

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Carlos Manuel Chastre Rodrigues (Licenciado)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas

Junho de 1993

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Orientador Científico Professor Júlio António da Silva Appleton

Co-Orientador Científico Professor Válter José da Guia Lúcio

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas

Junho de 1993

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

RESUMO

Analisa-se neste trabalho o comportamento da ligação aço-resina-betão. Esta ligação é utilizada em reforços de elementos estruturais com chapas de aço coladas ao betão através de resina epoxy, adicionando ou não buchas metálicas.

A motivação para este estudo advém da necessidade de investigar o comportamento da ligação aço-resina-betão com buchas metálicas, sujeita às acções monotónicas e, em particular, às acções cíclicas. Esta motivação é acrescida dada a localização do território português numa região com actividade sísmica importante.

O trabalho desenvolvido baseia-se essencialmente na análise experimental. Caracterizaram-se os materiais constituintes da ligação, ensaiaram-se seis modelos da ligação aço-resina com cargas monotónicas e vinte e seis modelos da ligação aço-resinabetão sujeita a acções monotónicas ou cíclicas.

Nos modelos da ligação aço-resina-betão, para além do tipo de acção, estudaram-se os parâmetros geometria da ligação, tipo de betão, tipo de resina e tipo de ligação - com e sem buchas metálicas.

Fez-se um estudo paramétrico com um modelo numérico de elementos finitos e uma análise global dos resultados dos ensaios experimentais da ligação aço-resina-betão em função dos parâmetros estudados.

BEHAVIOUR OF STEEL-EPOXY-CONCRETE CONNECTION IN STRUCTURAL ELEMENTS

ABSTRACT

The present work studies the behaviour of bonded steel plates to reinforced concrete elements, which can be used in the strengthening of concrete structural elements. Metallic expansion bolts can be added.

The objective of this dissertation is to investigate the behaviour to monotonic actions and particularly to cyclic loading of steel-epoxy-concrete connection with expansion bolts. This cyclic action is of particular interest due to the strong seismicity of the Portuguese territory.

The research is mainly based in experimental analysis. The caracterization of the materials was carried out. Six models of the steel-epoxy connection were tested with monotonic loading. Twenty six models of steel-epoxy-concrete bond were submitted either to monotonic or to cyclic actions.

Besides the type of action, other parameters were studied in the steel-epoxy-concrete connection models. These were the bond geometry area, the type of concrete, the type of epoxy and connection - with or without metallic expansion bolts.

A parametric study with a numerical model of finite elements, as well as a global analysis of the experimental tests of the steel-epoxy-concrete connection was carried out.

PALAVRAS CHAVE

Betão armado Reforço estrutural Resina epoxy Buchas metálicas Chapas de aço coladas Análise experimental

Acções cíclicas

Aderência

Armaduras exteriores

KEY WORDS

Reinforced concrete

Structural strengthening

Epoxy resins

Expansion bolts

Glued steel plates

Experimental analysis

Cyclic loading

Bond

External reinforcement

AGRADECIMENTOS

Esta tese foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, tendo contado com o apoio da Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica. A estas duas instituições agradeço os meios colocados à minha disposição.

A todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho desejo expressar o meu mais profundo agradecimento.

Ao Professor Júlio Appleton, meu orientador científico, pelo interesse e acompanhamento que me dedicou e pelos conselhos amigos e profundamente conhecedores que me transmitiu.

Ao Professor Válter Lúcio, que co-orientou este trabalho, a minha gratidão pelo apoio e disponibilidade constantes na realização dos ensaios, assim como pela orientação e amizade demonstrada.

Ao Professor José Câmara, coordenador do mestrado, pela disponibilidade revelada e pela forma prestável com que resolveu as dificuldades surgidas.

Ao Professor Augusto Gomes, pelos esclarecimentos concedidos sobre os ensaios com cargas cíclicas, e ao Professor Jorge Alfaiate, que colocou à minha disposição parte da bibliografia utilizada.

Ao Eng^o Nunes, pela importante ajuda na realização dos ensaios, e ao Eng^o. Abdias Gomes, pela colaboração prestada nos ensaios de caracterização dos betões.

Ao Victor, pela ajuda na montagem dos modelos e na colagem dos extensómetros e ao Fernando Alves, pela execução do sistema de ensaio.

Ao Engº. João Vaz, por ter posto à minha disposição o seu programa para tratamento gráfico dos resultados do modelo de elementos finitos e pela troca de impressões e amizade.

Aos Eng^{os}. Jorge Bounassar, Alexandre Pinto, João Durão, José Soares, Canfeng Li e Pinto da Costa, pela amizade e interesse manifestado na troca de impressões.

Manifesto igualmente o meu reconhecimento às empresas que deram o seu contributo para a realização dos ensaios:

- STAP, pela cedência e injecção das resinas utilizadas, em especial ao Eng^o Cóias e Silva, pelo interesse demonstrado e ao Sr. Pardal, pelo cuidado e dedicação que colocou na preparação e injecção das resinas.
- PRECIX, pela preparação das superfícies das chapas de aço.
- HILTI, pela cedência das buchas metálicas utilizadas.
- DYWIDAG, pela cedência dos varões de pré-esforço utilizados no sistema de ensaio.

Por fim, o maior agradecimento apresento-o aos meus pais e à minha esposa Dina, pelo apoio e incentivo que sempre me dispensaram ao longo destes anos. À Dina queria ainda agradecer a ajuda na revisão do texto e dedicar-lhe este trabalho.

ÍNDICE

<u>Capítulo 1</u> - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJECTIVOS	2
1.2 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3

<u>Capítulo 2</u> - ESTADO ACTUAL DOS CONHECIMENTOS	7
2.1 - INTRODUÇÃO	8
2.2 - PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES EXPERIMENTAIS	8
2.2.1 - Comportamento da ligação aço-resina-betão	10
2.2.2 - Comportamento dos reforços à flexão e/ou ao esforço transverso	
em elementos de betão armado	10
2.2.3 - Comportamento à fadiga dos reforços em vigas de betão armado	14
2.2.4 - Comportamento à fluência dos reforços em vigas de betão armado	17
2.2.5 - Influência de alguns parâmetros no comportamento da ligação	
aço-resina-betão	17
2.2.5.1 - Resinas epoxy	17
2.2.5.2 - Influência da preparação das superfícies do aço e do	
betão	
2.2.5.3 - Influência da resistência do betão	
2.2.5.4 - Influência da espessura da chapa de aço de reforço	
2.2.6 - Outros ensaios	19
2.3 - VERIFICAÇÃO DA LIGAÇÃO	20
2.3.1 - Notas preliminares	
2.3.2 - Solução elástica para a distribuição da tensão de aderência	

2.3.3 - Verificação da descolagem da chapa de açoatravés de um critério	
energético	23
2.2.4 - Recomendações do CEB	25

Capítulo 3 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	27
3.1 - AÇO	27
3.2 - BETÃO	29
3.3 - RESINA EPOXY	33

<u>Capítulo 4</u> - CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS DA LIGAÇÃO	
AÇO-RESINA-BETÃO	45
4.1 - CONCEPÇÃO E GEOMETRIA DOS MODELOS	
4.2 - PARÂMETROS ANALISADOS	
4.3 - APRESENTAÇÃO DOS MODELOS	
4.4 - PREPARARAÇÃO DOS MODELOS	
4.4.1 - Preparação da superfície do betão	51
4.4.2 - Preparação da superfície da chapa de aço	51
4.4.3 - Injecção da resina epoxy	
4.4.4 - Ligação com buchas metálicas	53
4.5 - SISTEMA DE ENSAIO	
4.5.1 - Mecanismo de ensaio dos provetes	54
4.5.2 - Equipamento de ensaio e de aquisição de dados	55
4.5.3 - Instrumentação	59
4.5.4 - Procedimento de ensaio	
4.5.4.1 - Modelos sujeitos a cargas monotónicas	
4.5.4.2 - Modelos sujeitos a cargas cíclicas	64

<u>Capítulo 5</u> - ENSAIOS EXPERIMENTAIS DOS MODELOS DA	
LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO	
5.1 - INTRODUÇÃO	65
5.2 - NOTAS PRELIMINARES	66
5.3 - ENSAIO DE MODELOS SUJEITOS A CARGAS MONOTÓNICAS	72
5.2.1 - Modelos sem buchas metálicas	74
5.2.2 - Modelos com buchas metálicas	121
5.3 - ENSAIO DE MODELOS SUJEITOS A ACÇÕES CÍCLICAS	136
5.3.1 - Modelos sem buchas metálicas	139
5.3.2 - Modelos com buchas metálicas	
5.3.3 - Evolução das tensões no aço com os ciclos de carga nos	
modelos II-D-2 e III-BD-2	154

Capítulo 6 - ANÁLISE DE RESULTADOS	
6.1 - MODELO NUMÉRICO	166
6.1.1 - Apresentação dos modelos	
6.1.1.1 - Modelos da Ligação Aço-Resina-Betão sem bucha metálica	
6.1.1.2 - Modelos da Ligação Aço-Resina-Betão com buchas metálicas	170
6.1.2 - Estudo paramétrico - apresentação de resultados	
6.1.3 - Comparação de resultados com os modelos experimentais	
6.2 - MODELOS EXPERIMENTAIS DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO	
6.2.1 - Análise global dos resultados	
6.2.1.1 - Força de rotura	
6.2.1.2 - Tensão máxima na chapa de aço	
6.2.1.3 - Tensão média de aderência na rotura	190
6.2.1.4 - Deslocamento relativo da chapa de aço em relação ao betão	
6.2.1.5 - Rigidez da ligação para 40% da força de rotura	

6.2.2 - Análise de resultados dos mod	elos ensaiados às acções	s cíclicas196
---------------------------------------	--------------------------	---------------

<u>Capítulo 7</u> - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	
7.1 - CONCLUSÕES	199
7.2 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	
REFERÊNCIAS	

A^*	- área da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço
A _{anc}	- área de ancoragem da chapa de aço
A_c	- área da secção de betão sem ter em conta as chapas de reforço
A _s	- secção da chapa de aço
$A_{s,1}$	- área da armadura ordinária
A _{s,2}	- área da armadura de reforço
b	- largura do betão, largura da viga
b_s	- largura da chapa de aço
d_1	- distância da armadura ordinária à fibra superior
d_2	- distância da armadura de reforço à fibra superior
ec	- altura do betão
Ec	- módulo de elasticidade do betão
E _{cm}	- valor médio do módulo de elasticidade do betão
eg	- espessura da resina
Ei	- módulo de elasticidade da resina do provete i
Em	- valor médio do módulo de elasticidade da resina
e _s	- espessura da chapa de aço
Es	- módulo de elasticidade do aço
F	- força
f_c	- tensão de rotura à compressão dos provetes de betão
f_{cm}	- valor médio da tensão de rotura à compressão em provetes cilíndricos de betão
f_{ct}	- tensão de rotura à tracção dos provetes de betão
f_{ctm}	- valor médio da tensão de rotura à tracção em provetes cilíndricos de betão
F _{rot}	- força de rotura
F _{rot}	- Força de rotura
G	
	- modulo de distorção da resina
$G_{\mathcal{C}}$	- modulo de distorção da resina - taxa de restituição de energia crítica
G _c h	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada.
G _c h i	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada. provete
<i>G_c</i> h i <i>I</i> *	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada. provete inércia da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço
G _c h i I* I _c	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada. provete inércia da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço inércia da secção de betão sem ter em conta as chapas de reforço
G_c h I I^* I_c $K_{0.4}$	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada. provete inércia da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço inércia da secção de betão sem ter em conta as chapas de reforço rigidez da ligação para 40% da força de rotura
G_c h I^* I_c $K_{0.4}$ l_a	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada. provete inércia da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço inércia da secção de betão sem ter em conta as chapas de reforço rigidez da ligação para 40% da força de rotura comprimento de ancoragem
G_c h i I^* I_c $K_{0.4}$ l_a l_{ef}	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada. provete inércia da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço inércia da secção de betão sem ter em conta as chapas de reforço rigidez da ligação para 40% da força de rotura comprimento de ancoragem comprimento efectivo da ancoragem
G_c h i I^* I_c $K_{0.4}$ la lef ls	 modulo de distorção da resina taxa de restituição de energia crítica altura da secção da viga não reforçada. provete inércia da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço inércia da secção de betão sem ter em conta as chapas de reforço rigidez da ligação para 40% da força de rotura comprimento de ancoragem comprimento efectivo da ancoragem comprimento da chapa de aço

NOTAÇÃO

n	- coeficiente de homogeneização aço-betão
N	- esforço normal
n	- número
R	- energia dissipada por unidade de superfície
t _s	- espessura da chapa de aço
V	- esforço transverso
V	- esforço transverso a ser absorvido pelo elemento estrutural após o reforço
We	- energia elástica
Wp	- energia potencial
Ws	- energia dissipada
x	- distância onde se mede a tensão
Х	- coordenada
Y	- coordenada
Z_1	- distância da armadura ordinária à força de compressão no betão
Z_2	- distância da armadura de reforço à força de compressão no betão
δ	- deslocamento relativo da chapa de aço em relação ao betão
$\delta_{m \acute{a} x}$	- deslocamento máximo na rotura
γ_n	- coeficiente de monolitismo para a resistência
$\sigma_{ced,i}$	- tensão de cedência no aço no provete i
$\sigma_{m,ced}$	- valor médio da tensão de cedência no aço
$\sigma_{m,m\acute{a}x}$	- valor médio da tensão máxima no aco
	vulor medio du tensuo maximu no uço
$\sigma_{ m m\acute{a}x}$	 tensão máxima na chapa de aço
σ _{máx} σ _{máx,i}	 tensão máxima na chapa de aço tensão máxima no aço no provete i
σ _{máx} σ _{máx,i} σ _{rot,i}	 tensão máxima na chapa de aço tensão máxima no aço no provete i tensão de rotura à tracção da resina do provete i
σ _{máx} σ _{máx,i} σ _{rot,i} σ _{rot,m}	 tensão máxima na chapa de aço tensão máxima no aço no provete i tensão de rotura à tracção da resina do provete i valor médio da tensão de rotura à tracção da resina
$\sigma_{máx}$ $\sigma_{máx,i}$ $\sigma_{rot,i}$ $\sigma_{rot,m}$ σ_{s0}	 tensão máxima na chapa de aço tensão máxima no aço no provete i tensão de rotura à tracção da resina do provete i valor médio da tensão de rotura à tracção da resina tensão na chapa de aço no início da ligação
$\sigma_{máx}$ $\sigma_{máx,i}$ $\sigma_{rot,i}$ $\sigma_{rot,m}$ σ_{s0} τ_{α}	 tensão máxima na chapa de aço tensão máxima no aço no provete i tensão de rotura à tracção da resina do provete i valor médio da tensão de rotura à tracção da resina tensão na chapa de aço no início da ligação tensão de aderência
$\sigma_{máx}$ $\sigma_{máx,i}$ $\sigma_{rot,i}$ $\sigma_{rot,m}$ σ_{s0} τ_{α} τ_{ader}	 tensão máxima na chapa de aço tensão máxima no aço no provete i tensão de rotura à tracção da resina do provete i valor médio da tensão de rotura à tracção da resina tensão na chapa de aço no início da ligação tensão de aderência tensão de aderência

Classes de modelos numéricos

AV	- betão tipo A, resina tipo V, modelo sem bucha
BV	- betão tipo B, resina tipo V, modelo sem bucha
AP	- betão tipo A, resina tipo P, modelo sem bucha
BP	- betão tipo B, resina tipo P, modelo sem bucha

AVB	- betão tipo A, resina tipo V, modelo sem bucha
BVB	- betão tipo B, resina tipo V, modelo com bucha
APB	- betão tipo A, resina tipo P, modelo com bucha
BPB	- betão tipo B, resina tipo P, modelo com bucha

Modelos experimentais

LAR-V	- ligação	aço-resina	tipo	V
-------	-----------	------------	------	---

- LAR-P ligação aço-resina tipo P
- LARB ligação aço-resina-betão
- I Série I (betão A)
- II Série II (betão A)
- III Série III (betão B)
- P Resina P
- B Bucha metálica
- D Dynamic (acções cíclicas)
- BD Bucha metálica + Dynamic

Classes de modelos experimentais

MP	- modelo-padrão (betão A, resina V, sem buchas, cargas monotónicas)
α	- (betão A, resina V, sem buchas, cargas monotónicas)
β	- (betão A, resina V, sem buchas, cargas monotónicas)
γ	- (betão A, resina V, sem buchas, cargas monotónicas)
III	- (betão B, resina V, sem buchas, cargas monotónicas)
II-P	- (betão A, resina P, sem buchas, cargas monotónicas)
III-P	- (betão B, resina P, sem buchas, cargas monotónicas)
II-B	- (betão A, resina V, com buchas, cargas monotónicas)
III-B	- (betão B, resina V, com buchas, cargas monotónicas)
II-D	- (betão A, resina V, sem buchas, acções cíclicas)
II-BD	- (betão A, resina V, com buchas, acções cíclicas)
III-BD	- (betão B, resina V, com buchas, acções cíclicas)

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A reparação e o reforço de estruturas de betão armado é cada vez mais uma necessidade.

Várias são as causas que, em conjunto ou separadamente, motivam uma intervenção de reparação ou de reforço. De entre estas, podem-se referir os erros de projecto, os defeitos de construção e os danos provocados por acções externas (acidentes, incêndios e deterioração da estrutura por ausência de conservação).

Além disso, a alteração do tipo de utilização da estrutura dá, frequentemente, origem a situações de reforço, devido ao aumento do nível da sobrecarga ou devido à eliminação de elementos estruturais.

A solução de reforço a adoptar é função de vários factores técnicos e económicos, em particular, da eficiência da intervenção do reforço, das condições e custos de realização da obra e da disponibilidade local de mão-de-obra especializada, materiais e equipamento. Outros aspectos importantes são a continuação ou não da utilização da estrutura durante a obra e a agressividade do meio ambiente durante e após o reforço.

São várias as opções para reforçar uma dada estrutura. Salientam-se, de entre estas, o reforço utilizando uma ou mais das seguintes técnicas: betão armado, betão projectado, perfís metálicos, pré-esforço, e chapas de aço coladas ao betão com resina epoxy, adicionando ou não buchas metálicas.

1

O reforço com chapas de aço coladas com resina epoxy surgiu em França com L'Hermite e Bresson na década de 60. Esta técnica era inicialmente destinada a novas construções, mas veio a revelar-se particularmente eficaz no reforço e reparação de estruturas de betão armado. Hoje em dia é utilizada no reforço de vigas (à flexão, ao esforço transverso ou à torção), no reforço de lajes à flexão e no reforço de pilares.

O presente trabalho incide em particular na técnica de reforço com chapas de aço coladas ao betão por injecção de resina epoxy, utilizando ou não buchas metálicas. Analisou-se em vinte e seis modelos experimentais, o comportamento da ligação aço-resina-betão e, em seis modelos, o comportamento da ligação aço-resina. Os modelos experimentais da ligação aço-resina-betão foram ensaiados, com e sem buchas metálicas, a acções monotónicas ou cíclicas.

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.

1.1 - OBJECTIVOS

A motivação para este estudo surgiu da necessidade de investigação do comportamento às acções monotónicas, e em particular às acções cíclicas, da ligação aço-resina-betão com buchas metálicas, motivação acrescida dada a localização do território português numa região com uma actividade sísmica importante.

