

**COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS
PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR
ENSAIOS MONOTÓNICOS E CÍCLICOS**



Romeu Gomes Reguengo

(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas e Geotecnia
pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Orientador: Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio

Co-orientador: Professor Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Júri

Presidente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu

Vogais: Professor Doutor José Manuel Matos Noronha da Câmara

Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio

Professor Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Fevereiro de 2010

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

RESUMO:

A pré-fabricação como técnica construtiva, tem vindo a ser cada vez mais utilizada. Esta apresenta vantagens das quais se podem destacar, a diminuição de custos, a redução do tempo em obra, o menor número de trabalhadores e menores meios envolvidos. Contudo estas vantagens só são evidentes caso se utilizem sistemas simples e eficientes para as ligações dos vários elementos.

A ligação pilar-fundação tem um papel fundamental no comportamento das estruturas pré-fabricadas, em particular, na presença de acções horizontais, como a acção dos sismos e do vento. Um dos sistemas de ligação pilar-fundação usados em estruturas pré-fabricadas consiste em deixar na extremidade inferior dos pilares armaduras salientes que são introduzidas em negativos executados nas fundações, sejam elas sapatas ou maciços de encabeçamento de estacas. Estes negativos são posteriormente injectados com “grout” para garantir a ligação.

Esta dissertação debruça-se essencialmente neste tipo de ligação estudando e ensaiando diferentes soluções de negativos para ligação das armaduras do pilar à fundação através de ensaios monotónicos e cíclicos, para analisar não só o comportamento às acções estáticas mas também para a acção sísmica.

São apresentados diversos exemplos de ligação pilar-fundação em estruturas pré-fabricadas e referidas as expressões de diferentes autores para a respectiva verificação da segurança.

Os resultados dos ensaios são interpretados à luz dos mecanismos básicos de resistência e estabelecem-se analogias entre os vários resultados obtidos.

Esta dissertação permite retirar conclusões sobre o comportamento das ligações com melhor desempenho ao nível de resistência.

Palavras-chave: Estruturas Pré-Fabricadas, Ligação Pilar – Fundação, Selagem, Ensaios Cíclicos.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

ABSTRACT:

The precast as a construction technique, has been increasingly used. Among advantages the precast construction with regard to cast in place construction as: the lower cost, reduction of time on site, the need less workers and less equipment.

The column-foundation connection plays a key role on the behavior of precast concrete structures, especially in the presence of horizontal actions, like earthquake and wind. One of the most used column-foundation connection systems in precast concrete structures consists on leaving on the lower end of the column protruding rebars that are introduced in negatives left in the foundation. These negatives are, later on, injected with grout to anchor the rebars.

The present dissertation focuses mainly this type of connection. Different types of anchorages were studied for the connection of the column reinforcement to the foundation, by means of monotonic and cyclic tests to analyze their behavior.

In the dissertation some column-foundation connection types are presented. Design equations from various authors are present too.

The results from the tests are analyzed according to their mechanisms of resistance and analogies are established between the results obtained.

This dissertation discusses and presents conclusions about the performance of the studied connections.

Keywords: Precast Concrete Structures, Connections, Column-Foundation, Sealing, Cyclic Tests.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Agradecimentos:

A elaboração desta tese teve o contributo importante de diversas pessoas, que de forma directa ou indirecta ajudaram e apoiaram e a quem eu não quero deixar de prestar o meu profundo agradecimento.

Às Empresas Secil Prêbetão, Hilti Portugal nas pessoas dos Engenheiros João Oliveira e Sérgio Rodrigues, respectivamente, agradeço a disponibilidade e fornecimento de materiais. À Sika Portugal pelo fornecimento de “grout”.

Ao Professor Doutor Válder Lúcio, orientador científico da dissertação manifesto o meu agradecimento pelo interesse, incentivo permanente, paciência, transmissão de conhecimentos e fundamentalmente pela amizade e motivação que incutiu em mim.

Ao Professor Doutor Carlos Chastre, co-orientador científico da dissertação tenho o prazer de manifestar o meu agradecimento pela forma paciente com que co-orientou este trabalho, pelas horas disponíveis a ouvir as minhas dúvidas e a tecer palavras de incentivo. Os seus conselhos, sugestões, críticas e interesse foram contribuições determinantes para a realização deste trabalho. Ao Professor, o meu apreço e estima.

Aos Professores Doutores, Pinho Ramos e Rocha de Almeida agradeço a disponibilidade em ajudar qualquer que fosse a situação.

Ao colega de gabinete Engenheiro Rui Marreiros e colegas de curso Daniel Rodrigues, Tiago Silva e João Lavos pela companhia e cooperação ao longo de todo o desenvolvimento experimental.

À Débora de Carvalho pelo seu apoio, incentivo, paciência e carinho nas horas que ficou condicionada devido à necessidade de elaborar esta dissertação.

Manifesto o meu obrigado à minha família em especial à minha Mãe pelas horas que deixei de partilhar com ela, e pelos momentos em que não lhe prestei todos os cuidados e mesmo assim, sempre recebi todo o seu apoio e carinho.

Por fim,

Saudade! É com esta palavra que expresso a minha imensa gratidão a uma pessoa que me deu todas as bases para me formar num Homem e me transmitiu toda a força e princípios de vida que hoje tenho.

Obrigado PAI.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

ÍNDICE DO TEXTO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações preliminares.....	1
1.2. Organização.....	3
2. CONSTRUÇÃO COM ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS.....	5
2.1. Sistemas estruturais de edifícios pré-fabricados.....	5
2.2. Regulamentação em estruturas pré-fabricadas.....	7
2.3. Ligações entre elementos estruturais de betão pré-fabricado	11
3. SISTEMAS DE ADERÊNCIA EM BETÃO ARMADO.....	25
3.1. Betão	25
3.2. Aço	26
3.3. Aderência entre armaduras de aço e betão para acções monotónicas.....	28
3.4. Aderência entre armaduras de aço e betão para acções cíclicas.....	34
3.5. Comprimento de amarração de acordo com o Eurocódigo 2.....	36
3.6. Ancoragens pós-instaladas (em estruturas pré-fabricadas).....	36
3.7. Influência da armadura transversal no desempenho da aderência.....	43
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
4.1. Introdução.....	45
4.2. Caracterização dos modelos.....	45
4.3. Procedimentos de preparação dos modelos.....	51
4.4. Sistema de ensaio e instrumentação.....	53
4.5. Caracterização dos materiais.....	61
5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	65

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

5.1. Ensaio monotônicos.....	65
5.2. Ensaio cíclicos	74
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	77
7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	83
7.1. Conclusões.....	83
7.1. Desenvolvimentos futuros.....	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Poucos meios envolvidos para obra de grande envergadura, (“Logplace” - Azambuja).....	2
Figura 2.1. Estruturas reticuladas de um edifício de escritórios e armazém, (“Logplace” - Azambuja).....	5
Figura 2.2. Estrutura reticulada com parede resistente, (“Casa das Sopas” - Évora).....	6
Figura 2.3. Utilização de painéis de fachada que podem ou não servir de contraventamento, (“Logplace” - Azambuja).....	6
Figura 2.4. Construção com paredes resistentes (gentilmente cedida pelo Prof. Válder Lúcio).....	7
Figura 2.5. Encastramento do pilar no cálice da sapata [7].....	8
Figura 2.6. Vários tipos de ligações.....	11
Figura 2.7. Ligação pilar-fundação.....	12
Figura 2.8. Ligação viga-pilar.....	12
Figura 2.9. Tipos de Ligação viga – viga.....	13
Figura 2.10. Ligação laje – viga.....	13
Figura 2.11. Ligação laje – laje.....	13
Figura 2.12. Ligação painel – estrutura.....	14
Figura 2.13. Ligação painel – painel.....	14
Figura 2.14. Ligação pilar-fundação com cavidade (adaptado de [1]).....	15
Figura 2.15. Ligação pilar-fundação com armaduras salientes do pilar (adaptado de [1]).....	17
Figura 2.16. Ligação pilar-fundação com armaduras salientes da fundação (adaptado de [1]).....	18
Figura 2.17. Ligação pilar-fundação com ferrolhos aparafusados (adaptado de [1]).....	19
Figura 2.18. Ligações pilar-fundação com ferrolhos aparafusados (adaptado de [1]).....	19

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Figura 2.19. Pormenor de ligação pilar – fundação comercializada pela empresa “B.S.ITALIA”	20
Figura 2.20. Apresentação do sistema que garante a verticalidade durante a montagem.....	21
Figura 2.21. Pormenor de ligação pilar – fundação comercializada pela empresa “PEIKKO”.....	22
Figura 2.22. Sistema de ligação pilar-fundação [15].....	23
Figura 3.1. Diagrama tensão-deformação do betão para carregamentos monotónicos [16].....	25
Figura 3.2. Diagrama tensão-deformação do betão para carregamentos de compressão cíclicos [16].....	26
Figura 3.3. Diagrama tensão-deformação de aços de diversas classes, para acções monotónicas de forças de tracção [16].....	27
Figura 3.4. Diagrama tensão-deformação de aço para acções cíclicas [16].....	28
Figura 3.5. Curva das tensões de aderência no início da tracção (adaptado de [9]).....	29
Figura 3.6. Curva das tensões de aderência com a mobilização de todo o varão (adaptado de [9]).....	29
Figura 3.7. a) Tensões tangenciais função do escorregamento para vários cenários possíveis; b) escorregamento; c) adesão, atrito e compressões das nervuras (bearing action); d) fissuras transversais e de “splitting”; e) “splitting” parcial [18].....	30
Figura 3.8. Aderência e “splitting” em betão armado: a) pico de tensões junto às extremidades das nervuras; b) escorregamento e compressões originadas pelas nervuras; c) parâmetros principais [18].....	31
Figura 3.9. a) tensão transversal induzida no betão; b) Bielas de compressão no betão (adaptado de [19]).....	32
Figura 3.10. Modos de rotura por aderência: a) rotura por “pull-out”; b) rotura por “pull-out” induzida por “splitting” com esmagamento e/ou corte do betão debaixo às nervuras; c) rotura por “splitting” [18].....	33
Figura 3.11. Degradação da aderência perante cargas cíclicas no mesmo sentido para valores de carga constante.....	35
Figura 3.12. Redução da área de aderência devido a fenda [22].....	35

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Figura 3.13. Modos de rotura da ligação executada com varão embebido num negativo selado com “grout”, adaptado de [23].....	37
Figura 3.14. Mecanismo de transferência de forças entre varão de aço, “grout” e betão, adaptado de [19].....	38
Figura 3.15. Modos de rotura de varões embebidos no betão.....	40
Figura 3.16. Esquema de ancoragem em “grout” [10]	40
Figura 3.17. Modos de rotura com bainha metálica.....	42
Figura 4.1. Dimensões dos maciços de betão (m).....	45
Figura 4.2. Armaduras dos maciços de betão.....	46
Figura 4.3. Ligação tipo P20.....	49
Figura 4.4. Ligação tipo PC20	49
Figura 4.5. Ligação tipo L20	49
Figura 4.6. Ligação tipo LC20	49
Figura 4.7. Ligação tipo V20	50
Figura 4.8. Ligação tipo P10	50
Figura 4.9. Ligação tipo P15	50
Figura 4.10. Ligação tipo P25.....	50
Figura 4.11. Ligação tipo CM20 e CC20	51
Figura 4.12. Betonagem dos maciços de betão	51
Figura 4.13. Aspecto final da betonagem	51
Figura 4.14. Selagem dos varões	52
Figura 4.15. Acessórios metálicos para garantir a verticalidade dos varões.....	52
Figura 4.16. Aspecto geral	52
Figura 4.17. Amostra do “grout” utilizado.....	52

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Figura 4.18. Estrutura de suporte.....	53
Figura 4.19. Sistema de transmissão de força.....	54
Figura 4.20. Configuração do ensaio para varões posicionados no canto do maciço de betão.....	55
Figura 4.21. Planta da configuração do ensaio e respectivas dimensões para varões posicionados no canto do maciço de betão	55
Figura 4.22. Configuração do ensaio para varões posicionados no centro do maciço de betão	56
Figura 4.23. Planta com a configuração do ensaio e respectivas dimensões para varões posicionados no centro do maciço de betão	56
Figura 4.24. Configuração do ensaio – Corte A-A.....	57
Figura 4.25. Configuração do ensaio – Corte B-B.....	57
Figura 4.26. DataLogger Spider 8 e computadores portátil.....	58
Figura 4.27. Bomba Hidráulica (esquerda) e sistema de aquisição de dados.....	58
Figura 4.28. Posicionamento da célula de carga.....	59
Figura 4.29. Posicionamento dos trasdutores de deslocamentos.....	60
Figura 4.30. Planta da localização dos extensómetros.....	60
Figura 4.31. Pormenor da localização dos extensómetros na armadura.....	61
Figura 5.1. Modelo Elasto-Plástico Equivalente.....	66
Figura 5.2. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação V20.....	67
Figura 5.3. Diagrama força-deslocamento da ligação L20.....	68
Figura 5.4. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação LC20.....	68
Figura 5.5. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P10.....	69
Figura 5.6. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P15.....	69
Figura 5.7. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P20.....	70

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Figura 5.8. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P25.....	71
Figura 5.9. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação PC20.....	71
Figura 5.10. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CM20.....	72
Figura 5.11. Diagrama força de puxe/força média na malha superior-deslocamento da ligação L20.....	73
Figura 5.12. Diagrama força de puxe/força média na malha superior-deslocamento da ligação P20.....	73
Figura 5.13. História de deslocamentos de um ensaio.....	74
Figura 5.14. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CC20 (1).....	75
Figura 5.15. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CC20 (2).....	76
Figura 5.16. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CC20 (3).....	76
Figura 6.1. Valores de força máxima aplicada em cada ligação.....	77
Figura 6.2. Diagramas dos Modelos Elasto-Plástico Equivalentes das ligações.....	78
Figura 6.3. Ensaio de tracção em tubo liso.....	81

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Valores básicos do coeficiente de comportamento q_0 , para sistemas regulares em altura.....	9
Quadro 3.1 – Comprimento de embebimento (l_e) em “grout”, adaptado de [10].....	41
Quadro 4.1. Designação dos modelos de ligação.....	48
Quadro 4.2. Caracterização dos betões.....	62
Quadro 4.3. Valores dos ensaios de tracção por flexão dos provetes de “grout”.....	63
Quadro 6.1. Resultados dos ensaios experimentais (valores médios)	78
Quadro 6.2. Comparação dos resultados experimentais com as estimativas da resistência obtidas com as expressões (3.4) a (3.16).....	79

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações preliminares

A construção civil tem sido considerada pouco industrializada quando comparada a outros ramos industriais, por apresentar baixos índices de produtividade e grande morosidade na obtenção do produto final. Uma alternativa para melhorar estes índices é a utilização da pré-fabricação em Betão Armado.

A indústria da pré-fabricação tem vindo a demonstrar inúmeras vantagens comparativamente à construção tradicional. De acordo com Silva [1] podem-se destacar as seguintes vantagens:

- Maior resistência e durabilidade do betão em virtude de um controlo de qualidade mais apertado e menor susceptibilidade às exposições ambientais;
- Melhor acabamento das superfícies dos elementos pré-fabricados;
- Menos meios envolvidos em obra (Figura 1.1);
- Redução dos prazos da obra;

Utilizando a pré-fabricação existe a vantagem de um maior controlo da qualidade, pois possibilita a existência de vários processos de controlo de qualidade desde a sua produção até à montagem final na obra. Contudo como em todos os produtos relacionados com a construção, existem ocasiões em que ocorrem imperfeições nas peças produzidas. Estas podem ser de origem estética, construtiva ou estrutural. O boletim 41 da FIB [2] descreve com detalhe a maior parte das imperfeições ocorridas durante as várias fases do edifício pré-fabricado, desde produção, transporte e à montagem. Neste documento são igualmente sugeridas possíveis acções para solução das várias anomalias.

A pré-fabricação por ser um processo de fabricação industrial diminui a probabilidade da ocorrência de acidentes de trabalho e tem enormes vantagens do ponto de vista ambiental comparativamente à construção tradicional. Existe uma optimização da utilização de todos os materiais e a possibilidade de reciclar muitos dos materiais que numa obra construída *"in situ"* seriam inutilizados [3].

Como neste tipo de indústria é possível a optimização dos trabalhos e, conseqüentemente, menos tarefas a realizar, é possível reduzir o consumo de energia, tornando-se uma indústria mais amiga do ambiente comparativamente com a construção tradicional.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR



Figura 1.1. Poucos meios envolvidos para obra de grande envergadura
("Logplace" - Azambuja)

Contudo, a indústria da pré-fabricação enfrenta algumas dificuldades para a sua plena viabilização. Estas limitações são decorrentes da necessidade de vários equipamentos para transporte e colocação dos elementos nos seus locais definitivos de utilização e principalmente da necessidade de promover ligações rígidas entre os vários elementos que compõem a estrutura.

A montagem dos diversos elementos da estrutura é realizada ao nível das ligações, tendo a finalidade de transmitir os esforços solicitantes em todas as fases de utilização da estrutura. E como tal, o tipo da ligação entre os elementos é de fundamental importância.

As ligações na pré-fabricação podem ser dimensionadas para terem um comportamento rígido, articulado ou semi-rígido.

Ao projectarem-se ligações em estruturas pré-fabricadas deve-se ter em conta como principais requisitos a ductilidade (capacidade da ligação apresentar deformações elasto-plásticas antes de atingir a ruptura) e resistência aos esforços solicitantes. Contudo, estes requisitos nem sempre são fáceis de quantificar porque existe falta de informação no que diz respeito ao comportamento de algumas ligações em estruturas pré-fabricadas.

Com este trabalho pretende-se estudar o comportamento de varões pós instalados na ligação pilar-fundação em estruturas pré-fabricadas.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

1.2. Organização

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

No capítulo 1 faz-se um breve enquadramento da indústria da pré-fabricação e uma introdução ao trabalho que é apresentado. No capítulo 2 é feita uma apresentação da panorâmica geral dos sistemas de ligação pilar-fundação e em especial dos estudos que mais contribuíram para o conhecimento deste tipo de ligação e para os mecanismos de transmissão de forças envolvidos.

No capítulo 3 descrevem-se os principais mecanismos resistentes existentes neste tipo de ligação e indicam-se os métodos de dimensionamento existentes na bibliografia. No capítulo 4 é apresentado o sistema de ligação estudado e descreve-se o programa experimental efectuado no âmbito desta tese. São descritos ensaios realizados com cargas monotónicas e com cargas cíclicas. No capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos em forma de diagramas força-deslocamento e no capítulo 6 faz-se uma análise dos resultados face a expressões existentes na bibliografia.

No capítulo 7 apresenta-se algumas das conclusões do presente trabalho e a formulação de algumas recomendações para desenvolvimentos futuros.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

2. CONSTRUÇÃO COM ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS

2.1. Sistemas estruturais de edifícios pré-fabricados

Na indústria da pré-fabricação, os sistemas estruturais variam consoante o próprio fabricante. Os sistemas mais comuns em estruturas pré-fabricadas são constituídos por:

- Estruturas reticuladas, com vigas e pilares pré-fabricados de um ou mais pisos (Figura 2.1). Na maioria destes casos o sistema estrutural é constituído por pilares encastrados na base e asnas apoiadas nos pilares. Nos casos em que numa direcção o vão é muito menor que na outra existem vigas longitudinais que com os pilares, formam pórticos na direcção do menor vão. A cobertura é constituída por chapas metálicas, suportadas por madres de betão armado pré-tensionado ou em aço, que transferem as acções às asnas.



Figura 2.1. Estruturas reticuladas de um edifício de escritórios e armazém,
("Logplace" - Azambuja)

Este tipo de estruturas é muito usual em edifícios para armazéns, zonas comerciais, edifícios de estacionamento e grandes edifícios de escritórios.

Neste tipo de estruturas podem-se incluir paredes ou núcleos resistentes às acções horizontais (Figura 2.2.).

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

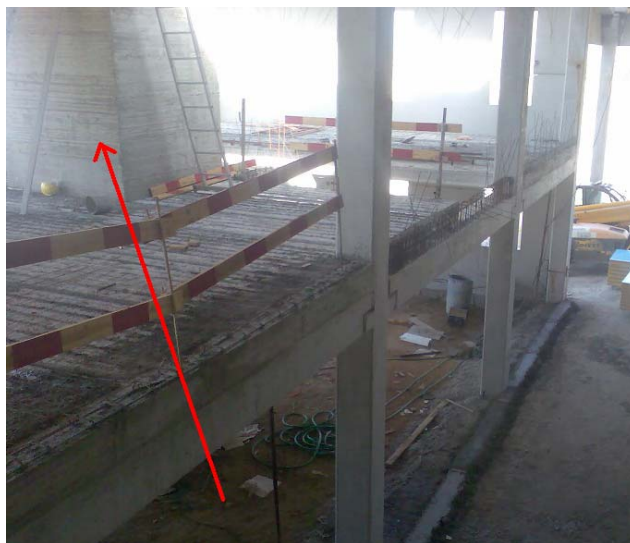


Figura 2.2. Estrutura reticulada com parede resistente,
(“Casa das Sopas” - Évora)

Existe também a possibilidade de colocação de painéis de fachada que, dependendo do dimensionamento das suas ligações, podem ou não ser elementos de contraventamento. Os painéis de fachada podem ser aplicados em estruturas reticuladas e em estruturas com paredes resistentes.. Na figura 2.3 ilustra-se a aplicação de painéis de fachada não resistentes num edifício industrial com uma estrutura reticulada.



Figura 2.3. Utilização de painéis de fachada que podem ou não servir de contraventamento,
(“Logplace” - Azambuja)

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

- Paredes resistentes, que podem aparecer de forma isolada (núcleos de escada ou de elevador) ou constituindo as paredes exteriores e algumas interiores dos edifícios, somente com aberturas para as portas e janelas como é representado na Figura 2.4.

A solução em que as paredes pré-fabricadas constituem simultaneamente elementos estruturais resistentes e paredes exteriores e interiores é usual na construção de edifícios para habitação. Este tipo de estruturas tem um bom comportamento ao fogo, sendo possível colocar isolamento térmico no interior destas paredes, proporcionando um bom comportamento térmico do edifício.



Figura 2.4. Construção com paredes resistentes
(gentilmente cedida pelo Prof. Válder Lúcio)

2.2. Regulamentação em estruturas pré-fabricadas

Em Portugal as estruturas de betão armado são regidas por dois regulamentos principais, REBAP [4] e RSA [5], em que ambos são omissos no que se refere a orientações para a construção de estruturas pré-fabricadas de betão armado. O LNEC no passado desenvolveu alguns trabalhos no estudo de ligações em edifícios pré-fabricados [6]. Presentemente a Universidade Técnica de Lisboa – IST e Universidade Nova de Lisboa – FCT tem publicado alguns documentos com orientações para este tipo de construção.

O Eurocódigo 2 [7], referente ao dimensionamento de construções em betão, apresenta no seu capítulo 10 orientações para estruturas pré-fabricadas em betão armado. No que diz respeito ao dimensionamento de estruturas às acções sísmicas o Eurocódigo 8 [8] apresenta algumas orientações para o dimensionamento de estruturas pré-fabricadas, informação que até então não existia.

Como referência podem-se utilizar algumas publicações internacionais. O boletim 43 [9] da FIB é uma referência no que diz respeito ao dimensionamento das ligações em estruturas pré-

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

fabricadas. Outro exemplo é o PCI Design Handbook [10], que apresenta e esclarece questões de pormenor com exemplos práticos para o bom dimensionamento e pormenorização de estruturas pré-fabricadas.

2.2.1. Eurocódigo 2

O Eurocódigo 2 [7] é o regulamento pelo qual é possível dimensionar todos os elementos de betão armado constituintes das estruturas pré-fabricadas e o edifício no seu conjunto. Na sua secção 10 o Eurocódigo 2 apresenta as regras indicadas para edifícios total ou parcialmente constituídos por elementos pré-fabricados de betão e que constituem um complemento às regras indicadas nas outras secções deste regulamento. Nesta secção são apresentadas a terminologia, os materiais, a análise estrutural, as ligações e o tipo de apoios em estruturas pré-fabricadas.

Em matéria de dimensionamento de estruturas pré-fabricadas de betão armado, esta norma veio uniformizar alguns critérios de projecto. Refira-se, a nível de exemplo, a definição do comprimento de encastramento do pilar no cálice da sapata ou maciço de encabeçamento, $l \geq 1,2 \cdot h$ (Figura 2.5)

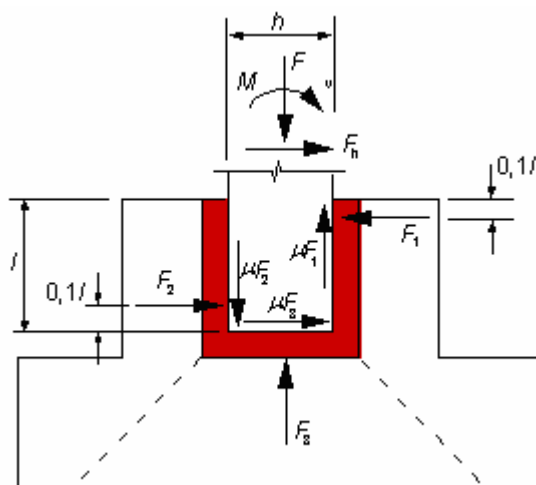


Figura 2.5. Encastramento do pilar no cálice da sapata [7]

2.2.2. Eurocódigo 8

O Eurocódigo 8 [8] foi aprovado na sua última versão em Dezembro de 2004, dando orientações sobre todos os aspectos de concepção de estruturas para resistência aos sismos com vários materiais estruturais e para os vários tipos de estruturas. Esta norma apresenta na sua secção 5.11 orientações referentes a estruturas pré-fabricadas que vem agravar substancialmente os

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

esforços neste tipo de estruturas comparativamente com os regulamentos Portugueses. Este aumento substancial deve-se à utilização de um coeficiente de comportamento inferior ao utilizado em estruturas correntes. Ou seja como não é conhecido o comportamento não linear deste tipo de estruturas a norma é conservativa na redução dos esforços devido às acções sísmicas.

Nas estruturas de betão armado o coeficiente de comportamento, “q”, é determinado:

$$q = q_0 \times k_w \quad (2.1)$$

Tendo em consideração o tipo de estrutura (pórtico, mista pórtico-parede, paredes acopladas ou desacopladas, sistemas flexíveis de torção ou pêndulos invertidos) e a classe de ductilidade (DC), de acordo com o Quadro 2.1 [8].

