multi-linear de comportamento hysterético

$$k_3 = \alpha_3 \times \frac{E_2 I}{L^3} \quad (6.17)$$

$$k_4 = \alpha_4 \times \frac{E_1 I}{L^3} \quad (6.18)$$

Sendo que  $E_1$  se refere ao módulo de elasticidade da barra e  $E_2$  ao módulo elasto - plástico (do troço com endurecimento) definido em (6.19). O  $I$  é a inércia em torno da menor dimensão da secção da barra, o  $L$  representa o comprimento efectivo do troço horizontal do dispositivo para efeitos de modelação, que é dado pela expressão (6.4), onde  $L_0$  é o comprimento absoluto do troço horizontal do dispositivo.

$$E_2 = \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (6.19)$$

Em que  $f_u$  é a tensão de rotura à tracção,  $f_y$  é a tensão de cedência da barra,  $\varepsilon_u$  é a extensão na força máxima e  $\varepsilon_y$  é a extensão de cedência.

A força de cedência aproximada,  $F_y^*$  é dada pela expressão (6.7), definida na secção 6.1. O deslocamento de cedência,  $\delta_y^*$  é dado pela expressão (6.20).

$$\delta_y^* = \frac{F_y^*}{k_0} \quad (6.20)$$

A força de rotura,  $F_u$  é dada pela expressão (6.21), que é dependente da relação entre  $f_u/f_y$  e de um factor  $\beta$  relativo ao endurecimento físico devido à geometria do dispositivo e aos ciclos de dobragem/desdobragem. O deslocamento correspondente à força de rotura,  $\delta_u$ , é calculado pela expressão (6.22).

$$F_u = \beta \times \frac{f_u}{f_y} \times F_y^* \quad (6.21)$$

$$\delta_u = \frac{F_u - F_y^*}{k_2} + \delta_y^* \quad (6.22)$$

### 6.3 Simulação dos ensaios experimentais

Neste modelo numérico, para efeitos de simplificação da modelação, adoptou-se  $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_4$  e  $\alpha_3 = \alpha_2/2$ . Os valores dos coeficientes que se adaptam à geometria e ao comportamento dos dispositivos testados, são:

$$\begin{cases} \alpha_0 = 1,5 \\ \alpha_1 = 1,5 \\ \alpha_2 = 21 \\ \alpha_3 = 10,5 \\ \alpha_4 = 1,5 \\ \beta = 1,1 \end{cases}$$

Aplicando o modelo numérico à história de deslocamentos efectuada no ensaio de cada conjunto de dispositivos, obtêm-se os diagramas multi-lineares hysteréticos representados nas Figuras 6.3 a 6.7.