Em seguida expõem-se os objectivos principais que orientaram este trabalho:

 fazer uma pesquisa bibliográfica, elaborando uma síntese com as principais contribuições nesta área;

- caracterizar, experimentalmente, os materiais componentes da ligação aço-resinabetão;
- avaliar em termos experimentais o comportamento dos modelos da ligação açoresina;
- observar, experimentalmente, o comportamento dos modelos da ligação aço-resinabetão, variando a geometria da ligação, o betão (2 tipos), a resina (2 tipos), o tipo de ligação (com ou sem buchas metálicas) e o tipo de acção (acções monotónicas ou cíclicas), e quantificar a influência destes no comportamento da ligação;
- compreender o funcionamento dos modelos experimentais da ligação aço-resinabetão, analisando um modelo numérico de elementos finitos, considerando o comportamento elástico linear dos materiais e quantificar, através de uma análise paramétrica, a influência dos diversos parâmetros.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, incluindo a introdução e as conclusões, e encontra-se organizada de acordo com os objectivos definidos.

No <u>capítulo 2</u> apresenta-se uma panorâmica geral sobre os trabalhos de investigação realizados por diversos autores acerca do reforço de elementos estruturais com chapas coladas ao betão com resina epoxy. Em particular referem-se alguns estudos realizados sobre o comportamento da ligação aço-resina-betão e sobre o comportamento do reforço de elementos estruturais à flexão, ao esforço transverso, à fadiga e à fluência. Referem-se ainda a influência de alguns parâmetros no comportamento da ligação e a existência de

algumas áreas de investigação por aprofundar. Apresentam-se, por fim, alguns critérios para verificação da ligação aço-resina-betão.

Apresenta-se, no <u>Capítulo 3</u>, a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos modelos da ligação aço-resina-betão. Os materiais testados foram as chapas de aço, os dois tipos de betão (A e B) e os dois tipos de resinas epoxy (V e P) utilizados. Apresentam-se igualmente neste capítulo os ensaios realizados com o objectivo de caracterizar a ligação aço-resina.

Descrevem-se, no <u>Capítulo 4</u>, os modelos utilizados nos ensaios experimentais da ligação aço-resina-betão. Apresenta-se a geometria dos modelos ensaiados e os parâmetros estudados. Referem-se os preparativos e cuidados a tidos na execução dos modelos e descreve-se o sistema de ensaio, a instrumentação dos modelos e os procedimentos utilizados nos ensaios.

No <u>Capítulo 5</u> apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais de vinte e seis modelos da ligação aço-resina-betão submetidos a cargas monotónicas ou às acções cíclicas. Realizaram-se três séries de ensaios (I, II e III) tendo-se definido um modelo-padrão para comparar os resultados obtidos.

Na série I ensaiaram-se dez modelos do betão tipo A com o intuito de definir o modelopadrão e analisar o comportamento da geometria da ligação. Na série II, realizada igualmente com o betão tipo A, ensaiaram-se oito modelos em que a área de ancoragem da chapa de aço era igual à do modelo-padrão. O objectivo desta série de ensaios foi analisar o comportamento da ligação, variando alguns parâmetros como o tipo de resina, a existência de buchas metálicas ou o tipo de acção a que os modelos estavam sujeitos. Na série III ensaiaram-se oito modelos com o betão tipo B e o objectivo foi idêntico ao da série II. Apresenta-se, no <u>Capítulo 6</u>, um estudo paramétrico dos resultados obtidos da análise elástica linear realizada com um modelo numérico de elementos finitos. O comportamento do modelo foi simulado com e sem buchas metálicas para os dois tipos de betão (A e B) e para os dois tipos de resina (V e P), aplicando uma carga estática.

Faz-se igualmente, no <u>Capítulo 6</u>, uma análise global dos resultados dos ensaios experimentais da ligação aço-resina-betão apresentados no capítulo 5. Analisam-se as diversas grandezas caracterizadoras do comportamento da ligação em função dos diversos parâmetros estudados.

No <u>Capítulo 7</u> apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo deste trabalho e indicam-se alguns aspectos que poderão ser desenvolvidos no futuro.

Capítulo 2

ESTADO ACTUAL DOS CONHECIMENTOS

2.1 - INTRODUÇÃO

São diversas as questões que se têm levantado relacionadas com o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com chapas de aço coladas ao betão com resina epoxy. Quer por via analítica quer por via experimental, os investigadores têm tentado dar resposta a algumas destas questões.

Os primeiros trabalhos de investigação nesta área surgiram em França com L'Hermite e **Bresson** em 1967. Estes investigadores apresentaram diversas comunicações [6, 7, 24 e 25] sobre este tema em Seminários e Congressos. Em 1981 **Ladner** e **Weder** dos laboratórios Suíços - EMPA - publicaram [27] um dos mais completos trabalhos de investigação sobre este assunto realizados até à data.

Em 1983, dado o crescente emprego desta técnica de reforço, o **CEB** apresenta no seu boletim de informação número 162 [19] algumas recomendações e sugestões sobre a utilização desta técnica, baseando-se nos trabalhos de investigação realizados até então. Também em 1983, **Theillout** apresenta, na Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris, a sua Tese de Doutoramento sobre o tema: *"Renforcement et Réparation des Ouvrages d'Art par la Technique des Toles Collées"* [33].

Em 1985 **Cánovas** publica a última das suas referências [12, 13 e 14] com os resultados das investigações realizadas no Instituto Eduardo Torroja de la Construction y del Cemento, em Madrid.

Em Portugal, no Instituto Superior Técnico, Alfaiate apresenta em 1986 a sua Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas [2]: "Reforço por Adição de Elementos Metálicos em vigas de Betão Armado - Flexão simples", onde se relatam os ensaios realizados em vigas de betão armado reforçadas à flexão com chapas metálicas coladas ao betão com resinas epoxy.

O **GTG 21** do CEB apresenta em Novembro de 1990 um documento provisório intitulado *"Redesign of Concrete Structures"* [15], abordando as diversas técnicas de reforço e reparação de estruturas, dando especial ênfase, no seu capítulo 5, às questões relacionadas com o controlo de qualidade dos materiais, das peças acabadas e respectivas operações de reparação ou reforço .

2.2 - PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES EXPERIMENTAIS

Tendo por base a pesquisa bibliográfica realizada, apresenta-se, em seguida, uma síntese principais contribuições experimentais nesta área.

2.2.1 - Comportamento da ligação aço-resina-betão

Para analisar o comportamento da ligação aço-resina-betão sem buchas metálicas, vários investigadores realizaram ensaios com o objectivo de quantificar o valor da força de rotura da ligação, obter a distribuição de tensões de aderência entre o aço e o betão e saber qual a configuração óptima da zona de ancoragem.

L'Hermite [25] tentou descobrir algumas potencialidades de utilização das chapas coladas com resina epoxy. Estava-se no início da investigação nesta área e existiam ainda muitas dúvidas, principalmente em relação ao comportamento das resinas.

Este autor realizou ensaios com diferentes tipos de ligação para observar essencialmente o comportamento da resina epoxy. Utilizou provetes de pequenas dimensões para ensaiar as ligações aço-resina, betão-resina e aço-resina-betão. A primeira foi ensaiada à tracção e as duas restantes à compressão.

Estes estudos iniciais foram importantes, embora os resultados a que o autor chegou fossem apenas qualitativos, dada a grande indefinição existente, na época, ao nível da composição química das resinas epoxy.

Ladner e Weder [27] realizaram nos laboratórios suíços EMPA ensaios à flexão, utilizando vigas simplesmente apoiadas de betão armado de secção rectangular $(b \times h = 150 \times 250 \text{ mm}^2)$ e um vão de dois metros. Estas vigas foram reforçadas com chapas de aço coladas no exterior para determinar a configuração óptima da zona de ancoragem.

A área da secção transversal das chapas e a área da zona de ancoragem foram mantidas constantes em todos estes ensaios. Os únicos parâmetros que variaram foram a largura e a espessura das chapas de aço e, por conseguinte, o comprimento da zona de ancoragem. As chapas de aço eram aderentes ao betão unicamente na zona de ancoragem, que se situava entre os apoios e a extremidade da viga.

Bresson [6] desenvolveu analiticamente uma expressão com a solução elástica da distribuição de tensões de aderência. **Ladner** e **Weder** [27] verificaram, através dos resultados dos ensaios, que o valor de pico, obtido analiticamente através da expressão desenvolvida por **Bresson** para as tensões de aderência (τ_{ader}), de facto não ocorre. Observaram ainda que, embora as tensões de aderência reais sejam consideravelmente menores, é efectivamente necessário um maior comprimento de ancoragem do que o previsto analiticamente.

Do resultado dos ensaios, observou-se igualmente que, para a mesma área de secção transversal da chapa de aço, as chapas finas e largas tinham um melhor comportamento do que as espessas e estreitas. Verificou-se, ainda, que as chapas espessas requeriam um comprimento de ancoragem maior do que as finas.

Theillout [33] realizou dez ensaios de tracção com chapas coladas com resina epoxy a uma superfície de betão, por forma a observar o efeito da geometria da ligação no valor da força de rotura e obter o valor da energia dissipada na rotura. Constatou, a partir da observação das superfícies de rotura obtidas nos ensaios, que a fenda não se propagava segundo um plano e que a força de rotura é independente do comprimento da ancoragem (l_{anc}) a partir do momento em que esta é maior do que 1,75 vezes a altura do betão a que a chapa está colada.

2.2.2 - Comportamento dos reforços à flexão e/ou ao esforço transverso em elementos de betão armado

Ladner e Weder [27] ensaiaram uma viga em T de betão armado, com uma altura de 0.5 m e um vão de 6.0 m. A viga era reforçada à flexão e ao esforço transverso com chapas de aço coladas. Os ensaios realizaram-se com cargas estáticas até à rotura. A secção da viga da chapa de reforço à flexão correspondia a 83% da área total de aço. As chapas para reforço ao esforço transverso foram coladas na alma da viga.

A viga T teve um comportamento elástico até a tensão no aço alcançar σ_s = 400 MPa. A força foi incrementada para além deste limite e como não existiram irregularidades ou mau funcionamento local, **Ladner** e **Weder** consideraram totalmente efectivo todo o sistema de transmissão de cargas até à rotura por esmagamento do betão comprimido. Os autores consideraram que as dimensões das chapas de reforço ao esforço transverso

asseguravam que o sistema de transferência de cargas pudesse funcionar de acordo com o princípio de treliça.

Ladner e Weder referem ainda que o tipo de formação de fendas e o comportamento das fendas indicava claramente que a aderência entre o betão e as chapas de aço era totalmente efectiva.

Cánovas [12 e 14] ensaiou à rotura 109 vigas reforçadas à flexão, com um vão de 3,0 m e um comprimento total de 3,35m; a secção das vigas tinha 0,20m de altura e 0,25m de largura. A aplicação da chapa de reforço fez-se na zona do meio-vão e num comprimento de 2,45m; a secção da chapa na viga de referência tinha 0,10 m de largura e 3 mm de espessura. Foram aplicadas duas forças a um terço e dois terços do vão.

Da análise dos resultados, **Cánovas** concluiu que o estado de tensão, para diferentes valores das solicitações, aproxima-se do valor previsto no cálculo. Esta aproximação entre os resultados experimentais e os teóricos permite, segundo o autor, assegurar uma boa fiabilidade deste tipo de reforço quando correctamente executado.

Refere ainda que as tensões de corte que apareceram na interface de união, tanto da cola com a chapa de aço como daquela com o betão, alcançam um valor máximo aproximado de 1.5 MPa. Trata-se de um valor que coincide bastante com o deduzido pelo cálculo e que é totalmente admissível para o betão utilizado nas vigas.

De acordo com o autor, a viga-tipo reforçada atingiu a rotura para um momento de 32 kNm, enquanto que a viga-tipo sem reforço atingiu a rotura para um momento de 12 kNm. Isto indica que o momento adicional absorvido é 166% do momento absorvido pela viga sem reforço. O **CEB** [19] recomenda que, quando uma secção é reforçada através desta técnica, o momento flector adicional não ultrapasse em 50% o momento flector inicial. Perante os resultados dos ensaios, **Cánovas** afirma que a limitação

recomendada pelo **CEB** é excessivamente conservadora e que poderia, com uma boa segurança, elevar-se a 100%.

Alfaiate [2] ensaiou 16 vigas de betão armado (vão livre de 1,80m), de secção rectangular (b=0,08m; h=0,20m), carregadas a terços de vão. Este tipo de carregamento possibilita a análise do troço central submetido a flexão circular e, simultaneamente, dos troços laterais submetidos a flexão com esforço transverso. No entanto, não se efectuaram reforços para absorção de esforço transverso, estando este totalmente garantido pelo betão e pelas armaduras transversais ordinárias.

Nestes ensaios, **Alfaiate** analisou o comportamento das vigas ao Estado Limite Último de Flexão (capacidade resistente) e ao Estado Limite de Utilização (fendilhação e deformação). Mantendo o momento resistente constante, os parâmetros analisados foram: a relação entre áreas de secções de armadura de reforço e de armadura longitudinal ordinária; os níveis de danos introduzidos antes da aplicação do reforço (pequenos, médios, grandes); e a constituição da ligação do reforço metálico à estrutura de betão armado (resina epoxy ou resina epoxy e buchas metálicas).

Atendendo aos resultados dos ensaios, o autor refere que as mecanismos e as cargas de rotura (por compressão no betão junto aos pontos de aplicação da carga) são idênticos em vigas de referência sem reforço e nas reforçadas com a mesma secção total de armadura.

Quanto ao Estado Limite de Utilização, **Alfaiate** constata que a rigidez de flexão (EI), variável segundo o tipo de viga, é idêntica antes e após a introdução do reforço em todas as vigas ensaiadas. Como consequência, a evolução de deformações e curvaturas pós-reforço é semelhante.

Quanto à reabertura de fendas após a introdução do reforço, esta é função fundamentalmente da correcta e efectiva reparação das mesmas por resina epoxy. A

12



Figura 2.1 - Vista geral de um ensaio realizado por Alfaiate numa viga reforçada à flexão [2].



Figura 2.2 - Pormenor da rotura obtida numa extremidade da chapa de aço de uma viga reforçada à flexão [2].

fendilhação pós-reforço só atingiu níveis elevados ($w_m > 1 mm$) quando se manifestou a cedência nítida das armaduras ordinária e de reforço, imediatamente antes de ocorrer a rotura. As fendas iniciais não reabriram quando reparadas, verificando-se o aparecimento de novas fendas entre as iniciais. Uma outra observação interessante é que durante a secagem da resina epoxy (5 a 7 dias), as deformações resultantes da fluência do betão não se transmitiram à armadura de reforço.

A finalizar, Alfaiate refere que as buchas metálicas reduzem o risco de descolagem nas ancoragens, devendo ser colocadas o mais possível nas extremidades, sob pena de não introduzirem qualquer benefício. A qualidade da execução da colagem é fundamental, visto que descontinuidades na ligação possibilitam uma maior concentração de tensões de aderência junto às zonas de ancoragem, cujo comprimento efectivo é sempre pequeno. A ocorrência, nessas zonas, de tensões muito elevadas pode permitir a descolagem da extremidade da armadura de reforço e originar a abertura de uma grande fenda de esforço transverso junto ao apoio. O resultado pode ser o desenvolvimento de um mecanismo de rotura precoce.

Fuchs e **Persy** [22] realizaram ensaios para analisar o comportamento da geometria da ligação unicamente em reforços ao esforço transverso. Constataram que, para uma espessura constante da chapa de aço, a força de rotura crescia à medida que se aumentava a altura da chapa de reforço. Verificaram também que a força de rotura diminuía com o aumento da espessura da chapa de aço. Os autores tentam explicar este fenómeno pelo facto de o aumento da espessura da chapa tornar a ligação mais rígida, provocando normalmente roturas na interface entre a resina e a chapa de aço.

2.2.3 - Comportamento à fadiga dos reforços em vigas de betão armado

Ladner e Weder [27] realizaram ensaios de fadiga em vigas rectangulares idênticas às referidas em 2.2.1. O objectivo destes ensaios era obter uma visão do mecanismo de rotura e estabelecer os limites aproximados da capacidade de resistir à fadiga.

Das oito vigas ensaiadas à fadiga, três resistiram a $1x10^7$ ciclos de carga com limites da tensão de tracção na chapa de aço de 140/100 MPa, 160/80 MPa e 200/40 MPa sem terem atingido a rotura. Noutras duas vigas, que foram submetidas a limites de tensão de 240/20 MPa e 280/20 MPa, as roturas por fadiga ocorreram no aço após, respectivamente, 1.26x10⁶ e 2.38x10⁵ ciclos de carga. Só três vigas, para as quais os limites de tensão foram fixados em 220/20 MPa, 230/10 MPa e 260/20 MPa, sofreram uma rotura pela ligação.

Os autores referem que nas vigas em que houve rotura pela ligação começa por existir uma descolagem das chapas de aço perto de uma fissura de flexão no betão, que se propaga deste ponto em direcção ao fim da chapa com o aumento do número de ciclos de carga. Para estas vigas o total dos ciclos de carga na rotura foram de 2.22×10^6 , 8.79×10^5 e 1.79×10^6 .

Ladner e Weder ensaiaram à fadiga uma viga T reforçada à flexão e ao esforço transverso. Percorreram quatro fases de fadiga com limites da tensão de tracção na chapa de aço de 240/120 MPa, 300/150 MPa, 360/180 MPa e 400/200 MPa. Os autores planearam fazer $2x10^6$ ciclos de carga em cada uma destas fases. Contudo, quase no fim da segunda fase, um dos varões da armadura ordinária não resistiu à fadiga junto de um apoio. Prosseguiram então com o ensaio depois de deslocar cada apoio cerca de 550 mm para o meio do vão, o que possibilitou a realização das quatro fases da fadiga. Não foi observado mais nenhum dano na viga ou na ligação.

Os autores realizaram um ensaio final para verificar se a viga tinha sido deteriorada com o ensaio de fadiga. O ensaio estático mostrou que: a viga resistira às quatro fases de fadiga sem qualquer dano excepto o acima mencionado - rotura de um varão da armadura ordinária. A viga foi ainda capaz de absorver o momento plástico total. Por fim a rotura ocorreu por compressão do betão, muito depois da chapa de aço ter atingido a tensão de cedência.

Cánovas [12 e 14] realizou também ensaios de fadiga em vigas com características idênticas às descritas na secção 2.2.2. Para o autor, os ensaios de fadiga alertaram para o facto de que as resinas, que se comportam bem face a cargas estáticas, podem deixar de o fazer quando se submetem a cargas dinâmicas, especialmente se a composição da resina não fôr a mais adequada para este tipo de reforço.