Quadro 2.1. Valores básicos do coeficiente de comportamento q_0 ,
para sistemas regulares em altura

TIPO ESTRUTURAL	DCM	DCH
Sistema Pórtico, sistema misto pórtico-parede, sistema de paredes acopladas	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Sistema de paredes desacopladas	3,0	$4,0\alpha_u/\alpha_1$
Sistema flexível de torção	2,0	3,0
Sistema pendular invertido	1,5	2,0

Onde α_u e α_1 são definidos em [8]:

Para estruturas que não são regulares em altura o valor de “q” deve ser reduzido em 20%. O dimensionamento de estruturas com ductilidade reduzida (DCL) é desaconselhado em regiões de maior sismicidade. Para estes casos o coeficiente de comportamento para os esforços deverá ser da ordem de 1,5.

O coeficiente de comportamento para estruturas pré-fabricadas em betão armado, “ q_p ”, é determinado por

$$q_p = k_p \times q \quad (2.2)$$

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

em que:

- q é o valor deste coeficiente para estruturas moldadas no local
- k_p é um coeficiente de redução que depende da capacidade de dissipação de energia da estrutura. Os valores recomendados são de $k_p=1,0$ para estruturas com ligações exteriores às regiões críticas ou para estruturas com ligações interiores a essas regiões, sobredimensionadas ou dissipativas (ver Figura 2.6). Nos restantes casos recomenda-se $k_p=0,5$ (o Anexo Nacional do EC8, ainda não publicado, vai recomendar a utilização de $k_p=0.65$ para estes casos).

Segundo Proença [11] para avaliação apropriada do efeito das ligações de estruturas pré-fabricadas na dissipação de energia da estrutura e de acordo com o EC8 [8] identificam-se as seguintes situações:

- a) - Ligações situadas fora das regiões críticas, sem afectar a capacidade de dissipação de energia (Figura 2.6). A ligação deve situar-se a uma distância da extremidade mais próxima da região crítica de pelo menos, a maior das dimensões transversais do elemento. A ligação deve ser dimensionada à flexão e corte, considerando coeficientes de majoração para ter em conta as sobrerresistências nas regiões críticas. Os coeficientes de majoração dependem da classe de ductilidade (DCM e DCH).
- b) - Ligações situadas dentro das regiões críticas, sobredimensionadas de tal forma que permanecem em regime elástico (Figura 2.6). A ligação deve ser dimensionada considerando coeficientes de majoração dos esforços para ter em conta as sobrerresistências das restantes secções. As armaduras da ligação devem estar totalmente amarradas ainda dentro da região crítica. As armaduras da região crítica devem estar totalmente ancoradas fora da ligação.
- c) - Ligações situadas dentro das regiões críticas, com ductilidade substancial (Figura 2.6). Deve fazer-se prova da ductilidade da ligação. A ductilidade pode ser demonstrada verificando as cláusulas aplicáveis a estruturas betonadas no local ou por meio de ensaios cíclicos repetidos em regime plástico.

O mecanismo predominante de dissipação de energia deve consistir em rotações plásticas nas regiões críticas. Admite-se ainda a possibilidade de dissipação de energia por meio de mecanismos plásticos de corte nas ligações.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

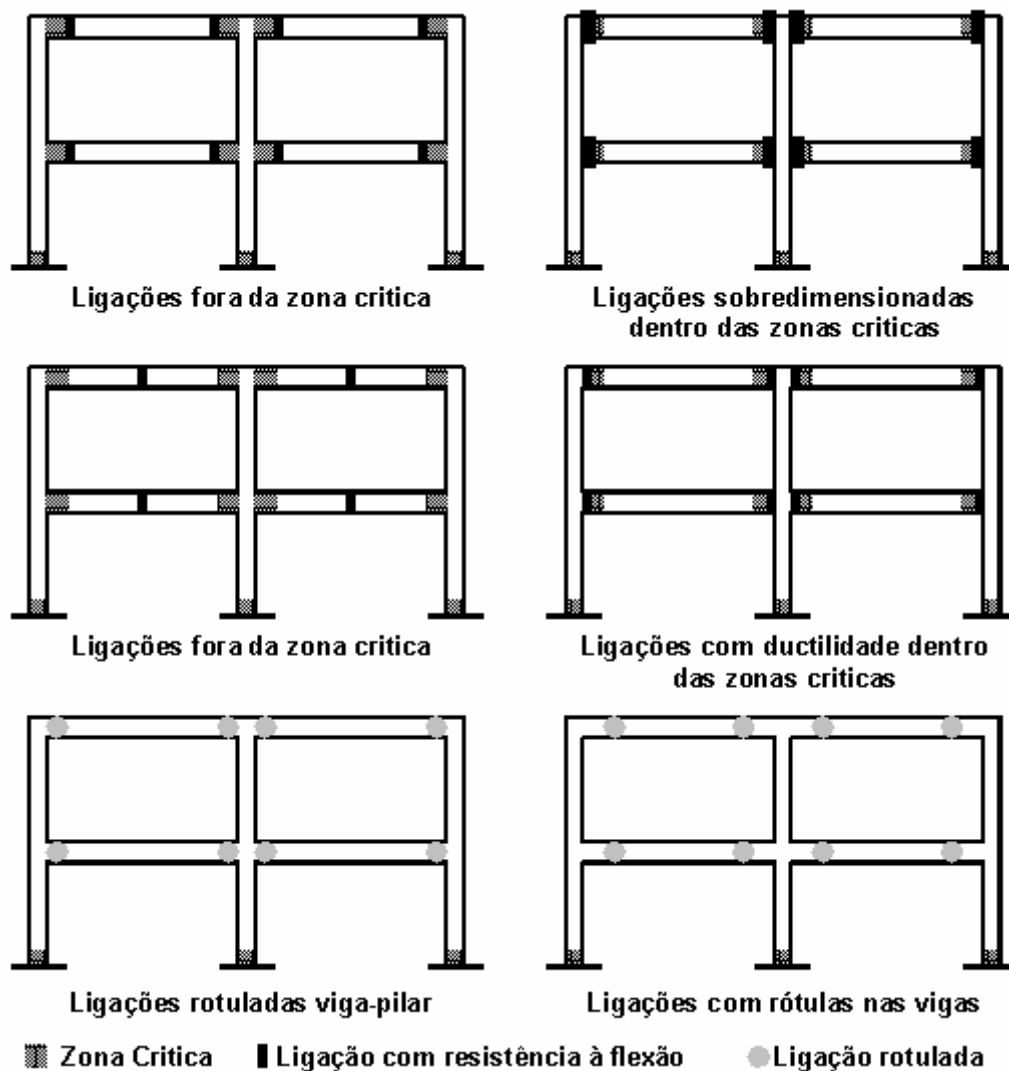


Figura 2.6. Vários tipos de ligações

Uma cláusula interessante do EC 8 é a 5.11.3.2, que refere que em estruturas com ligações viga-pilar articuladas, os pilares, devem ser fixos na base em “*fundações de cálice*” (Figura 2.5).

2.3. Ligações entre elementos estruturais de betão pré-fabricado

O comportamento dum estrutura pré-fabricada é condicionado pelo modo como são dimensionadas e realizadas as ligações entre os vários elementos. Numa estrutura pré-fabricada existem vários tipos de ligações. As mais importantes são ligação: pilar-fundação (Figura 2.7), ligação pilar-pilar, ligação parede resistente-parede resistente, ligação viga-pilar (Figura 2.8), ligação viga-viga (Figura 2.9), ligação laje-viga (Figura 2.10), ligação laje-laje (Figura 2.11), ligação painel-estrutura (Figura 2.12) e ligação painel-painel (Figura 2.13).

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR



Figura 2.7. Ligação pilar – fundação



Figura 2.8. Ligação viga – pilar

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR



Figura 2.9. Tipos de Ligação viga – viga



Figura 2.10. Ligação laje – viga



Figura 2.11. Ligação laje – laje

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR



Figura 2.12. Ligação painel – estrutura



Figura 2.13. Ligação painel – painel.

Todas as ligações devem ter como princípio, ser simples, com poucos acessórios, garantir a estabilidade durante a montagem de todos os elementos estruturais e ter um reduzido número de operações dando prioridade às ligações simples como encaixes e aparafusamentos.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

2.3.1. Ligação pilar – fundação mais utilizadas

Existem vários tipos de soluções para executar a ligação pilar-fundação que variam consoante sejam ou não compatíveis com as características do sistema de pré-fabricação desenvolvido.

Na Figura 2.14 apresenta-se uma das ligações mais correntes em pré-fabricação. Nesta ligação os pilares são embebidos numa cavidade executada na fundação (sapata ou maciço de encabeçamento de estacas), com posterior selagem do espaço livre entre a superfície interior da cavidade e as faces laterais do pilar. Esta solução é uma ligação simples de executar uma vez que permite dispensar o escoramento provisório, utilizando cunhas de madeira entre o pilar e a cavidade. Além disso permite a absorção de desvios dimensionais de geometria ou posicionamento em obra.

Diversos autores têm realizado trabalho de investigação nesta área, salientando-se Ebeling [12] e Mendes [13].

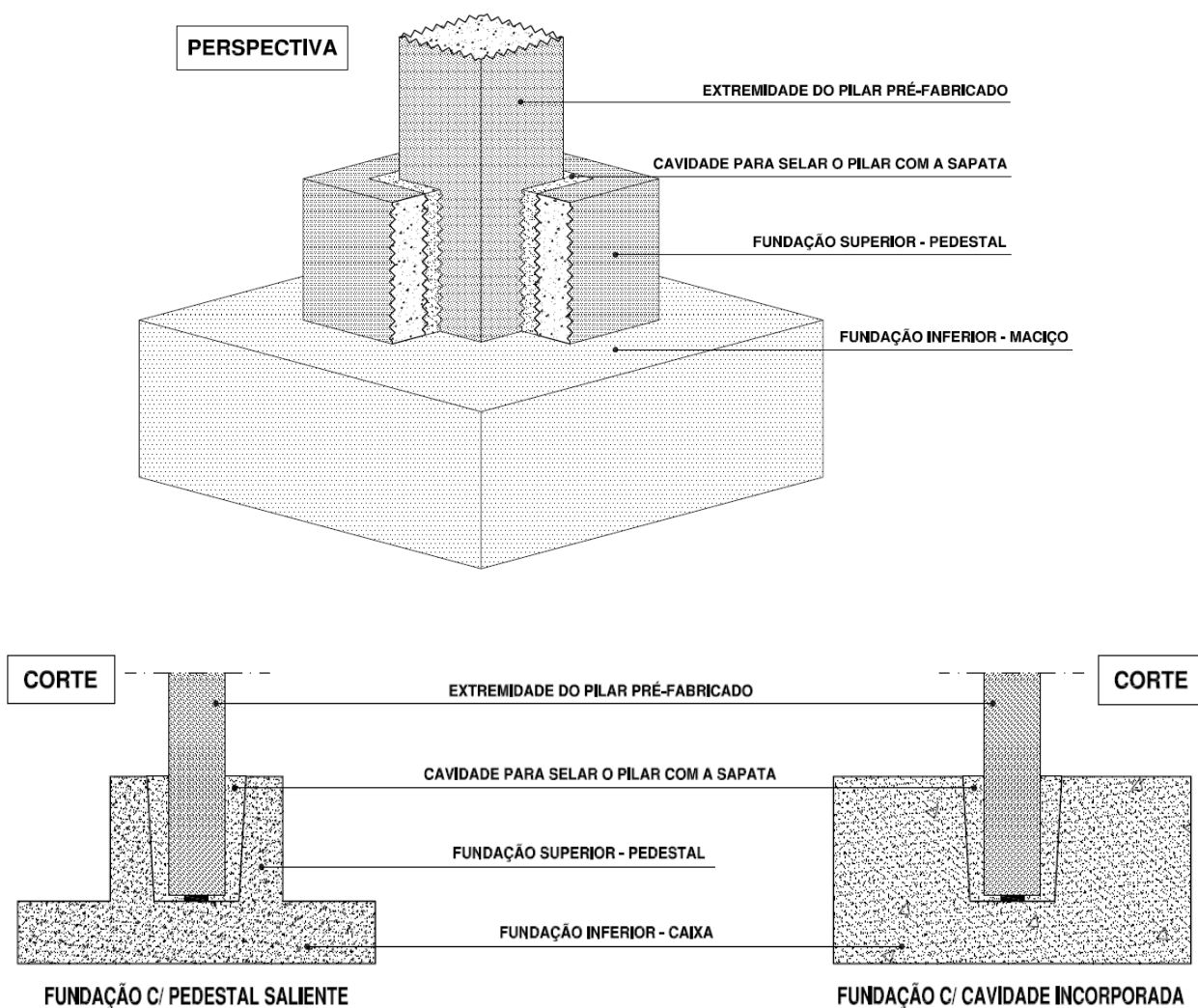


Figura 2.14. Ligação pilar-fundação com cavidade (adaptado de [1])

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

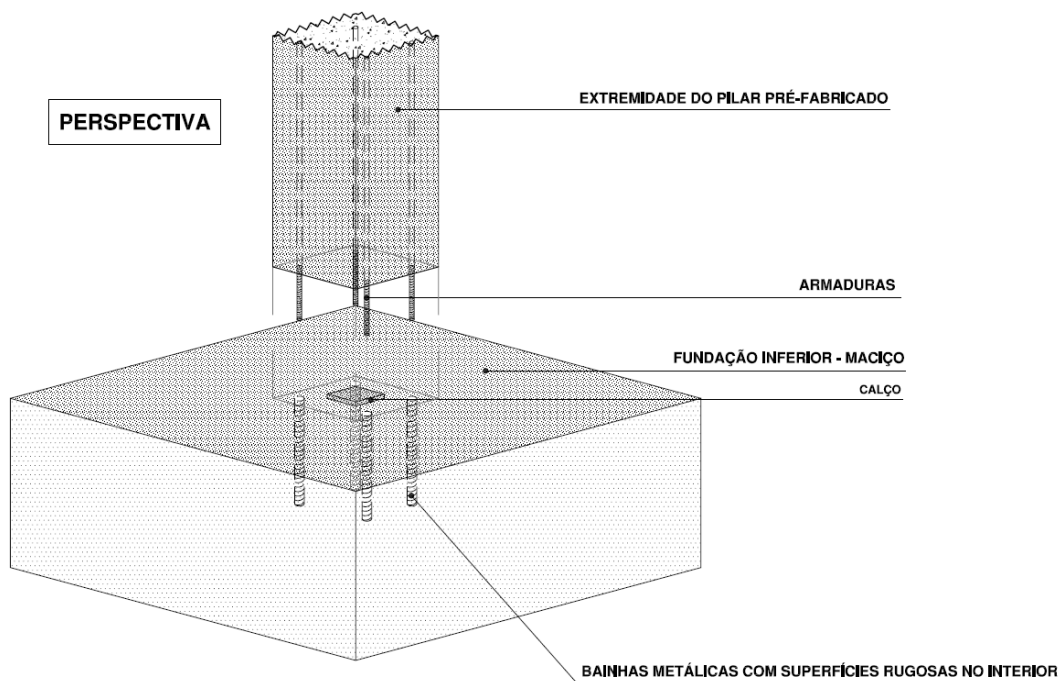
Existe também, e cada vez mais como sendo uma solução adoptada, a ligação com armaduras salientes do pilar (Figura 2.15) ou da fundação (Figura 2.16), respectivamente, que são introduzidas em aberturas existentes através de bainhas e posteriormente seladas por injeção de uma argamassa, comumente designada por “grout”. De acordo com [14], as principais vantagens da utilização deste tipo de ligação são:

- a existência da continuidade de momentos na base do pilar;
- a possibilidade de corrigir alguns desvios de geometria.

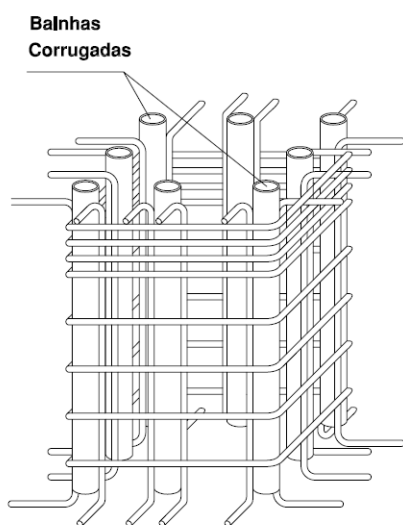
E as principais desvantagens são:

- a necessidade de utilização de escoramentos;
- o aparecimento de danos nas armaduras salientes durante a montagem ou transporte;
- a necessária atenção na limpeza das bainhas antes da selagem com “grout”.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR



PERSPECTIVA



CORTE

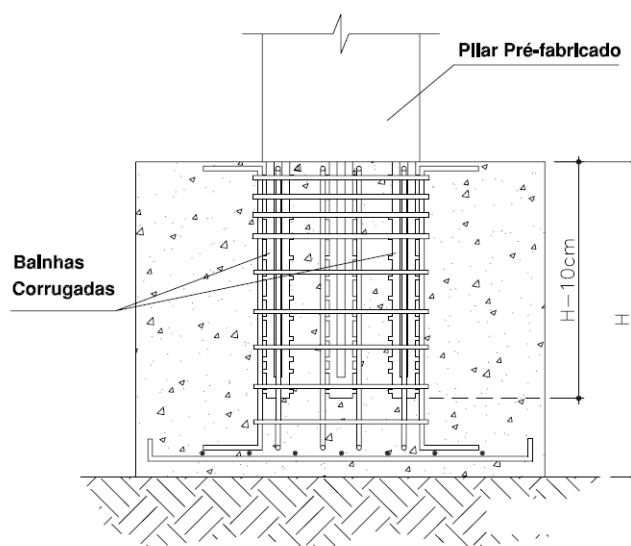


Figura 2.15. Ligação pilar-fundação com armaduras salientes do pilar (adaptado de [1])

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

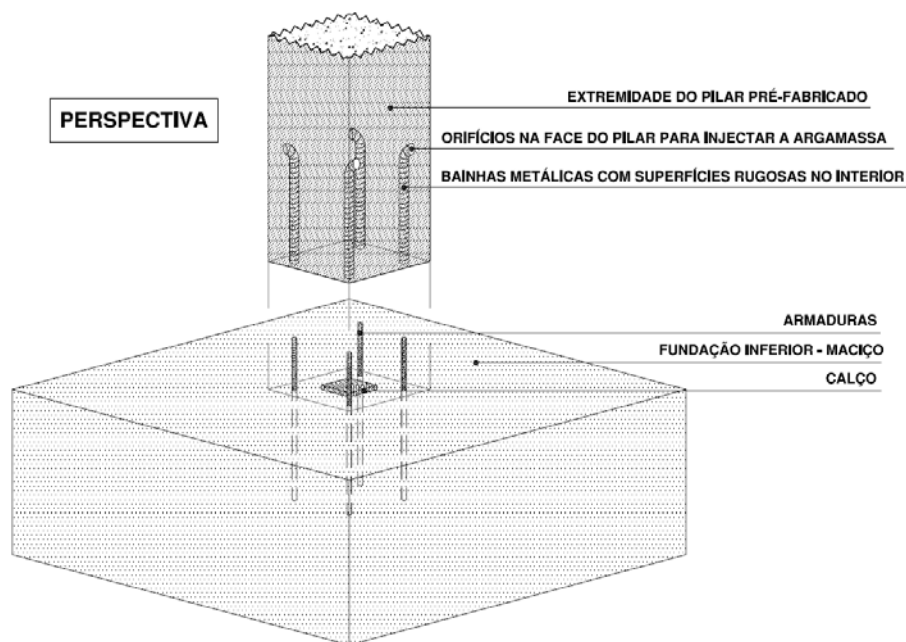


Figura 2.16. Ligação pilar-fundação com armaduras salientes da fundação (adaptado de [1])

Por último, existem ligações semelhantes às utilizadas em estruturas metálicas, constituídas por ferrolhos salientes da fundação que são aparafusados a uma chapa que vem soldada às armaduras na base do pilar (Figuras 2.17 e 2.18). Esta ligação apresenta a vantagem do nivelamento por ser efectuada através dum sistema de porcas e contraporcas, sendo posteriormente executada a selagem da junta existente entre a face inferior do pilar e superior da fundação.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

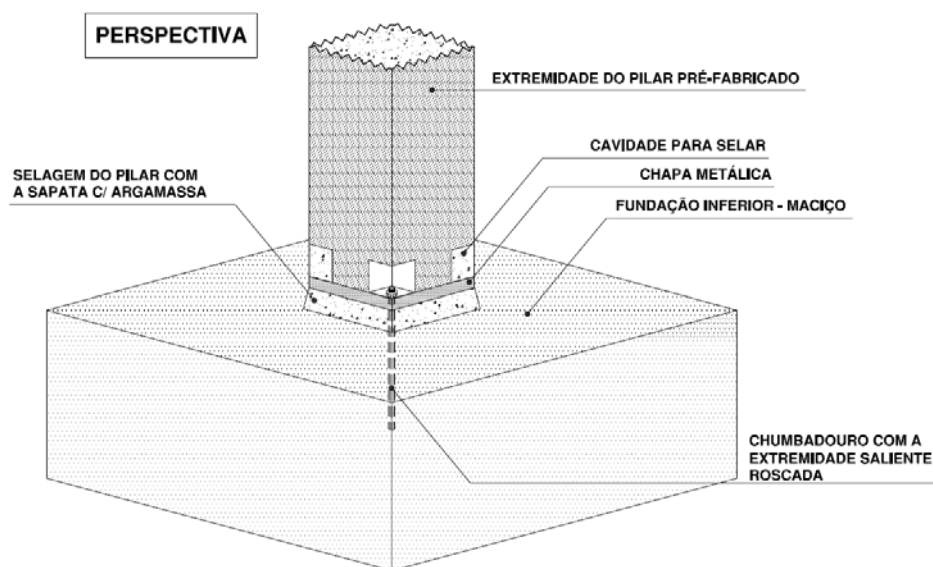


Figura 2.17. Ligação pilar-fundação com ferrolhos aparafusados (adaptado de [1])

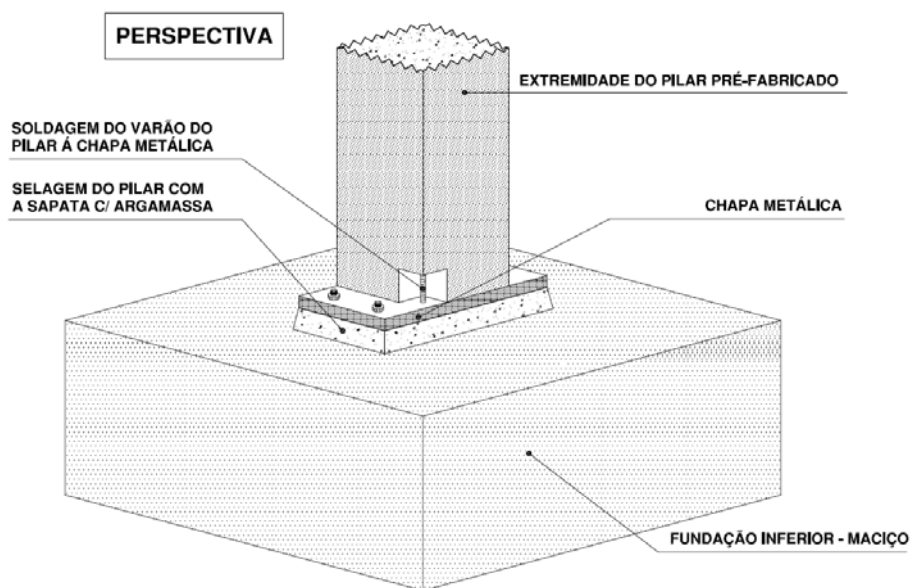


Figura 2.18. Ligação pilar-fundação com ferrolhos aparafusados (adaptado de [1])

O sistema de ligação pilar-fundação em estudo neste trabalho consiste em deixar na extremidade inferior dos pilares armaduras salientes que são introduzidas em negativos executados nas fundações (Figura 2.15). Estes negativos são posteriormente injectados com "grout" para garantir a ligação.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Estudaram-se três tipos de negativos em maciços de betão armado que simulam a fundação e optou-se por variar o comprimento de embebição nos diversos tipos de negativos. Todos os negativos foram selados com “grout” e ensaiados monotónicamente. Um dos tipos de ligação foi ensaiado sob acções cíclicas.

2.3.2. Sistemas comerciais de ligação pilar-fundação

2.3.2.1. Ligação pilar-fundação comercializado pela empresa “B.S. ITALIA”

A ligação apresentada na Figura 2.19 funciona através de um sistema de aperto de porcas e da introdução dos varões provenientes da base do pilar num negativo na sapata composto por um tubo metálico que tem no seu interior varões que se encontram betonados à sapata. Por fim, todos os negativos são seladas com “grout”.

A transmissão de forças entre os varões é conseguido através do confinamento do “grout” proporcionado pelo tubo metálico. Este impede o “splitting” do “grout”, ocorrendo em último caso e de modo pouco dúctil a rotura designada por “pull-out”. Estes fenómenos podem ser compreendidos no capítulo 3.

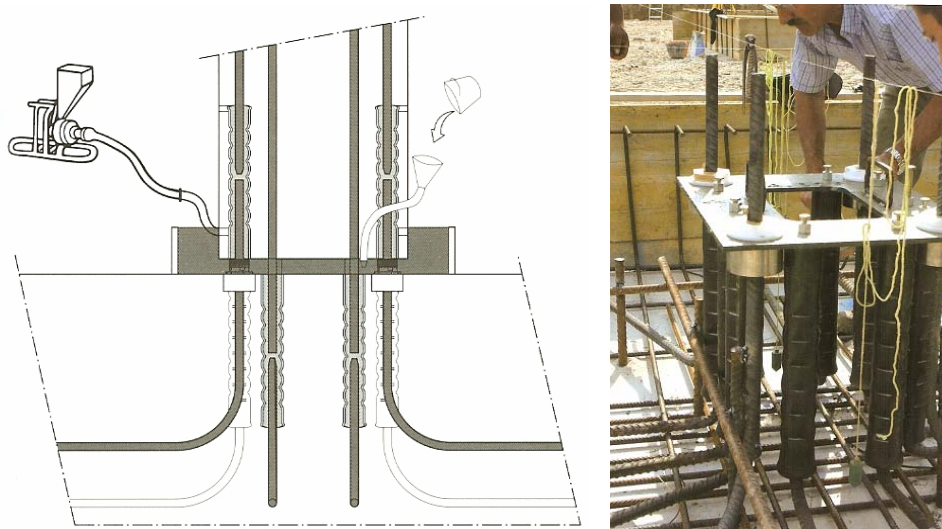


Figura 2.19. Pormenor de ligação pilar – fundação comercializada pela empresa “B.S.ITALIA”

Este tipo de ligação tem como principal vantagem a possibilidade de garantir a verticalidade no momento da montagem sem recurso a nenhum tipo de escoramento provisório. O nivelamento é

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

conseguido através de um sistema de porcas de grande dimensão como se pode observar na Figura 2.20.