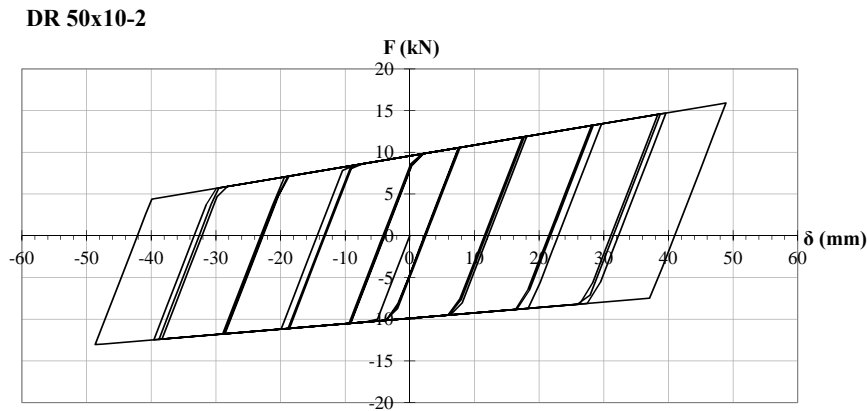


Figura 6.3: Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 50x10-2

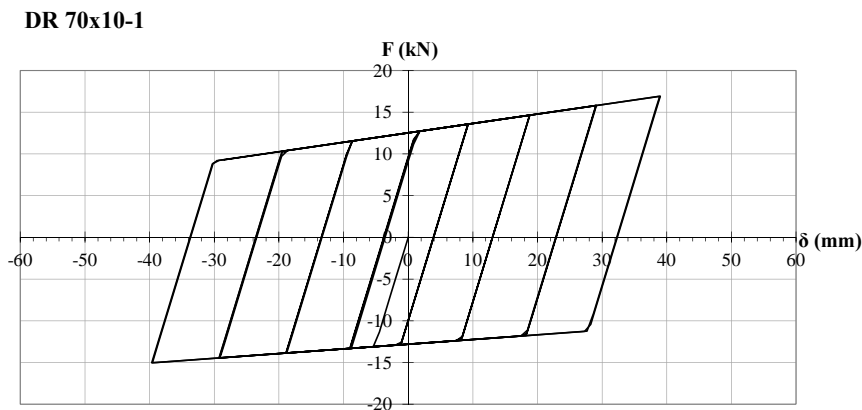


Figura 6.4: Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 70x10-1

### 6.3. Simulação dos ensaios experimentais

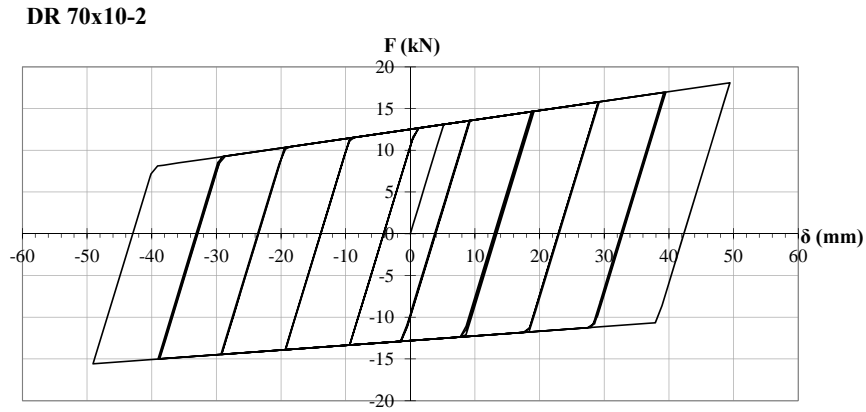


Figura 6.5: Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 70x10-2

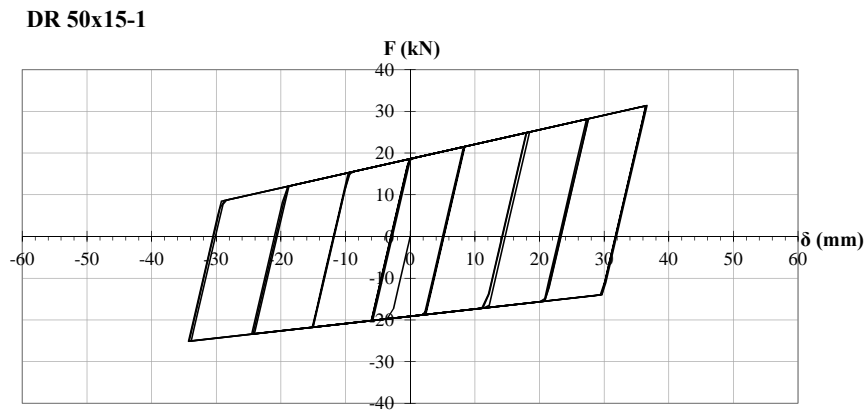


Figura 6.6: Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 50x15-1

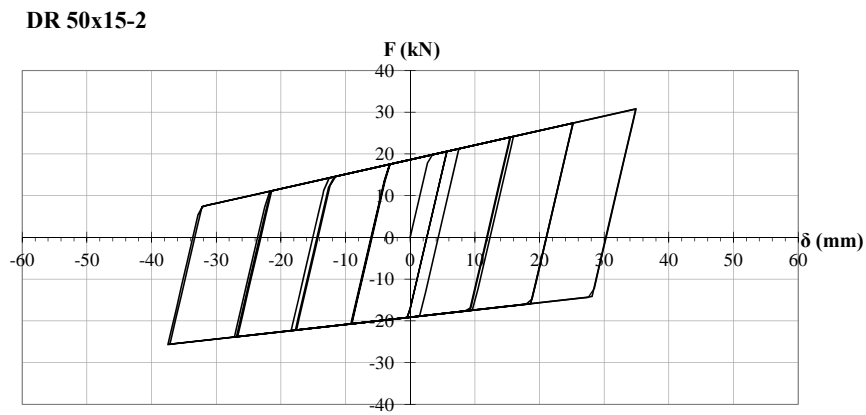


Figura 6.7: Modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos do ensaio dos DR 50x15-2

## Capítulo 6. Modelo numérico multi-linear do comportamento hysterético dos dispositivos dissipadores de energia

No Quadro 6.1 apresenta-se um resumo dos parâmetros calculados através do modelo numérico aplicado à história de deslocamentos de cada ensaio.

Quadro 6.1: Parâmetros resultantes do modelo numérico multi-linear

Modelo Numérico						
Dispositivos	50x10-2	70x10-1	70x10-2	50x15-1	50x15-2	Observações
$k_0$ (kN/mm)	1,999	2,542		6,655		rigidez inicial elástica
$k_1$ (kN/mm)	1,999	2,542		6,655		rigidez elástica
$k_2$ (kN/mm)	0,130	0,113		0,348		rigidez pós-cedência
$F_2$ (kN)	9,6	12,5		18,6		força ( $\delta = 0$ )
$k_3$ (kN/mm)	0,065	0,056		0,174		rigidez pós-cedência
$F_3$ (kN)	-9,9	-12,8		-19,1		força ( $\delta = 0$ )
$k_4$ (kN/mm)	1,999	2,542		6,655		rigidez elástica
$F_y$ (kN)	10,2	13,1		19,6		força de cedência
$F_u$ (kN)	16,1	19,0		31,0		força de rotura
$F_u/F_y$	1,58	1,45		1,58		
$F_{máx}^+$ (kN)	15,9	16,9	18,1	31,4	30,8	força máx. positiva
$F_{máx}^-$ (kN)	-13,1	-15,0	-15,6	-25,1	-25,7	força máx. negativa
$\delta_y$ (mm)	5,1	5,2		3,0		desloc. de cedência
$\delta_u$ (mm)	50,3	57,9		35,5		desloc. de rotura
$\delta_{máx}^+$ (mm)	48,9	39,0	49,4	36,6	34,9	desloc. máx. positivo
$\delta_{máx}^-$ (mm)	-48,7	-39,7	-49,1	-34,3	-37,5	desloc. máx. negativo
$\mu_\Delta$	9,9	11,1		11,8		ductilidade convencional
$\mu_p$	40,7	31,5	41,6	58,2	53,6	ductilidade plástica monotónica equivalente
$W_{acum}$ (kNm)	10,3	9,7	13,8	16,1	14,3	energia dissipada máx.
$n$	13	11	13	12	11	nº ciclos descritos

A rigidez inicial elástica ( $k_0$ ) e as rigidezes elásticas da fase de descarga dos ciclos ( $k_1$  e  $k_4$ ) aumentam quando a secção da barra aumenta, sendo esse aumento mais condicionado pela espessura da barra, visto as expressões que definem a rigidez serem dependentes da menor inércia da secção, em que a espessura da barra é elevada ao cubo -  $t^3$ . Outro factor importante no aumento da rigidez prende-se com o comprimento efectivo da barra horizontal do dispositivo ( $L$ ), que quanto menor for, mais rigidez confere ao dispositivo.