O autor observou que as uniões soldadas das chapas são zonas débeis face a solicitações dinâmicas e que a rotura se produz precisamente por estas zonas. **Cánovas** refere ainda que se as uniões soldadas forem protegidas por uma cobre-junta adequada, unida à chapa pela mesma resina epoxy empregue na colagem da chapa ao betão, o comportamento do reforço é similar ao de uma chapa inteira. Recomenda, como consequência, o emprego de chapas de aço inteiras e quando, por qualquer motivo especial (como o comprimento excessivo da chapa) seja impossível executar uma só peça, deve fazer-se a soldadura de empalme e colocar uma cobre-junta, de igual espessura da chapa, colada com o mesmo tipo de resina utilizada.
2.2.4 - Comportamento à fluência dos reforços em vigas de betão armado

Ladner e Weder [27] elaboraram um plano de ensaios a longo prazo - cerca de 15 anos - de vigas reforçadas com chapas metálicas coladas e sujeitas a cargas constantes no tempo. Os autores pretendem estudar a influência no tempo de parâmetros como o nível de carga, o tipo de clima e o tipo de protecção contra a corrosão. Dos resultados do primeiro ano de ensaios, concluíram que, excepção feita a alguns pontos de oxidação de pouca importância, não ocorreram danos significativos em relação à situação inicial.

Cánovas [12 e 14] analisou o comportamento de vigas submetidas a cargas constantes durante mais de um ano e meio. Como consequência dessa observação, o autor alerta para a importância da qualidade da resina e sugere a utilização de espessuras o mais reduzidas possível.

2.2.5 - Influência de alguns parâmetros no comportamento da ligação aço-resina-betão

2.2.5.1 - Resinas epoxy

Cánovas [12 e 14] observou nos ensaios que as resinas que se comportaram bem em relação a cargas estáticas de curta duração, fizeram-no mal quando estas cargas se mantiveram durante largo tempo (ensaios à fluência) ou quando eram dinâmicas (ensaios à fadiga).

Da análise dos ensaios das vigas à flexão, **Cánovas** constatou que a espessura da resina não tem uma influência significativa quando os ensaios se realizam com cargas de curta duração. No entanto, se estas cargas eram permanentes, observou que quanto maior era a espessura da película de resina, menos eficaz era o reforço. As flechas medidas em vigas carregadas durante um longo período de tempo apresentavam grandes incrementos quando a espessura da resina aumentava, nomeadamente se a composição da resina epoxy não era a mais adequada.

2.2.5.2 - Influência da preparação das superfícies do aço e do betão

Atendendo aos ensaios que realizou com diferentes preparações de superfícies, quer da chapa de aço quer do betão, **Cánovas** [12 e 14] considera que o tratamento ideal para as superfícies do aço e do betão é a preparação com jacto de areia. Considera, no entanto, aceitável a escarificação das superfícies de betão e o "esmerilar" suave com disco abrasivo da chapa de aço.

2.2.5.3 - Influência da resistência do betão

De acordo com **Cánovas** [12 e 14], o único investigador que refere especificamente esta questão, os resultados dos ensaios permitem-lhe confirmar que este tipo de reforço deixa de ser eficaz em betões de resistências características inferiores a 17.5 MPa por se produzir a rotura por corte no betão nas extremidades das chapas de reforço.

2.2.5.4 - Influência da espessura da chapa de aço de reforço

Cánovas [12 e 14] ensaiou vigas reforçadas à flexão com chapas de aço de diversas espessuras e concluiu que a espessura óptima da chapa de reforço está compreendida entre 3 e 4 mm. Estes resultados confirmam as recomendações do **CEB** [19] onde se aconselha que a chapa de reforço não deve exceder 3 mm de espessura, a menos que se

utilizem sistemas de ancoragem especiais, podendo nesse caso chegar-se a espessuras de 10 mm.

2.2.6 - Outros ensaios

Na pesquisa bibliográfica realizada, para além dos ensaios realizados por Alfaiate [2], praticamente não se encontraram trabalhos experimentais que abordem o comportamento da ligação aço-resina-betão com buchas metálicas. Existem, no entanto, algumas referências [3 e 11] onde se descrevem casos particulares de aplicação da técnica de reforço de elementos estruturais com chapas coladas ao betão com resina epoxy e adição de buchas metálicas.

Alguns investigadores, como **Ladner** e **Weder** [27] e também **Cánovas** [12 e 14] realizaram ensaios à fadiga¹ de vigas reforçadas, como foi referido em 2.2.3. Outros, como **Chang** e **Lui**, analisaram o comportamento da ligação resina-betão [16 e 17] e, em particular, [18] este comportamento a cargas dinâmicas². Contudo, o comportamento da ligação aço-resina-betão às acções cíclicas com um número reduzido de ciclos de carga e grandes amplitudes³ é uma área pouco ou nada investigada, em especial a ligação com buchas metálicas.

¹ Os ensaios de fadiga são realizados com um grande número de ciclos de carga e baixas amplitudes [20]

² Cargas repetidas e cargas de impacto são casos especiais de cargas dinâmicas [20]

³ Acções deste tipo ocorrem em movimentos sísmicos [20]

2.3 - VERIFICAÇÃO DA LIGAÇÃO

2.3.1 - Notas preliminares

Existe no comportamento da ligação aço-resina-betão uma analogia entre uma estrutura reforçada à tracção ou à flexão e uma junta de duplo recobrimento (figura 2.3). Esta é a razão pela qual alguns autores [6, 7, 26, 32, 33 e 34] analisam o comportamento da ligação aço-resina-betão, baseados no desenvolvimento de expressões analíticas que caracterizam o comportamento de uma junta de duplo recobrimento.





2.3.2- Solução elástica para a distribuição das tensões de aderência

Baseado no comportamento da junta de duplo recobrimento, **Bresson** [6] desenvolveu uma expressão para a solução elástica da distribuição de tensões de aderência, tendo admitido que:

- o aço, a resina e o betão seguem a Lei de Hook;
- a resina só tem tensões tangenciais;
- a espessura da chapa de aço (e_s), a altura (e_c) e a largura do betão (b), mantêm-se constantes ao longo do comprimento da ligação (l_a);
- as deformações e as tensões têm uma distribuição uniforme na secção;

Com base nestas hipóteses **Bresson** obteve a distribuição de tensões de aderência na ligação:

$$\tau_{ader}(x) = \sigma_{s0} \times w \times e_s \times \frac{\cosh(w \times x)}{\sinh(w \times l_a)}$$
(2.1)

com

$$w^{2} = \frac{G}{e_{g}} \times \left(\frac{1}{E_{s} \times e_{s}} + \frac{2}{E_{c} \times e_{c}}\right)$$
(2.2)

em que:

- τ_{ader} tensão de aderência;
- σ_{s0} tensão na chapa de aço no início da ligação;
- e_s espessura da chapa de aço;
- e_c a altura do betão;
- e_g espessura da resina;
- x distância onde se mede a tensão;
- l_a comprimento de ancoragem;
- G módulo de distorção da resina;
- E_c módulo de elasticidade do betão;
- E_s módulo de elasticidade do aço;



Figura 2.4 - Distribuição das tensões de aderência entre o aço e o betão [26].

Na figura 2.4 é possível observar que só é necessária uma pequena parte do comprimento de ancoragem para a transmissão das tensões do aço para o betão. Para obter o comprimento efectivo da ancoragem (l_{ef}) necessário para transferir uma percentagem - k - da tensão no aço para o betão ($0 \le k \le 1$), Ladner [26] apresenta a expressão (2.3) para $w \times x_0 > 1$.

$$l_{ef} = l_a - x_0 = \frac{-1}{w} \times \ln(1 - k)$$
(2.3)

2.3.3 - Verificação da descolagem da chapa de aço através de um critério energético

Baseado em alguns estudos experimentais, **Theillout** [32, 33 e 34] refere que a rotura da ligação aço-resina-betão se produz através da propagação de uma fissura no betão junto à interface resina-betão. Utilizando os conceitos da mecânica fractura, o autor determinou as solicitações que provocam a rotura da ligação numa junta de duplo recobrimento.

Partindo do princípio que se um sistema está em equilíbrio quando submetido a uma força F a sua energia livre é mínima, **Theillout** refere que, assim que a fissura no betão se propaga de um comprimento dx, se tem:

$$dW_e + dW_p + dW_s = 0 (2.4)$$

representando dW_e , dW_p e dW_s a energia elástica, a energia potencial e a energia dissipada, respectivamente, na abertura da fissura.

Considerando R a energia dissipada por unidade de superfície, para uma carga constante, a expressão (2.4) transforma-se na seguinte:

$$\left(\frac{\partial W_e}{\partial x}\right)_F \times dx + \left(\frac{\partial W_p}{\partial x}\right)_F \times dx + R \times dx = 0$$
(2.5)

O autor calcula a variação da energia elástica e da energia potencial do sistema e obtém o valor mínimo da energia dissipada num ensaio da ligação à rotura:

$$R = \frac{1}{2} \times F^2 \times \left(\frac{E_c \times e_c}{E_s \times e_s} \times \frac{1}{E_c \times e_c + E_s \times e_s}\right)$$
(2.6)

Sendo G_c a taxa de restituição de energia crítica e R a energia dissipada obtida pela expressão (2.6), a igualdade (2.5) escreve-se:

$$G_c = R \tag{2.7}$$

O valor da taxa de restituição de energia crítica, deveria ser um valor intrínseco do material, mas depende, segundo o autor, da velocidade de propagação da fissura. Diversos estudos experimentais mostraram que este valor se encontra entre 60 e 80 J/m² para o betão.

No caso de vigas reforçadas com chapas de aço coladas ao betão, **Theillout** apresenta a expressão (2.8) para a taxa de restituição de energia.

$$G_{c} = \frac{1}{2 \times b_{s}} \left(\frac{N^{2} \times n}{b_{s} \times E_{s}} \times \left(\frac{1}{e_{c}} - \frac{1}{e_{c} + n \times e_{s}} \right) + \frac{M^{2} \times n}{E_{s}} \times \left(\frac{1}{I_{c}} - \frac{1}{I^{*}} \right) + \frac{V^{2} \times n}{0.2 \times E_{s}} \times \left(\frac{1}{A_{c}} - \frac{1}{A^{*}} \right) \right) \quad (2.8)$$

em que:

- *M*, *N*, *V* são, respectivamente, os valores do momento flector, do esforço normal e do esforço transverso, calculados para os estados limites últimos, na extremidade da chapa de aço;
- *n* é o coeficiente de homogeneização aço-betão, que o autor toma igual a 15;
- b_s é a largura da chapa de aço;
- A_c e I_c são a área e a inércia da secção de betão sem ter em conta as chapas de reforço;
- $A^* e I^*$, são a área e a inércia da secção de betão tendo em conta as chapas de reforço;
- $E_{\rm s}$ é o módulo de elasticidade do aço;
- e_c é a espessura de duas vezes o recobrimento das armaduras ordinárias adicionada do diâmetro médio dos varões dessa armadura.

Poineau [30] refere como critério para a verificação da descolagem das chapas de aço, no caso de vigas reforçadas, que a taxa de restituição de energia crítica (G_c), dada pela expressão (2.8), deverá ser maior ou igual a 50 J/m².

2.3.4 - Recomendações do CEB

No boletim nº 162 do **CEB** sugere-se que, no reforço de vigas ou de lajes a espessura da chapa de aço não exceda 3 mm. Considera-se que o coeficiente de monolitismo para a resistência (γ_n) é igual à unidade, desde que a ligação seja verificada controlando a tensão no betão e que, após o reforço, o momento flector e o esforço transverso não excedam em 50% os valores existentes antes do reforço. Sugere-se ainda a utilização da expressão (2.9), apresentada nas recomendações gregas sobre reparação / reforço (N.T.U; 1978), para a verificação da tensão de aderência em chapas contínuas.

$$\tau_{\alpha} = \frac{V}{b \times Z_2 \times (1 + \frac{A_{s,1}}{A_{s,2}} \times \frac{d_1 - x}{d_2 - x} \times \frac{Z_1}{Z_2})} \approx \frac{V}{b \times Z_2 \times (1 + 0.85 \times \frac{A_{s,1}}{A_{s,2}})}$$
(2.9)

(2.10)

e considerando que $\tau_{\alpha} \leq \frac{1}{\gamma_c} \times f_{ctm}$.

em que:

- τ_{α} tensão de aderência
- V esforço transverso a ser absorvido pelo elemento estrutural após o reforço;
- A_{s.1} área da armadura ordinária;
- A_{s.2} área da armadura de reforço;
- d₁ distância da armadura ordinária à fibra superior;
- d₂ distância da armadura de reforço à fibra superior;
- Z₁ distância da armadura ordinária à força de compressão no betão;
- Z₂ distância da armadura de reforço à força de compressão no betão;
- b largura da viga;
- h altura da secção da viga não reforçada.

Capítulo 3

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo para o estudo global da ligação aço-resina-betão (LARB). Os materiais testados foram as chapas de aço, o betão e as resinas epoxy. Além destes materiais foram ainda utilizadas buchas de expansão mecânica Hilti HSL-TZ M8 com um comprimento de embebimento de 70 mm. De acordo com a especificação do fornecedor das buchas a classe do aço era de 8.8. Assim, dos materiais utilizados, apenas não se ensaiaram as buchas metálicas. Com o objectivo de caracterizar a ligação aço-resina realizaram-se ensaios, cujos resultados e modelo utilizado são mencionados em 3.4.

3.1- AÇO

Para caracterização do aço foram ensaiados cinco provetes representativos das chapas de aço utilizadas, de acordo com a norma Europeia EN 10 002-1 [29]. Na figura 3.1 mostrase a geometria dos provetes testados.



Figura 3.1 - Geometria dos provetes de aço.

Na figura 3.2 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos provetes ensaiados. No Quadro 3.1 indicam-se os valores das tensões de cedência e tensões máximas para os cinco provetes ensaiados, bem como os respectivos valores médios. Não se determinou experimentalmente o valor do módulo de elasticidade no aço, tendo-se considerado o seu valor igual a 200 GPa.



Figura 3.2 - Diagramas tensão-deformação dos provetes de aço ensaiados.

Provete	$\sigma_{\text{ced},i}$	$\sigma_{ced,i}$ $\sigma_{m,ced}$		σ _{m,máx}
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
S 1	273		339	
S2	277		376	
S3	289	271 <u>383</u> 352		361
S4	258			
S5	259		357	

Quadro 3.1 - Valores das tensões de cedência e tensões máximas nos provetes ensaiados, e respectivos valores médios.

3.2 - BETÃO

Por forma a melhor avaliar o comportamento da ligação aço-resina-betão, um dos parâmetros que se variou foi o tipo de betão, pelo que se produziram dois betões de qualidades diferentes: um de melhor qualidade (tipo A) e outro de qualidade inferior (tipo B). Ensaiaram-se provetes de ambos os betões para a caracterização das suas propriedades mecânicas, tendo-se obtido para cada tipo de betão a tensão média de rotura à compressão, a tensão média de rotura à tracção e o módulo de elasticidade. Apresentam-se em seguida os resultados desse ensaios.

Tipo de Betão	Tipo de Provetes	N°	Idade (dias)	Tensão de Rotura f c (MPa)	VALOR MÉDIO DA Tensão de Rotura em Provetes Cilíndricos <i>f_{cm}</i>		
	Cúbico	1	300	61.1 (50.7)	(IVII a)		
	Cúbico	2	300	65.0 (54.0)			
А	Cúbico	3	300	46.2 (38.4)	47.8		
	Cilíndrico	4	300	55.5			
	Cilíndrico	5	300	45.8			
	Cilíndrico	6	300	42.1			
	Cúbico	11	28	16.3 (13.5)			
В	Cúbico	12	28	18.8 (15.6)	14.6		
	Cúbico	13	112	23.5 (19.5)			
	Cúbico	14	112	27.9 (23.2)	18.8		
	Cilíndrico	15	112	17.4			
	Cilíndrico	16	112	15.1			
() - valor correspondente em cilindros ($f_{cil} = 0.83*f_{cub}$ [28]).							

Quadro 3.2 - Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão e valor médio da tensão de rotura à compressão em provetes cilíndricos para os betões tipo A e B.

No Quadro 3.2 indicam-se os valores das tensões de rotura à compressão dos provetes cúbicos e cilíndricos de betão. Os provetes foram ensaiados no início das séries I (betão tipo A) e III (betão tipo B) dos ensaios dos modelos da ligação aço-resina-betão, de acordo com as normas [8 e 21].

Para a determinação da tensão de rotura à tracção dos betões foi executado o ensaio brasileiro em provetes cilíndricos. Os resultados da tensão de rotura para cada provete e o valor médio da tensão de rotura para cada tipo de betão encontram-se no Quadro 3.3.

Τιρο	Número	IDADE	Tensão	VALOR MÉDIO DA			
DE	DO	(DIAS)	de Rotura	TENSÃO DE ROTURA			
Betão	Provete		f_{ct}	f _{ctm}			
			(MPa)	(MPa)			
	7	300	3.7				
А	8	300	3.8	3.7			
	9	300	3.6				
	10	300	3.7				
В	17	112	2.4				
	18	112	2.2	2.3			
$f_{sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d}; f_{ct} = \frac{f_{sp}}{1.2}$ $F - \text{ força máxima em N };$ $l - \text{ comprimento do provete em mm };$ $d - \text{diâmetro do provete em mm}$							

Quadro 3.3 - Tensão de rotura à tracção dos provetes de betão e valor médio da tensão de rotura à tracção dos betões tipo A e B.

O módulo de elasticidade foi determinado experimentalmente para os dois tipos de betão, de acordo com o especificado nas normas *ASTM* (C469-83 [5]) e *BS* (1881[9]). No

quadro 3.4 encontram-se os valores do módulo de elasticidade dos vários provetes ensaiados e o respectivo valor médio para cada tipo de betão.

É de notar que os valores apresentados correspondem a módulos de elasticidade secantes, definidos para diferentes níveis de tensão de acordo com as respectivas normas. Assim, para a norma BS o módulo de elasticidade é definido para um nível de tensão de 30% do valor característico da tensão de rotura, enquanto para a norma ASTM esse nível é de 40%.

Betão		NORMA	ASTM	NORMA BS		
Τιρο	NÚMERO DO	E _c	E _{cm}	E _c	E _{cm}	
	Provete	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	
	4	30.5		32.1		
А	5	30.7	29.5	33.3	31.0	
	6	27.4		27.8		
В	15	26.5		28.3		
	16	26.8	26.6	27.6	27.9	

Quadro 3.4 - Valor experimental do módulo de elasticidade de acordo com as normas *ASTM*-C469-83 e *BS*-1881: Part 121: 1983.

Existem em alguns regulamentos expressões analíticas que comparam o f_{cm} com o módulo de elasticidade. Por exemplo, o *REBAP* [31] apresenta a expressão (3.1) para o valor médio do módulo de elasticidade aos j dias.

$$E_{cm,j} = 9500 \times (f_{cm,j})^{\frac{1}{3}}$$
 [*REBAP*] (3.1)



Figura 3.3 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade no betão.

O American Concrete Institute (ACI) [1] apresenta duas expressões, adoptando-se a expressão (3.2) no caso de f_{cm} ser menor que 41.0 MPa, ou a (3.3) no caso de f_{cm} ser maior ou igual a 41.0 MPa.

$$E_{cm,j} = 4700 \times (f_{cm,j})^{\frac{1}{2}}$$
 $f_{cm,j} < 41.0 \text{ MPa}$ [ACI] (3.2)

$$E_{cm,j} = 3320 \times (f_{cm,j})^{\frac{1}{2}} + 6900$$
 $f_{cm,j} > 41.0 \text{ MPa}$ [ACI] (3.3)

Convém salientar que os níveis de tensão considerados na determinação do módulo de elasticidade são de 40% no caso do *ACI*, conforme a norma *ASTM* (C469-83[4]), enquanto no *REBAP* se referem valores na ordem de 40% a 50%.