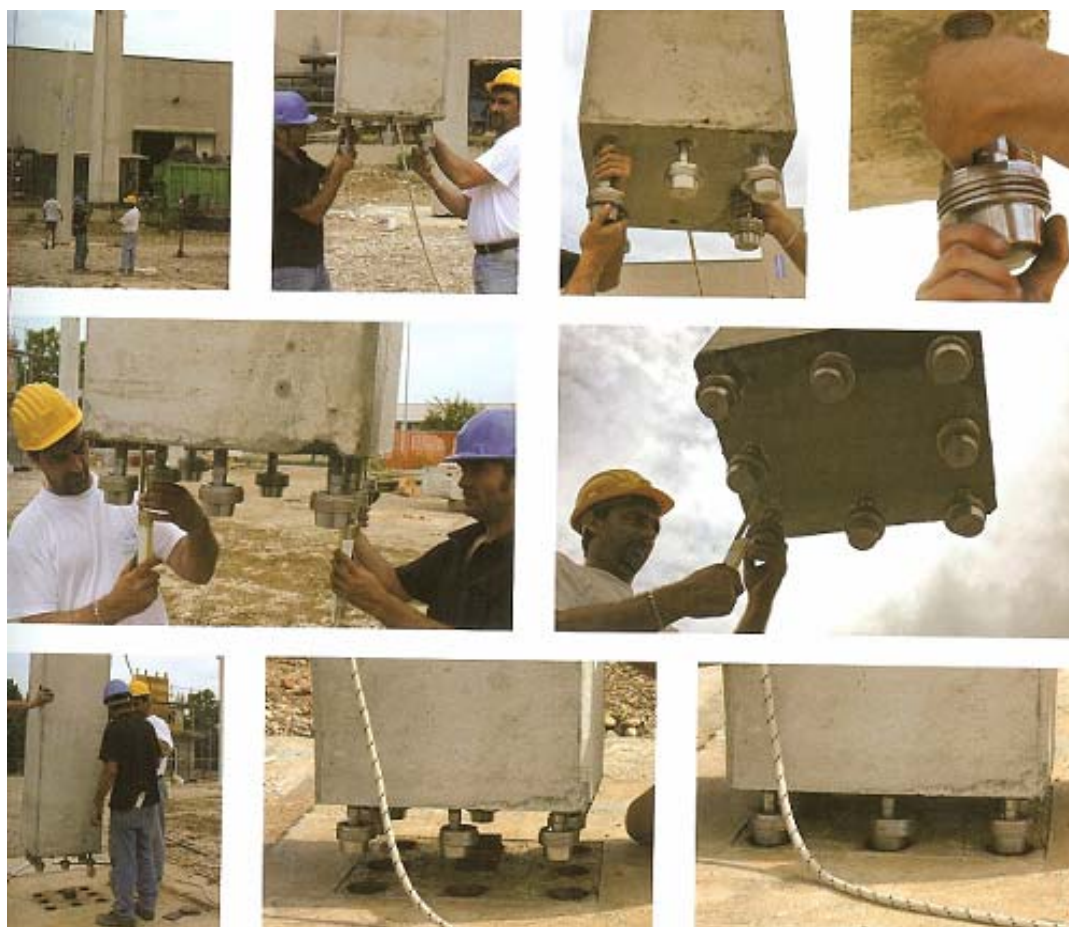


Figura 2.20. Apresentação do sistema que garante a verticalidade durante a montagem [34]

2.3.2.2. Ligação pilar–fundação comercializado pela empresa “PEIKKO”

Este tipo de ligação (Figura 2.21) já foi descrito anteriormente e é semelhante às ligações utilizadas em estruturas metálicas, constituídas por ferrolhos salientes da fundação que são aparafusados a uma chapa que vem soldada às armaduras na base do pilar (Figura 2.17 e 2.18). Esta ligação apresenta a vantagem de ser possível efectuar o nivelamento através dum sistema de porcas e contraporcas, sendo posteriormente executada a selagem da junta existente entre a face inferior do pilar e fase superior da fundação.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

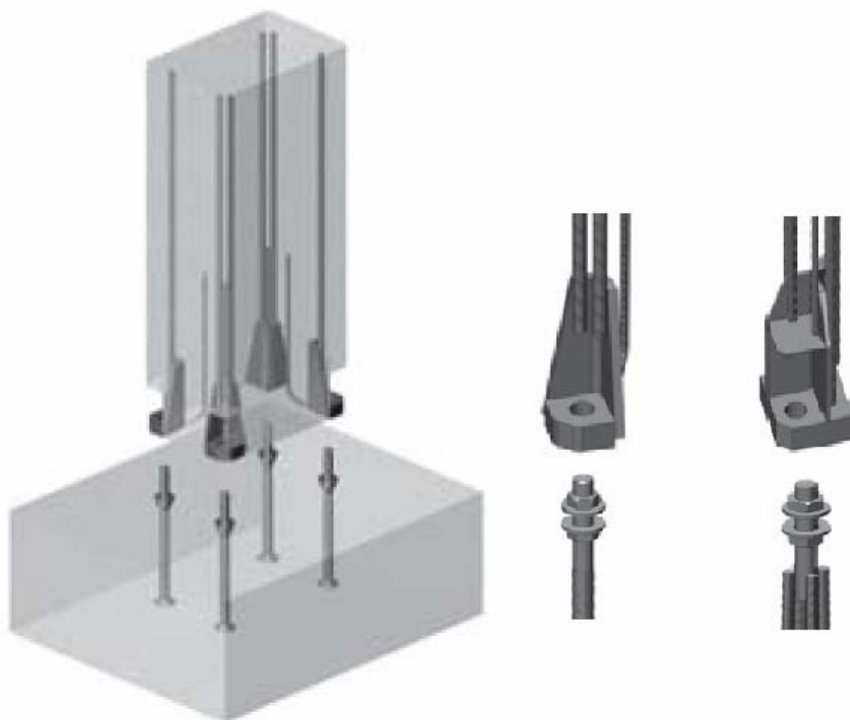


Figura 2.21. Pormenor de ligação pilar – fundação comercializada pela empresa “PEIKKO”

Ambas as soluções apresentadas pelas duas empresas são pouco dúcteis e tornam-se difíceis de aplicar em pilares com grandes taxas de armadura na base.

Apresentam também, diversos problemas para aplicação na indústria de pré-fabricação em Portugal devido ao elevado preço do sistema.

2.3.3. Ligação pilar – fundação em desenvolvimento

No Japão está em desenvolvimento um sistema de ligação pilar-fundação (Figura 2.22) utilizando um sistema híbrido de armadura mais cabos de pré-esforço [15]. Este sistema é composto por um sistema complexo de interação entre os cabos de pré-esforço e a armadura ordinária. Os cabos de pré-esforço para além de contribuírem para a resistência aos esforços de flexão têm também a função de reposicionar o pilar após um deslocamento devido ao sismo.

Este sistema tem a particularidade de o esforço transversal no pilar ser transmitido à fundação essencialmente pelo atrito entre a base do pilar e a zona de apoio da fundação.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

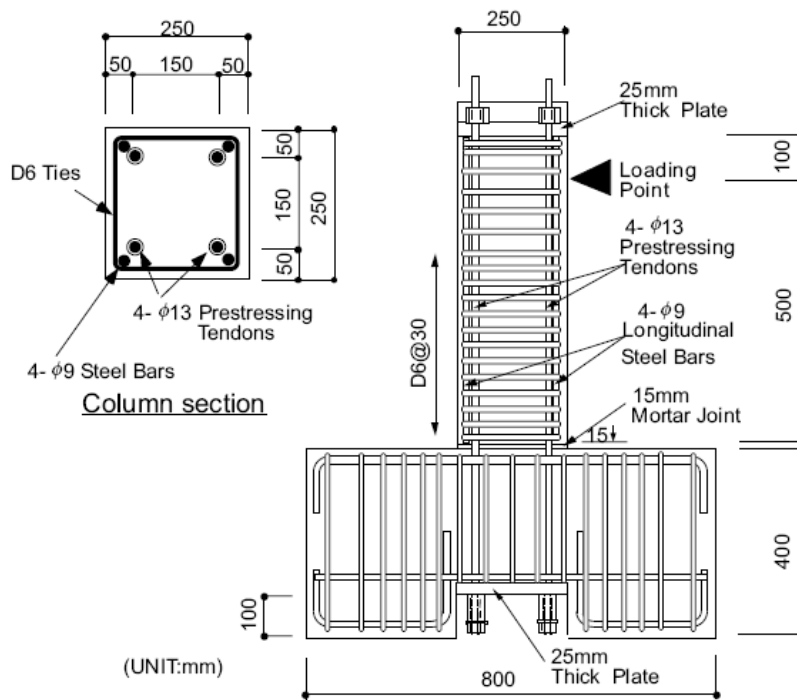


Figura 2.22. Sistema de ligação pilar-fundação [15].

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

3. SISTEMAS DE ADERÊNCIA EM BETÃO ARMADO

3.1. O Betão

Os diagramas típicos de tensão – deformação de diversos betões para carregamentos de compressão monotónicos são apresentados na Figura 3.1.

A análise da Figura 3.1 permite concluir que os betões com baixas características resistentes apresentam uma maior ductilidade, e os betões com elevadas resistências apresentam-se mais frágeis.

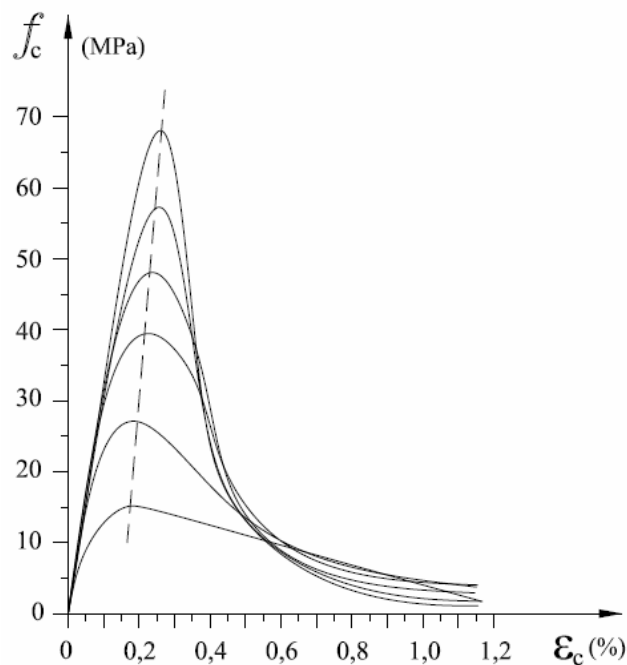


Figura 3.1. Diagrama tensão-deformação do betão para carregamentos monotónicos [16]

Através dos diagramas da Figura 3.1 podemos identificar 3 fases do comportamento mecânico do betão:

1 - Uma primeira fase com um ramo linear elástico indicando comportamento elástico.

2 - Uma segunda fase entre os 70% e 100% da tensão máxima onde é evidente uma redução da rigidez. É nesta fase que começam a desenvolver-se fissuras entre a pasta de cimento e os inertes (microfendilhação).

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

3 - Uma terceira fase corresponde à pós-ruptura com a diminuição da tensão e o surgimento de fissuras visíveis até à total destruição do betão.

Para carregamentos cíclicos à compressão em cilindros o betão tem um comportamento idêntico ao da Figura 3.2. Da análise das Figuras constata-se que a envolvente do carregamento cíclico coincide com a curva de carregamento monotónico.

À medida que se aumenta o número de carregamentos é visível a diminuição do declive da curva de carregamento. Isto deve-se à sucessiva degradação da estrutura interna do betão causada pela propagação das fissuras entre a pasta de cimento e os inertes. Na fase de descarga, são visíveis duas fases, a primeira imediatamente após a tensão máxima que se apresenta bastante íngreme e a segunda fase com redução da rigidez devido às deformações plásticas ocorridas no ciclo imediatamente anterior.

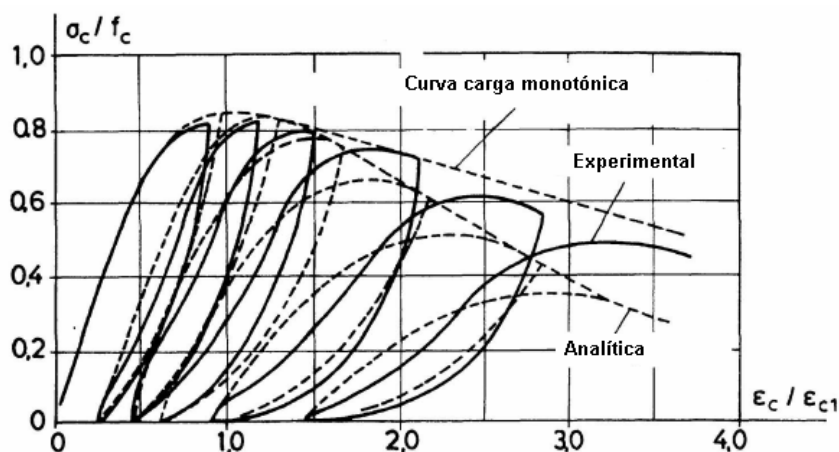


Figura 3.2. Diagrama tensão-deformação do betão para carregamentos de compressão cíclicos [16].

3.2. O Aço

O comportamento típico das armaduras ordinárias (aço laminado a quente) à tracção é apresentado na Figura 3.3. Da análise desse gráfico constata-se que as armaduras com menor resistência apresentam um comportamento mais dúctil, enquanto os aços com maior resistência apresentam menor ductilidade.

É normalmente assumido que os diagramas tensão-deformação do aço são idênticos em tracção e compressão, o que se tem verificado razoavelmente correcto através de ensaios experimentais [16].

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

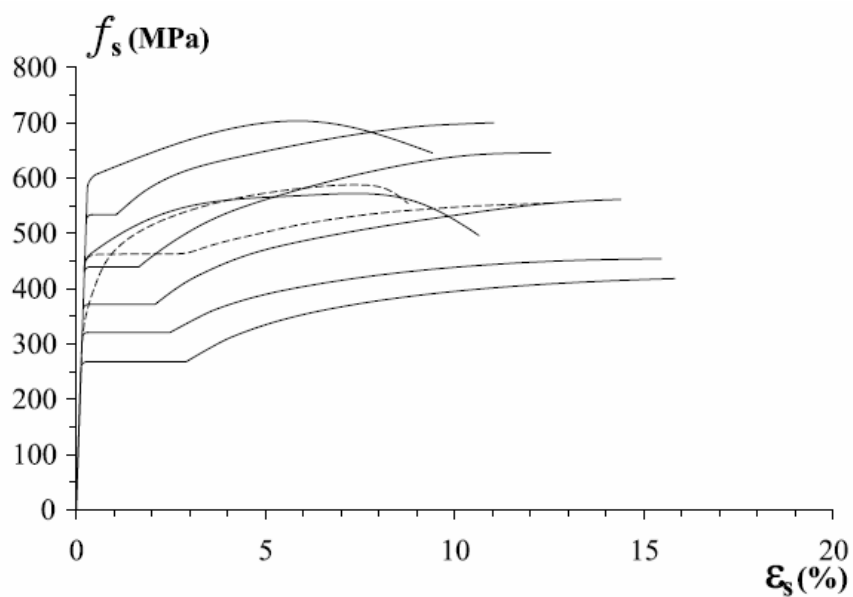


Figura 3.3. Diagrama tensão-deformação de aços de diversas classes, para acções monotónicas de forças de tracção [16]

No contexto do dimensionamento sísmico das estruturas de betão armado em que a exploração da ductilidade dos seus elementos, como forma de dissipação de energia transmitida pelos sismos, é assumida condição necessária para que as estruturas possam suportar as acções dos sismos, o comportamento dos varões de aço assumem maior importância. Dependendo do elemento estrutural, existe varões de aço que podem estar, em momentos diferentes, sujeitos a tensões de tracção e compressão, ou seja, podem estar sujeitos a acções cíclicas.

O andamento do diagrama tensão-deformação do aço sujeito a acções cíclicas corresponde ao apresentado na Figura 3.4.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

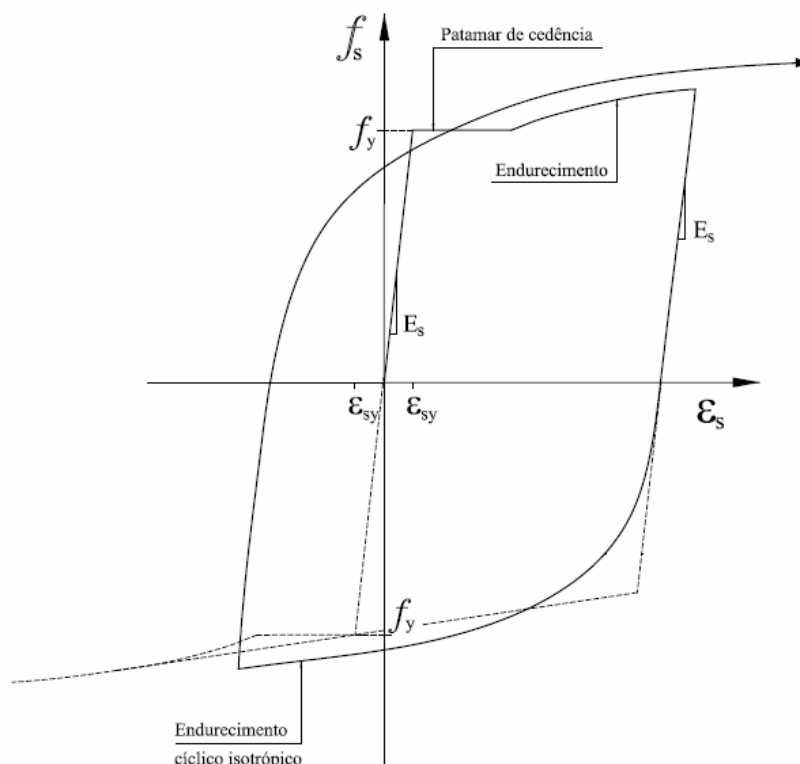


Figura 3.4. Diagrama tensão-deformação de aço para ações cíclicas [16].

Para além do troço elástico, do patamar de cedência e do troço com endurecimento antes da primeira inversão, o modelo deverá simular o efeito de “Baushinger”, em que, sob ações alternadas, o diagrama tensão-deformação do aço se torna não linear para tensões inferiores à tensão de cedência inicial [16].

3.3. Aderência entre armaduras de aço e betão para ações monotónicas

O mecanismo de transferência de tensões por aderência entre as armaduras e o betão é bastante conhecido, tendo sido alvo de variadíssimos estudos.

Os aspectos gerais a ter em conta na ligação entre o betão e os varões de aço segundo Lúcio e Marreiros [17] são, a adesão química, o atrito e a ligação mecânica que se instala entre os dois materiais. Muitos autores afirmam que grande parte da força transmitida pelo aço ao betão é feita através das nervuras sendo possível considerar que a tensão de aderência é a componente longitudinal da força exercida pelas nervuras do varão de aço no betão.

A transferência de forças de tracção entre varões de aço embebidos em betão é feita através de tensões de aderência que não são uniformemente distribuídas, mas que para efeito de cálculo são

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

consideradas uniformes. A Figura 3.5 e 3.6 apresentam a curva simplificada das tensões de aderência ao longo da barra desde o início da força de tracção até mobilizar todo o varão embecido.

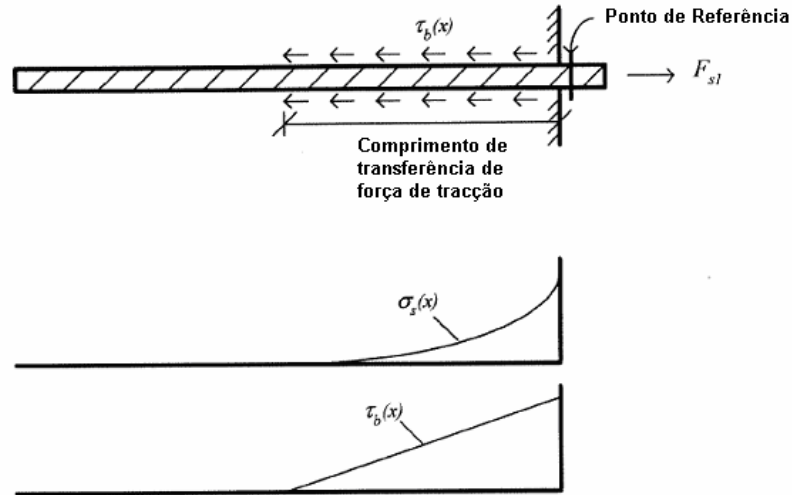


Figura 3.5. Curva das tensões de aderência no início da tracção, adaptado de [9]

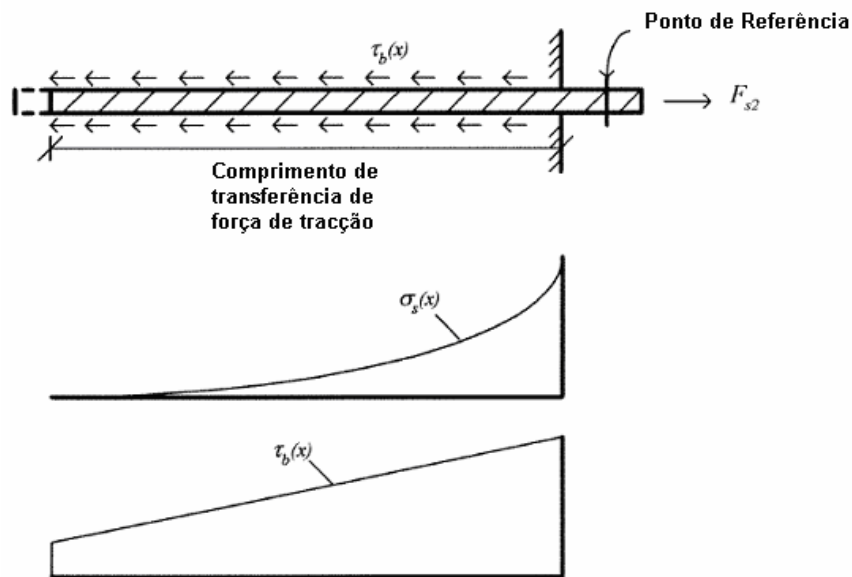


Figura 3.6. Curva das tensões de aderência com a mobilização de todo o varão, adaptado de [9]

Os autores Lúcio e Marreiros no trabalho desenvolvido [17], aprofundaram o estudo do comportamento da aderência de varões nervurados de aço ao betão. Um dos aspectos mais

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

importantes a transcrever é a descrição do comportamento do ensaio de “pull out”, que consiste em traccionar um varão de aço inserido num bloco de betão, exercendo a força de reacção por compressão contra o bloco de betão.

Neste ensaio podem-se identificar quatro fases do comportamento da aderência entre o aço e o betão (Figura 3.7.a)

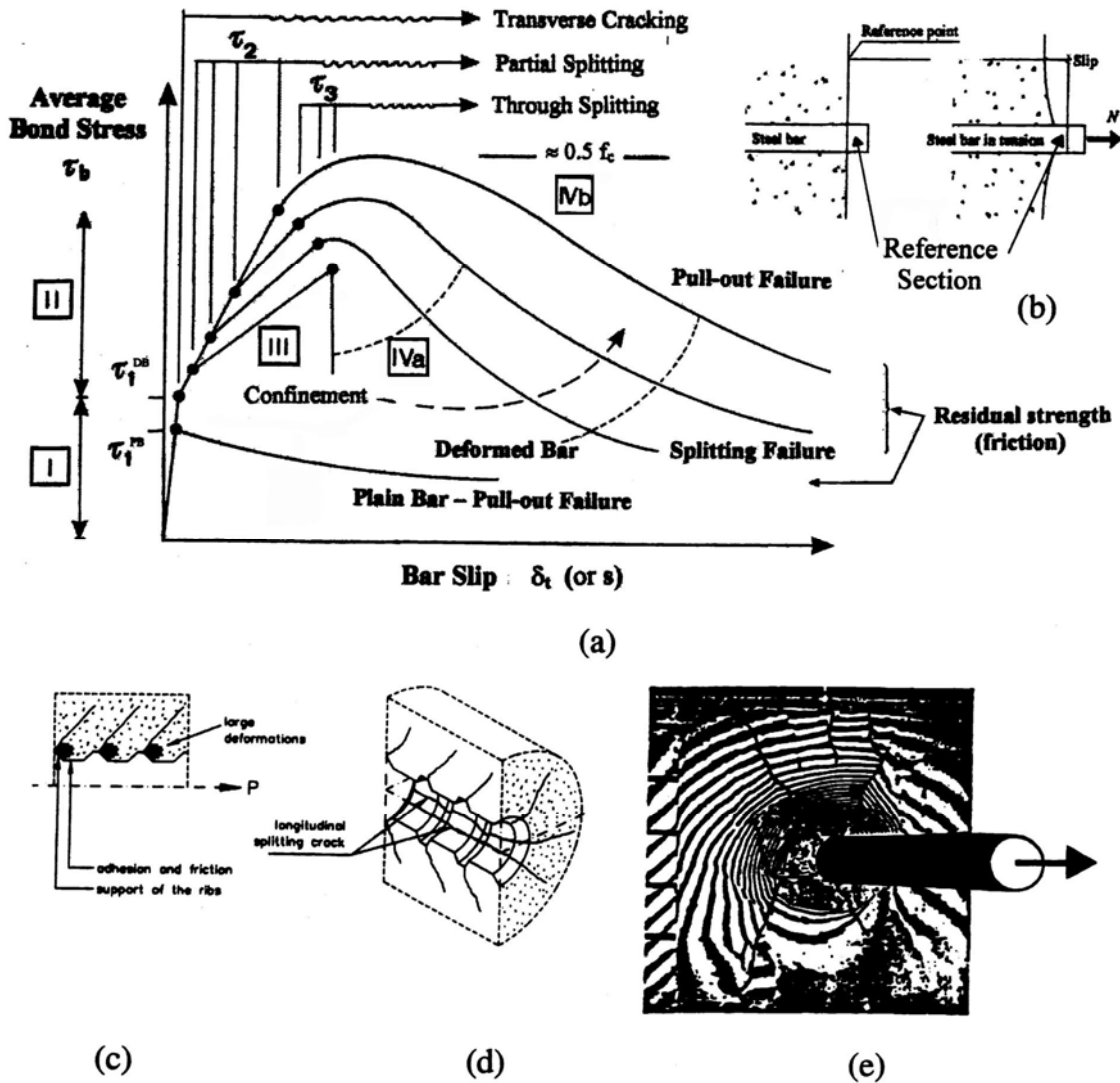


Figura 3.7. a) Tensões tangenciais função do escorregamento para vários cenários possíveis;
b) escorregamento; c) adesão, atrito e compressões das nervuras (bearing action);
d) fissuras transversais e de “splitting”; e) “splitting” parcial [18]

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Fase I (betão não fendilhado)

No início do ensaio, ainda para baixas tensões de aderência, $\tau \leq \tau_1 = (0.2-0.8) f_{ct}$, a aderência é assegurada essencialmente por adesão química, quase não ocorrendo escorregamento, mas ocorrendo um grande crescimento das tensões junto à extremidade das nervuras (Figura 3.8.a). Para além da adesão química, existe também uma interação mecânica associada a uma rugosidade microscópica da superfície do aço. No global, a adesão química ($0,20.f_{ct}$) e física ($0,80.f_{ct}$) é desprezável, como se pode comprovar através da observação do comportamento de varões lisos, onde a adesão química e o “microinterlocking” são rapidamente seguidas de escorregamento dos varões. Nesta fase o deslocamento relativo que ocorre é devido às distorções na camada de betão junto ao aço (interface), escorregamento que é praticamente desprezável.