O dispositivo DR 50x15 apresenta as rigidezes mais elevadas de forma bastante pronunciada em relação aos dispositivos DR 50x10 e DR 70x10 atendendo ao facto da espessura da sua barra ser 50 % maior do que a espessura das outras barras, e do seu afastamento efectivo entre as barras laterais ser menor do que o dos outros dispositivos (devido ao seu raio de dobragem).

As rigidezes pós-cedência ( $k_2$  e  $k_3$ ), têm em conta o endurecimento da barra de aço que constitui o dispositivo, que se revela maior em tracção do que em compressão, sendo esta diferença acentuada - a rigidez pós-cedência em tracção é o dobro da rigidez pós-cedência em compressão.

### 6.3. Simulação dos ensaios experimentais

---

Verificou-se que os dispositivos DR 70x10 são os que apresentam menores valores de rigidez pós-cedência, estando este acontecimento unicamente relacionado, com o menor valor obtido, relativamente aos outros dispositivos, no rácio entre a tensão de rotura e a tensão de cedência. O rácio  $F_u/F_y$  apresentado no Quadro 6.1, também apresenta menor valor para os dispositivos DR 70x10, pelo mesmo motivo, como se pode verificar pela expressão (6.22), que permite calcular a força de rotura ( $F_u$ ).

A força de cedência calculada, apresenta resultados coerentes com a variação de secção e espessura da barra para os três dispositivos.

O número de ciclos que o modelo multi-linear aplicado aos deslocamentos dos ensaios permite desenvolver (estando limitado pela  $F_u$ ), revela-se muito semelhante ao número de ciclos desenvolvidos nos ensaios até se atingir a força de rotura, dada pelo critério de rotura adoptado. Deste modo, as forças máximas positiva e negativa, para o mesmo número de ciclos realizados nos ensaios sem que houvesse perdas de energia significativas, são sempre menores que a força de rotura imposta no modelo, salvo a excepção para o DR 50x15-1, em que a força de rotura é de 31,0 kN e a força máxima positiva é de 31,4 kN, mas como a diferença é tão reduzida optou-se contar com esse último ciclo.

No que diz respeito aos deslocamentos máximos positivos e negativos, os dispositivos DR 50x10-2 estiveram perto de alcançar o deslocamento de rotura ( $\delta_u$ ) no ciclo nº 13, os dispositivos DR 70x10-1 deveriam ter descrito pelo menos mais dois ciclos (até ao ciclo nº 13) para se aproximar de forma mais razoável da capacidade máxima de deslocamento dada para este tipo de dispositivos, como foi o caso dos dispositivos DR 70x10-2. Os dispositivos DR 50x15-1 e DR 50x15-2 ultrapassaram ligeiramente o deslocamento de rotura ao desenvolverem o último ciclo, correspondente ao último ciclo descrito nos ensaios sem perdas de energia significativas.

Quanto aos valores da ductilidade convencional, variam essencialmente devido à variação da área da secção transversal dos dispositivos, na medida em que quanto maior for a área maior é a ductilidade, mas sendo esta variação pouco acentuada. A variação pouco acentuada da ductilidade convencional prende-se com o facto da sua expressão não ter em conta um dos parâmetros mais importantes neste tipo de dispositivos, que é a dissipação de energia.

A energia total dissipada por cada tipo de dispositivo varia essencialmente com a espessura da sua barra, que por sua vez influencia os valores das forças desenvolvidas pelo dispositivo. O número de ciclos desenvolvidos constitui o segundo factor de maior relevância para a energia dissipada.

Por último, a ductilidade plástica monotónica equivalente, como depende fortemente da energia dissipada e por conseguinte do número de ciclos desenvolvidos, também apresenta valores destacadamente mais elevados para os dispositivos DR 50x15, portanto, os dispositivos cuja barra apresenta a espessura mais elevada.

## 6.4 Comparação do modelo numérico com os ensaios experimentais

Nas Figuras 6.8 a 6.12 comparam-se o diagrama força - deslocamento do modelo numérico com o do ensaio para cada conjunto de dispositivos. Esta comparação permite visualizar o bom comportamento do modelo numérico face aos ensaios experimentais.