Por forma a poder comparar com os resultados experimentais, apresenta-se no Quadro 3.5 a aplicação das expressões anteriores aos dois tipos de betão ensaiados.

BETA	ÃO	ACI	REBAP
TIPO	<i>f_{cm}</i> (MPa)	E _{cm} (GPa)	E _{cm} (GPa)
А	47.8 > 41.0	29.9	34.5
В	18.8 < 41.0	20.4	25.3

Quadro 3.5- Valor analítico do módulo de elasticidade de acordo com o REBAP e o ACI.

Da comparação dos valores de E_{cm} obtidos experimental e analiticamente, constata-se, no caso presente, que a expressão (3.3) apresentada pelo *ACI* para betões com f_{cm} maior ou igual a 41.0 MPa concorda muito bem com os resultados experimentais, pois apresenta apenas uma dispersão de 1.4% para o betão tipo A. No caso de f_{cm} ser menor que 41.0 MPa a expressão (3.2) indicada pelo *ACI* apresenta uma dispersão de 23% em relação ao valor obtido experimentalmente para o betão tipo B. Quanto à expressão (3.1) apresentada pelo *REBAP*, revela uma dispersão em relação aos valores experimentais de 17% para o caso do betão tipo A, e concorda razoavelmente com os resultados experimentais para o caso do betão tipo B, pois apresenta uma dispersão de 5%.

3.3 - RESINA EPOXY

Nos ensaios dos modelos da ligação aço-resina-betão foram utilizados dois tipos de resina fornecidos por uma empresa da especialidade (STAP). Estas resinas têm a designação comercial Sika 150 e Concresive 1380, que se passarão a designar



Figura 3.4 - Pormenor da rotura de um provete de resina V.



Figura 3.5 - Pormenor do ensaio de um provete de resina P.

respectivamente por V e P (iniciais correspondentes à côr das resinas - verde e preta respectivamente). Pretendeu-se caracterizar as propriedades mecânicas das resinas utilizadas através do ensaio de tracção.

Na preparação dos provetes utilizou-se um molde com as dimensões 600×400mm². As faces eram de contraplacado marítimo, tendo no contorno placas de perspex com 2 mm de espessura, o que permitiu controlar a espessura da chapa de resina . Este molde foi vedado lateralmente e foi injectada a resina, num procedimento semelhante ao utilizado nos modelos da ligação aço-resina-betão. Após a cura, a chapa de resina foi retirada do molde e cortada em provetes com a geometria indicada na figura 3.6.



Figura 3.6 - Geometria do provete de resina.

Aos 17 dias de idade os dois tipos de resina foram ensaiados à tracção e obteve-se para cada um dos provetes a tensão de rotura e o módulo de elasticidade. Foram ensaiados seis provetes de resina P e três da resina V.

Nas figuras 3.7 a 3.15 mostra-se para cada tipo de resina e para cada provete a evolução das extensões nos provetes com as tensões a que os mesmos foram sujeitos.



Figura 3.7 - Diagrama tensão-deformação da Resina V1.



Figura 3.8 - Diagrama tensão-deformação da Resina V2.



Figura 3.9 - Diagrama tensão-deformação da Resina V3.



Figura 3.10 - Diagrama tensão-deformação da Resina P1.



Figura 3.11 - Diagrama tensão-deformação da Resina P2.



Figura 3.12 - Diagrama tensão-deformação da Resina P3.



Figura 3.13 - Diagrama tensão-deformação da Resina P4.



Figura 3.14 - Diagrama tensão-deformação da Resina P5.



Figura 3.15 - Diagrama tensão-deformação da Resina P6.

No quadro 3.6 apresentam-se os valores da tensão de rotura à tracção e do módulo de elasticidade de cada provete, indicando-se igualmente o valor médio da tensão de rotura e do módulo de elasticidade das resinas V e P.

Provete	σ _{rot,i} (MPa)	σ _{rot,m} (MPa)	E _i (MPa)	E _m (MPa)
V1	51.7		2882	
V2	47.7	50.1	2780	2722
V3	50.8		2505	
P1	64.6		4090	
P2	78.0		3759	
P3	63.5	68.8	3512	3948
P4	63.5		4193	
P5	68.6		4339	
P6	74.4		3798	

Quadro 3.6 - Tensão de rotura à tracção e módulo de elasticidade dos provetes de resina, e respectivos valores médios da tensão de rotura à tracção e do módulo de elasticidade das resinas V e P.

Da análise dos valores médios da tensão de rotura e do módulo de elasticidade de ambas as resinas, constata-se que estes valores são superiores na resina P em cerca de 37 % e 45%, respectivamente.

A extensão na rotura no caso da resina P foi em média de 2.4%. Quanto à resina V, o valor da extensão na rotura variou significativamente entre 1,9% e 3,9%, sendo o seu valor médio de 2,7%.

3.4 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA

Analisou-se o comportamento da ligação aço-resina (LAR), tendo-se realizado seis ensaios de provetes com a geometria apresentada nas figuras 3.16 e 3.17.



Figura 3.16 - Geometria dos provetes nos ensaios de caracterização da ligação aço-resina.

Um dos objectivos destes ensaios foi observar a influência do comportamento da ligação com o tipo de resina. Para isso realizaram-se três ensaios para cada uma das resinas utilizadas (V e P). O outro objectivo foi saber, para cada tipo de resina, o valor médio da tensão de aderência na rotura da ligação aço-resina.

A preparação e a execução dos provetes a ensaiar foi feita com o mesmo tipo de materiais e os mesmos procedimentos utilizados com os modelos da ligação aço-resinabetão (LARB).

As dimensões das chapas de aço dos provetes encontram-se na figura 3.16. Na figura 3.17 está indicado um pormenor da ligação, com a disposição e as dimensões das chapas de aço e das películas de resina. A área de ancoragem dos provetes é um terço da área de ancoragem das chapas de aço do modelo padrão considerado nos ensaios da ligação açoresina-betão.

Por razões de simetria do carregamento, os provetes foram realizados com três chapas de aço e a resina foi injectada na superfície entre as chapas na zona de sobreposição destas.



Figura 3.17 - Pormenor da ligação nos provetes ensaiados para caracterização da ligação aço-resina.

Os provetes foram ensaiados à tracção (Figura 3.18), tendo-se obtido para cada um deles a tensão média de aderência na rotura e para cada tipo de resina o respectivo valor médio. Na Figura 3.19 apresenta-se um pormenor da rotura de um provete de resina V. No Quadro 3.7 indicam-se os resultados dos ensaios. A tensão média de aderência na rotura $(\tau_{med(rot)})$ foi calculada dividindo a carga de rotura por chapa (F_{rot}) pela área de ancoragem (A_{anc} = 50×100 mm²).



Figura 3.18 - Aspecto geral do equipamento de ensaio quando se ensaiava o modelo LAR-P1.



Figura 3.19 - Pormenor da rotura de um modelo LAR- V.

TIPO DE RESINA	Modelo	F _{rot} (kN)	τ _{med(rot),i} (MPa)	τ _{med(rot)} (MPa)
	LAR-V1	12.7	2.5	
V	LAR-V2	10.3	2.1	2.3
	LAR-V3	11.8	2.4	<u> </u>
	LAR-P1	14.7	2.9	
Р	LAR-P2	17.5	3.5	3.2
	LAR-P3	15.7	3.1	

 $\label{eq:Quadro 3.7-Tensão média de aderência na rotura (\tau_{med(rot)}) para cada provete e respectivo valor médio para cada tipo de resina.$

Da observação dos resultados dos ensaios constata-se que o valor médio da tensão de aderência na rotura da resina P é superior em cerca de 39% ao da resina V.

Na ligação aço-resina-betão os modos de rotura possíveis são pela ligação resina-betão ou pela ligação aço-resina. Com o ensaio destes modelos obtiveram-se os valores médios da tensão de aderência na rotura, correspondentes ao modo de rotura aço-resina.

Este tipo de ensaio poderá revelar-se muito útil no estudo da influência de alguns parâmetros do comportamento da ligação, como sejam: o tipo de preparação da superfície do aço, o grau de decapagem, ou o comportamento de diferentes tipos de resinas com o tipo de preparação da superfície.

Capítulo 4

CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO

Neste capítulo caracterizam-se os modelos experimentais utilizados para testar a ligação aço-resina-betão (LARB), apresentando-se os modelos ensaiados, a sua geometria e os parâmetros estudados. Fala-se nos preparativos e cuidados a ter na execução dos modelos e descreve-se o sistema de ensaio, a instrumentação dos modelos e os procedimentos utilizados.

O objectivo destes ensaios experimentais foi o de avaliar o comportamento da ligação aço-resina-betão. Por forma a melhor avaliar este comportamento analisaram-se vários parâmetros como a geometria da ligação, o tipo de betão, o tipo de resina, a ligação com e sem buchas metálicas e o tipo de acção a que a ligação foi sujeita (cargas monotónicas ou cíclicas).

4.1 - CONCEPÇÃO E GEOMETRIA DOS MODELOS

Na concepção dos modelos a ensaiar para o estudo da ligação aço-resina-betão, teve-se em atenção várias condicionantes. Pretendeu-se que os modelos se realizassem a uma escala real ou próxima desta, que se adaptassem ao equipamento de laboratório disponível, que se mantivesse o mesmo tipo de modelo independentemente do tipo de acção e que o mecanismo de ensaio dos modelos fosse desmontável e reutilizável.

Os modelos são constituídos por um cubo de betão de dimensões 200×200×200 mm³, ao qual se ligam lateralmente duas chapas de aço de dimensões variáveis. A ligação entre as chapas e o betão é realizada por injecção de resina epoxy. As chapas de aço são

constituídas pela zona da área de ancoragem e por uma zona fora do cubo de betão que permite a ligação ao sistema de aplicação de cargas. A espessura da película de resina epoxy varia entre 0.5 e 1.5 mm e a espessura da chapa de aço é de 3 ou 4 mm conforme os modelos. A área de ancoragem da chapa é de forma variável e tem 150×10^2 mm². Na zona de ligação ao sistema de aplicação de cargas as dimensões da chapa de aço são de 120×200 mm².

Na figura 4.1 apresentam-se alguns modelos em fase de preparação, antes da injecção com resina epoxy.



Figura 4.1 - Aspecto da fase de preparação de alguns modelos.

4.2 - PARÂMETROS ANALISADOS

Estudaram-se diversos parâmetros e a sua influência no comportamento da ligação açoresina-betão. No sentido de poder comparar os resultados obtidos, considerou-se como referência um modelo padrão (MP), com as seguintes características:

Chapa de Aço (zona de	e ancoragem)
- espessura,	$e_s = 3 \text{ mm}$
- largura,	b _s = 100 mm
- comprimento,	$l_s = 150 \text{ mm}$
- área de ancoragem,	$A_{anc} = 150 \text{ x } 100 \text{ mm}^2$
 secção da chapa, 	$A_{\rm S} = 300 \ \rm mm^2$
Resina epoxy	
- tipo V (Sika 150),	$\sigma_{rot} = 50.1 \text{ MPa}$
	$E_m = 2722 \text{ MPa}$
- espessura,	$e_g = 0.5 a 2.0 mm$
Betão	
- cubo de betão com:	200x200x200 mm ³
- tipo A,	$f_{cm} = 47.8 \text{ MPa}$
	$f_{ctm} = 3.7 \text{ MPa}$
	$E_m = 29.5 \text{ GPa}$
Ligação sem huchos m	atálicas

Quadro 4.1 - Características do modelo padrão.

Apresentam-se em seguida os parâmetros analisados:

i) Geometria da ligação

A influência deste parâmetro foi estudada durante a I^a série de ensaios, tendo-se variado a largura, o comprimento e a espessura da chapa de aço, mantendo-se constante a área de ancoragem. No quadro 4.2 indicam-se os modelos onde se analisou a influência da geometria da chapa de aço, as dimensões das chapas e o número de ensaios realizados.

Estes ensaios foram realizados mantendo os outros parâmetros constantes. Assim, utilizou-se o betão tipo A, a resina tipo V, a ligação sem buchas e os modelos foram sujeitos apenas a cargas monotónicas.

ii) tipo de betão

Por forma a testar a influência deste parâmetro fabricaram-se dois tipos de betão com características bastante diferentes, conforme já se referiu:

- betão tipo A $(f_{cm} = 47.8 \text{ MPa}, f_{ctm} = 3.7 \text{ Mpa}, E_m = 29.5 \text{ MPa})$ - betão tipo B $(f_{cm} = 18.8 \text{ MPa}, f_{ctm} = 2.3 \text{ Mpa}, E_m = 26.6 \text{ MPa})$

Em conjugação com a variação deste parâmetro variou-se também o tipo de resina, o tipo de ligação (com ou sem bucha metálica) e o tipo de acção a que os modelos foram sujeitos. Manteve-se a geometria da chapa igual ao do modelo padrão.

iii) tipo de resina

Utilizaram-se os dois tipos de resina já descritos anteriormente, a resina tipo V (σ_{rot} =50.1 Mpa, E_m = 2722 MPa) e a resina tipo P (σ_{rot} = 68.8 Mpa, E_m = 3948 MPa). Estudou-se a influência da variação do tipo de resina com o tipo de betão. Mantiveram-se constantes os restantes parâmetros.

iv) tipo de ligação

Analisou-se o comportamento da ligação aço-resina-betão com e sem buchas metálicas. Com a variação deste parâmetro, variou-se também o tipo de betão e o tipo de acção a que os modelos foram sujeitos.

Na ligação com buchas metálicas utilizou-se em cada chapa de aço apenas uma bucha, por razões de geometria do modelo e consequente eficácia da bucha.

v) <u>tipo de acção</u>

Submeteram-se os modelos a cargas monotónicas ou a cargas cíclicas. Para analisar a influência deste parâmetro variou-se o tipo de betão e o tipo de ligação. Manteve-se constante o tipo de resina (V) e a geometria da ligação (igual à do modelo padrão).

4.3 - APRESENTAÇÃO DOS MODELOS

Realizaram-se três séries de ensaios onde se analisou a influência do comportamento da ligação com a variação dos parâmetros referidos no ponto anterior. Apresentam-se no quadro 4.2 os modelos ensaiados em cada série de ensaios e os parâmetros analisados.

			PARÂMETROS ENSAIADOS							
				G	EOMETRL	A				
Série	CLASSE	MODELO	N ^o DE	DA	DA LIGAÇÃO		TIPO DE	TIPO DE	TIPO DE	TIPO DE
			ENSAIOS	b _s	l _s	e _s	BETÃO	RESINA	LIGAÇÃO	ACÇÃO
				(mm)	(mm)	(mm)				
	MP	I-1, I-2 I-3, I-5	4	100	150	3	А	V	s/bucha	carga monot.
Ι	α	I-8, I-9	4	100	150	4	Α	V	s/bucha	carga
	β	I-4, I-7	2	75	200	4	А	V	s/bucha	carga
	γ	I-6, I-10	4	150	100	3	А	V	s/bucha	carga
	II-P	II-P-1	1		igual ao	ão	А	Р	s/bucha	carga
II	II-B	II-B-1 II-B-2	3	igual ao modelo padrão			А	V	c/bucha	carga monot.
		II-B-3 II-D-1	3	igual ao			А	V	s/bucha	carga
	II-D	II-D-2 II-D-3		modelo padrão						cíclica
	II-BD	II-BD-1 II-BD-2	2	igual ao modelo padrão			А	V	c/bucha	carga cíclica
	III	III-1 III_2	2	mov	igual ao		В	V	s/bucha	carga
III	III-P		2	mo	igual ao	ão	В	Р	s/bucha	carga
	III-B	III-F-2 III-B-1	2	1100	igual ao	aU ~_	В	V	c/bucha	carga
	III-BD	III-B-2 III-BD-1	2	mod	modelo padrão igual ao		В	V	c/bucha	monot. carga
 		III-BD-2		moo	delo padr	ão				cíclica
	<u>LEGENDA DOS MODELOS</u> I - Série I (betão A) II - Série II (betão A) III - Série III (betão B) P - Resina P B - Bucha metálica D - Dynamic (acções cíclicas) BD - Bucha metálica + Dynamic									
	Quando não existe nos modelos qualquer indicação sobre:									
				- 0	tipo de r	esina, é	porque est	ta é do tipo	o V	
				- 0	tipo de l	igação,	é porque e	sta é sem l	oucha	
	- o tipo de acção, é porque esta é monotónica									

Quadro 4.2 - Modelos ensaiados e parâmetros analisados em cada série.

4.4 - PREPARARAÇÃO DOS MODELOS

Ao preparar os modelos a ensaiar teve-se um cuidado especial em três fases de execução: *preparação da superfície do betão, preparação da superfície das chapa de aço e injecção da resina epoxy*. Tentou-se em cada uma destas fases compatibilizar a forma adequada de execução com os procedimentos habituais em obra.

Descrevem-se em seguida os procedimentos adequados a este tipo de reforço estrutural e os adoptados em cada uma destas fases de execução.

4.4.1 - Preparação da superfície do betão

Pretende-se com a preparação da superfície do betão retirar a leitada superfícial do betão na zona em contacto com a resina epoxy e tornar a superfície rugosa e "homogénea".

Os processos mais utilizados na preparação da superfície do betão são a preparação recorrendo a *jacto de areia*, a preparação utilizando o martelo de agulhas ou a picagem da superfície com *bujarda*, utilizando nos bordos *martelo e escopro*. Foi este último o processo utilizado na preparação dos modelos, dadas as reduzidas dimensões dos cubos de betão.

4.4.2 - Preparação da superfície da chapa de aço

Os métodos mais utilizados na decapagem da superfície do aço são a decapagem por *grenalhagem* e a decapagem por *jacto de areia*. O primeiro método consiste em projectar, dentro de um circuito fechado, com uma determinada intensidade e durante um determinado período de tempo, esferas de aço de diâmetro inferior ao milímetro sobre a superfície das peças de aço. O segundo método consiste em projectar sobre a superfície da chapa de aço um jacto de areia durante um dado período de tempo. Em ambos os

métodos o grau de decapagem pode ser controlado através do tempo a que as peças estão sujeitas ao processo de decapagem.

Com a decapagem da superfície das chapas de aço pretende-se retirar a gordura e a oxidação normalmente existente na superfície. O grau de decapagem normalmente pretendido é o estipulado na norma sueca - SIS 055-900-67 - e é de Sa 2.5.

Após a decapagem a superfície deverá ser protegida do meio ambiente até à sua utilização, de modo a evitar a oxidação. Por forma a não existirem zonas gordurosas deve-se evitar o contacto das mãos com a superfície decapada. Uma forma possível e eficiente de proteger a superfície decapada da chapa é pulverizar uma película de verniz sobre a mesma que será retirada apenas na altura da colocação da chapa de aço.

O método utilizado na preparação das chapas de aço para os modelos experimentais foi a *grenalhagem*. Dado que se tratavam de superfícies relativamente pequenas e fáceis de manusear, foram protegidas apenas com uma película de poliester do tipo da utilizada para proteger alimentos.

4.4.3 - Injecção da resina epoxy

Antes da injecção da resina epoxy é necessário remover as últimas poeiras existentes na superfície do betão (por exemplo, com um jacto de ar), retirar a película protectora da chapa de aço e proceder à colocação da mesma no local pretendido. Após a colocação da chapa é necessário selar a superfície lateral entre a chapa de aço e o betão (no caso dos modelos utilizou-se betume de pedra), deixando numa extremidade da chapa um tubo por onde se injectará a resina e na outra extremidade um tubo de purga.