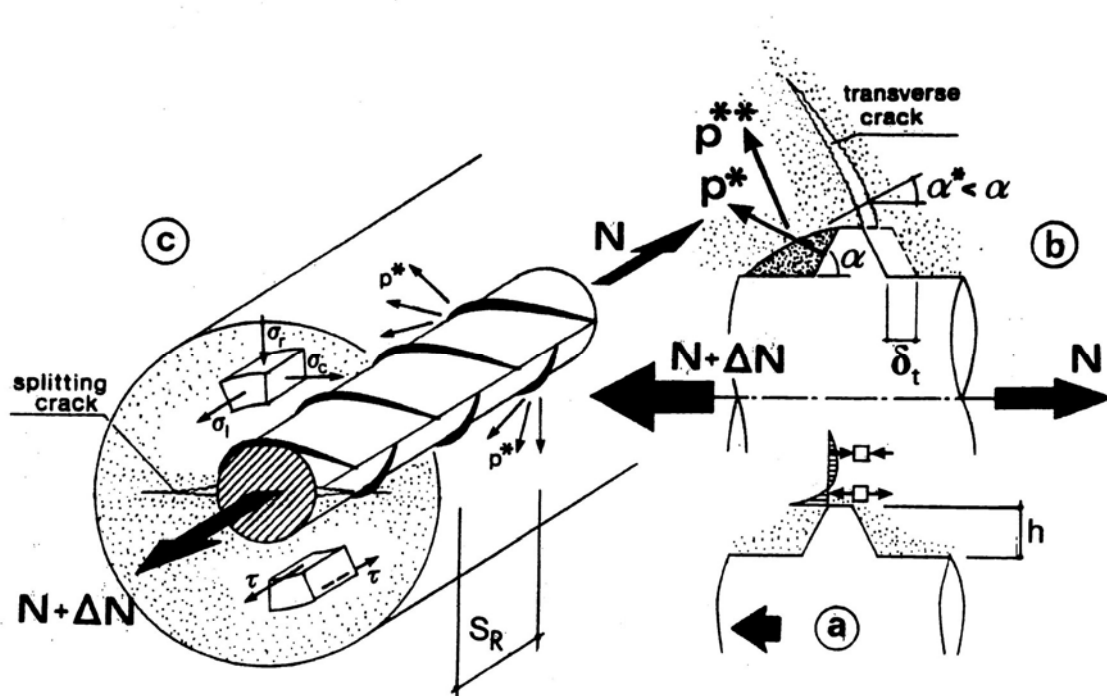


Figura 3.8. Aderência e “splitting” em betão armado: a) pico de tensões junto às extremidades das nervuras; b) escorregamento e compressões originadas pelas nervuras; c) parâmetros principais [18]

Fase II (primeiras fendas)

Para valores superiores das tensões de aderência, $\tau > \tau_1$, a adesão química perde-se. Em varões nervurados, as nervuras induzem grandes tensões no betão e originam micro-fendilhação transversal ao eixo do varão na extremidade das nervuras permitindo que ocorra escorregamento

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

(Figura 3.8.b), mas nesta fase a acção das nervuras ainda é limitada, não ocorrendo “splitting” (Figura 3.7.d).

Fase III

Para valores ainda superiores das tensões de aderência, $\tau \leq \tau_b = (1 \text{ a } 3).f_{ct}$, a fendilhação longitudinal (“splitting cracks”, Figuras 3.7.d e 3.8.c) alastra-se radialmente (Figura 3.9.a) devido ao aumento da acção das nervuras, que esmagam o betão que lhes é adjacente e introduzem um estado de tensão de tracção (σ_c na Figura 3.8.c). Esta pressão exercida pelas nervuras no betão circundante (Figuras. 3.9.b) é resistida pelas tensões de cintagem no betão. Como consequência, o betão circundante exerce uma acção de confinamento no varão, e a resistência por aderência e a rigidez são asseguradas essencialmente pelo intrincamento ao longo da armadura, pelas bielas radiais de betão e pelo anel de betão exterior não danificado. No caso da armadura transversal ser reduzida, esta fase terminará assim que a fendilhação radial “concrete splitting” atingir a face exterior de betão. A rotura ocorrerá por “splitting” (fase IVa).

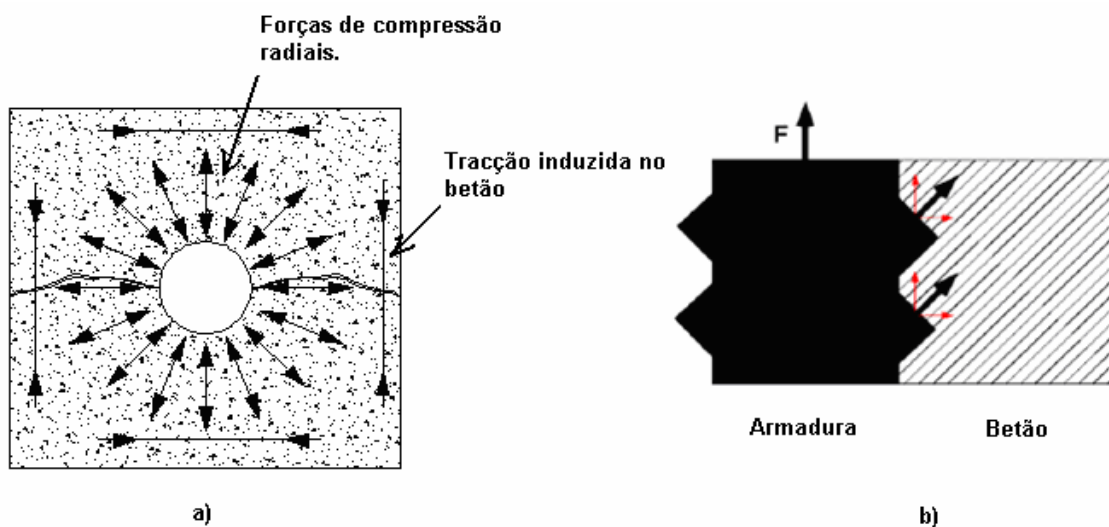


Figura 3.9. a) tensão transversal induzida no betão;
b) Bielas de compressão no betão, adaptado de [19]

No entanto em ancoragens relativamente longas e com um confinamento moderado, poderá ocorrer uma rotura mista, sendo numas zonas da ancoragem rotura por “splitting” e noutras rotura por “pull-out”. Esta rotura é definida por “splitting-induced pull-out failure”.

No caso da armadura transversal ser elevada ou o recobrimento ser grande, o confinamento vai impedir o “splitting”, ficando este limitado ao núcleo fendilhado em redor do varão. Esta rotura é designada por “pull-out failure” (fase IVb).

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

A acção dos varões com o aparecimento da fissuração longitudinal vai mobilizar todas as possibilidades de confinamento. A eficiência do confinamento depende do recobrimento e do espaçamento entre varões, da quantidade de armadura transversal e da coesão das fendas.

Fase IVa

No caso de varões nervurados confinados fraca ou medianamente por armadura transversal, a fendilhação longitudinal (“splitting cracks”) ocorre em todo o recobrimento e espaçamento entre varões e a aderência tende a perder-se abruptamente (Figura 3.10.c). Por outro lado, armadura transversal em quantidade suficiente pode assegurar a eficiência da aderência em vez da separação (“splitting”) do betão, devido à acção de confinamento desenvolvida pelo reforço. Nesta fase podem ocorrer escorregamentos muito significativos e até inaceitáveis.

A rotura, por “splitting” é bastante frágil, sendo mais preocupante em betões leves e em betões de alta resistência, uma vez que as fendas não ocorrem só na pasta de cimento, mas também atravessam os agregados. Isto provoca fendas menos rugosas e mais planas.

Fase IVb

Como foi referido na fase III, no caso de varões nervurados fortemente confinados, não ocorrerá “splitting”, ocorrendo a rotura por “pull-out” (Figura 3.10.a).

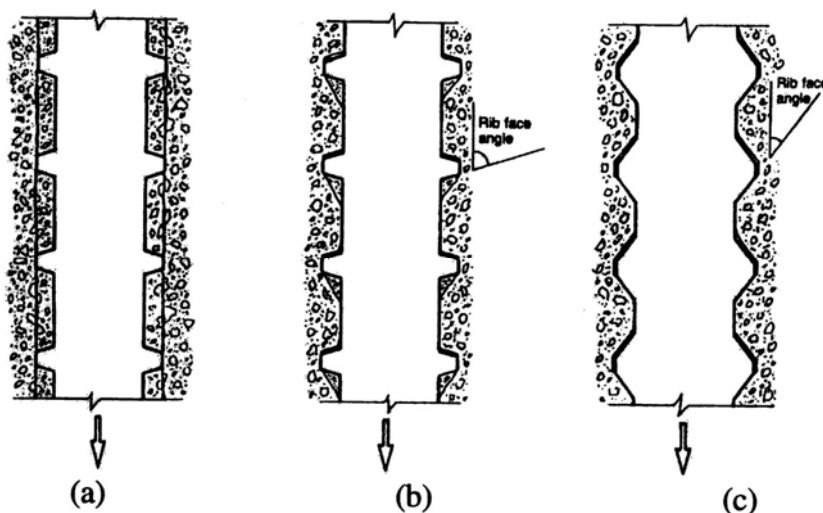


Figura 3.10. Modos de rotura por aderência: a) rotura por “pull-out”;
b) rotura por “pull-out” induzida por “splitting” com esmagamento e/ou corte do
betão debaixo às nervuras; c) rotura por “splitting” [18].

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Existem também vários factores que influenciam a aderência. Um desses factores é a colocação dos varões de aço durante a betonagem, de tal modo, que o melhor comportamento da aderência consegue-se em varões horizontais colocados na parte inferior da cofragem e em varões verticais solicitados em sentido contrário ao da betonagem, ou seja, em ambos os casos com as nervuras a serem empurradas contra a pasta de cimento menos porosa.

O estado de tensão no betão é um outro factor importante, podendo condicionar o tipo de rotura num caso limite. Se o betão estiver sujeito a tensões de tracção na direcção transversal, existe uma maior facilidade à abertura de uma fenda longitudinal ao varão, o que significa que o comportamento de varões embebidos no betão têm tendência de romper por “splitting”, e varões selados no betão que teriam tendência a ter roturas por “pull-out” podem, no limite, ter roturas por “splitting”. As compressões transversais às armaduras vão produzir um efeito de confinamento, que é favorável, pois tende a não permitir que se abra a fenda longitudinal referida.

3.4. Aderência entre armaduras de aço e betão para acções cíclicas

Quando sujeitas a carregamentos cíclicos ou repetidos, as zonas de ancoragem sofrem uma progressiva degradação da aderência que poderá conduzir a uma rotura para forças e tensões de aderência inferiores às tensões últimas obtidas com ensaios monotónicos. A diminuição da aderência é devido à propagação de micro fendas e da progressiva destruição do betão em frente às nervuras do varão de aço [18].

A aderência antes da rotura é garantida somente pelo comportamento das nervuras, por esse motivo a resistência à compressão do betão é o factor mais importante na aderência, e não a resistência à tracção. Um adequado confinamento é muito importante para que não ocorram as primeiras fendas principalmente perante acções cíclicas com cargas alternadas.

Quando se considera a aderência para um numero elevado de ciclos com cargas no mesmo sentido e para o mesmo valor de carga, observa-se através da Figura 3.11 que existe uma diminuição do escorregamento comparativamente com os ciclos iniciais, depois mantém-se constante e aumenta o seu valor de escorregamento mesmo antes de ocorrer a rotura da ligação, normalmente por pull-out [18].

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

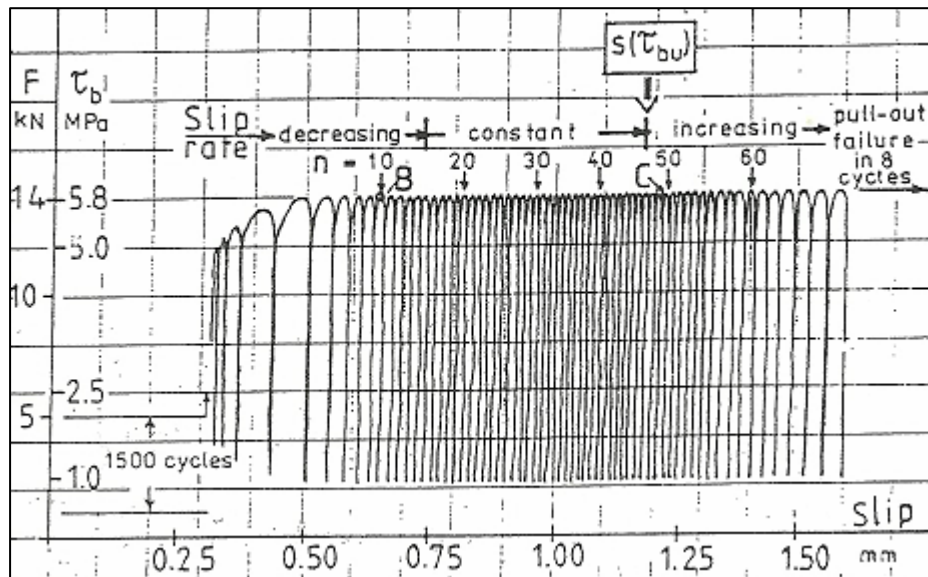


Figura 3.11. Degradação da aderência perante cargas cíclicas no mesmo sentido para valores de carga constante

Em ensaios realizados, Eligehausen et al. [20] mostraram que a degradação em ensaios cíclicos com carga alternada e deslocamento alternado são mais prejudiciais para a aderência do que o mesmo número de ensaios com cargas no mesmo sentido.

No caso da ligação se encontrar em betão fendilhado como se mostra na Figura 3.12, a resistência da ligação reduz-se aproximadamente em 50% [22]. Este fenómeno ocorre porque existe uma redução de aproximadamente metade da área de aderência.

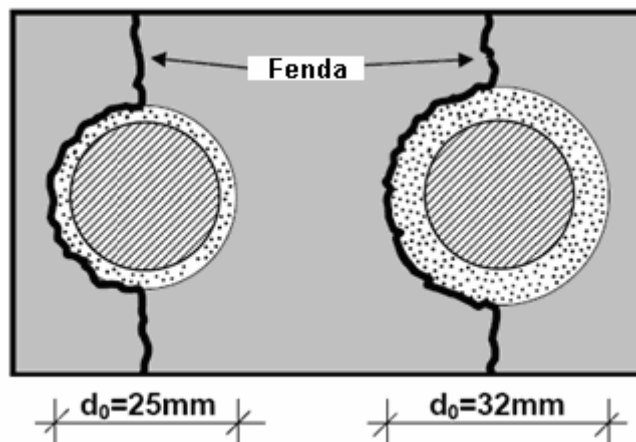


Figura 3.12. Redução da área de aderência devido a fenda [22]

3.5. Comprimento de amarração de acordo com o Eurocódigo 2

De acordo com o Eurocódigo 2 [7] o comprimento de amarração a utilizar numa ligação de um varão de aço nervurado, depende essencialmente do diâmetro e da classe do aço, das dimensões e classe do betão e se existe ou não confinamento dessa ligação. Este comprimento de amarração deve respeitar a seguinte expressão:

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (3.1)$$

em que $l_{b,rqd}$ é o comprimento de amarração base dado pela expressão (3.2), $l_{b,min}$ é idêntico ao referido para o REBAP [6] e os coeficientes α têm a função de ter em conta diversos factores. O α_1 tem em conta a forma da barra considerando adequado o recobrimento, o α_2 tem em conta a espessura do recobrimento, o α_3 tem em conta o confinamento conferido pela armadura transversal, α_4 tem em conta a existência de varões transversais soldados e o α_5 tem em conta a pressão transversal ao longo do comprimento de ancoragem. O produto $\alpha_2 \alpha_3 \alpha_5$ não pode ser inferior a 0,7.

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \times \frac{\sigma_{Sd}}{f_{bd}} \quad (3.2)$$

Na expressão 3.2, ϕ é diâmetro do varão, σ_{Sd} é valor de cálculo da tensão no varão na secção inicial da zona de ancoragem e f_{bd} é o valor de cálculo da tensão de rotura da aderência, onde f_{bd} para varões de alta aderência pode ser considerado igual a:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad (3.3)$$

em que f_{ctd} é o valor de cálculo da resistência do betão à tracção segundo [7], o η_1 é o coeficiente relacionado com as condições de aderência e com a posição do varão durante a betonagem e o η_2 está relacionado com o diâmetro do varão (ver [7]).

3.6. Ancoragens pós-instaladas (em estruturas pré-fabricadas)

3.6.1. Ancoragens com varões selados com “grout” em betão não fendilhado

O dimensionamento das armaduras seladas com “grout” é similar ao dimensionamento de ligações embebidas no betão, contudo, é necessário uma execução cuidada desta ligação para que seja eficiente. Tendo em conta que uma ligação com varões selados com “grout” é pouco deformável, o seu dimensionamento depende, essencialmente, da resistência aos estados limites últimos [21].

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

A quantificação da resistência da ancoragem dos varões pós-instalados pode ser efectuada através dos modelos de cálculo da resistência da ancoragem de varões, ou ferrolhos, pós-instalados no betão e selados com “grout”. Neste âmbito são conhecidos diversos trabalhos de Eligehausen [22], de Miltenberger [23], de Cook et all, [24] e Khunz et all [25] (estes dois últimos, selagem com resinas), entre outros. De acordo com Miltenberger [23] a rotura da ligação executada através de um varão embebido num negativo e selado com “grout”, pode ocorrer pelos seguintes modos (Figura 3.13):

1 - Cedência do aço do varão,

$$F_{Rd,1} = A_s \cdot f_{yd} \quad (3.4)$$

2 - Rotura da ligação entre o aço e o “grout”,

$$F_{Rd,2} = \pi \cdot \phi \cdot h_{ef} \cdot f_{bd,grout} \quad (3.5)$$

3 - Rotura da ligação entre o “grout” e o betão,

$$F_{Rd,3} = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot f_{bd,betão} \quad (3.6)$$

4 - Rotura com forma cónica pelo betão,

$$F_{Rd,4} = 12,5 \cdot (f_{cd})^{0,5} \cdot (h_{ef})^{1,5} \quad (3.7)$$

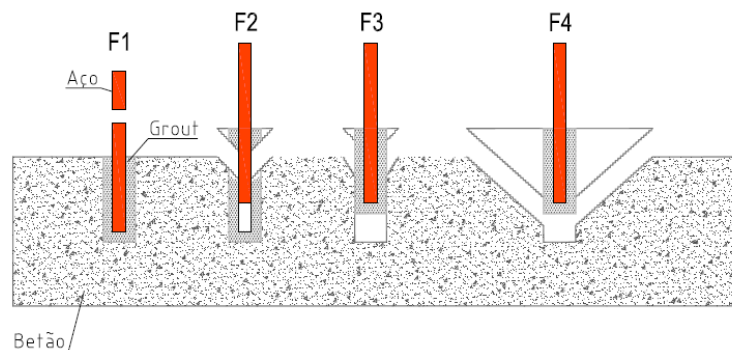


Figura 3.13. Modos de rotura da ligação executada com varão embebido num negativo selado com “grout”, adaptado de [23]

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

As Eqs (3.4) a (3.7) quantificam o valor de cálculo da resistência à tracção da ligação (F_{Rd}). A_s representa a área da secção transversal do varão e \varnothing o seu diâmetro, f_{yd} corresponde ao valor de cálculo da tensão de cedência do aço do varão, h_{ef} é o comprimento de embebiamento do varão, d é o diâmetro interior do negativo, $f_{bd,grout}$ e $f_{bd,betão}$ representam o valor de cálculo da resistência por aderência do "grout" e do betão, respectivamente, e f_{cd} o valor de cálculo da resistência à compressão do betão.

A Eq (3.7) é válida apenas nos casos em que $h_{ef} < 280$ mm. Para $280 \text{ mm} \leq h_{ef} \leq 635$ mm deve ser utilizada a Eq (3.8).

$$F_{Rd,4} = 4,75 \cdot (f_{cd})^{0,5} \cdot (h_{ef})^{1,67} \quad (3.8)$$

Nas Eqs (3.7) e (3.8) h_{ef} e f_{cd} têm unidades de mm e N/mm^2 , respectivamente.

A equação recomendada para o modo de rotura 4 refere-se a uma ligação isolada no interior de um maciço de betão com espessura considerável e sem armaduras. Nos casos de agrupamento de ligações ou de ligações próximas dos limites do maciço de fundação, deverão ser considerados coeficientes redutores da força resistente. Estes coeficientes estão disponíveis através de Eligehausen e não são relevantes para a presente dissertação. Os valores obtidos com as Eqs (3.4) a (3.7) segundo o autor deste estudo [23] deverão ser reduzidos a metade nas situações em que o betão se encontra fendilhado.

Segundo Eligehausen [26] tem que existir uma grande preocupação na limpeza do negativo onde é selado o varão de aço, caso contrário, existe uma redução da resistência da ancoragem que pode ir até metade do valor da resistência de um furo bem limpo.

Na Figura 3.14 é ilustrado o mecanismo de transferência da força de tracção através das nervuras do varão de aço para o "grout" e seguidamente do "grout" para o betão.

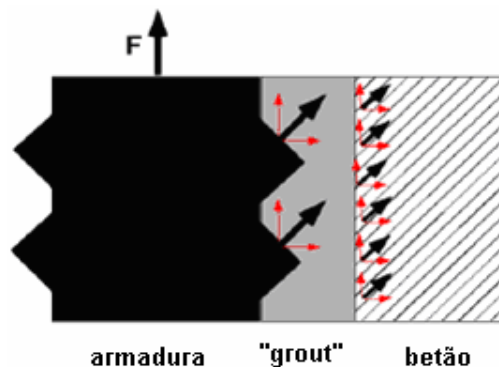


Figura 3.14. Mecanismo de transferência de forças entre varão de aço, "grout" e betão, adaptado de [19]

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

No caso de ancoragens com varões selados com “grout” em betão fendilhado, as expressões acima referidas não podem ser aplicadas. Nesse caso existem diversos trabalhos de Eligehausen [22, 27] que apresentam estudos sobre o comportamento deste tipo de ancoragens.

3.6.2. Ancoragens com varões embebidos em betão não fendilhado

A quantificação da resistência de varões embebidos no betão pode ser efectuada através dos modelos de cálculo da resistência normais neste tipo de ligação (Figura 3.15). A rotura de varões embebidos no betão pode ocorrer dos seguintes modos:

1 - Cedência do aço do varão,

$$F_{Rd,1} = A_s \cdot f_{yd} \quad (3.9)$$

2 - Rotura da ligação entre o aço e o betão,

$$F_{Rd,2} = \pi \cdot \phi \cdot h_{ef} \cdot f_{bd, \text{betão}} \quad (3.10)$$

4 - Rotura com forma cónica pelo betão. De acordo com o boletim 43 da FIB [9], na sua secção 7.3.2, a expressão para a rotura com forma cónica do betão para comprimentos de embebedimento ($h_{ef} > 100$ mm) vem:

$$F_{Rd,4} = 7,0 \cdot (f_{cd})^{0,5} \cdot (h_{ef})^{1,5} \quad (3.11)$$

Na utilização da expressão 3.11 o boletim 43 da FIB [9], recomenda que se utilize um coeficiente de segurança ($\gamma_{Mc} = 1,80$). Esta expressão para comprimentos de embebedimento superior a 200 mm ($h_{ef} > 200$ mm) é bastante conservadora.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

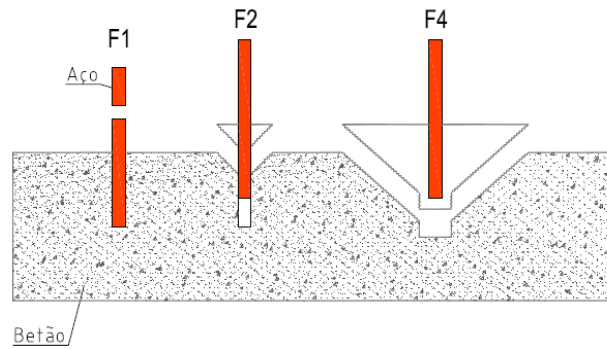


Figura 3.15. Modos de ruptura de varões embebidos no betão

3.6.3. Ancoragens com bainhas metálicas em betão não fendilhado

No caso em estudo (quantificação da resistência da ancoragem dos varões pós-instalados) é estudado a ligação pilar-fundação através da ancoragem da armadura saliente do pilar em bainhas metálicas previamente betonadas na fundação. Na Figura 3.16 é apresentado o esquema de ancoragem. Este modelo de ligação permite a transferência de forças de tracção e compressão convenientemente.