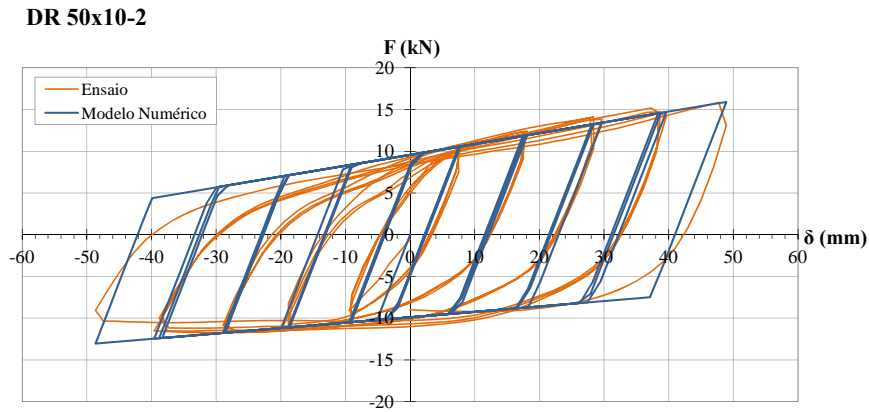


Figura 6.8: Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 50x10-2

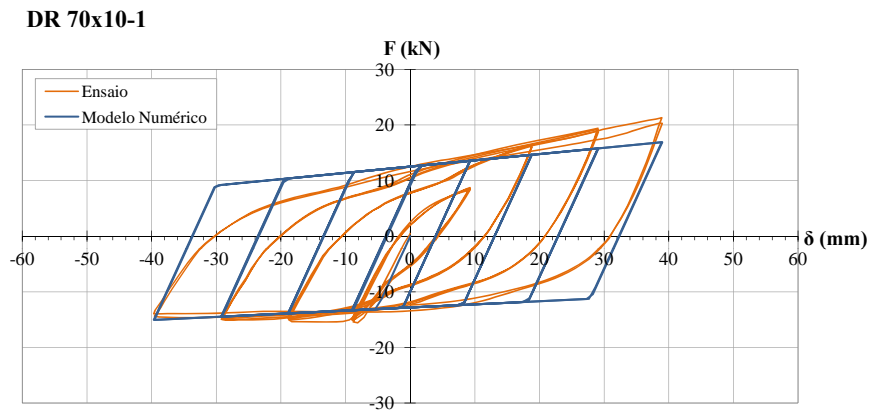


Figura 6.9: Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 70x10-1

## 6.4. Comparação do modelo numérico com os ensaios experimentais

**DR 70x10-2**

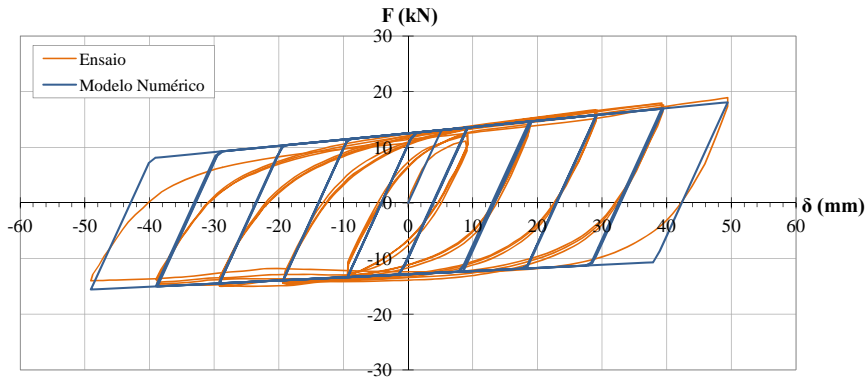


Figura 6.10: Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 70x10-2

**DR 50x15-1**

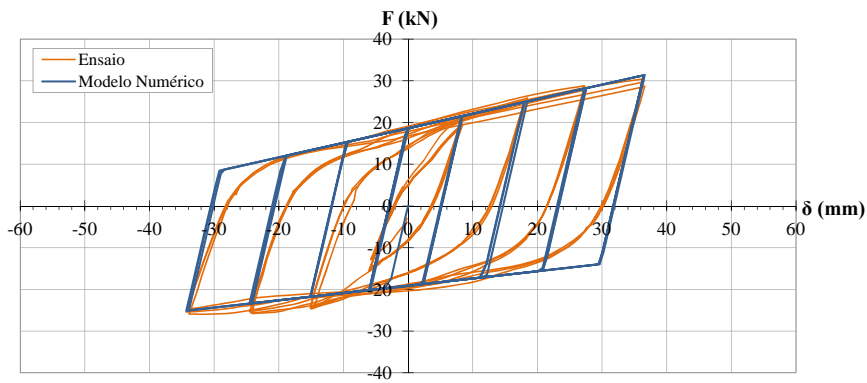


Figura 6.11: Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 50x15-1

**DR 50x15-2**

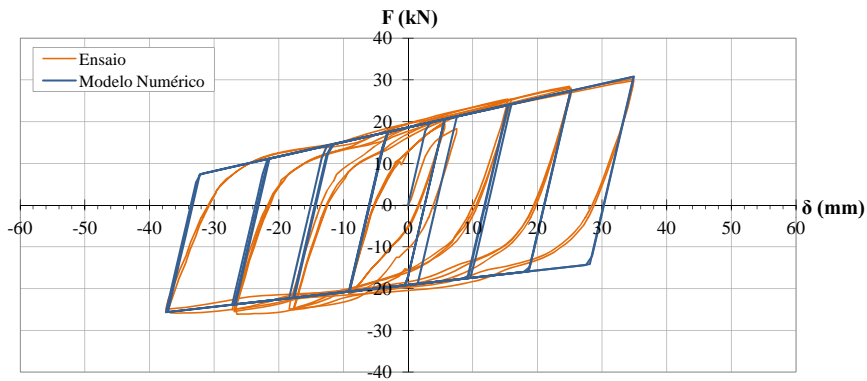


Figura 6.12: Comparação do modelo numérico com o ensaio dos DR 50x15-2

## Capítulo 6. Modelo numérico multi-linear do comportamento histerético dos dispositivos dissipadores de energia

No Quadro 6.2 comparam-se os vários parâmetros calculados para a análise do comportamento dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia, através de um rácio entre os valores resultantes da aplicação do modelo numérico multi-linear (Quadro 6.1) e os valores resultantes dos ensaios experimentais (Quadro 5.5).

As forças e deslocamentos máximos não entram na comparação do Quadro 6.2, porque não faz sentido comparar os valores experimentais que abrangem todos os ciclos desenvolvidos no ensaio dos dispositivos com os valores do modelo que estão limitados pelo critério de rotura.