Para injecção da resina epoxy é necessário dispor de um equipamento especial para injecção. Este equipamento é composto basicamente por uma máquina de injecção com
dois reservatórios distintos e por uma pistola misturadora. Um dos reservatórios contém a resina e o outro o endurecedor. Estes dois componentes da resina epoxy são bombeados através de dois tubos separados nas proporções exactas (no caso das resinas utilizadas, as proporções eram de duas partes de resina para uma parte de endurecedor). Os tubos convergem para a pistola através da qual se faz então a mistura da resina com o endurecedor e a homogeneização do produto a injectar. A injecção da resina é feita através do tubo deixado previamente numa das extremidades da chapa de aço. Quando tiver percorrido a distância entre as duas extremidades a resina sairá pelo tubo de purga deixado na extremidade oposta à da injecção. Deixa-se correr a resina por este tubo durante o tempo necessário para expelir as bolhas de ar existentes e só então se tapa o tubo de purga e se deixa a resina submetida a uma pressão de uma atmosfera durante cerca de trinta segundos, por forma a que ocupe todos os espaços existentes entre o betão e a chapa de aço.

4.4.4 - Ligação com buchas metálicas

Nos casos em que se utilizam buchas metálicas os procedimentos anteriores são semelhantes, sendo no entanto necessário fazer furos no betão e na chapa de aço com as dimensões prescritas pelo fabricante para o tipo de bucha metálica utilizado. Feitos os furos colocam-se a chapa e as buchas, dá-se o aperto pretendido, veda-se a superfície lateral e procede-se à injecção da resina epoxy como descrito anteriormente.



Figura 4.2 - Pormenor da injecção da resina epoxy nos modelos.

4.5 - SISTEMA DE ENSAIO

4.5.1 - Mecanismo de ensaio dos provetes

O mecanismo de ensaio dos modelos foi concebido para permitir a aplicação de cargas monotónicas ou cíclicas. Basicamente o mecanismo é composto por dois conjuntos: um que liga as chapas de aço às garras superiores da máquina de ensaios e outro, independente do primeiro, que abraça o cubo de betão e faz a ligação às garras inferiores da máquina de ensaio. Na figura 4.3 apresenta-se um esquema deste mecanismo de ensaio dos modelos.



Figura 4.3 - Mecanismo de ensaio dos modelos.

Na figura 4.4 pode-se observar um modelo instrumentado e preparado para ser ensaiado.

4.5.2 - Equipamento de ensaio e de aquisição de dados

Equipamento de ensaio

• A máquina utilizada para ensaiar os modelos foi:

- INSTRON - Model 1343

Trata-se de uma máquina para ensaiar peças a cargas monotónicas ou dinâmicas e que funciona através de um sistema hidráulico que permite aplicar forças até 25 tf ou deslocamentos até 50 mm.

Aquisição de dados:

Na série I

 O equipamento utilizado para leitura dos extensómetros eléctricos é constituído por uma ponte de medida Vishay Instruments, modelo *P3500* com a unidade de leitura *SB-10*. Trata-se de um equipamento que possui dez canais de leitura, tendo funcionado em quarto de ponte.

Nas séries II e III

- Utilizou-se um sistema de aquisição de dados para leitura dos extensómetros eléctricos composto por:
 - HBM (Hotting Baldwin Messtechnick) Multipoint Measuring Unit: UPM100
 - computador Apple Macintosh-II

O HBM-*UPM100* é um equipamento que permite a detecção, processamento e edição dos sinais das leituras até cem canais de tipos diferentes. A recolha dos resultados das leituras pode ser efectuada num registador de papel contínuo acoplado a este equipamento ou num ficheiro de resultados, uma vez que o equipamento permite a ligação a um computador Apple. Para tratamento desses resultados existe um programa (*BEAM*).

Nos ensaios dos modelos das séries II e III, sujeitos a cargas monotónicas, os resultados foram registados em papel contínuo. No caso dos modelos sujeitos a cargas cíclicas as leituras foram contínuas, o que deu origem a uma grande quantidade de resultados que foram armazenados em ficheiro de computador.



Figura 4.4 - Modelo instrumentado e preparado para ser ensaiado.

Nas figura 4.5 e 4.6 apresenta-se um aspecto geral do sistema de ensaio dos modelos utilizados, respectivamente, na série I e nas séries II e III.



Figura 4.5 - Sistema de ensaio dos modelos utilizados durante a série I (P3500 + SB-10 + INSTRON).



Figura 4.6 - Aspecto geral do sistema de ensaio dos modelos utilizados durante as séries II e III (INSTRON + UPM100 + APPLE).

4.5.3 - Instrumentação

- Utilizaram-se extensómetros de resistência eléctrica colocados na face superior da chapa de aço, com as seguintes características:
 - Tipo: FLK-6-11
 - Resistência: 120Ω
 - *GF* = 2.13
 - Marca: Tokyo Sokki Kenkyujo

Nas figuras 4.7 a 4.13 indica-se o posicionamento dos extensómetros em cada modelo.



Figura 4.7 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-1, I-2, I-3 e I-5.

MODELOS	Posição				Exte	ENSÓME	TROS			
	(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I-1	Х	22	52	82	112	-	142	142	142	158
I-2	Y	0	0	0	0	-	-35	0	35	0
I-3	Х	22	52	82	112	124	-	142	142	158
	Y	0	0	0	0	0	-	0	35	0
I-5	X	24	54	84	114	130	146	146	146	162
	Y	0	0	0	0	0	-25	0	25	0

Quadro 4.3 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-1, I-2, I-3 e I-5.



Figura 4.8 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-8 e I-9.

MODELOS	Posição	Extensómetros								
	(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I-8	Х	22	52	82	112	127	127	127	142	158
I-9	Y	0	0	0	0	-25	0	25	0	0

Quadro 4.4 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-8 e I-9.



Figura 4.9 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-4 e I-7.

MODELOS	Posição	Extensómetros							
	(mm)	1 2 3 4 5 6 7 8							
I-4	Х	32	62	92	122	152	172	192	208
I-7	Y	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 4.5 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-4 e I-7.



Figura 4.10 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-6 e I-10.

MODELOS	Posição	Extensómetros								
	(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I-6	Х	22	52	72	72	72	72	72	92	108
	Y	0	0	0	-60	-30	0	30	60	0
I-10	Х	18	48	68	68	68	68	68	88	104
	Y	0	0	0	-60	-30	0	30	60	0

Quadro 4.6 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos I-6 e I-10.



Figura 4.11 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos II-D-1, II-D-2, II-D-3, II-P-1, III-P-1, III-P-2, III-1 e III-2.

Mod	ELOS	Posição	Extensómetros						
		(mm)	1	2	3	4			
II-D-1	II-D-2	Х	20	80	120	150			
II-D-3	II-P-1								
III-P-1	III-P-2	Y	0	0	0	0			
III-1	III-2								

Quadro 4.7 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos II-D-1, II-D-2, II-D-3, II-P-1, III-P-1, III-P-2, III-1 e III-2.



Figura 4.12 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos III-B-2, II-BD-1, II-BD-2, III-BD-1, III-BD-2.

MODELOS	Posição		Extensómetros										
	(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
III-B-2	Х	20	-	50	-	75	-	90	-	120	-	145	-
	Y	0	-	0	-	-25	-	0	-	0	-	0	-
II-BD-1; II-BD-2	Х	20	20	50	50	75	75	90	90	120	120	145	145
III-BD-1; III-BD-2	Y	0	-35	0	-35	-20	-35	0	-35	0	-35	0	-35

Quadro 4.8 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos III-B-2, II-BD-1, II-BD-2, III-BD-1, III-BD-2.



Figura 4.13 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos II-B-1, II-B-2, II-B-3, III-B-1.

MODELOS	Posição	Extensómetros							
	(mm)	1	2	3	4	5	6	7	8
II-B-1; II-B-2	Х	20	35	50	90	105	120	135	150
II-B-3; III-B-1	Y	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 4.9 - Posicionamento dos extensómetros nos modelos II-B-1, II-B-2, II-B-3, III-B-1.

• Utilizou-se igualmente na instrumentação dos modelos um deflectómetro mecânico para medir o deslocamento relativo da chapa de aço em relação ao cubo de betão.

É possível ver na figura 4.4 o posicionamento do deflectómetro e na figura 4.14 o deslocamento que se pretende medir.



Figura 4.14 - Esquema do modelo com o posicionamento do deflectómetro e indicação do deslocamento que se pretende medir.

4.5.4 - Procedimento de ensaio

4.5.4.1 - Modelos sujeitos a cargas monotónicas

• Foram efectuados aproximadamente 10 a 15 passos de carga até à rotura, consoante o modelo ensaiado.

- A leitura dos instrumentos foi realizada em cada passo de carga.
- Próximo da rotura retirava-se o deflectómetro para não o danificar.
- A duração dos ensaios foi de aproximadamente vinte minutos utilizando a ponte de medida da Vishay Instruments - *P3500* e de cerca de dez minutos utilizando o equipamento de leitura HBM-*UPM100*.

4.5.4.2 - Modelos sujeitos a cargas cíclicas

Procedimento típico:

- No início do ensaio aplicava-se ao modelo um deslocamento inicial, correspondente a 50% da força de rotura estimada.
- Em seguida aplicava-se um deslocamento cíclico de ± 15% do deslocamento para a carga de 50% durante 20 ciclos. Ao fim de cada período de 20 ciclos aumentava-se ± 5% o deslocamento cíclico anterior até se chegar à rotura.
- Durante estes ensaios as leituras eram automáticas e contínuas. O equipamento permitia fazer 10 leituras por cada extensómetro em cada ciclo. No entanto, houve alguns problemas e em dois ensaios apenas foi possível armazenar duas leituras por extensómetro em cada ciclo.
- A frequência de oscilação considerada foi de 0.5 Hz.

Capítulo 5

ENSAIOS EXPERIMENTAIS DOS MODELOS DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais dos modelos da ligação aço-resina-betão submetidos a cargas monotónicas ou cíclicas. No sentido de facilitar a apresentação dos resultados dos ensaios, optou-se por mostrar separadamente os resultados dos modelos sujeitos a cargas monotónicas (secção 5.2) dos modelos sujeitos a cargas cíclicas (secção 5.3).

Realizaram-se três séries de ensaios tendo-se definido um modelo padrão (I-1, I-2, I-3 e I-5) para poder comparar os resultados obtidos. Na série I ensaiaram-se dez modelos do betão tipo A com o objectivo de analisar o comportamento da geometria da ligação.

Na série II, realizada igualmente com o betão tipo A, ensaiaram-se oito modelos em que a área de ancoragem da chapa de aço era igual à do modelo padrão. O objectivo desta série de ensaios foi o de analisar o comportamento da ligação, variando alguns parâmetros como o tipo de resina, a existência de buchas metálicas ou o tipo de acção a que os modelos estavam sujeitos.

Na série III ensaiaram-se oito modelos com betão tipo B e o objectivo foi idêntico ao da série II.

5.2 - NOTAS PRELIMINARES

Inicialmente o modo de rotura da ligação estava a ser condicionado pelo sistema de aplicação de cargas ao betão. Na figura 5.1 mostra-se a evolução dos sistemas de aplicação de carga utilizados com vista a obter um tipo de rotura mais dependente das características da ligação aço-resina-betão (figura 5.2).



Figura 5.1 - Evolução dos sistema de aplicação de cargas utilizados. As superfícies de contacto com o betão em cada sistema encontram-se indicadas a preto.



Figura 5.2 - Esquema simplificado com os motivos que levaram à alteração do sistema de aplicação de cargas. A tracejado indica-se a rotura obtida em cada sistema.

Na figura 5.3 apresentam-se os modos de rotura tipo possíveis nestes modelos da ligação aço-resina-betão: pelo betão (*rotura tipo 1a* e *1b*), pela resina (*rotura tipo 2*), pelo aço (*rotura tipo 3*) ou uma combinação de dois ou mais destes modos. A *rotura tipo 4* é uma rotura pela resina e pelo betão; e a *rotura tipo 5*, além da rotura da resina e do betão, tem uma cedência da bucha metálica.



Figura 5.3 - Modos de rotura tipo possíveis.

Indicam-se no quadro 5.1 os sistemas de aplicação de carga utilizados e os modos de rotura tipo obtidos em todos os modelos ensaiados.

Modelo	Sistema de aplicação de cargas	Tipo de Rotura
I-1	1	1 <i>a</i>
I-2	2	4
I-3	2	4
I-4	2	la
I-5	2	la
1-6	2	Ia
I-7	3	2
1-8 1-0	4	4
I-9 I 10	4	4
I-10	4	4
111-1 111-2	4	4
III-2 II D 1	1	4
	4	4
III-I -1 III_P_2		4 1b
III-I -2 II_R_1	1	5
II-B-1 II-R-2	7	5
II-B-2 II-B-3		5
III-B-1	4	5
III-B-2	,	5
II-D-1	4	2
II-D-2		2
II-D-3		4
II-BD-1	4	5
II-BD-2		5
III-BD-1	4	5
III-BD-2		5

Quadro 5.1 - Sistemas de aplicação de carga utilizados e tipos de rotura obtidos.

O *sistema-1* de aplicação de cargas, apresentado na figura 5.1, foi utilizado no modelo I-1 e em dois modelos preparatórios (modelos 01 e 02), realizados para aferir todo o sistema. O modo de *rotura* obtido nos modelos preparatórios foi do *tipo-2* num dos modelos e do *tipo-1a* noutro. No modelo I-1 a rotura foi igualmente do *tipo-1a*.

Com o *sistema-2* passou-se de uma situação onde as cargas aplicadas ao betão estavam relativamente concentradas para uma situação onde eram distribuídas sobre a superfície do

betão. Com isto, conseguiu-se que os modelos I-2 e I-3 tivessem uma *rotura do tipo-4*. No entanto, a superfície do betão não era homogénea e a placa de aço que transmitia as cargas ao betão não era suficientemente rígida, o que deu origem a que esta se deformasse (figura 5.2). Como consequência, nos modelos I-4, I-5 e I-6 passou-se a ter *roturas do tipo-1a*.

No *sistema-3* as forças no betão passaram a ser concentradas junto às chapas de aço, a uma distância de 20 mm do bordo. Obteve-se então uma *rotura do tipo-2* no modelo I-7, mas a placa de aço que transmitia as cargas ao betão era pouco rígida e acabou por ceder, como se pode observar na figura 5.4.



Figura 5.4 - Cedência do sistema de transmissão de cargas no modelo I-7.

No *sistema-4* aumentou-se a espessura da placa de aço de 12 para 20 mm e deixou-se de ter *roturas do tipo 1a* nos restantes ensaios realizados.

É de referir que o equipamento utilizado na leitura dos extensómetros eléctricos foi a ponte de medida da Vishay Instruments *P3500* com a unidade de ligação *SB-10* no caso da série I e dos modelos II-P-1, III-P-2, II-B-1 e II-B-2. Neste equipamento a leitura em cada passo de carga tem de ser feita manualmente, canal a canal, enquanto nos restantes modelos ensaiados com cargas monotónicas nas séries II e III, a leitura foi feita automaticamente para todos os canais, em cada passo de carga, com o sistema de aquisição de dados HBM-*UPM100*. Consequentemente, a duração média de cada ensaio utilizando o primeiro equipamento rondou os vinte minutos, enquanto nos modelos ensaiados com cargas monotónicas utilizando o HBM-*UPM100* foi de cerca de dez minutos.

5.3 - ENSAIO DE MODELOS SUJEITOS A CARGAS MONOTÓNICAS

Independentemente da série ou do tipo de betão, optou-se por apresentar primeiro os resultados dos ensaios dos modelos sem buchas metálicas. Começa-se por mostrar os resultados dos modelos onde se variou a geometria da ligação (série I, betão tipo A); em seguida apresentam-se os resultados dos modelos onde se utilizou o betão tipo B (III-1 e III-2) e aqueles onde se utilizou a resina P (II-P-1, III-P-1, III-P-2).

Para uma melhor exposição, os modelos da série I não serão apresentados pela ordem que foram ensaiados, mas por classes, de acordo com as características geométricas.

Os resultados dos modelos ensaiados com buchas metálicas são apresentados em 5.2.2. Indicam-se primeiro os resultados dos modelos ensaiados com o betão tipo A (II-B-1, II-B-2 e II-B-3) e em seguida os ensaiados com o betão tipo B (III-B-1 e III-B-2)

Por cada ensaio realizado apresenta-se um diagrama com a evolução das tensões normais na chapa de aço ao longo do eixo longitudinal da mesma. Os valores das tensões são medidos ao nível de cada extensómetro colocado no modelo e são apresentados seis passos de carga até à rotura e as respectivas forças aplicadas ao modelo. Com estes diagramas são indicadas as dimensões dos modelos, as características dos materiais utilizados e a força de rotura obtida.

Conhecidas as tensões normais ao longo da chapa de aço é possível mostrar um diagrama com as tensões tangenciais (tensões de aderência) na interface entre a chapa de aço e o betão. Estas tensões que são obtidas como se indica na figura 5.5. Com este diagrama é referida a tensão média de aderência na rotura ($\tau_{med(rot)}$) obtida no ensaio do respectivo modelo. Através deste diagrama, é por vezes possível perceber as zonas onde irão aparecer as fendas ou a descolagem da chapa. Nos modelos com bucha metálica os valores da tensão de aderência num diagrama obtido desta forma não têm significado, pelo que se optou, neste caso, pela não apresentação do mesmo.



Figura 5.5 - Forma de obtenção das tensões de aderência.

Em alguns modelos apresenta-se um diagrama da distribuição de tensões normais na secção transversal da chapa de aço. Mostra-se igualmente um diagrama força-deslocamento onde se pode observar a evolução do deslocamento relativo (δ) da chapa de aço em relação ao betão.

Juntamente com estes diagramas, são apresentadas algumas fotografias com pormenores relacionados com o modo de rotura ou com o aspecto das superfícies do betão ou da chapa de aço.

5.3.1 - Modelos sem buchas metálicas

• Modelo I-1

Neste modelo o sistema de aplicação de cargas foi o *sistema-1* e ocorreu a *rotura tipo-1a* como se pode verificar na figura 5.6.



Figura 5.6 - Pormenor da rotura no modelo I-1

Nos passos de carga antes da rotura, as tensões de aderência no diagrama da figura 5.8 são máximas junto à extremidade onde a carga é aplicada e são praticamente nulas para X=98mm.

Observa-se na figura 5.9 que as tensões normais na secção transversal da chapa de aço são maiores ao nível do eixo longitudinal e decrescem sensivelmente em direcção às extremidades laterais da chapa.



Figura 5.7 - Modelo I-1, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.9 - Modelo I-1, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 142 mm



Figura 5.10 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-1

• Modelo I-2

Neste modelo passou-se a utilizar o *sistema-2* de apoio e obteve-se uma *rotura tipo-4*. Na figura 5.16 mostra-se a superfície de betão após a rotura, onde é possível observar junto à face superior do cubo de betão uma fissura com um desenvolvimento aproximadamente em arco.

Num modelo com estas características é difícil que a rotura se verifique simultaneamente em ambas as faces. O que se verificou sempre foi a rotura em apenas uma das faces. Em alguns casos, após os ensaios, procedia-se a um arrancamento manual da chapa (figura 5.11) na face onde não tinha ocorrido a rotura, com o intuito de observar o aspecto da superfície da ligação do betão à chapa.