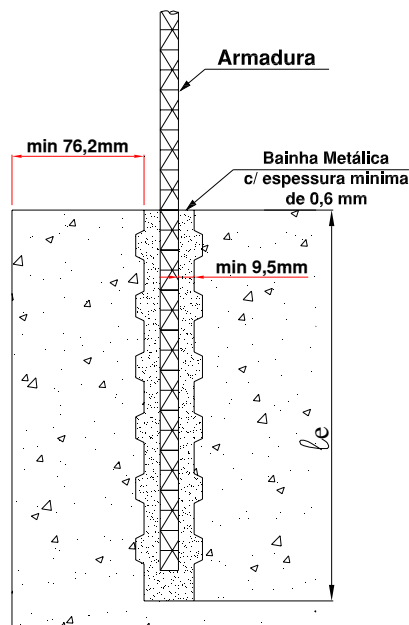


Figura 3.16. Esquema de ancoragem em “grout” [10]

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

De acordo com PCI Design Handbook [10] os comprimentos de embebedimento da armadura com diâmetro inferior a 25,4 mm (Bar Size 8) e tensão de cedência de 413,7 MPa, devem ser os seguintes:

Quadro 3.1 – Comprimento de embebedimento (l_e) em “grout”, adaptado de [10]

Diâmetro (mm)	l_e (mm)
9,5	305
12,7	305
15,9	305
19,1	381
22,2	533
25,4	686

Nota: Caso a tensão do “grout” seja superior a 34,5 MPa, multiplica-se os valores de comprimento

de embebedimento (l_e em mm) por $\sqrt{\frac{34,5}{f_{c_{grout}} (MPa)}}$.

Contudo os valores apresentados no PCI só são válidos caso seja considerado o seguinte:

- 76,2 mm de betão em torno da bainha metálica;
- bainha com espessura mínima de 0,6 mm;
- recobrimento mínimo de “grout” em torno da armadura de 9,5 mm;
- tensão à compressão mínima do “grout”, nunca inferior à tensão de compressão do betão ou no mínimo 34,5 MPa;
- o comprimento de embebedimento (l_e) nunca deve ser inferior 305 mm.

Neste tipo de ligação em que é utilizada uma bainha como negativo e onde vai ser embebedido o varão, foi adoptado nesta dissertação e por analogia com os modelos de rotura anteriores (3.6.1), a possibilidade de considerar neste tipo de ligação os modos de rotura representados na Figura 3.17:

- 1 - Cedência do aço do varão,

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

$$F_{Rd,1} = A_s \cdot f_{yd} \quad (3.12)$$

2 - Rotura da ligação entre o aço e o "grout",

$$F_{Rd,2} = \pi \cdot \phi \cdot h_{ef} \cdot f_{bd,grout} \quad (3.13)$$

4 - Rotura com forma cônica pelo betão, fazendo a analogia com a expressão 3.11,

$$F_{Rd,4} = 7,0 \cdot (f_{cd})^{0,5} \cdot (h_{ef})^{1,5} \quad (3.14)$$

5 - Rotura da ligação entre o "grout" e a bainha metálica,

$$F_{Rd,5} = \pi \cdot d_{int} \cdot h_{ef} \cdot f_{bd,grout} \quad (3.15)$$

6 - Rotura da ligação entre a bainha e o betão,

$$F_{Rd,6} = \pi \cdot d_{ext} \cdot h_{ef} \cdot f_{bd,betão} \quad (3.16)$$

onde d_{int} e d_{ext} representam, respectivamente, os diâmetros interior e exterior da bainha.

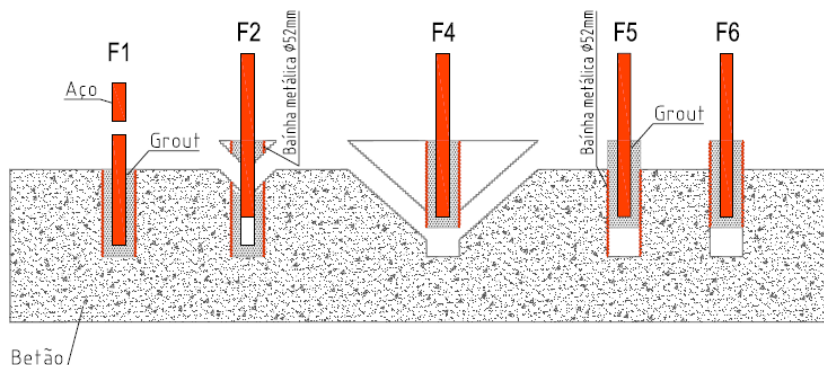


Figura 3.17. Modos de rotura com bainha metálica

3.7. Influência da armadura transversal no desempenho da aderência

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

A armadura transversal limita a progressão das fissuras radiais “splitting”, aumentando a força de aderência. O aumento da armadura transversal aumenta a aderência e converte uma rotura por fendas radiais “splitting failure” em rotura por “pull out” [32].

Segundo Zuo e Darwin [32], o total da força da aderência (T_b) pode ser representado como a soma da contribuição do betão (T_c) (contribuição da aderência do betão) mais a contribuição da aderência proveniente do aço (T_s).

$$T_b = T_c + T_s \quad (3.17)$$

O valor da contribuição do aço (T_s) é em função da área de aço que atravessa um potencial plano de fendas. Segundo os autores Zuo e Darwin [31], o valor de T_s pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$T_s = K_1 \cdot t_r \cdot t_d \cdot \frac{N \cdot A_{tr}}{n} \cdot f_c'^p \quad (3.18)$$

Onde:

K_1 = constante em [32];

t_r = factor que depende da área relativa da nervura da armadura;

t_d = factor que dependo do diâmetro da armadura;

N = numero de varões de aço em torno do varão tracionado;

A_{tr} = área de cada varão que atravessa potenciais planos de fendilhação em torno do varão tracionado;

n = numero de varões tracionados;

f_c' = resistência à compressão do betão em cilindros de 150 x 300 mm;

p = factor que consta em [32].

Nota: Estas expressões foram calibradas com unidades segundo as normas americanas.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

Neste capítulo caracterizam-se os modelos experimentais utilizados para estudar os diferentes tipos de ligações de armaduras pós-instaladas. Refere-se a concepção dos modelos, a sua geometria e pormenorização. Apresentam-se também, os resultados dos ensaios de caracterização mecânica dos materiais utilizados. Descreve-se ainda, o sistema de ensaio, os procedimentos e a instrumentação utilizada.

Este estudo do comportamento de armaduras pós-instaladas teve como objecto a ligação pilar-fundação com armaduras salientes no pilar seladas com “grout” [33] em negativos metálicos previamente betonados no maciço de fundação ou seladas em furos realizados com carotadeira em betão curado. Ao longo da campanha de ensaios alterou-se o tipo de negativo no maciço de betão e o comprimento de embeimento. O diâmetro das bainhas ou dos furos realizados com carotadeira têm diâmetro de 52 mm. O diâmetro é superior 30 mm ao diâmetro do varão selado no interior do furo (20 mm) de acordo com as indicações do boletim 43 da FIB [9].

Para cada tipo de ligação efectuaram-se três ensaios com cargas monotónicas até à rotura da ligação. Num tipo de ligação efectuaram-se três ensaios com cargas cíclicas.

4.2. Caracterização dos modelos

4.2.1. Geometria dos maciços de betão

Foram executados quatro maciços de betão, todos eles com as mesmas dimensões e com o mesmo tipo de betão como se mostra na Figura 4.1.

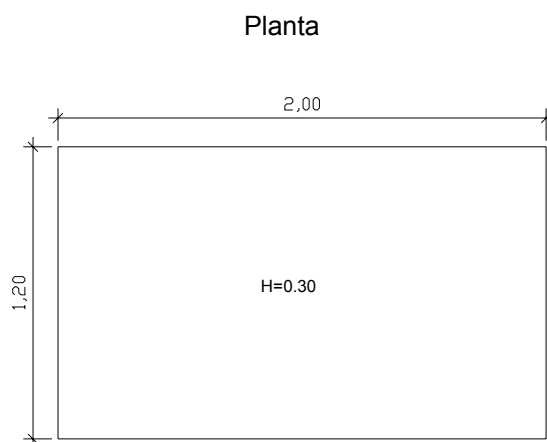


Figura 4.1. Dimensões dos maciços de betão (m)

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Todos os maciços de betão foram armados com uma malha quadrada de varões nervurados com diâmetro de 10 mm e espaçada 15 cm, (Figura 4.2).

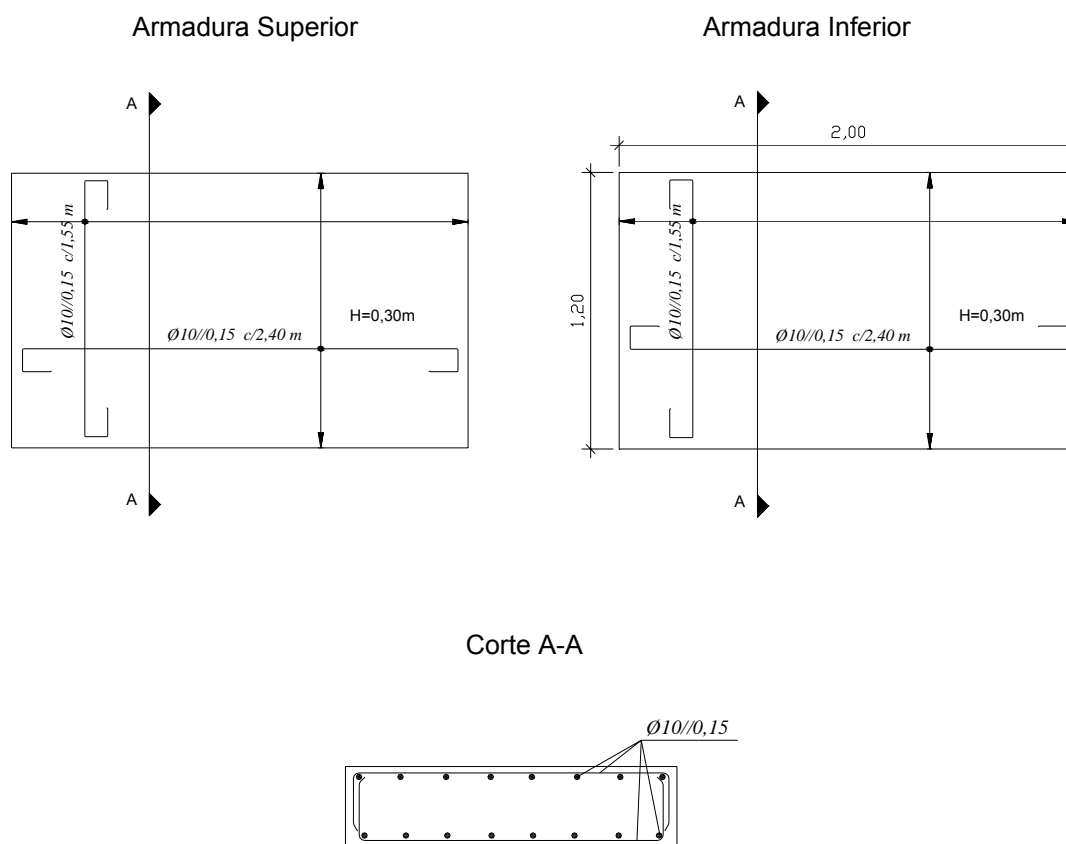


Figura 4.2. Armaduras dos maciços de betão

4.2.2. Geometria e características dos modelos de ligação

Os modelos foram agrupados em séries de três ensaios para cada tipo de ligação. Em cada maciço de betão foram deixados vários tipos de ligações usando vários comprimentos de embhecimento. No quadro 4.1 apresenta-se a geometria, as dimensões e a designação atribuída às séries de modelos ensaiados.

A primeira letra da designação atribuída refere-se a bainha de pré-esforço (P), bainha em tubo de aço liso (L), furo de carotadeira (C) ou a varão simplesmente embecido (V). A letra C a seguir à letra P ou L, refere-se à existência de cintagem da bainha através de uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm. A letra M a seguir à primeira letra C (carotadeira), corresponde a ensaios monotónicos, e a letra C corresponde a ensaios cíclicos. Os números que se seguem indicam o comprimento de embhecimento em centímetros.

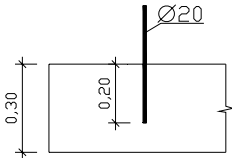
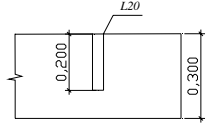
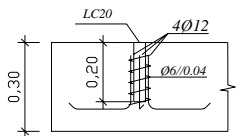
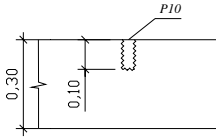
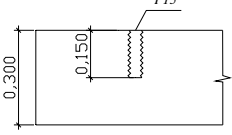
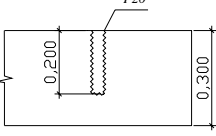
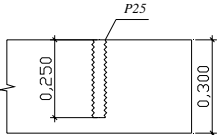
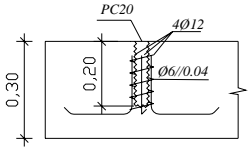
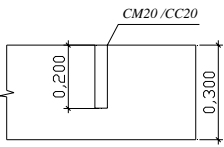
COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Assim, foram estudados os seguintes tipos de negativos:

- bainhas em tubo de aço de 52 mm de diâmetro com 20 cm de comprimento de embebedimento na fundação (L20);
- idem, cintadas através de uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm (LC20);
- bainhas de pré-esforço de 52 mm de diâmetro com 10, 15, 20 e 25 cm de comprimento de embebedimento (P10, P15, P20 e P25);
- bainhas de pré-esforço de 52 mm de diâmetro com 20 cm de comprimento de embebedimento e cintadas através de uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm (PC20);
- furo realizado com carotadeira com 52 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade (CM20, CC20).

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Quadro 4.1. Designação dos modelos de ligação

Designação	Tipo de Ligação	Diâmetro (mm)	Comprimento de Embebimento (cm)
V20		20	20
L20		52	20
LC20		52	20
P10		52	10
P15		52	15
P20		52	20
P25		52	25
PC20		52	20
CM20, CC20		52	20

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

O primeiro maciço de betão tem embebido dois tipos de ligações: três ligações com bainhas de pré-esforço de diâmetro de 52 mm, com um comprimento de embebimento de 20 cm designadas por P20 (Figura 4.3) e três com bainhas de pré-esforço de diâmetro de 52 mm e comprimento de embebimento 20cm cintadas com uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm designadas por PC20 (Figura 4.4).



Figura 4.3. Ligação tipo P20



Figura 4.4. Ligação tipo PC20

O segundo maciço de betão tem embebido dois tipos de ligações: três com bainhas lisas de diâmetro de 52 mm, com um comprimento de embebimento de 20 cm designadas por L20 (Figura 4.5) e três com bainhas lisas com um diâmetro de 52 mm e comprimento de embebimento de 20cm cintadas com uma armadura helicoidal de diâmetro 6 mm espaçada de 4 cm designadas por LC20 (Figura 4.6).

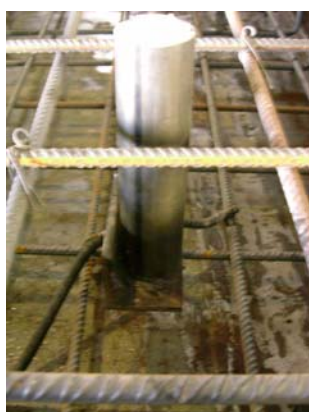


Figura 4.5. Ligação tipo L20



Figura 4.6. Ligação tipo LC20

O terceiro maciço de betão tem embebido: três varões de aço de diâmetro de 20 mm com um comprimento de embebimento de 20 cm designados por V20, que funciona como ligação de

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

referência (Figura 4.7), e três ligações com bainhas de pré-esforço com um diâmetro de 52 mm e comprimento de embhecimento de 10 cm designadas por P10 (Figura 4.8).



Figura 4.7. Ligação tipo V20



Figura 4.8. Ligação tipo P10

O quarto maciço de betão tem embecido dois tipos de ligações: três bainhas de pré-esforço de diâmetro de 52 mm, com um comprimento de embhecimento de 15 cm designadas por P15 (Figura 4.9) e três bainhas de pré-esforço com um diâmetro de 52 mm e comprimento de embhecimento de 25 cm designadas por P25 (Figura 4.10).



Figura 4.9. Ligação tipo P15



Figura 4.10. Ligação tipo P25

As ligações através de furos de carotadeira de 52 mm de diâmetro, foram realizados por carotagem com coroa de 52 mm de diâmetro, na parte inversa de um maciço de betão já ensaiado, escolhendo uma zona de betão não fendilhado (Figura 4.11). Houve o cuidado de centrar o furo no centro da malha de aço e para isso utilizou-se um equipamento de localização de

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

armaduras, “FerroScan” da HILTI. Seguidamente procedeu-se à instalação dos varões e respectiva selagem com “grout”.



Figura 4.11. Ligação tipo CM20 e CC20

4.3. Procedimentos de preparação dos modelos

4.3.1. Maciços de betão

Para a moldagem do maciço de betão foi utilizada uma cofragem metálica de superfície lisa e sempre lubrificada com óleo desconfrante. Os maciços de betão foram betonados em dias diferentes e cada um por sua vez, tendo-se especificado um betão da classe C25/30. Betonou-se sobre uma mesa vibratória garantindo uma vibração homogénea em todo o maciço (Figura 4.12). A Figura 4.13 mostra o aspecto final da betonagem.



Figura 4.12. Betonagem dos maciços de betão



Figura 4.13. Aspecto final da betonagem

Em todas as betonagens foram recolhidos provetes cilíndricos de modo a caracterizar o betão quanto à sua resistência.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

4.3.2. Ligação dos varões de aço ao maciço de betão

Para a instalação dos varões, foi feita a limpeza prévia das bainhas com recurso a escova de arame e aspiração de modo a ser retirada grande parte dos resíduos de corrosão. A ligação dos varões de aço de 20 mm de diâmetro ao maciço de betão fez-se através da selagem dos varões dentro das bainhas (Figura 4.14), com uma argamassa pronta de retracção compensada – “SIKAGROUT” comercializada pela SIKA. Houve o cuidado de garantir que o varão é colocado no centro da bainha e que permanece perfeitamente na vertical. Para esse efeito utilizaram-se acessórios metálicos com o aspecto da Figura 4.15.



Figura 4.14. Selagem dos varões



Figura 4.15. Acessórios metálicos para garantir a verticalidade dos varões

A selagem foi feita para todas as ligações num único dia, ficando os maciços com o aspecto que se mostra na Figura 4.16. Na altura recolheram-se amostras do “grout” para posterior caracterizado mecânica, Figura 4.17.



Figura 4.16. Aspecto geral



Figura 4.17. Amostra do “grout” utilizado

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

4.4. Sistema de ensaio e instrumentação

Os ensaios de todos os modelos foram realizados no laboratório de estruturas pesadas no Departamento Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.

4.4.1. Estrutura de suporte

Para realizar os ensaios de arrancamento, foi necessário criar uma estrutura de suporte para apoiar, o cilindro hidráulico e a célula de carga. O sistema de arrancamento é constituído por uma estrutura metálica de reacção formada por dois perfis de secção quadrada e uma viga composta por dois perfis UPN como mostra a Figura 4.18.



Figura 4.18. Estrutura de suporte

4.4.2. Sistema de puxe

O sistema de ensaio é constituído por um cilindro hidráulico perfurado (Enerpac RRH307) accionado por uma bomba hidráulica (Enerpac GPEW 2020 WSN) e colocado sobre uma célula de carga (TML – TCLP-20KN), que ao ser actuado exerce uma força de arrancamento no varão a ensaiar. O sistema de transmissão da força de arrancamento ao varão é conseguido utilizando uma cabeça de ancoragem de pré-esforço e respectivas cunhas como mostra a Figura 4.19.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR



Figura 4.19. Sistema de transmissão de força

4.4.3. Configuração geral do ensaio

O sistema de ensaio é auto equilibrado, ou seja, não necessita de reacção exterior já que a força é exercida no próprio maciço de betão. Para o arrancamento dos varões que estão embebidos nos maciços foi necessário adoptar diferentes tipos de posicionamentos do sistema, relativamente à localização do varão no bloco. Existiu essa preocupação para que a distância do varão aos apoios metálicos do sistema de ensaio fosse semelhante para todas as situações. Existiu também a preocupação de deixar posicionados os varões a uma distância mínima dos bordos do maciço de betão de 250 mm, tal como adoptado por Eligehausen [22] para não aparecer fendilhação devido à proximidade do bordo.

Assim, para os varões que se encontravam selados nos cantos do maciço de betão utilizou-se a disposição representada nas Figura 4.20 e 4.21.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

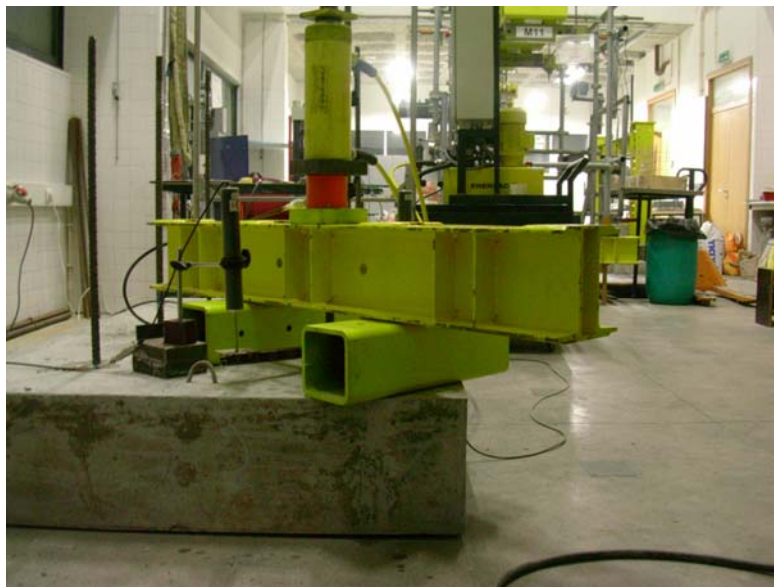


Figura 4.20. Configuração do ensaio para varões posicionados no canto do maciço de betão

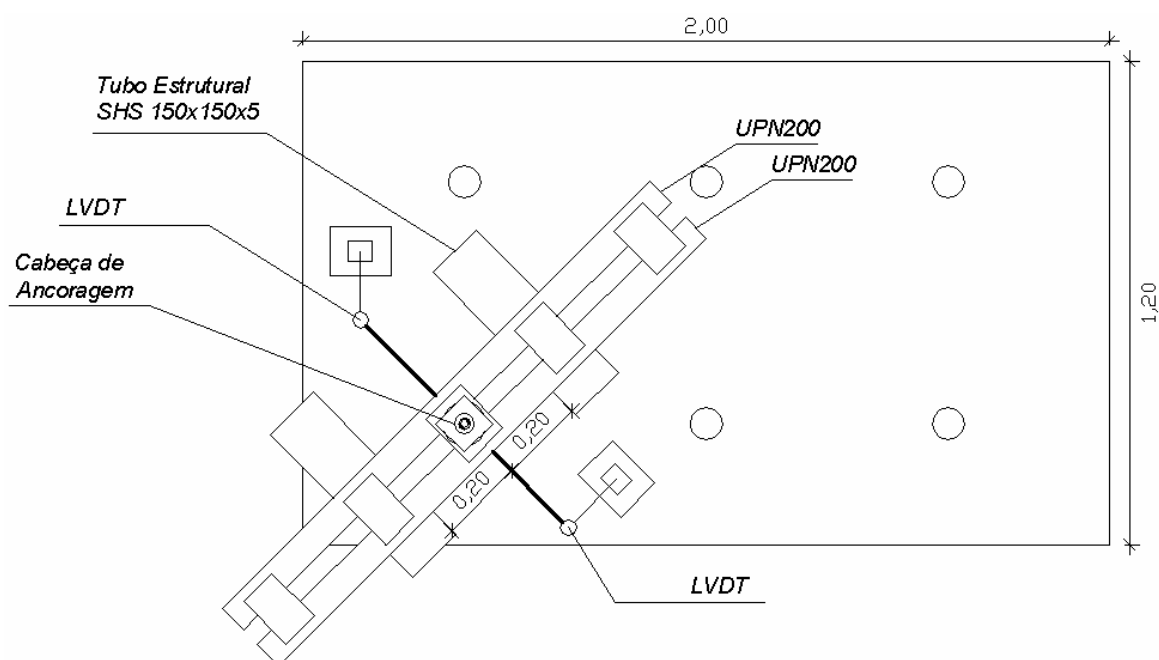


Figura 4.21. Planta da configuração do ensaio e respectivas dimensões para varões posicionados no canto do maciço de betão

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Para varões posicionados na zona central adoptou-se a disposição demonstrada nas Figura 4.22 a 4.25.