Quadro 6.2: Rácio dos parâmetros resultantes do modelo numérico sobre os parâmetros resultantes dos ensaios

Dispositivos	Modelo Numérico / Experimental					Observações
	50x10-2	70x10-1	70x10-2	50x15-1	50x15-2	
$k_0$	1,82	1,27	1,21	1,75	1,51	rigidez inicial elástica
$k_1$	1,18	1,27	1,16	1,62	1,55	rigidez elástica
$k_2$	0,90	0,49	0,68	1,33	1,13	rigidez pós-cedência
$F_2$	1,02	1,03	1,11	0,95	0,97	força ( $\delta = 0$ )
$k_3$	1,54	10,98	1,43	1,39	1,32	rigidez pós-cedência
$F_3$	1,01	0,88	0,98	0,91	0,90	força ( $\delta = 0$ )
$k_4$	1,67	1,45	1,41	1,75	1,58	rigidez elástica
$F_y$	1,00	0,90	1,07	0,90	0,95	força de cedência
$F_u$	1,02	0,89	1,01	1,00	1,03	força de rotura
$\delta_y$	0,55	0,71	0,90	0,53	0,64	desloc. de cedência
$\delta_u$	1,03	1,46	1,17	0,97	0,95	desloc. de rotura
$\mu_\Delta$	1,88	1,65	1,28	1,46	0,98	ductilidade convencional
$\mu_p$	2,01	1,96	1,16	2,42	1,73	ductilidade plástica monotónica equivalente
$W_{acum}$	1,10	1,25	1,11	1,15	0,99	energia dissipada máx.

A comparação das rigidezes do modelo numérico para o experimental pode ser feita visualizando as Figuras 6.8 a 6.12, onde se verifica uma boa aproximação para todas as rigidezes à excepção da rigidez inicial elástica ( $k_0$ ), devido ao facto de se ter igualado esta rigidez às rigidezes  $k_1$  e  $k_4$ , para simplificar o modelo.

O Quadro 6.2 mostra que as rigidezes elásticas do modelo numérico são sempre superiores às dos ensaios experimentais. Mas como o seu valor afecta o deslocamento de cedência e o deslocamento de rotura, se a rigidez no modelo fosse menor (através dos coeficientes  $\alpha$ ), o deslocamento de rotura aumentava, e afectava a fiabilidade do modelo.

#### 6.4. Comparação do modelo numérico com os ensaios experimentais

---

A rigidez pós-cedência em tracção ( $k_2$ ) é menor para o modelo numérico, no caso dos dispositivos DR 50x10 e DR 70x10, mas maior no caso dos dispositivos DR 50x15. Isto deve-se ao facto de se ter escolhido a melhor aproximação para o valor do coeficiente  $\alpha$  que afecta esta rigidez por igual em todos os dispositivos.

O valor da força de cedência ( $F_y^*$ ), constitui uma excelente aproximação ao valor da força de cedência retirado dos ensaios. E o valor da força de rotura, afectado pelo coeficiente  $\beta$  escolhido, também cria uma aproximação muito boa ao valor da força de rotura dos ensaios.

Como já foi referido anteriormente, o facto do valor da rigidez inicial elástica ser mais elevado que o experimental, afecta o valor do deslocamento de cedência ( $\delta_y$ ), obtendo-se assim, um valor razoavelmente menor que o do deslocamento de cedência obtido nos ensaios. Em compensação, obtém-se um valor de deslocamento de rotura ( $\delta_u$ ) muito aproximado ao dos ensaios, excepto para os dispositivos DR 70x10-1, mas este valor não deve ser considerado atendendo a que estes dispositivos realizaram alguns ciclos previamente ao começo do ensaio.

Os valores da ductilidade convencional e da ductilidade plástica monotónica equivalente também se mostram muito mais elevados, para a maior parte dos dispositivos, no modelo numérico, devido também à rigidez inicial elástica se apresentar mais elevada do que nos ensaios experimentais.

A energia máxima dissipada no modelo numérico é ligeiramente mais elevada do que nos ensaios, devido à não consideração do efeito de *Bauschinger* na definição do modelo numérico.

Por fim, refira-se que o modelo proposto consegue simular (Figuras 6.8 a 6.12) de forma bastante razoável o comportamento dos dispositivos observado experimentalmente.



## Capítulo 7

# Conclusões e desenvolvimentos futuros

No presente trabalho estudou-se o comportamento da ligação entre o painel de fachada e um elemento estrutural. Para o desenvolvimento deste estudo adoptaram-se seis soluções diferentes de dispositivos mecânicos dissipadores de energia - DR 50x5, DC 50x5, DR 50x10-1 e DR 50x10-2, DR 70x10, DR 50x15. Prepararam-se dois sistemas de ensaios, no primeiro simulou-se a ligação completa, com painéis de fachada pré-fabricados, pilar de betão e dispositivo mecânico dissipador de energia, e no segundo testou-se apenas o dispositivo de ligação, através de ensaios quasi-estáticos.

No sentido de poder modelar futuramente o comportamento de dispositivos com geometrias semelhantes, propôs-se um modelo multi-linear do comportamento hysterético dos dispositivos dissipadores de energia baseado nas relações constitutivas do aço e na geometria dos dispositivos. Por fim, fez-se uma simulação dos ensaios com o modelo multi-linear proposto e compararam-se os resultados da simulação com os resultados dos ensaios experimentais.

Nas secções seguintes apresentam-se as principais conclusões obtidas através dos ensaios realizados e do modelo numérico multi-linear elaborado e propostas para desenvolvimentos futuros que permitem um estudo mais vasto e aprofundado do tema principal deste trabalho.