Figura 5.11 - Esquema do arrancamento manual da chapa de aço na face onde não ocorreu a rotura.

O que se constatou normalmente foi que o aspecto das superfícies das chapas diferiam bastante como se mostra na figura 5.17. A chapa 2a apresentada nesta figura foi a chapa por onde ocorreu a rotura da ligação durante o ensaio do modelo I-2. A chapa 2b foi posteriormente arrancada à mão. Verifica-se que o aspecto da superfície da chapa 2b é homogéneo e que a película de resina tem betão agarrado em toda a sua superfície. Ao invés, a chapa 2a apresenta um aspecto pouco homogéneo e a película de resina, para além de descolar da chapa de aço na extremidade inferior, só tem betão agarrado na extremidade

superior da zona de ancoragem da chapa. A tensão média de aderência na rotura ($\tau_{med(rot)}$) foi de 2,3 MPa como se pode observar na figura 5.13.

O GTG21 do CEB [15] sugere que nos elementos estruturais onde se utilize a técnica de reforço das chapas coladas com resina epoxy se faça um ensaio de arrancamento para controle de qualidade da aderência da ligação. Este ensaio consiste em colar com resina epoxy uma pastilha de aço de 50 mm de diâmetro à superfície de betão da peça reforçada, utilizando materiais com as mesmas características e procedendo da mesma forma que no reforço do elemento estrutural em questão. É posteriormente aplicada uma força de tracção ao pedaço de chapa de aço. A rotura deverá ser necessariamente pelo betão e a tensão correspondente de tracção deverá ser de pelo menos 1,5 MPa.

A comparação das superfícies de rotura descritas mostra que a rotura por tracção depende mais das características do betão que a rotura por corte. Assim sendo, o ensaio de arrancamento pode não ser representativo da resistência ao corte da ligação aço-resinabetão.



Figura 5.12 - Modelo I-2, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.14 - Modelo I-2, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 142 mm.



Figura 5.15 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-2.



Figura 5.16 - Aspecto da superfície de betão e em particular da zona fissurada após o ensaio do modelo I-2.



Figura 5.17 - Superfícies das chapas de aço após o ensaio do modelo I-2. A chapa 2a é a correspondente à face por onde ocorreu a rotura. A chapa 2b foi arrancada manualmente.



Figura 5.18 - Vista do modelo I-3 após o ensaio com o pormenor da rotura.



Figura 5.19 - Aspecto da superfície da chapa de aço da face onde ocorreu a rotura no modelo I-3.



Figura 5.20 - Modelo I-3, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.22 - Modelo I-3, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 142mm.



Figura 5.23 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-3.

• Modelo I-3

No diagrama da figura 5.20 verificam-se algumas zonas de tensões constantes, o que vai afectar directamente o diagrama da figura 5.21 com tensões de aderência nulas, ou quase, nessa zona.

Como se pode observar na figura 5.19, existe na rotura uma certa descontinuidade da película de resina, relacionada com uma má aderência em algumas zonas da chapa, o que justifica o que se disse anteriormente em relação às tensões de aderência praticamente nulas.

• Modelo I-5

Neste modelo utilizou-se o *sistema-2* e a *rotura* foi do *tipo-1a*. Na figura 5.26 é bem visível o modo de rotura ocorrido.

No modelo numérico apresentado no capítulo 6 verificou-se que existe uma certa curvatura para cima na extremidade inferior da chapa de aço. Esta situação pode justificar o aparecimento de tensões negativas na face superior da chapa em alguns modelos nos últimos passos de carga, com a consequente descolagem na zona inferior da chapa devido a este efeito local. As variações bruscas de tensão no diagrama da figura 5.27, para X=22 mm, no último passo de carga, estão provavelmente relacionadas com esta situação.

As tensões de aderência de sinal contrário (sentido divergente) poderão estar relacionadas com o aparecimento de fissuras, como se exemplifica na figura 5.24.



Figura 5.24 - Esquema exemplificativo do aparecimento de uma fissura no betão.



Figura 5.25 - Vista geral do modelo I-5 antes do ensaio.



Figura 5.26 - Pormenor do modo de rotura do modelo I-5.



Figura 5.27 - Modelo I-5, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.29 - Modelo I-5, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 146mm.



Figura 5.30 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-5.
A partir do modelo I-8 passou-se a utilizar nos ensaios o *sistema-4* de aplicação de cargas e deixaram de ocorrer modos de *rotura do tipo 1a*.

O modelo I-8 tem a particularidade de a espessura da chapa de aço ter sido aumentada de 3 para 4 mm em relação aos modelos I-1, I-2, I-3 e I-5 (MP). Verifica-se que, relativamente a estes modelos, as tensões normais na chapa de aço são um pouco inferiores e que a distribuição transversal de tensões normais na chapa é mais uniforme.

A existência de tensões de aderência de sentido divergente (figura 5.33) junto à extremidade superior do cubo de betão corresponde ao aparecimento de uma fenda no betão, como se pode observar na figura 5.31.



Figura 5.31 - Fenda na extremidade superior do cubo de betão no modelo I-8.



Figura 5.32 - Modelo I-8, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.34 - Modelo I-8, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 127mm.



Figura 5.35 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-8.



Figura 5.36 - Aspecto da superfície de rotura do betão no modelo I-9.



Figura 5.37 - Aspecto da superfície da chapa de aço da face onde ocorreu a rotura no modelo I-9.



Figura 5.38 - Modelo I-9, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.40 - Modelo I-9, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 127mm.



Figura 5.41 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-9.

As características geométricas, os materiais e o andamento das tensões normais na chapa de aço deste modelo são idênticos aos do modelo I-8, apesar das tensões no caso do I-9 serem um pouco inferiores.

Como se observa no diagrama da figura 5.39, existe uma variação brusca das tensões de aderência junto à face superior do cubo de betão, o que corresponde a uma fenda nesta zona originando uma *rotura do tipo-4*. Esta rotura com arrancamento de um pedaço de betão pode ser observada nas figuras 5.36 e 5.37.

• Modelo I-4

Manteve-se nos modelos I-4 e I-7 a área de ancoragem constante, mas alterou-se o comprimento da chapa de aço para 200 mm e a largura para 75 mm. A espessura da chapa de aço utilizada foi de 4 mm.

No modelo I-4 o sistema de aplicação de cargas utilizado foi o *sistema-2* e obteve-se uma *rotura tipo-1a*, como se pode observar nas figuras 5.42 e 5.43.

A geometria da zona de ancoragem fez com que ao longo do eixo da chapa de aço a distribuição de tensões normais fosse menos irregular que a verificada nos modelos com um comprimento de ancoragem menor. Os picos existentes no diagrama das tensões de aderência (figura 5.45) correspondem a alguma fissuração, que veio a provocar a rotura que é visível na figura 5.42.



Figura 5.42 - Pormenor da rotura tipo-la ocorrida no modelo I-4.



Figura 5.43 - Aspecto da superfície da chapa de aço correspondente à face onde ocorreu a rotura no modelo I-4.



Figura 5.44 - Modelo I-4, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.46 - Superfície do cubo de betão com o pormenor da rotura (*tipo-1a*) ocorrida no modelo I-7.



Figura 5.47 - Aspecto da superfície da chapa de aço da face onde ocorreu a rotura no modelo I-7.



Figura 5.48 - Aspecto da superfície do betão na face onde a chapa foi arrancada manualmente no modelo I-7.



Figura 5.49 - Aspecto da superfície da chapa de aço do modelo I-7 arrancada manualmente.



Figura 5.50 - Modelo I-7, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.



Figura 5.51 - Modelo I-7, diagrama das tensões de aderência na interface entre a chapa de aço e o betão.



Figura 5.52 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-7.

O modelo I-7 apresenta as mesmas características geométricas e os mesmos materiais que o modelo I-4. O sistema de aplicação de cargas foi mudado para o *sistema-3*, sendo a *rotura* obtida do *tipo-2*. Nas figuras 5.46 e 5.47 mostra-se a face do cubo de betão por onde ocorreu a rotura e a respectiva chapa metálica.

À semelhança do modelo I-4, verifica-se existir uma maior uniformização das tensões normais ao longo da chapa de aço. As tensões de aderência são relativamente uniformes em todo o comprimento, excepto na extremidade superior do cubo de betão, onde existe um pico de tensões.

Na face oposta à da rotura, a chapa de aço foi arrancada manualmente de forma idêntica à descrita no modelo I-2. Observa-se nas figuras 5.48 e 5.49 que o aspecto das superfícies do betão e da chapa de aço é bastante diferente do das figuras 5.46 e 5.47.

Com o ensaio dos modelos I-6 e I-10 pretendeu-se ver o efeito da distribuição de tensões na zona de ancoragem quando esta é mais larga que comprida. Assim, manteve-se a área de ancoragem constante em relação aos restantes modelos, mas alterou-se o comprimento da chapa de aço para 100 mm e a largura para 150 mm. A espessura da chapa de aço utilizada foi de 3 mm.

Na figura 5.53 mostra-se o modelo I-6, onde é possível observar a geometria da chapa de aço e o *sistema-2* de apoio das cargas utilizado no ensaio deste modelo. Este sistema irá provocar uma *rotura do tipo-1a*, como se ilustra na figura 5.54.

Observa-se na figura 5.57 que a distribuição das tensões normais na secção transversal da chapa de aço decresce acentuadamente do centro para os bordos da chapa. Esta situação deve-se ao facto de a carga estar aplicada à chapa de forma não uniforme, devido à disposição dos parafusos.



Figura 5.53 - Pormenor do modelo I-6, onde é visível a geometria da chapa de aço e a disposição dos extensómetros na mesma.



Figura 5.54 - Aspecto da superfície da chapa de aço correspondente à face onde ocorreu a *rotura tipo 1-a* no modelo I-6.



Figura 5.55 - Modelo I-6, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.57 - Modelo I-6, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 72 mm.



Figura 5.58 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-6.

Este modelo tem as mesmas características geométricas e os mesmos materiais que o modelo I-6, à excepção do sistema de aplicação de cargas utilizado (*sistema-4*), como se pode observar na figura 5.59. A *rotura* foi do *tipo-4*, como é visível nas figuras 5.60 e 5.61.



Figura 5.59 - Pormenor do modelo I-10 após a rotura tipo-4 ter ocorrido.

A distribuição de tensões normais na secção transversal da chapa de aço decresce acentuadamente do centro para as extremidades laterais da chapa, de forma idêntica à do modelo I-6.



Figura 5.60 - Aspecto da superfície de betão após o ensaio do modelo I-10.



Figura 5.61 - Aspecto da superfície da chapa de aço correspondente à face do modelo I-10 por onde ocorreu a rotura no ensaio.



Figura 5.62 - Modelo I-10, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.64 - Modelo I-10, diagrama das tensões normais na secção transversal da chapa de aço, para Y= 68mm.



Figura 5.65 - Diagrama força-deslocamento no Modelo I-10.

No diagrama da figura 5.62 existem tensões negativas na chapa de aço para X=18 mm. Isto poderá estar relacionado com o fenómeno local já referido, de curvatura para cima na extremidade da chapa, com a consequente descolagem da mesma nesta zona.

As tensões de aderência apresentadas no diagrama da figura 5.63 apresentam um valor nulo entre X= 80 e X= 84 mm, conforme o passo de carga. Como à esquerda e à direita desta zona as tensões têm sentidos opostos, isto corresponde provavelmente à formação de uma fenda a qual provocou a rotura com arrancamento de um pedaço de betão junto à extremidade superior do cubo de betão (figura 5.60).

• Modelos III-1 e III-2

Estes modelos foram concebidos para observar o comportamento da ligação aço-resinabetão utilizando o betão tipo B, de características bastante inferiores ao betão tipo A. À excepção do betão, estes modelos tinham as mesmas características do modelo-padrão.

Os modos de *rotura* obtidos foram do *tipo-4*, como se pode observar nas figuras 5.72 e 5.73. No entanto, os valores correspondentes da força de rotura são demasiado elevados e não são coerentes com os valores obtidos para a força de rotura nos modelos I-1, I-2, I-3 e I-5 que caracterizam o modelo padrão. Uma das possíveis explicações para este fenómeno poderá estar relacionada com a velocidade do ensaio, em que os cerca de dez minutos de duração foram aproximadamente metade da duração média dos ensaios realizados na série I.



Figura 5.66 - Modelo III-1, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.68 - Diagrama força-deslocamento no Modelo III-1.



Figura 5.69 - Diagrama força-deslocamento no Modelo III-2.



Figura 5.70 - Modelo III-2, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.72 - Pormenor da rotura ocorrida no modelo III-1.



Figura 5.73 - Aspecto da superfície de rotura tipo-4 ocorrida no modelo III-2.

Modelo II-P-1

Com o ensaio deste modelo pretendeu-se observar o comportamento da ligação aço-resinabetão utilizando a resina tipo P, que possui uma tensão média de rotura ($\sigma_{rot,m}$) e um módulo de elasticidade (E_m) superiores aos da resina V. Com excepção da resina, este modelo tinha as mesmas características do modelo-padrão. No entanto, só foi possível realizar o ensaio de um modelo com estas características, pelo que os valores obtidos servirão apenas como indicador de referência.

Verificou-se no ensaio deste modelo que a força de rotura (F_{rot}) e a tensão máxima na chapa de aço ($\sigma_{s,max}$) foram bastante superiores aos valores médios dos modelos equivalentes ensaiados com a resina V.

Pelo facto de se terem utilizado apenas quatro extensómetros, o andamento das tensões na chapa de aço é relativamente homogéneo (figura 5.74), não reflectindo os efeitos locais existentes. Como consequência deste grande afastamento dos extensómetros não é possível detectar o aparecimento de eventuais fendas ou descolagem da chapa através dos diagramas das figuras 5.74 e 5.75.



Figura 5.74 - Modelo II-P-1, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.76 - Aspecto da superfície de rotura do modelo II-P-1.



Figura 5.77 - Aspecto da superfície de rotura do modelo III-P-1.

Com estes modelos manteve-se o mesmo tipo de resina (P) e a mesma geometria do modelo II-P-1, mas variou-se o betão para o tipo B. O que se referiu para o modelo II-P-1 quanto ao afastamento dos extensómetros é válido para os modelos III-P-1 e III-P-2.

Relativamente ao modelo II-P-1 é de referir que o III-P-1 e o III-P-2 apresentam uma força de rotura (F_{rot}) inferior e, como consequência, uma tensão média de aderência na rotura ($\tau_{med(rot)}$) igualmente inferior. Este facto seria de esperar, atendendo ao facto de o betão tipo B ter características significativamente inferiores ao betão tipo A. No entanto, as tensões máximas na chapas de aço no modelo III-P-1 ao nível do modelo II-P-1, enquanto no modelo III-P-2 estas tensões já são bastante inferiores.

O modo de *rotura* obtido para os modelo III-P-1 foi do *tipo-4* (figuras 5.77 e 5.83) e no modelo III-P-2 foi do *tipo-1b* (figura 5.84).



Figura 5.78 - Diagrama força-deslocamento no Modelo III-P-1.



Figura 5.79 - Modelo III-P-1, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.81 - Modelo III-P-2, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.







Figura 5.83 - Pormenor da rotura tipo-4 ocorrida no modelo III-P-1.



Figura 5.84 - Pormenor da rotura tipo-1b ocorrida no modelo III-P-2.

5.3.2 - Modelos com buchas metálicas

Foram ensaiados com cargas monotónicas cinco modelos com buchas metálicas. A área de ancoragem (b = 100 mm, L = 150 mm), a espessura da chapa de aço ($e_s = 3 mm$) e o tipo de resina utilizada (tipo V) foram idênticos em todos os modelos ensaiados.

Utilizaram-se buchas de expansão mecânica Hilti HSL-TZ M8 com um comprimento de embebimento de 70 mm. De acordo com a especificação do fabricante da bucha a classe do aço era 8.8.

O único parâmetro que variou nos cinco modelos foi o tipo de betão. Ensaiaram-se três modelos com o betão tipo A (II-B-1, II-B-2 e II-B-3) e dois modelos com o betão tipo B (III-B-1 e III-B-2). À excepção da bucha metálica, os modelos utilizados com o betão tipo A eram semelhantes ao modelo padrão.

O sistema de apoio de cargas utilizado foi o *sistema-4* e em todos os ensaios ocorreu uma *rotura* da ligação do *tipo-5*, que corresponde a uma rotura da ligação pela resina e pelo betão e a uma cedência parcial da bucha.

O procedimento de ensaio para estes modelos com bucha metálica foi semelhante, até à rotura da ligação, ao procedimento efectuado para os restantes modelos ensaiados com carga monotónica. No entanto, embora se tenha considerado como critério de rotura a rotura da ligação aço-resina-betão, isto não significa que tenha existido a rotura da bucha; esta apenas cedeu, continuando ainda com capacidade de carga. Após a rotura da ligação aço-resina-betão da força provocada por esta rotura e pelo aumento do deslocamento no modelo.

Apesar de ter ocorrido a rotura da ligação aço-resina-betão, em alguns dos modelos (II-B-2, II-B-3 e III-B-2) continuou-se o ensaio, para saber qual era a capacidade resistente da

ligação com buchas metálicas depois da história de cargas a que esta já tinha sido submetida.

A ligação, apenas com buchas, foi submetida a esta segunda carga nos modelos II-B-2, II-B-3 e III-B-2, tendo resistido ainda a respectivamente 56%, 72% e 55% da força de rotura, respectivamente. Este facto denota maior ductilidade da rotura da ligação com bucha do que da ligação sem bucha.

O comportamento da ligação aço-resina-betão com bucha metálica pode ser descrito em três fases conforme se indica na figura 5.85. A primeira fase corresponde à parte inicial de aplicação da carga, onde praticamente não existe mobilização da bucha e portanto a capacidade resistente da ligação é desenvolvida pelas tensões de aderência. No entanto, existe aqui um efeito originado pelo momento de aperto dado à bucha, que vai provocar algumas tensões de compressão entre a chapa de aço, a resina e o betão, assim como uma pequena mobilização da bucha por atrito. No caso dos modelos ensaiados esta primeira fase corresponde a cerca de 20% da força de rotura da ligação aço-resina-betão.

Quando se refere que a bucha praticamente não é mobilizada nesta primeira fase é porque o diâmetro do furo na chapa de aço tem uma folga de cerca de 1mm em relação ao diâmetro da bucha e portanto não existe uma mobilização directa por corte da bucha enquanto não existir contacto entre esta e a chapa de aço.

A segunda fase começa a partir do momento em que há um contacto entre a bucha e a chapa de aço e termina com a rotura da ligação aço-resina-betão. Nesta fase, a capacidade resistente da ligação é desenvolvida em conjunto pelas tensões de aderência e pela resistência ao corte da bucha.

122







 $\delta_0 \leq \delta_2 < \delta_{\text{rot-LARB}}$





Como já se referiu, após a rotura da ligação aço-resina-betão, a ligação com a bucha metálica fica ainda com uma capacidade de carga superior a 50% do valor da força de rotura. A terceira fase começa com a rotura da ligação aço-resina-betão e termina com a rotura da ligação com bucha. Esta última rotura poderá acontecer por um ou mais dos seguintes factores: rotura por corte ou por arrancamento da bucha, plastificação da chapa de aço ou rotura do betão. Nos casos presentes a rotura deu-se pelo betão, com uma fenda vertical típica de um rotura de "splitting".