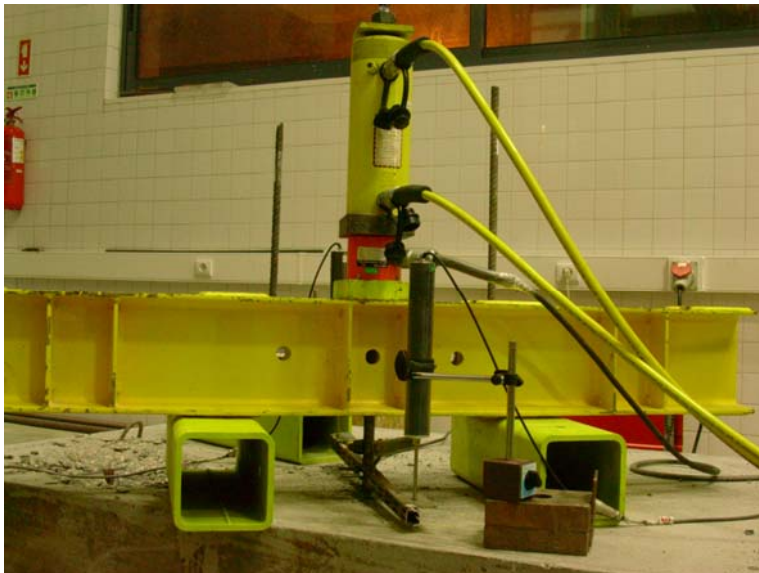


Figura 4.22. Configuração do ensaio para varões posicionados no centro do maciço de betão

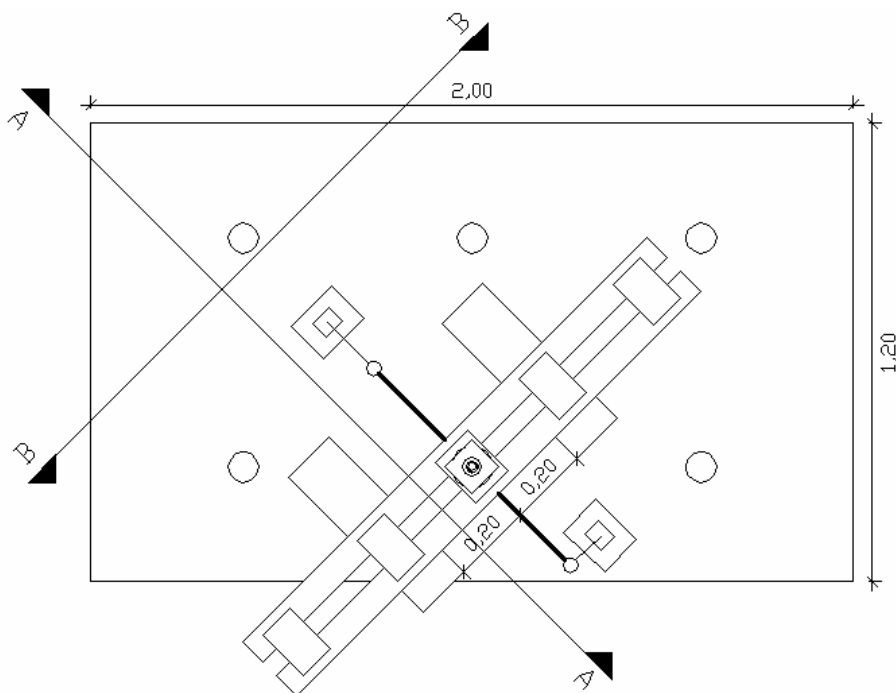


Figura 4.23. Planta com a configuração do ensaio e respectivas dimensões para varões posicionados no centro do maciço de betão

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Corte A-A

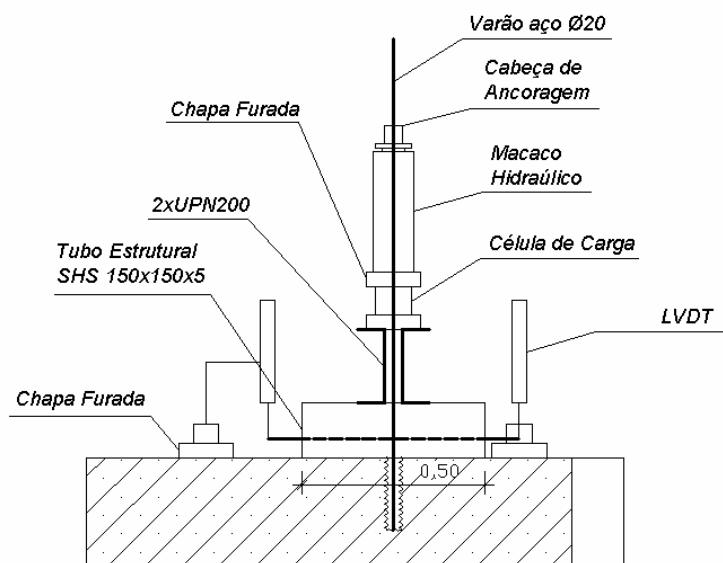


Figura 4.24. Configuração do ensaio – Corte A-A

Corte B-B

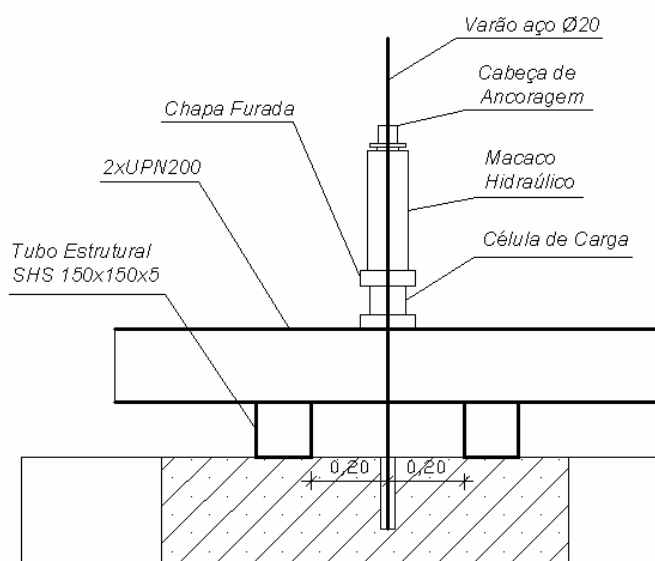


Figura 4.25. Configuração do ensaio – Corte B-B

4.4.4. Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados para leitura da célula de carga, dos trasdutores de deslocamentos (CDP 100) e extensómetros eléctricos é composto por dois DataLogger's Spider 8

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

(HBM) ligados em série e um computador PC portátil. A montagem dos dois DataLogger Spider 8 em série permite ler simultaneamente 16 canais. A recolha dos dados foi efectuada através de um software da HBM (CATMAN) e posteriormente exportados para uma folha de cálculo para tratamento complementar. Todo este sistema apresenta-se nas Figura 4.26 e 4.27.

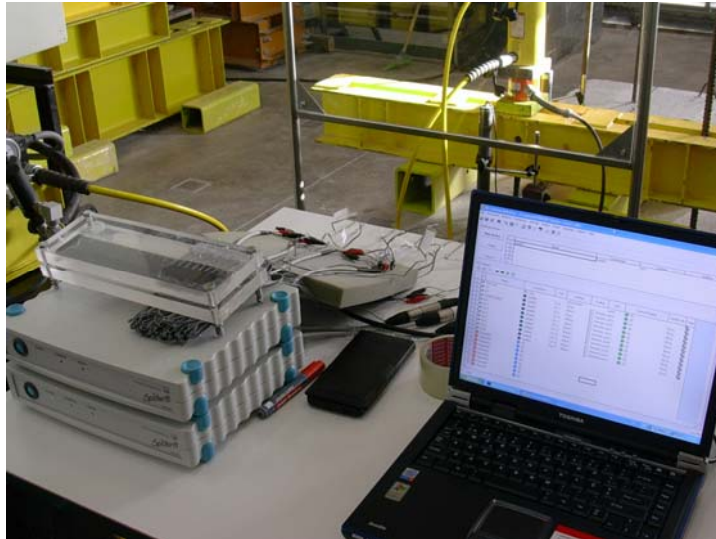


Figura 4.26. DataLogger Spider 8 e computador portátil

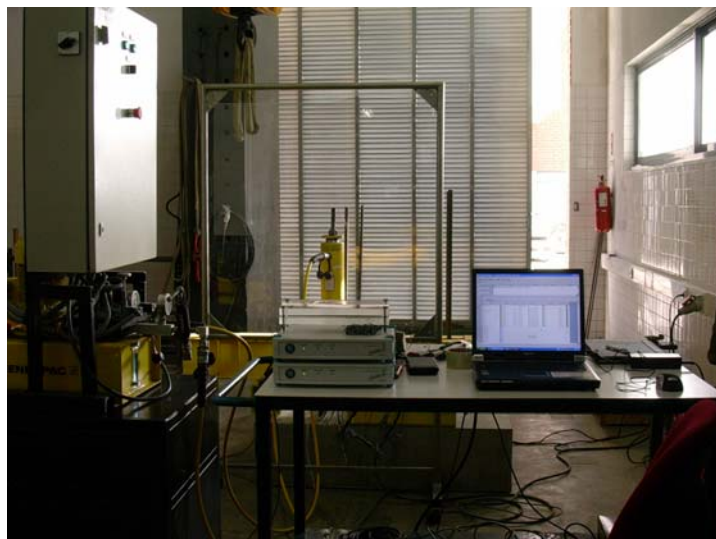


Figura 4.27. Bomba Hidráulica (esquerda) e sistema de aquisição de dados

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

4.4.5. Instrumentação

A instrumentação realizada foi semelhante em todos os ensaios. A instrumentação dos modelos consistiu na utilização de uma célula de carga, transdutores de deslocamento vertical e extensómetros eléctricos de resistência colados na superfície dos varões de aço.

A célula de carga da marca TML (TCLP-20 KN – Resistência 350Ω) é colocada entre o macaco hidráulico e a estrutura de suporte, como mostra a Figura 4.28, de modo a recolher a força transmitida pelo macaco ao varão de aço.



Figura 4.28. Posicionamento da célula de carga

Os transdutores de deslocamento da marca TML (CDP 100 – resistência 350Ω) são posicionados na vertical, apoiados num suporte de modo a recolher o deslocamento do varão junto à base do maciço de betão, através de um mecanismo metálico, como se mostra na Figura 4.29.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

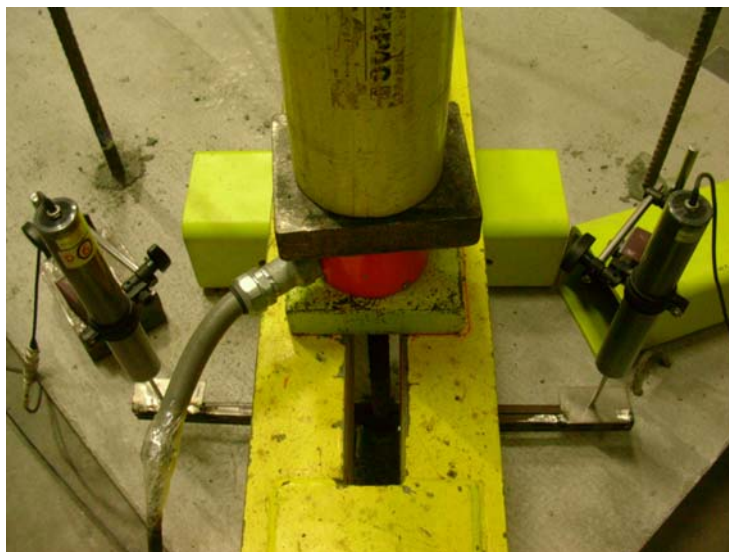


Figura 4.29. Posicionamento dos transdutores de deslocamento

Os extensómetros eléctricos de resistência são da marca TML (FLA-5-11 com gauge factor de 2.10 – resistência 350 Ω).

Nos quatro varões da malha superior em torno das ligações L20 e P20 foram colocados dois extensómetros em pontos diametralmente opostos da mesma secção do varão. Isto para eliminar os efeitos resultantes de eventual flexão dos varões, como mostra a Figura 4.30 e Figura 4.31.

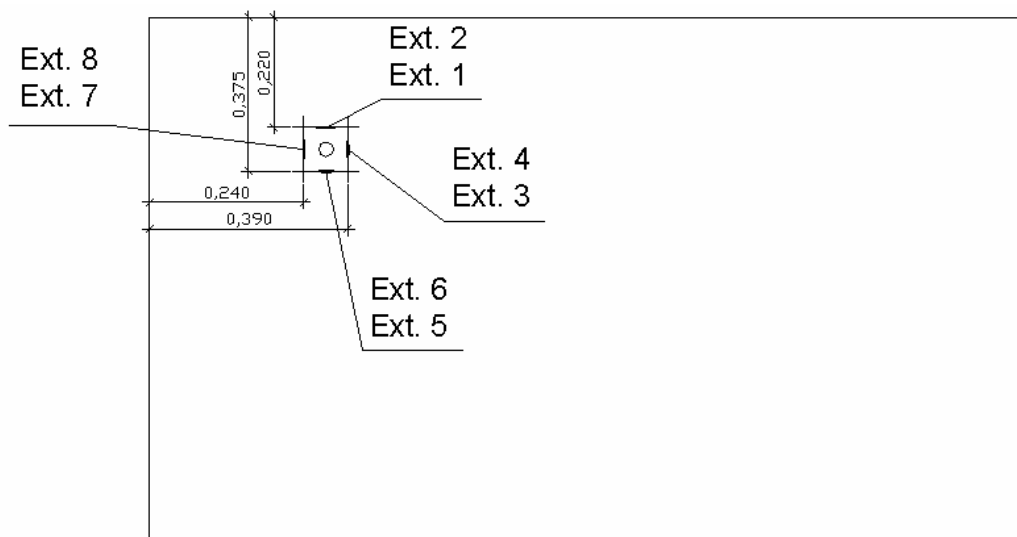


Figura 4.30. Planta da localização dos extensómetros

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

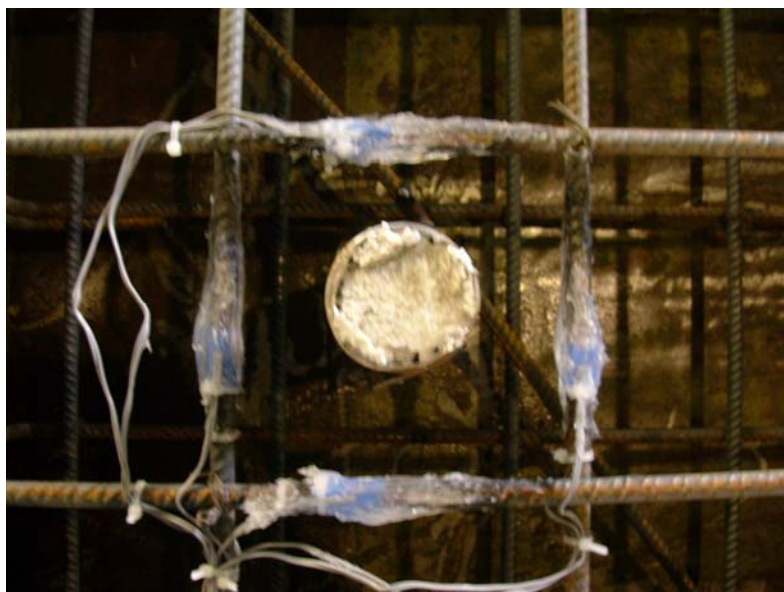


Figura 4.31. Pormenor da localização dos extensómetros na armadura

4.5. Caracterização dos materiais

4.5.1. Betão

A betonagem dos quatro blocos de betão foi realizada na Secil – Prebetão. Por cada betonagem foram recolhidos seis provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. A caracterização mecânica do betão foi efectuada através de ensaios de compressão realizados à data de ensaio das ligações em estudo. No quadro 4.2 apresentam-se os resultados médios da resistência à compressão (f_{cm}) e os valores médios da resistência à tracção (f_{ctm}), determinados segundo a NP EN 206-1 [28] e EN 1992.1.1 [7].

$$f_{cm} = f_{ck} + 4 \quad (4.1)$$

$$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} \text{ para } f_{cm} \leq C40/50 \quad (4.2)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) \text{ para } f_{cm} > C40/50 \quad (4.3)$$

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Quadro 4.2. Caracterização dos betões

Tipo de Ligação	Provete		Idade (dias)	f_{ci} (MPa)	f_{cm} (MPa)	$f_{ctm}^{(1)}$ (MPa)
	Designação	Tipo				
P20 e PC20	B.A.1	Cilindro	32	34,9	34,9	3,0
	B.A.2	"	32	34,8		
	B.A.3	"	32	35,1		
L20 e LC20	B.A.4	"	37	26,0	26,2	2,4
	B.A.5	"	37	25,4		
	B.A.6	"	37	27,1		
V20 e P10	B.A.7	"	45	32,6	33,0	2,8
	B.A.8	"	45	34,3		
	B.A.9	"	45	32,1		
P15 e P25	B.A.10	"	31	31,7	31,8	2,8
	B.A.11	"	31	32,1		
	B.A.12	"	31	31,5		
CM20	B.A.13	"	240	33,4	34,0	2,9
	B.A.14	"	240	35,3		
	B.A.15	"	240	33,2		
CC20	B.A.16	"	565	30,7	28,4	2,5
	B.A.17	"	565	27,6		
	B.A.18	"	565	26,9		

(1) – valor de cálculo de acordo com a expressão (4.2)

4.5.2. "Grout"

O "grout" utilizado [33], corresponde a uma argamassa não retráctil, obtida através da mistura de aditivos que são expansivos durante o endurecimento inicial do betão e que compensam a subsequente retracção normal da argamassa. Para caracterizar este material prepararam-se três provetes com 160x40x40 mm³ para determinar a resistência à tracção por flexão e a resistência à compressão.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

No Quadro 4.3 apresentam-se os valores obtidos para a tensão de rotura à tracção por flexão ($f_{ct,fl}$), a tensão de rotura à compressão, bem como os correspondentes valores médios e o valor da resistência à tracção simples (f_{ctm}), determinado de acordo com [7]. O valor da resistência à tracção simples (f_{ctm}) do “grout” foi calculado de acordo com a expressão 4.3 apesar de esta ser calibrada para betões.

Quadro 4.3. Valores dos ensaios de tracção por flexão dos provetes de “grout”

Tipo de Ligação	Provete		$f_{cti,fl}$	$f_{ctm,fl}$	f_{ci}	f_{cm}	f_{ctm}
	Designação	Tipo	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Grout	G.1	Cubo	8,6	8,7	67,5	66,2	4,3
	G.2	Cubo	9,2		64,3		
	G.3	Cubo	8,2		66,8		

4.5.3. Aço

Foram usados varões de 20 mm de diâmetro em aço A500NR os quais apresentam uma tensão de cedência média de 543,8 MPa, que equivale à força de cedência 170,83 kN. A força de rotura é de 204,80 kN.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados na forma de diagrama força-deslocamento os resultados dos ensaios monótonicos e cíclicos. Para melhor compreensão dos diversos diagramas e resultados foi desenvolvido um Modelo Elasto-Plástico Equivalente como forma de comparação dos vários resultados.

5.1. Ensaio monótonico

Dado o comportamento não linear das ligações estudadas optou-se por determinar um Modelo Elasto-Plástico Equivalente, definido pelas expressões (5.1) a (5.9), o qual permite comparar entre si o desempenho das diversas ligações ensaiadas. Para a definição deste Modelo Elasto-plástico Equivalente considerou-se que a energia de deformação do modelo era idêntica à energia dispendida até à rotura pela ligação ensaiada. Começou-se por considerar para rigidez k do modelo a rigidez secante observada no ensaio para uma força igual a 40% da força máxima, obtendo-se:

$$k = \frac{0,4F_{\text{máx}}}{\delta_{0,4}} \quad (5.1)$$

Considerando de seguida as energias de deformação elásticas (W_1) e plásticas (W_2) dadas por:

$$W_1 = \frac{F_{\text{ced}} \times \delta_1}{2} \quad (5.2)$$

$$W_2 = F_{\text{ced}} \times (\delta_2 - \delta_1) \quad (5.3)$$

Com,

$$\delta_1 = \frac{F_{\text{ced}} \times \delta_{0,4}}{0,4F_{\text{máx}}} \quad (5.4)$$

E calculando a energia de deformação (W_{total}) ocorrida durante o ensaio até à força máxima, obtida por integração numérica do gráfico força-deslocamento do ensaio da ligação.

$$W_{\text{total}} = W_1 + W_2 \quad (5.5)$$

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Substituindo a equação (5.4) nas equações (5.2) e (5.3), vem:

$$W_1 = F_{ced}^2 \times \frac{\delta_{0,4}}{2 \times 0,4F_{m\acute{a}x}} \quad (5.6)$$

$$W_2 = F_{ced} \times \delta_2 - F_{ced}^2 \times \frac{\delta_{0,4}}{0,4F_{m\acute{a}x}} \quad (5.7)$$

Substituindo em seguida as equações (5.6) e (5.7) na equação (5.5), vem:

$$W_{total} = F_{ced} \times \delta_2 - \frac{1}{2} F_{ced}^2 \times \frac{1}{k} \quad (5.8)$$

Ou seja:

$$F_{ced} = k \times \delta_2 - \sqrt{(k \times \delta_2)^2 - 2 \times k \times W_{total}} \quad (5.9)$$

O Modelo Elasto-Plástico Equivalente tem um primeiro troço elástico-linear (Figura 5.1) com rigidez k , e valor máximo em (δ_1, F_{ced}) , e um segundo troço horizontal com deslocamentos a variar entre δ_1 e δ_2 (Figura 5.1).

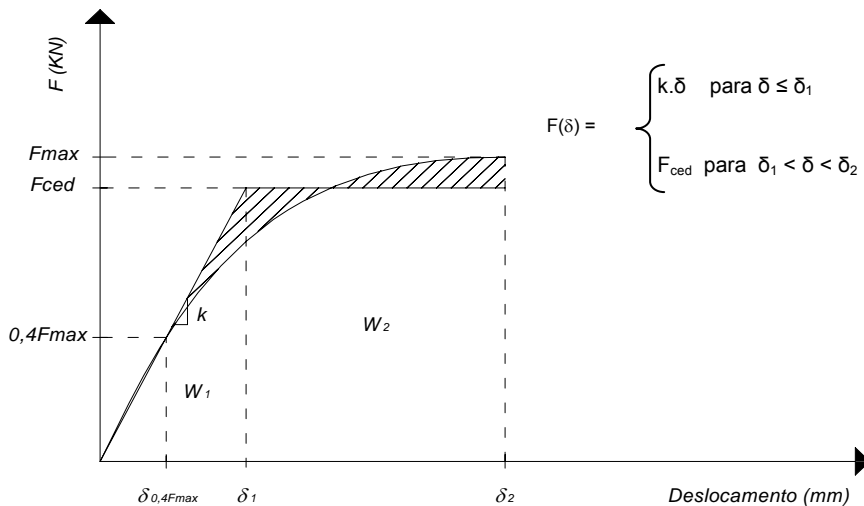


Figura 5.1. Modelo Elasto-Plástico Equivalente

No capítulo 6 os resultados serão analisados e comparados com os vários tipos de rotura apresentados no capítulo 3.6.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

5.1.1. Ligação V20 (referência)

A ligação V20 corresponde aos varões de 20 mm de diâmetro com um comprimento de embebedimento de 20 cm betonados conjuntamente com o betão. Trata-se da ligação de referência com a qual se irão comparar as restantes. Na Figura 5.2 apresenta-se o diagrama força-deslocamento bem como a curva média do Modelo Elasto-Plástico. A rotura é tipicamente de “pull out” e de acordo com 3.6.2 é do tipo 2, isto é, pela ligação entre o betão e o varão, como se pode observar na Figura 5.2.

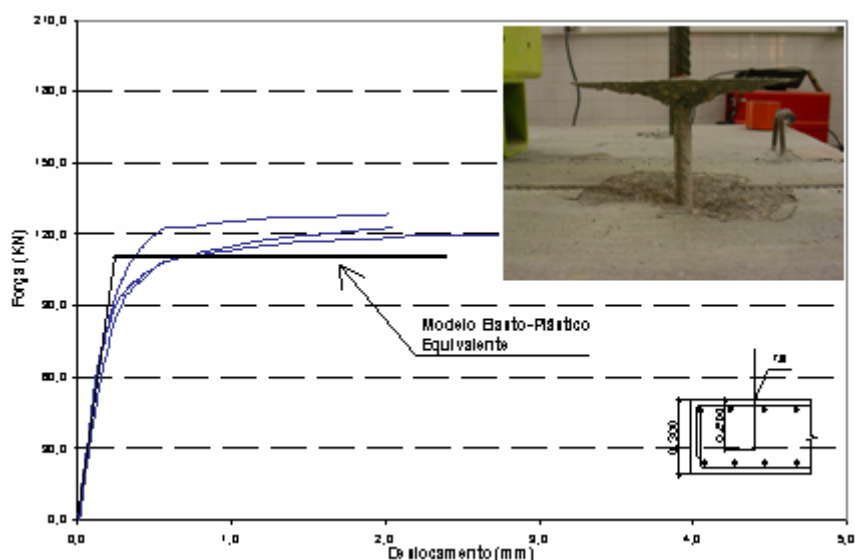


Figura 5.2. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação V20

5.1.2. Ligações L20 e LC20

Apesar de serem diferentes, as ligações L20 e LC20 (ver quadro 4.1) são analisadas em conjunto porque ambas têm o mesmo tipo de rotura. A diferença entre elas é a cintagem da ligação LC20, a qual não teve influência significativa na rotura, pois esta ocorre pela ligação entre a bainha de aço e o “grout” (rotura tipo 5). Neste tipo de ensaio o tubo metálico é liso e a rotura ocorre para pequenos valores de força de tracção, como se pode observar nos diagramas força-deslocamento das Figuras 5.3 e 5.4.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

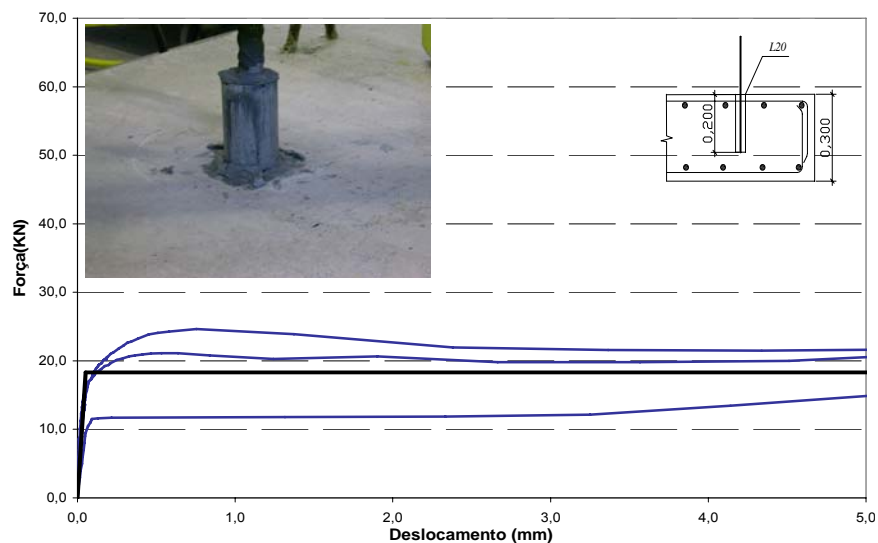


Figura 5.3. Diagrama força-deslocamento da ligação L20

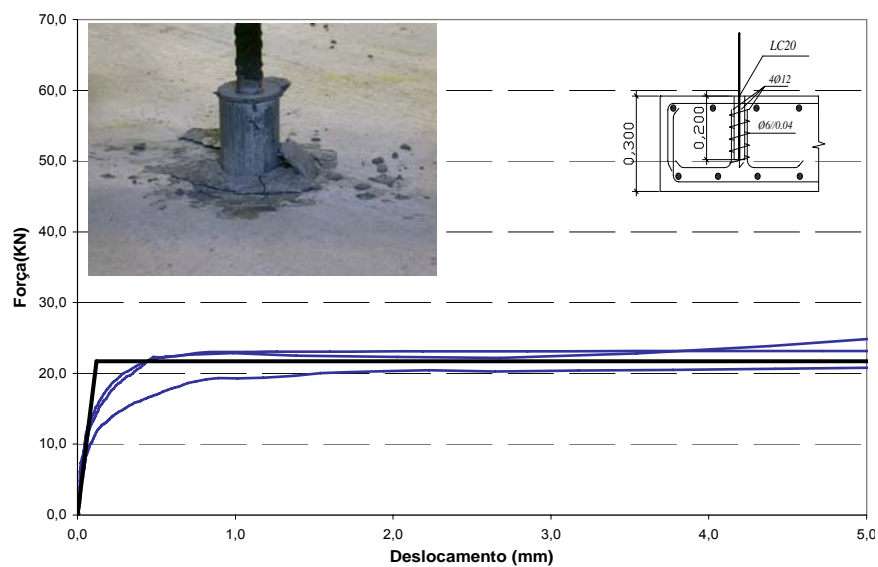


Figura 5.4. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação LC20

5.1.3. Ligação P10

Na Figura 5.5 apresenta-se o diagrama força – deslocamento obtido no ensaio da ligação P10 (ver quadro 4.1). Verificou-se a delaminação do recobrimento na zona circundante à ligação, como se pode observar na Figura 5.5. Trata-se de uma rotura com forma cônica do betão do tipo 4 de acordo com 3.6.3.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

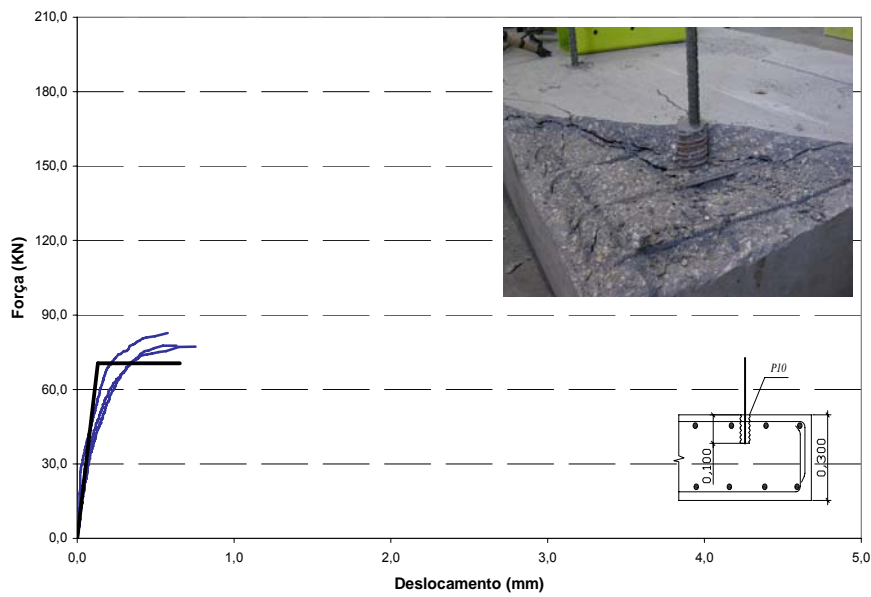


Figura 5.5. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P10

5.1.4. Ligação P15

Na Figura 5.6 apresenta-se o diagrama força – deslocamento da ligação P15 (ver quadro 4.1). Após a rotura, a ligação ficou com o aspecto que se observa na Figura 5.6. Trata-se, portanto, de uma rotura por “splitting” e de acordo com os modos apresentados no capítulo 3.6.3. é uma rotura entre a bainha e o betão, ou seja, do tipo 6.