### 7.1 Conclusões

O primeiro grupo de ensaios realizados permite concluir que relativamente à configuração do dispositivo mecânico de ligação, o que apresenta melhor comportamento é o dispositivo circular. O processo de quinagem deste dispositivo é menos sujeito a acções que enfraquecem determinadas zonas do mesmo comparativamente com os dispositivos rectangulares. Ao contrário dos dispositivos circulares, nos dispositivos rectangulares o processo de quinagem provoca plastificação local das barras. Outra razão para este melhor comportamento prende-se com a maior capacidade de se deformar e de recuperar das deformações plásticas que a forma circular apresenta face à forma rectangular.

Dada a geometria dos dispositivos ensaiados, a melhor forma encontrada de limitar as deformações laterais e encaminhar o movimento do dispositivo foi fixar ao dispositivo um elemento confinante exterior e interior com a sua largura e aproximadamente metade do seu comprimento. Da observação dos ensaios constatou-se que um outro elemento muito importante que permite melhorar o comportamento na zona da ligação do dispositivo ao painel de fachada é a chapa utilizada entre o dispositivo e as porcas do(s) parafuso(s), dado que confere rigidez àquela zona e deste modo limita possíveis deformações nesta zona e o conseqüente esmagamento do betão do painel.

O segundo sistema de ensaio permitiu comparar o desempenho de três tipos diferentes de dispositivos, com áreas de secção transversal diferente. Os dispositivos DR 50x10 e DR 70x10 possuem a mesma espessura de barra, mas a área transversal da barra do DR 70x10 é superior em 40 % à área da secção transversal do DR 50x10. O dispositivo DR 50x15 possui uma espessura 50% superior à espessura dos outros dispositivos, e um incremento de área da secção de 50% em relação ao dispositivo DR 50x10, e de cerca de 10% relativamente ao dispositivo DR 70x10.

O dispositivo que apresenta melhor comportamento em termos de força de cedência e de força de rotura é o dispositivo DR 50x15, pelo facto da espessura ser a condicionante mais relevante na determinação destes parâmetros de resistência.

Concluiu-se que o parâmetro que mais contribui para a rotura dos dispositivos foi a amplitude máxima de deslocamentos comportada por cada um, e não a quantidade de ciclos realizados. Neste caso, o dispositivo DR 70x10 mostrou melhor capacidade para atingir deslocamentos mais elevados sem apresentar sinais de rotura, constatando-se que para atingir maiores amplitudes de deslocamento é recomendável aliar uma área da secção elevada a uma espessura reduzida.

No que diz respeito à dissipação de energia, conclui-se que um incremento da espessura das barras do dispositivo e conseqüentemente da sua inércia revela melhor eficiência em termos de dissipação energética do que um incremento em termos de área da secção transversal da barra mas mantendo a mesma espessura. Os dispositivos DR 50x15 apresentaram a maior dissipação de energia, mesmo em situações em que atingiram a rotura para um número de ciclos inferior aos dispositivos DR 50x10 e DR 70x10.

O dispositivo DR 50x10, destaca-se com o valor mais elevado de taxa de amortecimento viscoso equivalente, constatando-se que, uma área de secção transversal menor pode conduzir a um maior amortecimento viscoso.

Em termos de ductilidade convencional em deslocamento, a área da secção transversal indicou ser o factor mais condicionante, na medida em que quanto maior a área da secção da barra do dispositivo, maior é a ductilidade do dispositivo. Contudo, se atendermos à ductilidade plástica monotónica equivalente, outros factores também se revelam importantes, como a energia dissipada e o número de ciclos de carga desenvolvidos pelo dispositivo. O dispositivo DR 50x15 foi o que evidenciou o melhor comportamento em termos de ductilidade.

O modelo numérico multi-linear proposto por forma a simular o comportamento histerético dos dispositivos mecânicos dissipadores de energia, e os parâmetros adoptados na sua definição, revelaram um bom comportamento face aos resultados dos ensaios experimentais.

Os parâmetros utilizados na definição do modelo numérico permitiram chegar à conclusão que a rigidez do dispositivo depende essencialmente da espessura do dispositivo e do comprimento efectivo da sua barra horizontal, constatando-se que quanto mais elevada for a espessura da barra e menor o comprimento efectivo da barra horizontal do dispositivo, maior é a rigidez do dispositivo. A área da secção transversal, por si só, mostrou não ser muito relevante. A maior rigidez verificou-se no dispositivo DR 50x15, com uma diferença considerável para o dispositivo DR 70x10, e uma diferença de rigidez pouco assinalada entre o dispositivo DR 70x10 e o dispositivo DR 50x10.

O valor da força de cedência obtido analiticamente, constituiu uma excelente aproximação ao valor da força de cedência obtida nos ensaios, com a vantagem de poder ser determinada de forma expedita, sem a necessidade de recurso a programas de cálculo ou a cálculos morosos.

De todos os parâmetros analisados, o factor que mais influencia o bom comportamento de um dispositivo dissipador de energia de geometria semelhante aos dispositivos estudados, é a espessura da barra que constitui o dispositivo.

Por fim, refira-se que caso se pretenda implementar o tipo de dispositivos estudados no âmbito desta dissertação, o modelo proposto, calibrado com base nos ensaios experimentais, poderá ser uma ferramenta bastante interessante de auxílio no dimensionamento de sistemas estruturais com painéis de fachada. Dado que, o mesmo pode ser facilmente implementado em programas de cálculo comerciais, podendo desta forma contabilizar-se a participação dos painéis de fachada, incluindo as suas ligações à estrutura, no comportamento global do sistema estrutural.

### 7.2 Desenvolvimentos futuros

Com a realização deste trabalho constatou-se que os dispositivos com uma configuração circular podem representar uma solução interessante de ligação para painéis de fachada à estrutura. Desta forma, seria importante o desenvolvimento do estudo do comportamento destes dispositivos em específico, variando a área da secção transversal da barra e as características mecânicas do aço utilizado.