Apresentam-se, em seguida, para cada ensaio realizado dois diagramas: um com a evolução das tensões normais no aço ao longo do eixo da chapa e outro com a evolução dos deslocamentos relativos (δ) em função da força.

Modelo II-B-1

Pode-se observar no diagrama da figura 5.86 que a força de rotura da ligação e as tensões máximas na chapa de aço são, como seria de esperar, bastante superiores ao valor médio das tensões correspondentes nos modelos que caracterizam o modelo padrão.

Na figura 5.86 é possível verificar que existe uma certa linearidade das tensões ao longo da chapa de aço durante o primeiro passo de carga. Isto significa que o comportamento da ligação ainda se encontra na primeira fase. A força a que está a ser submetida a ligação nesta fase de carga corresponde a 19% da força de rotura.


Figura 5.86 - Modelo II-B-1, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.



Figura 5.87 - Diagrama força-deslocamento no Modelo II-B-1.



Figura 5.88 - Aspecto da rotura tipo-5 ocorrida no modelo II-B-2.



Figura 5.89 - Chapa de aço correspondente à face do modelo II-B-2 por onde ocorreu a rotura.



Figura 5.90 - Modelo II-B-2, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.



Figura 5.90 - Diagrama força-deslocamento no Modelo II-B-2.



Figura 5.92 - Aspecto da superfície do betão e da resina por onde ocorreu a rotura no modelo II-B-2 com o pormenor da físsura vertical existente no cubo de betão (splitting).



Figura 5.93 - Aspecto da chapa de aço e da bucha metálica correspondente à face do modelo II-B-2 por onde ocorreu a rotura.

• Modelo II-B-2

No diagrama da figura 5.88 verifica-se que no primeiro passo de carga a ligação ainda se encontra na primeira fase. A força a que está a ser submetida a ligação nesta fase de carga corresponde a 22% da força de rotura.

A força de rotura no modelo II-B-2 foi relativamente inferior à do modelo II-B-1, sendo a *rotura* da ligação aço-resina-betão do *tipo-5*. É possível observar na figura 5.88 que a rotura ocorreu pelo betão na parte superior da zona de ancoragem e pela resina na parte inferior, tendo existido um certo deslocamento da bucha metálica.

Após a rotura da ligação aço-resina-betão continuou-se o ensaio. A ligação apenas com bucha metálica resistiu ainda a 56% do valor da força de rotura.

O efeito de compressão da bucha sobre o betão deu origem a uma fissura vertical, envolvendo todo o cubo de betão - visível na figura 5.92 - e que provocou a rotura da ligação pelo betão (splitting).

O aparecimento da fissura no betão rapidamente provocou a rotura, uma vez que o cubo não tinha armaduras. Num elemento estrutural de betão armado a existência de armaduras poderia controlar a fissuração e evitar a rotura. No entanto, há que ter atenção a estas situações no dimensionamento do reforço porque, normalmente, nas estruturas a reforçar existe um défice de armaduras. Por exemplo, numa viga reforçada com buchas, o aparecimento deste fenómeno semelhante ao "splitting" poderá partir a viga em duas.

• Modelo II-B-3

A *rotura* da ligação aço-resina-betão neste modelo foi do *tipo-5* e a força de rotura correspondente foi igual à do modelo II-B-2.

Na figura 5.96 apresenta-se o modelo II-B-3 após o ensaio, onde é visível a rotura da ligação pelo betão e pela resina e o aparente bom estado em que se encontra a bucha metálica.



Figura 5.94 - Modelo II-B-3, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.



Figura 5.95 - Diagrama força-deslocamento no Modelo II-B-3.

• Modelo III-B-1 e III-B-1

Nos modelos III-B-1 e III-B-2 mudou-se o tipo de betão, passando-se a utilizar o betão tipo B de características inferiores ao betão tipo A. A *rotura* ocorrida nestes modelos foi do *tipo-5* e é possível observá-la nas figuras 5.97 e 5.101.

Apresenta-se na figura 5.100 um pormenor da superfície de rotura no modelo III-B-1, onde é visível que a rotura ocorreu pelo betão na parte superior da zona de ancoragem. Na parte inferior, a bucha parece ter funcionado como travamento a uma eventual superfície de rotura unicamente pelo betão, tendo esta acabado por ocorrer essencialmente pela resina.

O valor médio da força de rotura nestes modelos foi aproximadamente 23% inferior ao valor médio obtido nos correspondentes modelos ensaiados com o betão tipo A.

As tensões máximas na chapa de aço do modelo III-B-1 são ligeiramente inferiores à média dos valores obtidos nos modelos II-B-1, II-B-2, II-B-3. No entanto, no diagrama da figura 5.102, relativo ao modelo III-B-2, as tensões máximas no aço são muito inferiores às tensões máximas no modelo III-B-1 (possivelmente por erro de leitura dos extensómetros).



Figura 5.96 - Pormenor da superfície do betão e da resina por onde ocorreu a rotura no modelo II-B-3.



Figura 5.97 - Vista do modelo III-B-1 com o pormenor da rotura tipo-5 ocorrida durante o ensaio.



Figura 5.98 - Modelo III-B-1, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.



Figura 5.99 - Diagrama força-deslocamento no Modelo III-B-1.



Figura 5.100 - Pormenor da superfície de rotura no betão e na resina ocorrida no modelo III-B-1.



Figura 5.101 - Vista geral do modelo III-B-2 com o pormenor da rotura ocorrida durante o ensaio.



Figura 5.102 - Modelo III-B-2, diagrama das tensões normais ao longo do eixo longitudinal da chapa de aço.



Figura 5.103 - Diagrama força-deslocamento no Modelo III-B-2.

5.4 - ENSAIO DE MODELOS SUJEITOS A ACÇÕES CÍCLICAS

Os primeiros trabalhos de investigação na área do reforço com chapas coladas com resina epoxy surgiram em França. Contudo, apesar da ocorrência de alguns acidentes, devido a fadiga, em pontes reforçadas por este método [33], nunca houve grande interesse por parte dos investigadores franceses no estudo do comportamento desta técnica de reforço às acções cíclicas - talvez por se tratar de um país com uma actividade sísmica pouco relevante.

Investigadores como Ladner e Weder [27] ou Cánovas [12 e 14] realizaram alguns ensaios de fadiga em vigas simplesmente apoiadas. No entanto, não se conhecem trabalhos realizados com o objectivo de observar o comportamento da ligação aço-resina-betão (com ou sem buchas metálicas) a acções cíclicas de curta duração. Consequentemente, não existem normas ou recomendações a definir o tipo de carregamento a utilizar em ensaios da ligação aço-resina-betão sob acções cíclicas. Gomes [23] refere mesmo não existirem normas ou recomendações que definam o tipo de carregamento a utilizar nos ensaios de estruturas ou elementos de betão armado sob acções cíclicas.

Em [23], Gomes faz uma síntese sobre a história de cargas utilizadas em ensaios de elementos estruturais sob acções cíclicas. O autor refere que quando se pretende observar o comportamento inelástico de uma estrutura, elemento ou material, devem-se aplicar deslocamentos, evitando-se, deste modo, a instabilidade que surge ao se atingir o ponto de máxima resistência quando se aplicam forças.

Nos relatórios de ensaios publicados por vários autores e referidos por Gomes observa-se uma grande dispersão no número de repetições de ciclos utilizados, variando entre um e dez ciclos com igual amplitude.

Atendendo às características da ligação, ao equipamento de ensaio disponível e à pouca homogeneidade de critérios no ensaio de elementos estruturais sob acções cíclicas, optou-se

pelo seguinte procedimento típico no ensaio dos modelos da ligação aço-resina-betão com e sem buchas metálicas:

- No início do ensaio aplicou-se ao modelo um deslocamento inicial, correspondente a 50% da força de rotura estimada.
- Em seguida aplicou-se um deslocamento cíclico de ± 15% do deslocamento para a carga de 50% durante 20 ciclos. Ao fim de cada período de 20 ciclos aumentou-se ± 5% o deslocamento cíclico anterior até se chegar à rotura.
- Durante estes ensaios as leituras eram automáticas e contínuas. O equipamento permitia fazer 10 leituras por cada extensómetro em cada ciclo. No entanto, houve alguns problemas e em dois ensaios apenas foi possível armazenar duas leituras por extensómetro em cada ciclo.
- A frequência de oscilação considerada foi de 0.5 Hz.

Inicialmente pretendeu-se ensaiar às acções cíclicas nove modelos da ligação aço-resinabetão, todos com a resina tipo V, mas variando os parâmetros - tipo de betão e existência ou não de buchas metálicas. Contudo, devido a avaria do equipamento de ensaio não foi possível ensaiar os modelos sem bucha do betão tipo B.

Relativamente aos modelos ensaiados, ocorreu no modelo II-D-1 uma *rotura tipo-2* (pela resina) antes da fase do ensaio com cargas cíclicas. Nos modelos II-D-2 e II-D-3 não houve problemas e a *rotura* foi do *tipo-2* e do *tipo-4*, respectivamente. Quanto aos modelos II-BD-1, II-BD-2, III-BD-1 e III-BD-2 a *rotura* ocorrida foi do *tipo-5*.

As características das buchas utilizadas nestes ensaios são idênticas às utilizadas com cargas monotónicas.

Em seguida apresentam-se os resultados dos ensaios, indicando-se primeiro os modelos do betão tipo A (II-D-1, II-D-2 e II-D-3), sem buchas metálicas e em seguida os modelos com bucha do betão tipo A (II-BD-1 e II-BD-2) e do betão tipo B (III-BD-1 e III-BD-2).

Apresentam-se, para cada modelo ensaiado, um diagrama deslocamento-ciclo de carga e outro força-ciclo de carga. O primeiro diagrama corresponde à história de deslocamentos introduzida no ensaio do modelo, enquanto o segundo diagrama diz respeito à história de forças a que o modelo esteve sujeito. Neste último diagrama o eixo das abcissas (nº de ciclos) encontra-se ligeiramente fora de escala, apresentando um carácter apenas qualitativo. Com isto, pretendeu-se realçar os períodos de igual amplitude de deslocamento a que o modelo esteve sujeito e as alturas em que o ensaio foi interrompido para aumentar a amplitude do deslocamento.

5.4.1 - Modelos sem buchas metálicas

• Modelo II-D-1

Pretendia-se ensaiar este modelo às acções cíclicas. Todavia, quando se estava a aplicar o deslocamento inicial correspondente a 50% da força de rotura estimada (valor médio da força de rotura com carga monotónica no modelo padrão), deu-se a rotura acidental da ligação pela resina, como é visível na figura 5.104.



Figura 5.104 - Modelo II-D-1: pormenor da superfície da resina e da chapa de aço após a rotura tipo-2.

• Modelo II-D-2

Neste modelo aplicou-se um deslocamento inicial menor e mais lento por causa dos problemas que tinham existido com o modelo II-D-1. O deslocamento inicial aplicado correspondeu a cerca de 17,5 % do valor médio da força de rotura no modelo padrão.

Submetida à história de deslocamentos indicada na figura 5.106 a ligação resistiu a 112 ciclos de deslocamento, tendo ocorrido uma *rotura do tipo-2*. A força máxima atingida foi de 14,8 kN, valor que é cerca de 37% do valor médio da força de rotura no modelo padrão. O valor do deslocamento inicial aplicado correspondeu a 47 % do valor da força de rotura no modelo II-D-2.



Figura 5.105 - Aspecto da superfície da resina por onde ocorreu a rotura tipo-2 no modelo II-D-2.



Figura 5.106 - Diagrama deslocamento - ciclo de carga no modelo II-D-2.



Figura 5.107 - Diagrama força - ciclo de carga no modelo II-D-2.



Figura 5.108 - Vista do modelo II-D-3 com o pormenor da rotura tipo-4 ocorrida durante o ensaio.



Figura 5.109 - Diagrama deslocamento - ciclo de carga no modelo II-D-3.

MODELO II-D-3 (1)



Figura 5.110 - Diagrama força - ciclo de carga no modelo II-D-3 (primeiros 160 ciclos).



Figura 5.111 - Diagrama força - ciclo de carga no modelo II-D-3 (últimos 172 ciclos).

• Modelo II-D-3

A ligação no modelo II-D-3 resistiu a 332 ciclos, submetida à história de deslocamentos indicada na figura 5.109.

Para melhor visualização dos resultados, o diagrama força-ciclo de carga foi dividido em duas partes, apresentando-se na figura 5.110 os primeiros 160 ciclos de carga e na figura 5.111 os últimos 172 ciclos.

O deslocamento inicial aplicado correspondeu a 28,5 % do valor médio da força de rotura no modelo padrão. Completados os primeiros 160 ciclos de carga a força mínima na ligação estava próxima de zero. Como não se pretendia sujeitar a ligação a compressões, resolveu-se aumentar o deslocamento "inicial" para um deslocamento correspondente a 36% do valor médio da força de rotura no modelo padrão. Aos 220 ciclos o problema anterior voltou-se a colocar e foi necessário aumentar o deslocamento "inicial" para um deslocamento "inicial" para um deslocamento correspondente a 44% do valor médio da força de rotura no modelo padrão.

A *rotura* obtida foi do *tipo-4 e a* força máxima obtida na ligação foi de 32 kN, o que corresponde a 80 % do valor médio da força de rotura no modelo padrão.

Os modelos sem bucha metálica - II-D-1, II-D-2 e II-D-3 - apresentam um comportamento bastante díspar entre si. Mesmo não se considerando o modelo II-D-1, que teve uma rotura precoce, o tipo de rotura e os resultados obtidos no ensaio dos modelos II-D-2 e II-D-3 são bastante divergentes. A força máxima no modelo II-D-2 foi de 14,8 kN, o que é aproximadamente 46 % do valor da força máxima no modelo II-D-3, apesar deste último ter estado sujeito a uma história de deslocamentos mais gravosa. Com este grau de dispersão de resultados não se pode considerar nada satisfatório o comportamento sem buchas metálicas da ligação aço-resina-betão às acções cíclicas.

5.4.2 - Modelos com buchas metálicas

Em seguida apresentam-se os modelos ensaiados com buchas metálicas às acções cíclicas. Começa-se por mostrar os resultados obtidos nos modelos ensaiados na série II com o betão tipo A (II-BD-1 e II-BD-2) e posteriormente os modelos ensaiados na série III com o betão tipo B (III-BD-1 e III-BD-2).

• Modelo II-BD-1

Na figura 5.112 indica-se o diagrama com a história de deslocamentos impostos à ligação, tendo esta resistido a 163 ciclos de deslocamento.

O deslocamento inicial aplicado foi o correspondente a 48% do valor médio da força de rotura obtida nos modelos correspondentes (II-B-1, II-B-2 e II-B-3) ensaiados com cargas monotónicas.

A *rotura* ocorrida neste modelo foi do *tipo-5* e a força máxima obtida foi de 51,6 kN, o que corresponde a 88,5 % do valor médio da força de rotura obtida nos modelos II-B-1, II-B-2 e II-B-3 ensaiados com cargas monotónicas.

Durante os ensaios com acções cíclicas o equipamento fazia, normalmente, dez leituras automáticas por cada extensómetro em cada ciclo de deslocamentos. No entanto, houve alguns problemas com o programa utilizado durante este ensaio e apenas foi possível armazenar duas leituras por cada extensómetro em cada ciclo de carga, razão pela qual o diagrama da figura 5.113 se encontra pouco uniforme.



Figura 5.112 - Diagrama deslocamento - ciclo de carga no modelo II-BD-1.



Figura 5.113 - Diagrama força - ciclo de carga no modelo II-BD-1.



Figura 5.114 - Aspecto do modelo II-BD-1 com o pormenor da rotura tipo-5 ocorrida no ensaio.



Figura 5.115 - Vista do modelo II-BD-2 com o pormenor da rotura tipo-5 ocorrida no ensaio.



Figura 5.116 - Diagrama deslocamento - ciclo de carga no modelo II-BD-2.



Figura 5.117 - Diagrama força - ciclo de carga no modelo II-BD-2 (apenas últimos ciclos).

• Modelo II-BD-2

O modelo II-BD-2 foi submetido a um deslocamento inicial praticamente semelhante ao do II-BD-1 e a uma história de deslocamentos ligeiramente diferente (figura 5.116), dado que as amplitudes de deslocamentos aplicadas ao modelo II-BD-2 foram superiores. A ligação resistiu, no entanto, a 219 ciclos contra os 163 ciclos no modelo II-BD-1.

A *rotura* ocorrida foi do *tipo-5* e a força máxima na chapa de aço foi idêntica à do modelo II-BD-1, sendo de 84 % do valor médio da força de rotura obtida nos modelos com as mesmas características ensaiados com cargas monotónicas.

Neste ensaio só foi possível armazenar os dados relativos aos últimos ciclos de carga, os quais se apresentam no diagrama da figura 5.118.

Dada a pouca dispersão dos resultados dos ensaios dos modelos II-BD-1 e II-BD-2, comparativamente com os resultados dos ensaios dos modelos II-D-1 e II-D-2, pode considerar-se bastante razoável o comportamento com buchas metálicas da ligação açoresina-betão às acções cíclicas.

• Modelo III-BD-1

Neste modelo utilizou-se o betão tipo B, sendo as restantes características idênticas às dos modelos II-BD-1 e II-BD-2.

Na realidade, este foi o primeiro modelo a ser ensaiado às acções cíclicas. Pretendeu-se saber qual o número de ciclos que a ligação resistiria a uma amplitude constante do deslocamento em torno de um deslocamento inicial, correspondente a 50 % do valor médio da força de rotura nos modelos de características idênticas - III-B-1 e III-B-2 - que foram ensaiados com cargas monotónicas. A ligação acabou por resistir a 453 ciclos de carga, tendo ocorrido uma *rotura do tipo-5*. Os resultados referentes aos primeiros 150 ciclos de carga não foram armazenados, pelo que da figura 5.119 apenas constam os 303 ciclos finais.



Figura 5.118 - Diagrama deslocamento - ciclo de carga no modelo III-BD-1.



Figura 5.119 - Diagrama força - ciclo de carga no modelo III-BD-1 (últimos 303 ciclos).



Figura 5.120 - Modelo III-BD-1: pormenor do posicionamento dos extensómetros e da bucha metálica.



Figura 5.121 - Vista do modelo III-BD-2 com o pormenor da rotura tipo-5 ocorrida durante o ensaio.







MODELO III-BD-2

Figura 5.123 - Diagrama força - ciclo de carga no modelo III-BD-2.

• Modelo III-BD-2

No modelo III-BD-2 aplicou-se um deslocamento inicial correspondente a 48,6% do valor médio da força de rotura nos modelos de características idênticas (III-B-1 e III-B-2) ensaiados com cargas monotónicas. A ligação resistiu a 170 ciclos, de acordo com a história de deslocamentos indicada na figura 5.122, e a *rotura* obtida foi do *tipo-5*.

A força máxima ocorrida foi de 38,8 kN, o que corresponde a 86,4% do valor médio da força de rotura ocorrida nos modelos de características idênticas ensaiados com cargas monotónicas.