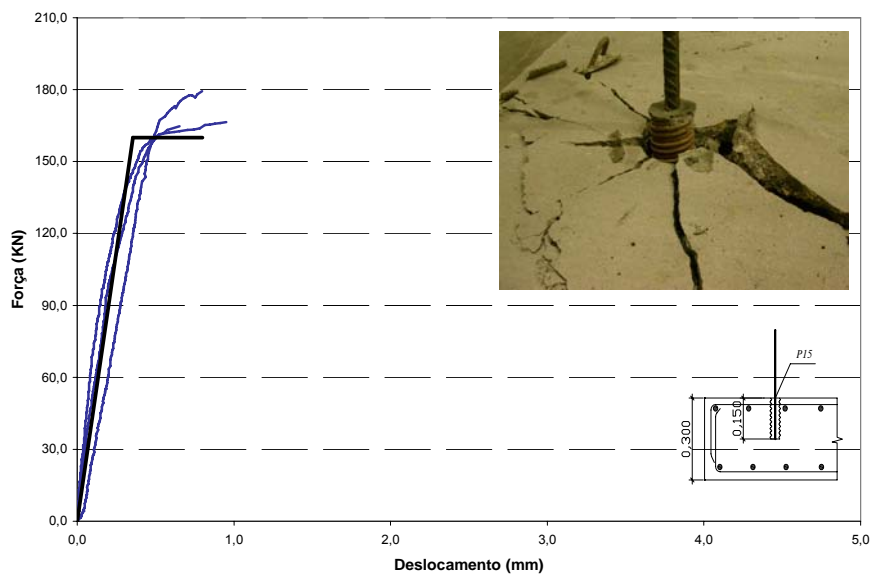


Figura 5.6. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P15

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

5.1.5. Ligação P20

A rotura da ligação P20 (ver quadro 4.1) ocorreu para valores próximos da tensão de cedência do aço. Na Figura 5.7 apresenta-se o diagrama força – deslocamento da ligação. A rotura é um mecanismo complexo, tendo-se começado por formar fissuras radiais (“splitting”) na superfície do betão que deram origem a um cone de rotura. Nos primeiros dois terços do comprimento de embebiamento a rotura ocorre na ligação entre a bainha e o betão circundante, enquanto no último terço ocorre entre o aço e o “grout”. Este tipo de rotura é conhecido por “splitting-induced pull out failure” pois ocorre numa zona do varão por “splitting” e noutra por “pull out”.

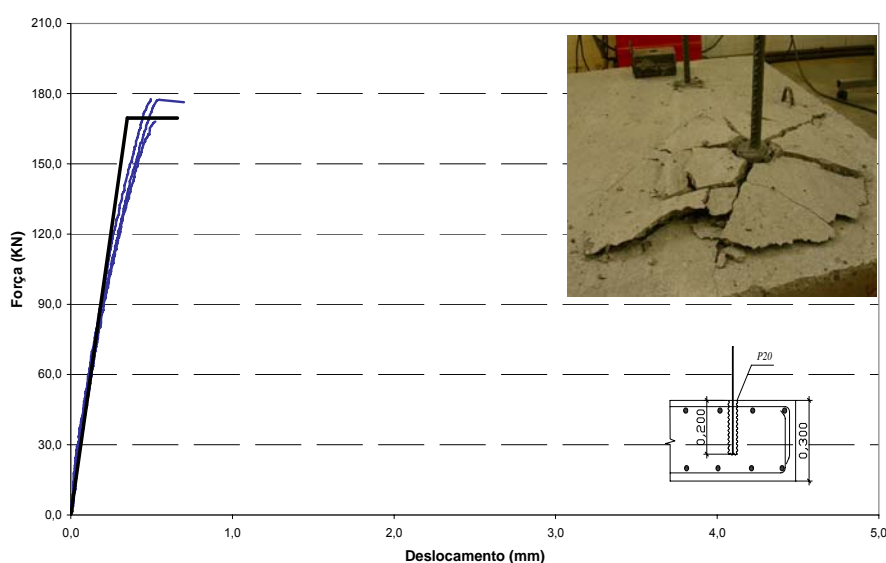


Figura 5.7. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P20

5.1.6. Ligação P25

Na ligação P25 (ver quadro 4.1) o comprimento de embebiamento é de 25 cm o que implicou um acréscimo de resistência na ligação. Na Figura 5.8 apresenta-se o diagrama força-deslocamento da ligação P25. Após o ensaio a ligação P25 apresenta apenas uma pequena delaminação da camada superficial de betão e algumas fissuras tangenciais, como se mostra na Figura 5.8. Trata-se de uma rotura por cedência das armaduras, ou seja, do tipo 1 de acordo com 3.6.3.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

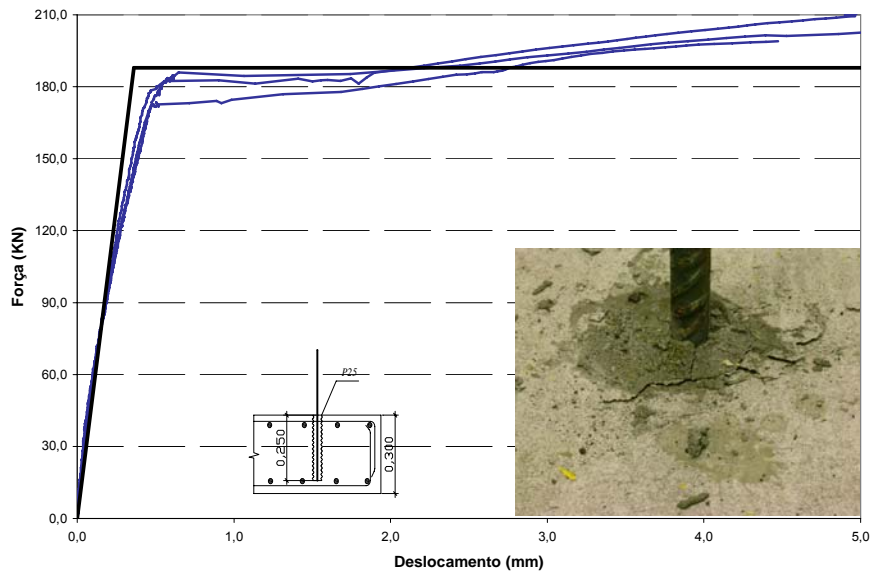


Figura 5.8. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação P25

5.1.7. Ligação PC20

A diferença entre a ligação PC20 e a ligação P20 é a adição de cintagem (ver quadro 4.1). Como resultado da cintagem houve um acréscimo de resistência da ligação e a rotura deu-se claramente por cedência da armadura, ou seja, do tipo 1 de acordo com 3.6.3. Na Figura 5.9 apresenta-se o diagrama força-deslocamento da ligação. A ligação após o ensaio apenas apresenta uma pequena delaminação da camada superficial de betão e algumas fissuras radiais.

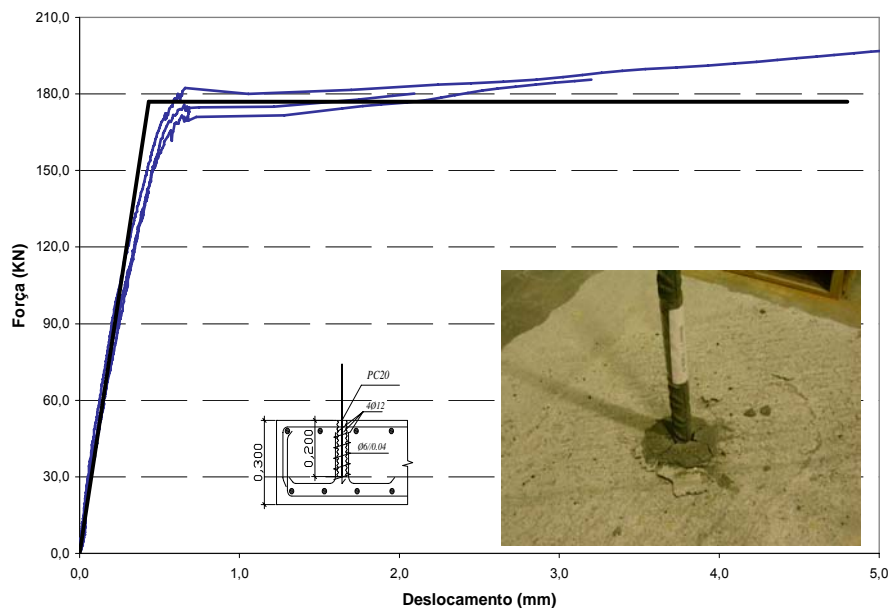


Figura 5.9. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação PC20

5.1.8. Ligação CM20

A ligação CM20 corresponde à situação em que se realizou um furo de 52 mm de diâmetro com 20 cm de comprimento, com posterior selagem da armadura com “grout”. Na Figura 5.10 apresenta-se o diagrama força–deslocamento da ligação. A rotura, deu-se entre o “grout” e o varão de aço, isto é, uma rotura por “pull out”, ou seja, do tipo 2 de acordo com Miltenberguer [23] (3.6.1).

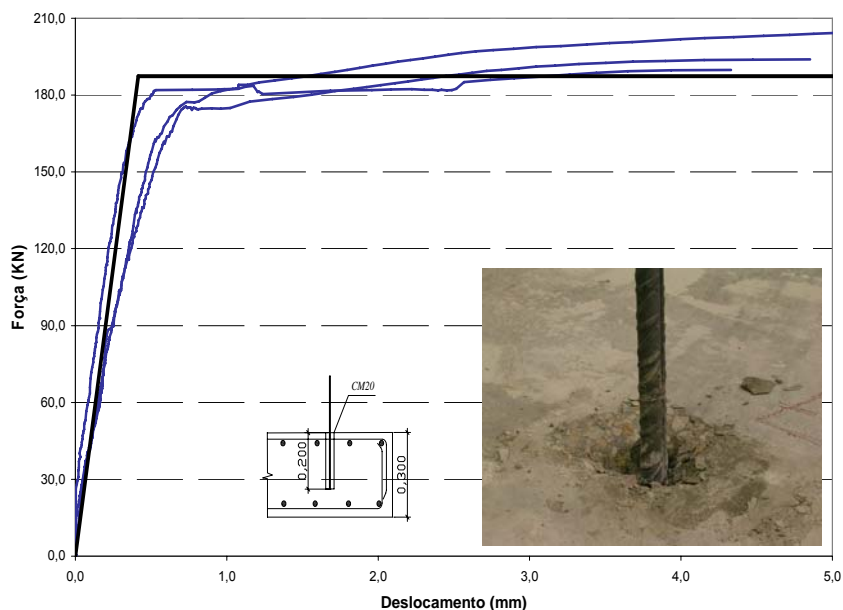


Figura 5.10. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CM20

5.1.9. Esforços na malha superior do maciço de betão

Como foi descrito na caracterização dos modelos de ensaio, o maciço de betão apresenta uma malha superior e inferior de armadura $\varnothing 10//0,15$. Esta malha foi instrumentada com dois extensómetros diametralmente opostos (Figuras 4.30 e 4.31), isto porque o arranque do varão provoca flexão nas armaduras horizontais que pode ser quantificada através de dois extensómetros. A diferença entre as extensões dá a deformação relativa à flexão do varão e a média destas extensões dá o valor da deformação correspondente à força de tracção nesta armadura, sendo esta última a que interessa para análise.

Com isto foi possível quantificar qual o esforço de tracção a que cada varão da malha quadrada esteve sujeito durante a aplicação da força de puxe nos ensaios às ligações L20 e P20 (Fig. 5.11 e 5.12).

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

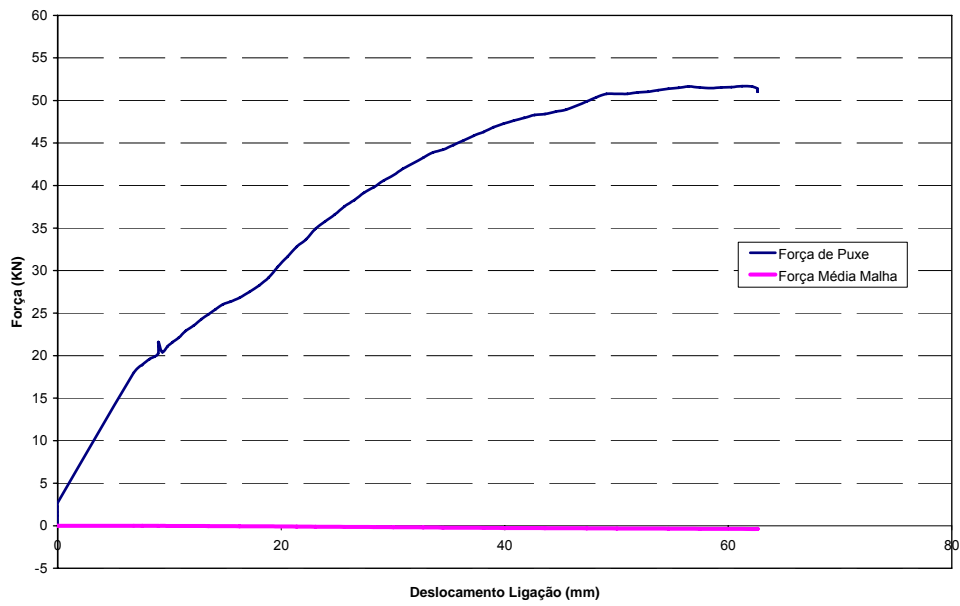


Figura 5.11. Diagrama força de puxe/força média em cada varão da malha superior–deslocamento da ligação L20

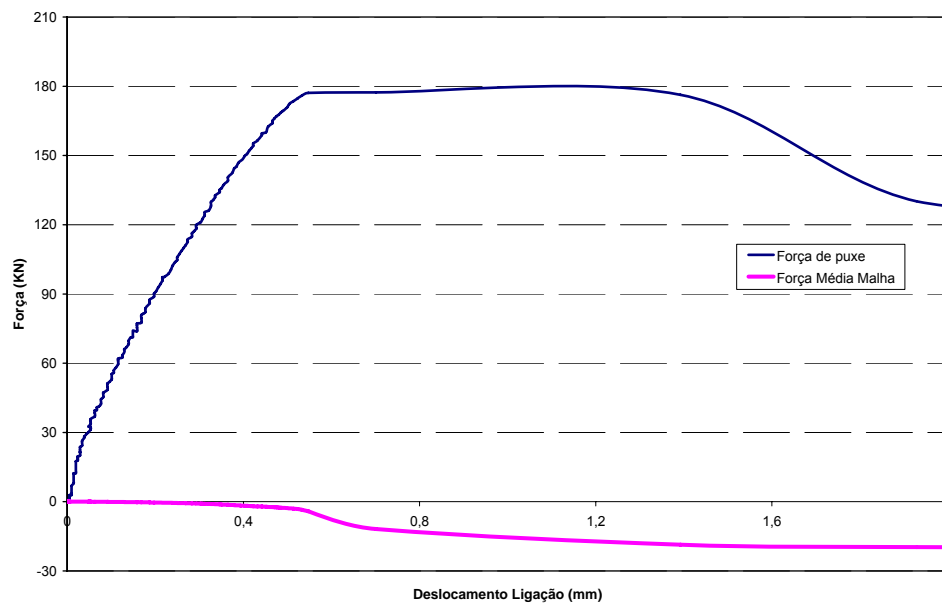


Figura 5.12. Diagrama força de puxe/força média na malha superior–deslocamento da ligação P20

Em ambos os diagramas é notório que a reacção à força de puxe tem um comportamento não linear. As forças desenvolvidas na malha superior devido à força de puxe são pequenas. A malha só entra em funcionamento quando a ligação está muito próxima da rotura.

Apesar de não estar aqui demonstrado, na ligação P20, durante o ensaio, foi possível perceber que o aumento significativo da força de tracção nos varões em torno da ligação ocorre quando o

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

betão começa a fendilhar. No diagrama da ligação L20 não é notório o aumento da força de tracção na malha superior do maciço porque a força de puxe não foi suficiente para fendilhar o betão em torno da ligação, uma vez que a rotura ocorre entre a bainha metálica lisa e o “grout” para valores de força de puxe muito pequenos.

5.2. Ensaios cíclicos

Os ensaios cíclicos foram realizados na ligação CC20, a qual é composta por um furo de 52 mm de diâmetro com 20 cm de profundidade, com posterior selagem da armadura com “grout”. Também neste caso foram realizados três ensaios com a mesma ligação.

Existem alguns tipos de procedimentos de ensaios tais como o proposto pelo ECCS [29] ou o utilizado no PRESS [30], contudo estes procedimentos têm uma história de deslocamentos impostos alternados.

No caso dos ensaios realizados optou-se pela aplicação de incremento de deslocamentos e como não existe nenhuma referência ao tipo de procedimento de ensaio a utilizar nestas ocasiões, optou-se por aplicar um carregamento inicial em que se impôs o deslocamento de cedência da ligação (δ_y) calculado para acções monotónicas e seguidamente foram aplicados ciclos de descarga e carga em que a força mínima foi limitada a 10% da força de cedência e o deslocamento imposto foi incrementado sucessivamente de $0,2\delta_y$. Na Figura 5.13 apresenta-se a título de exemplo a história de deslocamentos do um ensaio.

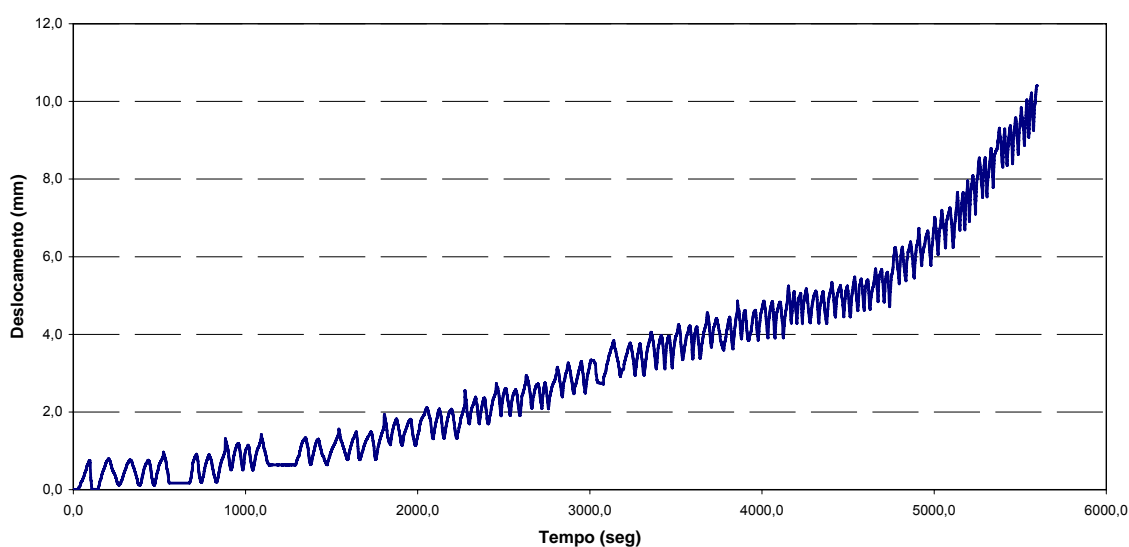


Figura 5.13. História de deslocamentos de um ensaio

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

O controlo do ensaio foi realizado manualmente e por este motivo a velocidade de ensaio não foi regular devido à dificuldade do controlo do incremento dos deslocamentos.

Nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam-se os diagramas força-deslocamento de cada ligação ensaiada, tendo-se sobreposto o diagrama do ensaio monotónico correspondente ao mesmo tipo de ligação (CM20).

Em todos os ensaios cíclicos a rotura ocorreu entre o “grout” e o varão de aço, isto é, uma rotura do tipo 2.

No último ensaio efectuado a força registada, foi superior à força máxima registada no ensaio monotónico. A força máxima registada também é superior à força de rotura do varão. O comportamento deste não é totalmente satisfatório, podendo justificar-se os resultados obtidos por um eventual erro na calibração da célula de carga ou uma troca dos varões (não pertencendo estes ao mesmo lote dos aços anteriores).

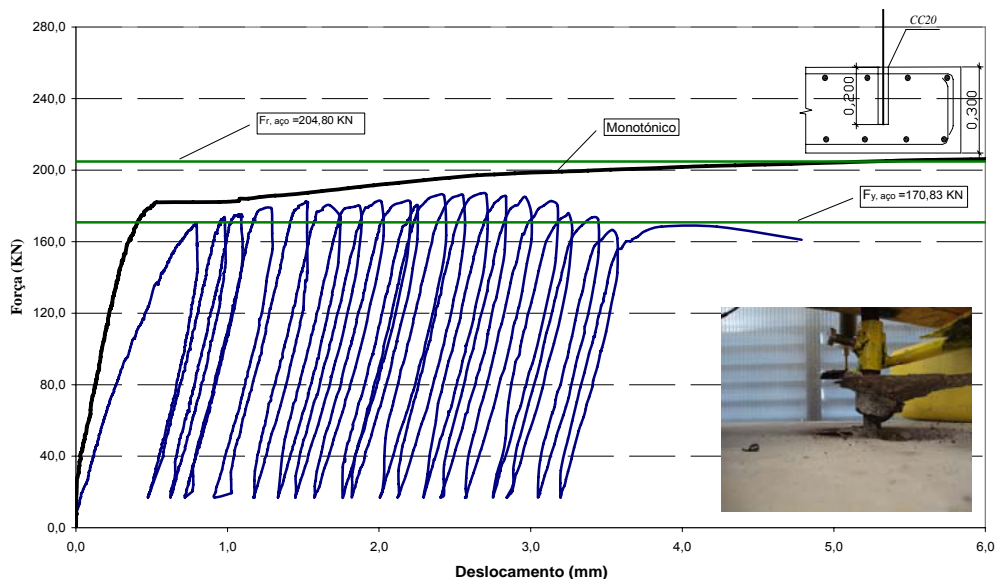


Figura 5.14. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CC20 (1)

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

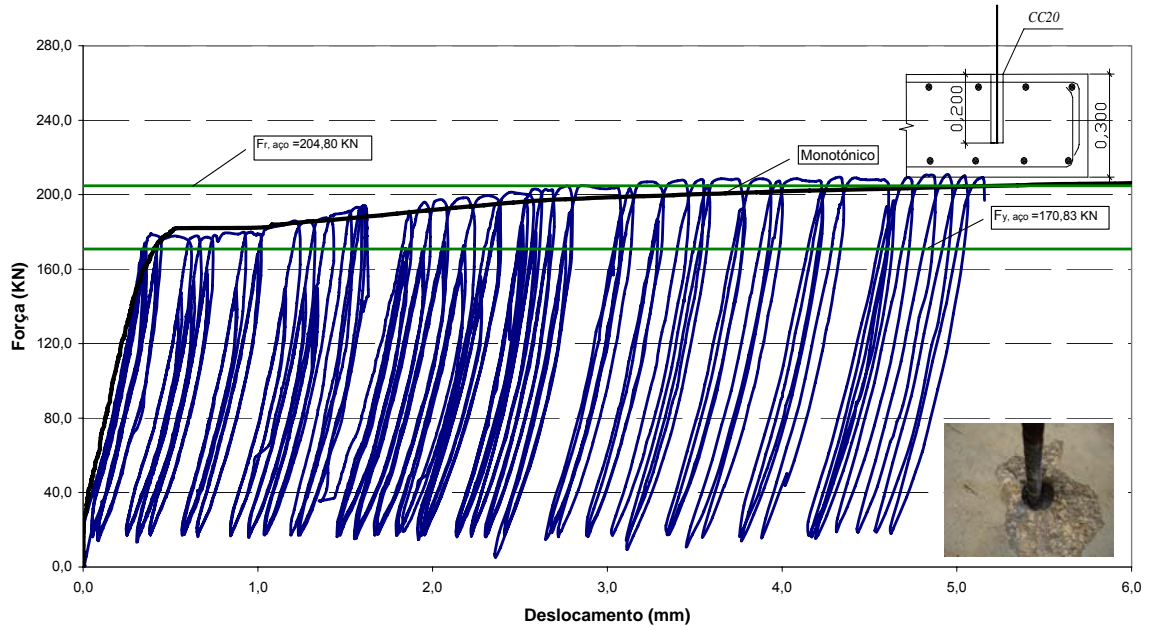


Figura 5.15. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CC20 (2)

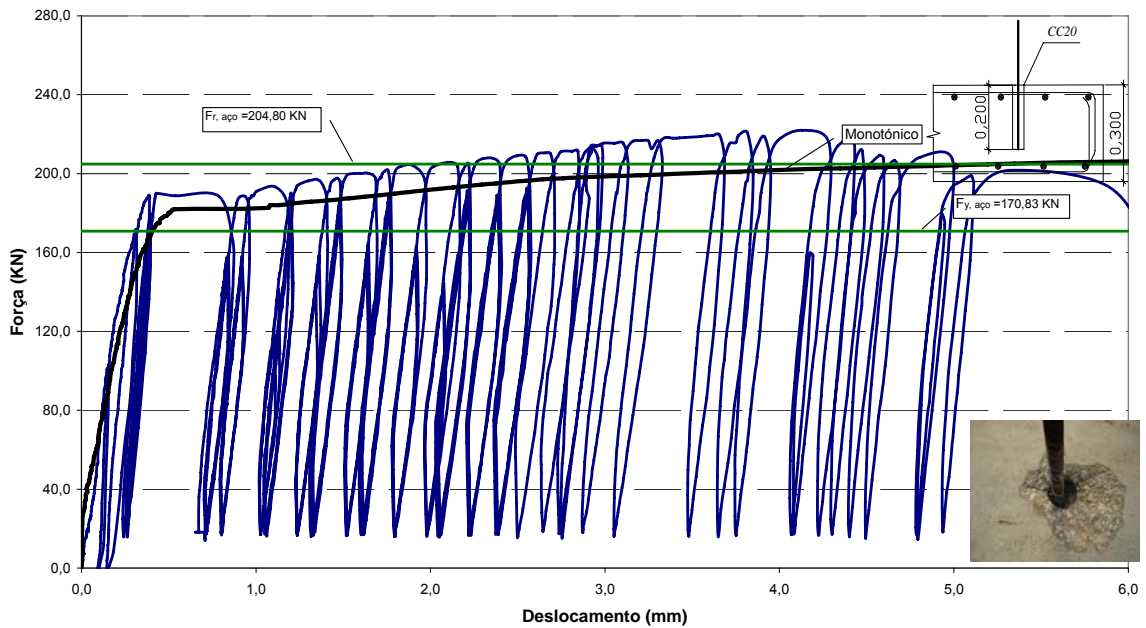


Figura 5.16. Diagrama força-deslocamento e rotura da ligação CC20 (3)

Ambos os tipos de rotura que ocorreram na ligação CM20 e CC20 (rotura tipo 2) são diferentes dos obtidos nos ensaios de Eligehausen [22]. Neste ultimo caso a rotura ocorrida é do tipo 3, ou seja entre o "grout" e o betão. Esta diferença pode acontecer porque no caso em estudo temos 16mm de recobrimento de "grout" em torno do varão de aço dentro do negativo, e no estudo de Eligehausen [22], o recobrimento de "grout" era somente 6 mm.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 6.1 apresenta-se o gráfico de barras onde é possível, de um modo simples, perceber qual a ligação com melhor desempenho a nível da resistência. O gráfico de barras representa os valores de força de tracção máxima aplicada em cada varão e o valor da força de cedência do aço.