Outro aspecto, que não foi abordado ao longo deste estudo, mas que é importante para garantir um desempenho ao mais alto nível do dispositivo, diz respeito a um sistema passivo de ser incorporado neste tipo de dispositivos que permita a dissipação de energia na outra direcção, para o caso de acções sísmicas.

Por fim, seria importante desenvolver uma modelação numérica, através de um programa de elementos finitos de análise não linear, para deste modo poder simular o comportamento real do dispositivo, estudá-lo e optimizá-lo quando sujeito a outro tipo de acções, difíceis de testar em laboratório.

# Bibliografia

- [1] CRISAFULLI, F. J.; RESTREPO, J. I. - *Ductile Steel Connections for Seismic Resistant Precast Buildings*. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 4, 2003, 541-553.
- [2] DECRETO-LEI nº 235/83 de 31 de Maio - *Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Porto Editora, 1983.
- [3] DECRETO-LEI nº 349-C/83 de 30 de Julho - *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*. Porto Editora, 1983.
- [4] ELLIOTT, K. S. - *Precast Concrete Structures*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- [5] FIB BULLETIN - *Precast Insulated Sandwich Panels*. Guide to Good Practice, Draft Version, 2011.
- [6] FIB BULLETIN 43 - *Structural Connections for Precast Concrete Buildings*. Guide to good practice, 2008.
- [7] FINDER, S. M. A. - *Sistemas de Pré-fabricação (on line)*. Universidade do Estado de Santa Catarina. [www.joinville.udesc.br/portal/professores/simone\\_maciel/materiais/SISTEMA\\_DE\\_PR\\_FABRICA\\_O\\_Aula\\_4\\_2.ppt](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/simone_maciel/materiais/SISTEMA_DE_PR_FABRICA_O_Aula_4_2.ppt) (consultado em 2010-09-14)
- [8] GOODNO, B. J.; CRAIG, J. I. - *Ductile Cladding Connection Systems for Seismic Design*. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, October 1998.
- [9] HALFEN - *Halfen (on line)*. [www.halfen.pt](http://www.halfen.pt) (consultado em 2010-09-26)
- [10] KELLY, J. M.; SKINNER, R. I.; HEINE, A. J. - *Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for use in Earthquake Resistant Structures*. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 3, Sept. 1972, 63-88.
- [11] MASSEY, W.; CHARLESON, A. - *Architectural Design for Earthquake*. Second Edition, New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2007.
- [12] McCABE, S. L.; HALL, W. J. - *Assessment of Seismic Structural Damage*. Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No.9, Sept. 1989, 2166-2183.
- [13] MENEGOTTO, M. - *Observations on precast concrete structures of industrial buildings and warehouses*. Progettazione Sismica, n. 03/2009 (Special issue on L'Aquila earthquake), Ch. 2.6 – English edition, IUSS, Pavia, November 2009.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [14] NP EN 10 002-1 - *Materiais Metálicos - Ensaio de Tracção*. Comité Europeu de Normalização, 1990.
- [15] NP EN 1992-1-1:2010 - *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. IPQ, 2010.
- [16] NP EN 1998-1:2010 - *Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. IPQ, 2010.
- [17] NP EN 206-1 - *Betão: Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade*. Norma Portuguesa, IPQ, Junho 2007.
- [18] PAMPANIN, S. - *Design of Hybrid (Single or Coupled) Walls*. Seismic Design of Prefabricated Concrete and Timber Structures, University of Canterbury, 2010.
- [19] PAMPANIN, S. - *Innovative Seismic Connections for Precast Concrete Buildings*. ELITE - The International Journal of Precast Art, 4, 2002, 53-60.
- [20] PCI COMMITTEE REPORT - *State-of-the-Art of Precast/Prestressed Sandwich Wall Panels*. PCI Journal, Vol. 42, No. 2, March/April 1997.
- [21] PCI INDUSTRY HANDBOOK COMMITTEE - *PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete*. Sixth Edition, USA, Precast/Prestressed Concrete Institute, 2004.
- [22] PINELLI, J. P.; CRAIG, J. I.; GOODNO, B. J. - *Energy-based seismic design of ductile cladding systems*. Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 3, Março 1995.
- [23] PINELLI, J. P.; MOOR, C.; CRAIG, J. I.; GOODNO, B. J. - *Testing of Energy Dissipating Cladding Connections*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25, 1996, 129-147.
- [24] PRIESTLEY, M.; SEIBLE, F.; CALVI, G. M. - *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, 1996.
- [25] QUINTANA, R. - *RZA Pré-Moldados Ltda. (on line)*, 2007.  
<http://www.rza.ind.br/lajestt.htm> (consultado em 2010-08-11)
- [26] REGUENGO, R. G. - *Comportamento da ligação pilar-fundação em estruturas pré-fabricadas com armaduras salientes do pilar*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- [27] RIVA, P. - *100 Vantaggi dell'Edilizia Industrializzata in Calcestruzzo*. Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Università degli Studi di Bergamo, 2009.
- [28] RODRIGUES, C. C. - *Comportamento às acções cíclicas de pilares de betão armado reforçados com materiais compósitos*. Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2005.
- [29] SCHULTZ, A. E.; TADROS, M. K.; HUO, X.; MAGAÑA, R. - *Seismic Resistance of Vertical Joints in Precast Shear Wall Panels*, Proceedings of the FIP 1994 XII Congress, Washington D.C., May-June 1994.
- [30] SILVA, A. M. S. - *Ligações entre Elementos Pré-fabricados de Betão*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1998.

- [31] UEHARA, F. N. - *Diretrizes para desenvolvimento de projeto para ligações de painéis de fachada horizontais de concreto pré-moldado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- [32] VAN ACKER, A. - *Leçon 6 - Planchers et toitures préfabriqués (on line)*. Conception de Construction en Beton Prefabrique, FEBE, Belgium. [http://www.febe.be/fr\\_BE/publications/list/id/8](http://www.febe.be/fr_BE/publications/list/id/8) (consultado em 2010-10-28)
- [33] VAN ACKER, A. - *Leçon 7 - Systèmes à murs porteurs préfabriqués (on line)*. Conception de Construction en Beton Prefabrique, FEBE, Belgium. [http://www.febe.be/fr\\_BE/publications/list/id/8](http://www.febe.be/fr_BE/publications/list/id/8) (consultado em 2010-10-28)
- [34] VAN ACKER, A. - *Leçon 8 - Façades en béton architectonique (on line)*. Conception de Construction en Beton Prefabrique, FEBE, Belgium. [http://www.febe.be/fr\\_BE/publications/list/id/8](http://www.febe.be/fr_BE/publications/list/id/8) (consultado em 2010-10-28)
- [35] VAN ACKER, A. - *Precast Concrete Structures for Buildings*. Belgium, s/d.
- [36] WEIDMANN, D., FORNARI, R. - *Trabalho de Acompanhamento de Obra de Fundação (on line)*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. <http://geocities.ws/acompanhamentoobra/visita9.htm> (consultado em 2010-09-14)
- [37] WOLF, H.; KLATEK.; VIANA, G.; MARQUES T. - *Ligação de Paredes Pré-fabricadas à Estrutura - Estruturas Compactas em Construções Pré-fabricadas*. 2º Congresso Nacional da Pre-fabricação em Betão, ANIPB, 2008.



## Anexo A

# Pormenorização das armaduras dos elementos de betão

### Painéis de fachada

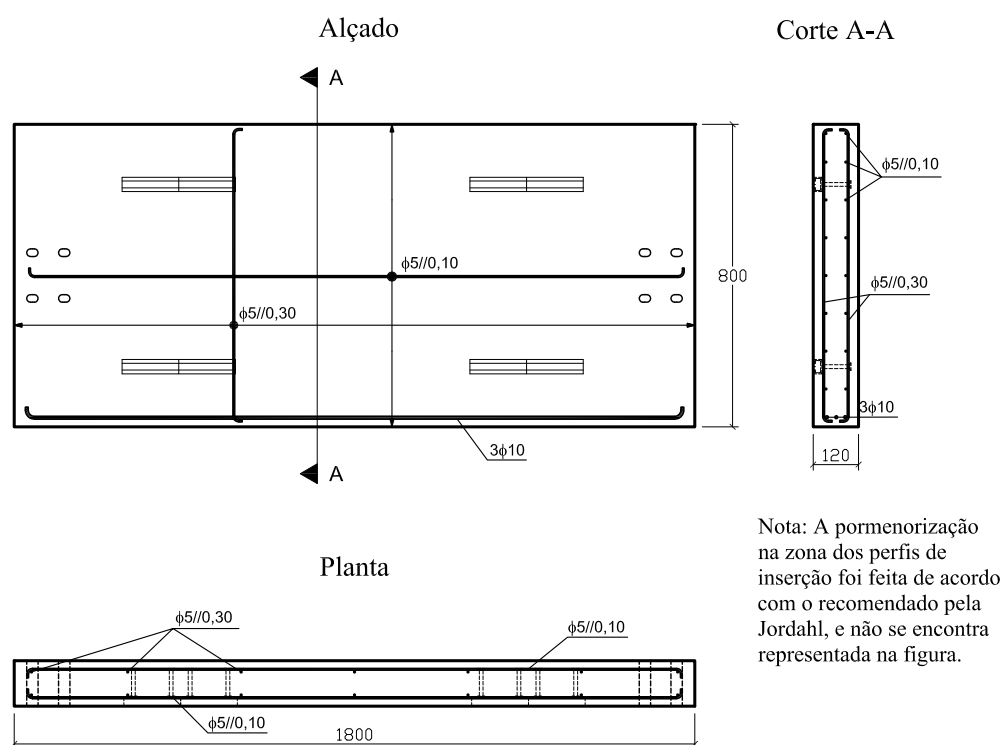


Figura A.1: Pormenorização das armaduras dos painéis de fachada (mm)

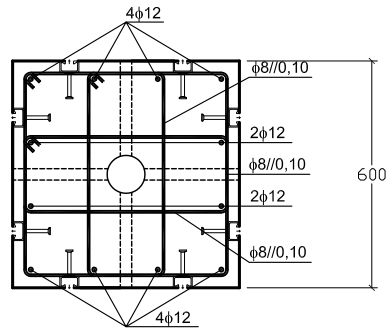


Figura A.2: Armaduras dos painéis de fachada

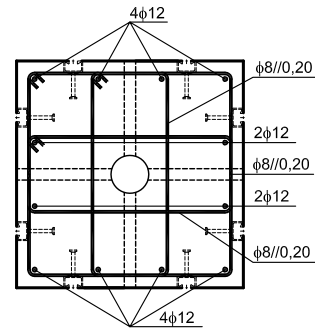
Bloco de betão

Planta

Topo do Bloco até ao Final dos Perfis de Inserção



Base do Bloco até ao Final dos Perfis de Inserção



Nota: A pormenorização na zona dos perfis de inserção foi feita de acordo com o recomendado pela Jordahl, e não se encontra representada na figura.

Figura A.3: Pormenorização das armaduras do bloco de betão (mm)



Figura A.4: Armaduras do bloco de betão