Verifica que as ligações P20, PC20, CM20 e P25 atingem valores de resistência superior à força de cedência dos varões de aço utilizados nos ensaios.

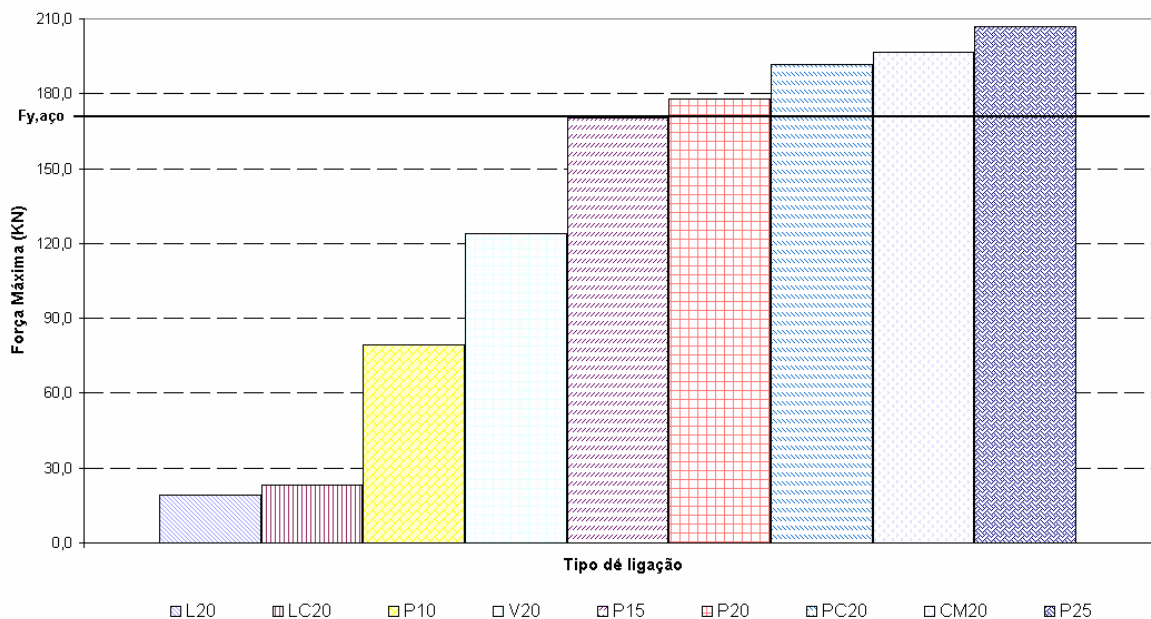


Figura 6.1. Valores de força máxima aplicada em cada ligação

No Quadro 6.1 sintetizam-se os resultados dos ensaios monotónicos. Apresentam-se os valores da força máxima ($F_{máx}$), o deslocamento correspondente à força máxima (δ_2), a força de cedência do Modelo Elasto-Plástico Equivalente (F_{ced}), e o deslocamento correspondente à força de cedência equivalente (δ_1), estes dois últimos apenas para os ensaios monotónicos. Os valores apresentados correspondem à média dos resultados de três ensaios para cada tipo de ligação.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Quadro 6.1. Resultados dos ensaios experimentais (valores médios)

Modelo de Ensaio	$F_{m\acute{a}x}$	$\delta_{2,Fm\acute{a}x}$	F_{ced}	$\delta_{1,Fced}$
	(kN)	(mm)	(KN)	(mm)
V20	124,05	2,39	110,46	0,24
L20	19,24	5,27	18,31	0,05
LC20	23,05	5,31	21,74	0,12
P10	79,27	0,65	70,50	0,13
P15	170,21	0,80	160,04	0,36
P20	177,68 ⁽¹⁾	0,96	167,31	0,34
P25	206,89 ⁽¹⁾	5,60	187,92	0,36
PC20	191,87 ⁽¹⁾	4,80	176,91	0,43
CM20	196,76 ⁽¹⁾	5,20	187,38	0,42
CC20	216,50 ⁽¹⁾	3,98	-	-

(1) Ensaios em que a força máxima da ligação é superior à força de cedência do varão de aço.

Na Figura 6.2 apresentam-se os Modelos Elasto-Plástico Equivalentes. Os gráficos correspondem aos valores médios de conjuntos de três ligações do mesmo tipo.

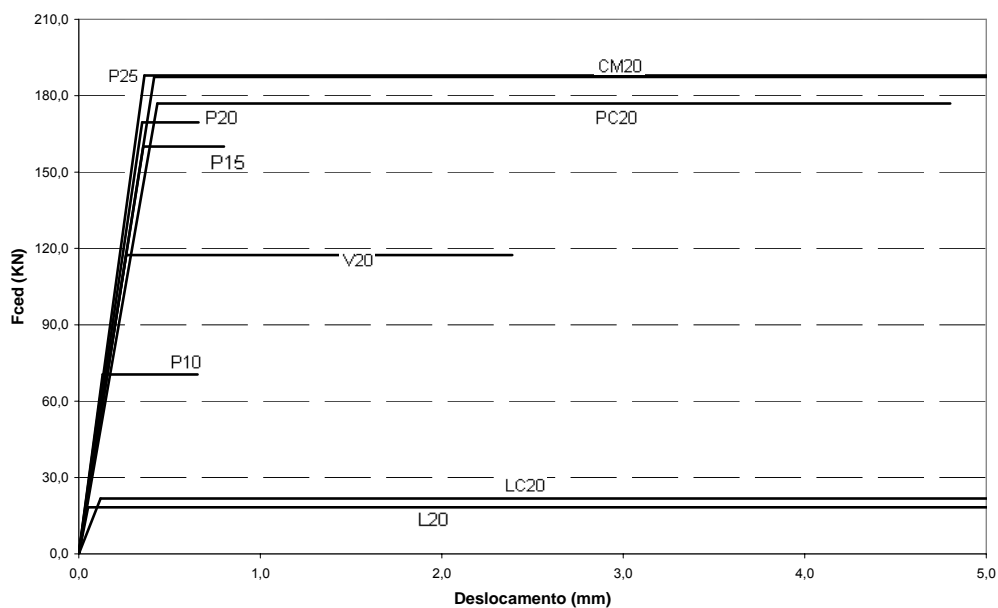


Figura 6.2. Diagramas dos Modelos Elasto-plástico Equivalentes das ligações

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

Analisando as Figuras 6.1, 6.2 e o Quadro 6.1, constata-se que as ligações com bainha em tubo de aço liso (L20 e LC20) apresentam um mau desempenho, o mesmo acontecendo com a ligação P10, realizada com bainha de pré-esforço com 10 cm de embebedimento. Pelo contrário, os melhores desempenhos de todas as ligações estudadas, em termos de resistência, foram obtidos com as ligações com bainha de pré-esforço com 20 cm ou mais de embebedimento (P20, P25, e PC20) e com a ligação CM20, realizada através de um furo executado com carotadeira.

É de realçar que a adição de cintagem em torno da bainha de pré-esforço na ligação PC20, originou um acréscimo de 11% de resistência face à mesma ligação sem nenhuma cintagem.

Através dos gráficos de força-deslocamento das ligações P20, P25, PC20 e CM20, em que a força de puxe ultrapassou a força de cedência do varão, verifica-se que estas ligações apresentam maior ductilidade devido à cedência das armaduras. Pelo contrário, as restantes ligações apresentam ductilidade muito reduzida.

Quadro 6.2. Comparação dos resultados experimentais com a estimativa da resistência obtida com as expressões (3.4) a (3.16)

Modelo de Ensaio	F_{ced} KN	$F_{rd,1}$ kN	$\frac{F_{ced}}{F_{R,1}}$	$F_{rd,2}$ kN	$\frac{F_{ced}}{F_{R,2}}$	$F_{rd,3}$ kN	$\frac{F_{ced}}{F_{R,3}}$	$F_{rd,4}$ kN	$\frac{F_{ced}}{F_{R,4}}$	$F_{rd,5}$ kN	$\frac{F_{ced}}{F_{R,5}}$	$F_{rd,6}$ kN	$\frac{F_{ced}}{F_{R,6}}$
V20	110,46	170,83	1,55	80,07	1,38	-	-	113,74	0,97	-	-	-	-
L20	18,31	170,83	9,33	121,58	0,15	-	-	101,74	0,18	316,11	0,06	174,20	0,11
LC20	21,74	170,83	7,86	121,58	0,18	-	-	101,74	0,21	316,11	0,07	174,20	0,12
P10	70,50	170,83	2,42	60,79	1,16	-	-	40,21	1,75	158,05	0,45	104,09	0,68
P15	160,04	170,83	1,07	91,18	1,76	-	-	72,52	2,21	237,08	0,68	151,79	1,05
P20	167,31	170,83	1,02	121,58	1,38	-	-	116,96	1,43	316,11	0,53	217,17	0,77
P25	187,92	170,83	0,91	151,97	1,24	-	-	156,03	1,20	395,13	0,48	252,98	0,74
PC20	176,91	170,83	0,97	121,58	1,46	-	-	116,96	1,51	316,11	0,56	217,17	0,81
CM20	187,38	170,83	0,91	121,58	1,54	212,93	0,88	115,45	1,62	316,11	0,59	212,93	0,88

No Quadro 6.2 comparam-se os resultados experimentais com as estimativas da resistência obtidas com as Equações (3.4) a (3.16). Os valores neste Quadro, foram obtidos através da determinação de f_{bm} e $f_{bm,grout}$ segundo a EN1992.1.1 [7], a qual considera a influência da fendilhação no valor da tensão de aderência aço-betão. Note-se que a tensão de aderência dada pela norma aplica-se exclusivamente a aços nervurados. Usou-se a liberdade de utilizar a mesma

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

tensão de aderência, calibrada para varões com uma geometria de nervuras predefinida, nas bainhas de pré-esforço (ligações P).

A resistência da ligação V20 excedeu o valor de $F_{Rd,2}$ para a resistência da aderência entre o aço e o betão, eventualmente por não existirem fendas a atravessar a ligação. De acordo com Eligehausen et al [22] a fendilhação reduz em 40% a 50% a resistência da ligação.

Dado os valores muito baixos das ligações L20 e LC20, não é possível fazer analogias com as expressões teóricas de cálculo.

Apesar de a rotura da ligação P10 ter sido claramente pelo betão, com a formação da superfície de rotura cónica característica, o valor da sua resistência é estimado de forma razoável pela equação (3.13), excedendo em 75% a resistência dada pela equação (3.14) que representa o mecanismo de rotura observado.

No caso da ligação P15, o valor do resultado experimental e tipo de rotura correspondem, de forma razoável, ao valor da equação (3.16). Também aqui, a resistência dada pela equação (3.14), que representa o mecanismo com superfície cónica de rotura pelo betão, é excedida em 121%.

Na ligação P20, o resultado experimental é estimado de forma razoável pela Eq. (3.4), ou seja, através da cedência das armaduras. No entanto, esta rotura teve um comportamento frágil, condicionado pelos tipos de rotura 2 e 4, cujos valores resistentes foram ultrapassados em 38% e 43%, respectivamente.

Nas ligações P25, PC20 e CM20, o comportamento na rotura foi claramente condicionado pela cedência do aço. Os valores de F_{ced} obtidos excedem ligeiramente a força de cedência do aço devido ao endurecimento deste após a cedência.

A resistência da ligação PC20 excedeu a da ligação P20 devido à cintagem do betão em redor da ligação. Como já se referiu, a rotura deu-se por cedência do aço.

Para as ligações L20 e LC20, a rotura deu-se por deslizamento na interface “grout”-bainha. A tensão na rotura de contacto na interface, através da expressão 6.1, é cerca de 1,60 MPa, que corresponde a um valor muito baixo.

$$\sigma_{aderência} = \frac{F_{puxe}}{\pi \cdot d_s \cdot h_{ef}} \quad (6.1)$$

Refira-se que foi realizado um estudo de “Influência de diferentes parâmetros no comportamento da ligação entre fundações existentes de betão armado e micro estacas” [31], em que foram ensaiados varões selados em tubos lisos, sendo a tensão de aderência obtida nesses ensaios

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

(Figura 6.3) muito semelhante à tensão de aderência verificada nos ensaios realizados às ligações tipo L20 e LC20.

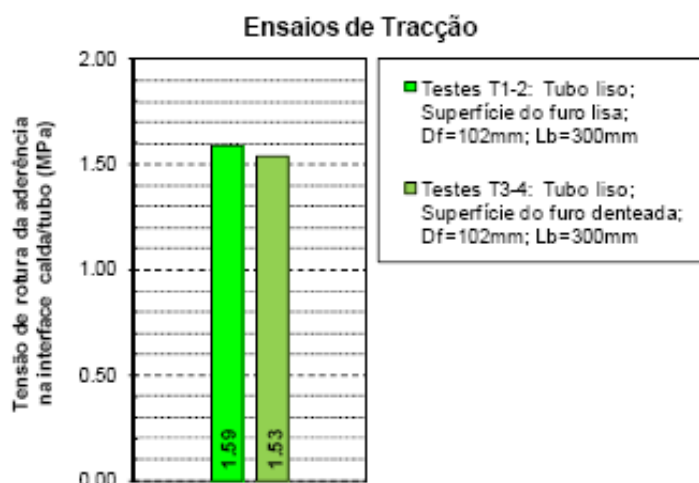


Figura 6.3. Ensaio de tracção em tubo liso (extraído de [31])

Uma conclusão interessante neste estudo [31] é que a tensão de aderência em tubos lisos não é influenciada pelo diâmetro e comprimento de selagem. Confirmando desta forma que é desaconselhável a utilização de bainhas lisas embebidas em betão, semelhantes à das ligações L20 e LC20.

Relativamente à ligação CM20 é de realçar o facto desta conduzir a uma resistência bastante superior à da ligação de referência V20. Para este facto contribui a maior aderência do “grout” e o diâmetro do furo. A resistência observada excedeu em 61% a resistência estimada para a rotura por aderência entre o varão e o “grout”.

No caso da ligação ensaiada com cargas cíclicas (CC20) pode-se observar que, tal como na CM20, a resistência também é superior à da ligação de referência V20, contudo a rotura ocorre para deslocamentos maiores que na CM20 o que se deve à degradação dos elementos envolvidos no mecanismo de aderência. Este fenómeno pode ser encarado como uma diminuição de ductilidade da ligação CC20 em comparação com a ligação CM20, o que vem ao encontro do referido em [22].

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No presente trabalho foram estudadas oito soluções de ligações para estudar o comportamento de ancoragens de varões pós-instalados em estruturas pré-fabricadas, tendo sido realizados ensaios monotónicos e cíclicos.

Nas secções seguintes apresentam-se as principais conclusões resultantes do estudo efectuado e propostas de trabalhos futuros que permitam esclarecer e aprofundar alguns dos aspectos não tratados.

7.1. Conclusões

Deste estudo, constata-se que é de todo desaconselhável a utilização de bainhas lisas embebidas em betão, semelhantes à das ligações L20 e LC20.

A melhor solução de ligação foi aquela em que se utilizaram bainhas de pré-esforço cintadas tendo-se constatado que a cintagem melhorou a ligação. Nos vários tipos de soluções estudadas, verificou-se que uma bainha de pré-esforço com embebedimento de 20 cm é suficiente para solicitar toda a resistência de um varão de 20 mm de diâmetro.

Neste estudo constatou-se que a utilização de varões de aço selados à posteriori através de um furo, executado com carotadeira, apresentam um bom desempenho do ponto de vista da resistência à tracção. O varão embebido directamente no betão apresentou piores resultados, o que demonstra que o “grout” utilizado na selagem garante uma melhor aderência que o betão original. Verificou-se através dos resultados dos ensaios cíclicos neste tipo de ligação (CC20) que existe uma degradação da aderência entre o aço e o “grout”, diminuindo ligeiramente a ductilidade da ligação. Contudo, o comportamento deste tipo de ligação às acções cíclicas, pode-se considerar que teve um desempenho muito bom.

As Equações (3.12) a (3.16), utilizadas para quantificar a resistência das ligações à tracção simples, poderão apenas dar valores indicativos para o caso de ligações com bainhas metálicas, pois foram calibradas com a tensão de aderência entre o betão e varões nervurados (f_{bd}) segundo o EC2 [7]. Para estes casos será necessário efectuar mais ensaios para analisar os diferentes parâmetros envolvidos e obter expressões mais apropriadas.

Após este estudo constata-se que apenas as ligações em que a rotura se deu pelo aço apresentam ductilidade significativa na rotura.

Como recomendação para dimensionamento deste tipo de ligações refira-se que é importante determinar a resistência dos diferentes modos de rotura da ligação. Em seguida deve-se forçar a que a rotura seja condicionada pelo comportamento do aço em cedência, isto é, a resistência da

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

ligação (Equações (3.6) e (3.13) a (3.16)) deve ser sempre superior à resistência da armadura (Equação (3.12)), garantindo assim um comportamento dúctil da ligação pilar-fundação.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Com a realização do presente trabalho constatou-se que existem alguns parâmetros cuja importância na resistência deste tipo de ligações não está completamente estudada, designadamente, a existência ou não de armaduras horizontais na face superior da fundação e qual a contribuição desta armadura para a resistência da ligação. Neste sentido, é importante estudar a influência da espessura do seu recobrimento (o qual tem um valor significativo no caso das fundações), a influência do estado de tensão do varão na resistência da ligação, o diâmetro do furo e da bainha, o efeito positivo da cintagem da ligação, e o efeito de proximidade de varões em grupo, algo que acontece com muita frequência devido às grandes quantidades de armadura na base dos pilares.

Outro aspecto pertinente a estudar poderá ser o comportamento da ligação com ensaios cíclicos alternados e deste modo avaliar o comportamento na ligação dos mecanismos de aderência entre o varão e o “grout”, bainha de pré-esforço e betão

Para melhor compreender o comportamento da ligação pilar-fundação é desejável que se efectuem ensaios à escala real da ligação pilar-fundação por forma a calibrar expressões que traduzam de forma mais aproximada o comportamento real da ligação, de modo a se poderem utilizar no dimensionamento deste tipo de ligações em estruturas pré-fabricadas.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Silva, A.M.S.; “Ligações entre elementos pré-fabricados de betão”; Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1998.
- [2] Fib bulletin 41, “Treatment of imperfections in precast structural elements”, State-of-art report, 2003.
- [3] Fib bulletin 21, “Environmental issues in prefabrication”, State-of-art report, 2007.
- [4] “Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de Julho, Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado”, Porto Editora.
- [5] “Decreto-Lei nº 235/83 de 31 de Maio, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes”, Porto Editora.
- [6] Santos, S., “Comportamento de Ligações de Estruturas Pré-fabricadas de Betão”. Tese apresentada ao concurso para especialista do LNEC, Lisboa, Junho 1984.
- [7] “Eurocode – 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules for buildings”, CEN EN 1992-1-1, April 2004.
- [8] “Eurocode – 8: Design of Structures for Earthquake resistance – Part 1-1: General rules, seismic actions and rules for buildings”, CEN EN 1998-1-1, December 2004.
- [9] Fib bulletin 43, “Structural connections for precast concrete buildings”, 2008, Guide of good practice.
- [10] “PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete institute”, PCI Industry Handbook Committee, Sixth Edition, 2004.
- [11] Proença, J., “Comportamento Sísmico de Estruturas Pré-Fabricadas – Implicações do Eurocódigo 8”, Construção em Betão Pré-Fabricado – um desafio para o futuro, Seminário OE, 10 de Fevereiro de 2006.
- [12] Ebeling, E.B.; El Debs, M.; Lúcio, V.J.G., “Estudo sobre o punçoamento em ligações pilar-fundação por meio de cálice em estruturas de betão pré-fabricado”; 2º Congresso Nacional da Prefabricação em Betão; LNEC, Lisboa, Março de 2008.
- [13] Mendes, L.; Coelho, E.; Costa, A. C.; “Ensaio sísmico a um sistema estrutural de betão pré-fabricado”; SILE08; UNL, Lisboa, Novembro de 2008.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

- [14] “Design and typical details of connections for Precast and Prestressed Concrete”, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1988.
- [15] M. Nishiyama; F. Watanabe; Fumio; Minehiro; “Seismic performance of precast column-foundation assembled by post-tensioning”; Conference on advanced materials for construction of bridges, buildings, and other structures III, Davos, Switzerland, 2003.
- [16] Chastre, C; “Comportamento às acções cíclicas de pilares de betão armado reforçados com materiais compósitos”; Dissertação apresentada para obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2005.
- [17] Lúcio, V.; Marreiros, R; “Estado do conhecimento em aderência de varões nervurados de aço ao betão em elementos de betão armado”; UNIC-RPS1, 2005.
- [18] FIB bulletin 10; “Bond of Reinforcement in Concrete”, State-of-the-art Report, 2000.
- [19] Eligehausen, R.; Fuchs, W.; “Recent developments and open problems in fastening technique”, Universitat Stuttgart, Germany.
- [20] Eligehausen, R.; Popov, E.P.; Bertero, V.V.; “Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations”, Report No. UCB/EERC 83-23, Univ. Of California, Berkeley (Ca, USA).
- [21] “Guidelines for the Use of Structural Precast Concrete in Buildings”; New Zealand Concrete Society and New Zealand National Society for Earthquakes Engineering, 1992.
- [22] Eligehausen, R.; Simons, I.; Kretschmar, M.; “Behaviour of Post-installed Rebars under Reversed Cyclic Loading”; fib, Proceedings of the 2nd International Congress, Naples, 2006.
- [23] Matthew Miltenberger, P.E.; “Capacity design of grouted anchors”; 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology; Washington, DC, USA, 2001.
- [24] Cook, A., MacVay, M., Krishnamurthy, K.; “Pullout Simulation Postinstalled Chemically Bonded Anchors”; Journal of Structural Engineering, September 1996.
- [25] Kunz, J., Wisser E.; Geiss, P.; “Behavior and Design of Adhesive Anchors Under Tensile Load”; Hilti Development Corp., Germany, 2004.
- [26] Eligehausen, R.; Spieth, H.; “Post installed rebar connections”; Institute for Construction Materials, University of Stuttgart, Germany, 2006.

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO PILAR-FUNDAÇÃO EM ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS
COM ARMADURAS SALIENTES DO PILAR

- [27] Eligehausen, R.; Spieth, H.; "Behavior of Anchors in Cracked Concrete under Tension Cycling at Near-Ultimate Loads"; Technical Paper, ACI Structural Journal, 2008.
- [28] NP EN 206-1 Betão: Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade, Norma Portuguesa, IPQ, Junho 2007.
- [29] ECCS Technical Working Group 1.3 – Seismic design, "Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cycling loads", European Convention for Constructional Steelwork, September 1985.
- [30] Priestley, M. (Editor), "Report on the third U.S.PRESS Coordinating Meeting". Report No. PRESS 92/02, Department of applied mechanisms and engineering sciences, University of California at San Diego, La Jolla, California, August, pp. 12-16.
- [31] Veludo, J; Júlio, E.; Pinto, P; "Influência de diferentes parâmetros no comportamento da ligação entre fundações existentes de betão armado e micro estacas"; Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008, Guimarães, 2008.
- [32] ACI 408R-03; "Bond and development of straight reinforcing bars in tension"; Reported by ACI Committee 408.
- [33] SIKA, Prontuário. Catálogo de fichas técnicas.
- [34] Revista Italiana "Elite".