Apesar do deslocamento inicial nos modelos III-BD-1 e III-BD-2 ter sido igual, a história de deslocamentos a que estes modelos foram sujeitos foi bastante diferente, pelo que uma comparação entre os resultados obtidos por estes modelos só poderá ser feita em termos qualitativos. Pode-se, contudo, referir que o comportamento da ligação foi bastante razoável, atendendo a que o betão tipo B é de fraca qualidade.

Um aspecto interessante verificado nos ensaios às acções cíclicas dos modelos com bucha metálica II-BD-1, II-BD-2 e também no modelo III-BD-2 foi que a força máxima ocorrida nos ensaios em cada um destes modelos foi cerca de 86% do valor médio da força de rotura ocorrida nos modelos de características idênticas ensaiados com cargas monotónicas. Verifica-se que, nestes modelos com bucha metálica, a ligação aço-resina-betão sujeita às acções cíclicas teve uma perda de resistência de cerca de 14%, sendo o comportamento da ligação independente do tipo de betão. O comportamento da ligação revela, deste modo, maior rigidez e maior ductilidade que nos modelos sem bucha.

5.4.3 - Evolução das tensões no aço com os ciclos de carga nos modelos II-D-2 e III-BD-2

• Modelo II-D-2

Na figura 5.124 indica-se o posicionamento dos extensómetros eléctricos de resistência na chapa de aço do modelo II-D-2.

Nas figuras 5.125 a 5.128 apresenta-se para cada extensómetro o diagrama tensão no aço-ciclo de carga.



Figura 5.124 - Posicionamento dos extensómetros eléctricos de resistência no modelo II-D-2.



Figura 5.125 - Extensómetro 1: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo II-D-2.



Figura 5.126 - Extensómetro 2: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo II-D-2.



Figura 5.127 - Extensómetro 4: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo II-D-2.



Figura 5.128 - Extensómetro 4: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo II-D-2.

• Modelo III-BD-2

Na figura 5.129 indica-se o posicionamento da bucha metálica e dos extensómetros eléctricos de resistência no modelo III-BD-2.

Nas figuras 5.130 a 5.141 apresenta-se, para cada extensómetro, o diagrama tensão no aço-ciclo de carga.

Por observação dos diagramas das figuras 5.136 e 5.138 é possível detectar um fenómeno local de plastificação na chapa de aço a partir dos 160 ciclos de carga.



Figura 5.129 - Posicionamento da bucha metálica e dos extensómetros eléctricos de resistência no modelo III-BD-2.



Figura 5.130 - Extensómetro 1: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.131 - Extensómetro 2: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.132 - Extensómetro 3: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.133 - Extensómetro 4: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.134 - Extensómetro 5: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.135 - Extensómetro 6: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.


Figura 5.136 - Extensómetro 7: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.137 - Extensómetro 8: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



MODELO III-BD-2





MODELO III-BD-2

Figura 5.139 - Extensómetro 10: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.140 - Extensómetro 11: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.



Figura 5.141 - Extensómetro 12: diagrama tensão no aço - ciclo de carga no modelo III-BD-2.

Capítulo 6

ANÁLISE DE RESULTADOS

Com o objectivo de melhor compreender o comportamento dos modelos experimentais da ligação aço-resina-betão, apresenta-se em 6.1 um estudo paramétrico utilizando a análise elástica linear pelo método dos elementos finitos. O comportamento do modelo foi simulado com e sem buchas metálicas para os dois tipos de betão (A e B) e para os dois tipos de resina (V e P), aplicando uma carga estática.

Em 6.2 faz-se uma análise global dos resultados obtidos nos ensaios experimentais dos modelos da ligação aço-resina-betão. Analisam-se as diversas grandezas medidas nos ensaios em função dos diversos parâmetros considerados.

No caso dos modelos ensaiados às acções cíclicas analisam-se também os valores obtidos nos modelos da ligação aço-resina-betão para a força máxima na rotura, tensão média de aderência na rotura, em função do número de ciclos a que a ligação resistiu nos ensaios.

6.1 - MODELO NUMÉRICO

6.1.1 - Apresentação dos modelos

Fez-se uma análise plana linear dos modelos ensaiados através de um programa de elementos finitos. Simulou-se o comportamento dos modelos da ligação aço-resina-betão com e sem buchas metálicas para os dois tipos de betão (A e B) e para os dois tipos de resina (V e P), aplicando uma carga estática.

No modelo numérico consideraram-se as dimensões da chapa de aço, a espessura da resina e a área de ancoragem iguais às do modelo-padrão utilizado nos ensaios experimentais (ver quadro 4.1).

No quadro 6.1, apresentam-se os módulos de elasticidade considerados para cada tipo de material. Estes valores foram obtidos experimentalmente, com excepção do módulo de elasticidade do aço.

Material	Τιρο	Módulo de Elasticidade E _m (GPa)
Betão	A	29.5
	В	26.6
Resina	V	2.72
	Р	3.95
Aço	Chapa	200
	Bucha	200

Quadro 6.1 - Módulos de Elasticidade considerados no modelo numérico

Dada a simetria dos modelos experimentais, considerou-se no modelo numérico apenas metade do cubo de betão. Efectuou-se a análise com elementos de placa com uma espessura de 200 mm no betão e de 100 mm na resina e no aço. A malha de elementos finitos tem, no betão, uma altura de 100 mm e um comprimento de 200 mm, na resina uma altura de 2 mm e um comprimento de 150 mm e no aço 3 mm de altura por 170 mm de comprimento.

O programa de elementos finitos utilizado é limitado quanto ao número máximo de elementos permitido, pelo que foi necessário optimizar em cada modelo a discretização utilizada. Isto implicou que a discretização não fosse a mesma nos modelos com e sem buchas metálicas.

6.1.1.1 - Modelos da Ligação Aço-Resina-Betão sem bucha metálica

Apresenta-se na figura 6.1 a malha de elementos finitos considerada e a deformada do modelo AV (betão tipo A, resina tipo V), aumentada 4×10^5 vezes em relação às dimensões do provete. A força aplicada corresponde, por simplicidade, a uma tensão de tracção média na chapa de aço de 100 MPa.

Observa-se na deformada do modelo AV - figura 6.1(b) - que a zona de maiores deformações se encontra junto à extremidade esquerda da resina, sendo também nesta extremidade que ocorrem as tensões principais máximas de tracção nestes materiais (nos primeiros elementos da fronteira entre a resina e o aço.

Verificou-se, em alguns ensaios experimentais, existirem na extremidade direita da chapa de aço tensões de compressão na face superior desta, as quais poderão estar relacionadas com a curvatura que se observa nesta zona (figura 6.1(b)).



Figura 6.1 - (a) Malha de elementos finitos. (b) Deformada do modelo AV, aumentada 4×10⁵ vezes.

Na figura 6.2 apresenta-se, para o caso do modelo AV, o caminho das tensões de tracção e compressão no betão.





Figura 6.2 - Modelo AV- (a) Tensões de tracção e (b) tensões de compressão no betão.

Na extremidade esquerda do modelo - figura 6.1(b) - existe um fenómeno local de flexão na chapa de aço, comprovado pela existência de tensões principais de compressão no aço. Além deste fenómeno, verifica-se ainda que o betão, na face superior do modelo se deforma para fora do seu plano. Em vigas de betão armado, reforçadas para a flexão com chapas coladas, surgem fenómenos semelhantes nas secções fendilhadas. Teillout [32, 33 e 34] e Poineau [30] argumentam que, por este facto, as secções transversais da viga em flexão sofrem deformações normais ao seu plano (empenamento) e, além disso, a secção deforma-se no seu plano. Assim, o comportamento de um elemento estrutural de betão armado reforçado com chapas metálicas não respeita as hipóteses clássicas da resistência de materiais (Lei de Navier). Poineau [30] refere que este fenómeno de flexão local reduz a resistência da estrutura em relação à rotura, tal como ela é obtida por cálculo clássico. Propõe um método de cálculo que tem em conta estes fenómenos, através de coeficientes de redução aplicados à tensão de serviço na chapa de aço (calculada pelos métodos clássicos).

6.1.1.2 - Modelos da Ligação Aço-Resina-Betão com buchas metálicas

De forma idêntica, apresenta-se na figura 6.3 a malha de elementos finitos considerada. A deformada apresentada é a do modelo AVB (betão tipo A, resina tipo V, ligação com bucha metálica - B), aumentada 4×10^5 vezes relativamente às dimensões do provete. A tensão de tracção aplicada à chapa de aço é de 100 MPa.

Uma vez que se trata de uma análise plana e linear, a deformada apresentada nas figuras 6.3(b) e 6.4 tem um comportamento global idêntico ao mostrado na figura 6.1(b). Contudo, verifica-se que as deformações são menores devido ao efeito da bucha, em especial à direita desta.

A curvatura na extremidade direita da chapa é menor que a verificada no modelo sem bucha e o fenómeno de flexão local na extremidade esquerda da chapa continua a verificar-se.



Figura 6.3 - (a) Malha de elementos finitos. (b) Deformada do modelo AVB, aumentada 4×10⁵ vezes.

Na figura 6.4 apresenta-se um pormenor da deformada na zona de maiores deformações.



Figura 6.4 - Modelo AVB: pormenor da deformada.

Indica-se na figura 6.5 o caminho das tensões de tracção e compressão no betão do modelo AVB. Em termos globais, verifica-se um caminho de tensões no betão diferente entre o modelo sem bucha (figura 6.2) e o modelo com bucha (figura 6.5). É notória a mobilização do betão pela bucha.

A bucha faz com que hajam menores tensões de tracção no betão, pelo facto de estas se distribuírem mais em profundidade, enquanto no modelo sem bucha se concentram mais ao nível da superfície.



Figura 6.5 - Modelo AVB- (a) Tensões de tracção e (b) tensões de compressão no betão.

Em termos de tensões principais máximas na chapa de aço, no betão e na resina do modelo com bucha metálica, verifica-se que estas ocorreram nas mesmas zonas do modelo sem bucha, como se irá constatar em 6.2.2.

6.1.2 - Estudo paramétrico - apresentação de resultados

Como foi referido, fez-se um estudo paramétrico utilizando este modelo numérico. Variou-se o tipo de resina e o tipo de betão com o tipo de ligação, utilizando ou não buchas metálicas.

Nos quadros 6.2 e 6.3 indicam-se os resultados deste estudo paramétrico. Nas figuras 6.6 e 6.7 mostram-se, em pormenor, as zonas onde ocorreram as tensões máximas no modelo numérico com e sem bucha metálica.

MODELOS	MATERIAL	Tensão	ZONA DE	Tensão	ZONA DE	DESLOCAMENTO
		MÁXIMA	OCORRÊNCIA	MÁXIMA	OCORRÊNCIA	RELATIVO
		DE	DA	DE	DA	AÇO - BETÃO
		Tracção	Tensão	Compressão	Tensão	δ
		(MPa)	MÁXIMA	(MPa)	MÁXIMA	(mm)
	Betão (A)	6.50	2	10.3	1	
AV	Resina (V)	10.8	3	5.99	4	
	Aço	127	6	4.76	5	0.0263
	Betão (B)	6.57	2	10.3	1	
BV	Resina (V)	10.9	3	5.94	4	
	Aço	128	6	4.81	5	0.0267
	Betão (A)	7.06	2	10.4	1	
AP	Resina (P)	13.0	3	6.47	4	
	Aço	130	6	4.90	5	0.0242
	Betão (B)	6.89	2	10.4	1	
BP	Resina (P)	13.1	3	6.40	4	
	Aço	132	6	4.96	5	0.0246

Quadro 6.2 - Estudo paramétrico nos modelos sem bucha. Deslocamento relativo (δ) aço - betão. Tensões principais máximas e mínimas (e zonas onde estas ocorrem) nos diversos materiais, para uma tensão de tracção aplicada na chapa de aço de 100MPa.



Figura 6.6 - Modelos sem bucha. Pormenor das zonas de tensões principais máximas.

Pela observação do quadro 6.2, constata-se que, em termos de tensões principais máximas:

- a variação nas tensões de tracção nos modelos com betões diferentes e o mesmo tipo de resina é pouco significativa. Numa análise linear a variação do tipo de betão praticamente não influi no resultado das tensões de tracção.
- existe uma grande influência no valor das tensões de tracção quando se faz variar o tipo de resina. A resina P tem um módulo de elasticidade 45% superior ao da resina V, o que faz com que as tensões nos modelos com resina P sejam 5 a 9% superiores no betão, aproximadamente 20% superiores na resina e 3% no aço.
- as tensões de compressão não variam significativamente no betão e no aço com os parâmetros betão e resina. No entanto, ao nível da resina as tensões de compressão aumentam cerca de 8% quando se utiliza a resina P em vez da resina V.

Quanto ao deslocamento relativo aço-betão (δ), verifica-se que não é influenciado pelo tipo de betão, mas é-o pelo tipo de resina. Nos modelos com resina P o deslocamento é

inferior em 7 a 8% ao dos modelos com resina V, pelo facto do ao módulo de elasticidade da resina P ser bastante superior.

		Tensão	ZONA DE	Tensão	ZONA DE	Deslocamento
MODELOS	MATERIAL	MÁXIMA	OCORRÊNCIA	MÁXIMA	OCORRÊNCIA	RELATIVO
		DE	DA	DE	DA	AÇO - BETÃO
		Tracção	Tensão	Compressão	Tensão	δ
		(MPa)	MÁXIMA	(MPa)	MÁXIMA	(mm)
	Betão (A)	6.47	2	6.12	1	
AVB	Resina (V)	9.61	3	5.73	4	
	Aço	121	6	4.78	5	0.0257
	Bucha	26.9	8	20.2	7	
	Betão (B)	6.40	2	6.12	1	
BVB	Resina (V)	9.72	3	5.68	4	
	Aço	122	6	4.83	5	0.0261
	Bucha	26.3	8	20.7	7	
	Betão (A)	6.92	2	6.12	1	
APB	Resina (P)	11.5	3	6.30	4	
	Aço	124	6	4.93	5	0.0239
	Bucha	19.3	8	13.0	7	
	Betão (B)	6.81	2	6.11	1	
BPB	Resina (P)	11.5	3	6.23	4	
	Aço	125	6	4.99	5	0.0242
	Bucha	20.5	8	13.4	7	

Quadro 6.3 -Estudo paramétrico nos modelos com bucha. Deslocamento relativo (δ) aço - betão.
Tensões principais máximas e mínimas (e zonas onde estas ocorrem) nos diversos
materiais, para uma tensão de tracção aplicada na chapa de aço de 100MPa.

Por observação do quadro 6.3 constata-se, em termos de tensões principais máximas de compressão, que:

- nos modelos com resina P as tensões no betão são superiores em cerca de 10%.
- uma maior deformabilidade da resina V faz com que as tensões de compressão na bucha sejam em média 55% superiores às tensões correspondentes nos modelos com resina P.



Figura 6.7 - Modelos com bucha. Pormenor das zonas de tensões principais máximas.

Em termos de tensões principais máximas de tracção, verifica-se que:

 à excepção das tensões na bucha, a variação do tipo de betão continua a ter pouca influência no valor das tensões de tracção dos outros materiais.

- quanto ao tipo de resina, os modelos com a resina P apresentam, em relação aos modelos com resina V, tensões no betão cerca de 10% superiores, na resina entre 18 a 20% e no aço 2,5%.
- A bucha é mais solicitada por um betão mais fraco e uma resina de pior qualidade. Em média, nos modelos com resina V, a bucha tem um acréscimo de tensão de 29% em relação aos modelos com resina P; nos modelos com o betão B, o acréscimo de tensão na bucha é de 5 a 6% em relação ao betão A.

Quanto ao deslocamento relativo aço-betão, este é inferior em aproximadamente 7% nos modelos com resina P.

Verifica-se que as tensões principais máximas de tracção nos modelos com bucha, relativamente aos modelos sem bucha, são, em média, 31% inferiores no betão, 11% inferiores na resina e 5% inferiores no aço - independentemente do tipo de resina ou de betão.

As tensões principais máximas de compressão no betão são, em média, 41% inferiores nos modelos com bucha, não sendo significativa a variação desta tensão nos outros materiais com a existência ou não de bucha no modelo.

Nos modelos com bucha o deslocamento relativo aço-betão é inferior em 1 a 2% relativamente aos modelos sem bucha. Em regime elástico o deslocamento é quase igual com ou sem bucha. No entanto, tal não é o caso depois da fendilhação que provoca o escorregamento.

6.1.3 - Comparação de resultados com os modelos experimentais

Com a análise paramétrica realizada constatou-se a grande influência dos parâmetros tipo de resina e existência de bucha metálica - no comportamento da ligação aço-resinabetão. A qualidade do betão pouco influiu no comportamento elástico da ligação.

Compararam-se os valores da rigidez da ligação no modelo numérico com os valores médios obtidos nos ensaios experimentais. Para isso, agruparam-se os modelos experimentais em classes com as mesmas características - MP (I-1, I-2, I-3 e I-5), III (III-1 e III-2), III-P (III-P-1 e III-P-2), II-B (II-B-1, II-B-2 e II-B-3), III-B (III-B-1 e III-B-2) - e calcularam-se os valor médios da rigidez por classe.

No quadro 6.4 apresentam-se os valores médios da rigidez da ligação aço-resina-betão nas classes de modelos experimentais (onde foi possível calcular o deslocamento δ) e nas correspondentes classes de modelos numéricos. A rigidez da ligação foi calculada para uma força de 18,5 kN, que corresponde a aproximadamente 46% da força média de rotura no modelo-padrão.

			Knum	Kexp	Knum/Kexp
MODELOS	Numéricos	Experimentais		[F=18,5 kN]	
	(Classe)	(Classe)	(kN/mm)	(kN/mm)	
	AV	MP	1139	191	5,96
Sem bucha	BV	III	1126	118	9,54
	BP	III-P	1222	148	8,26
Com bucha	AVB	AVB II-B		440	2,65
	BVB	III-B	1149	290	3,96

Quadro 6.4 - Comparação do valor médio da rigidez nos modelos numéricos e experimentais $[K=F/\delta, \text{ com }F=18.5 \text{ kN} \iff \sigma_s = 62 \text{ MPa} \text{ no modelo numérico}].$

Constata-se, da observação do quadro 6.4, que a rigidez da ligação aço-resina-betão nos modelos numéricos sem bucha e com o betão tipo B é cerca de oito a nove vezes e meia superior à dos modelos experimentais, enquanto nos modelos com o betão tipo A essa relação já é menor.

Nos modelos com bucha metálica a relação entre a rigidez no modelo numérico e nos ensaios experimentais varia entre 2,65 e 3,96. O comportamento da ligação com bucha é substancialmente melhor, o que conduz a uma simulação mais aproximada por parte do modelo numérico.

6.2 - MODELOS EXPERIMENTAIS DA LIGAÇÃO AÇO-RESINA-BETÃO

6.2.1 - Análise global dos resultados

Após a apresentação, no capítulo 5, dos resultados obtidos nos ensaios dos modelos da ligação aço-resina-betão, faz-se agora uma análise global. Analisam-se as diversas grandezas que caracterizam o comportamento da ligação, em função dos diversos parâmetros considerados (*geometria da ligação, tipo de betão, tipo de resina, tipo de ligação e tipo de acção*).

No quadro 6.5, indicam-se os valores obtidos nos ensaios dos modelos da ligação açoresina-betão para a força de rotura, tensão máxima na chapa de aço, tensão média de aderência na rotura, deslocamento máximo na rotura e da rigidez da ligação para 40% da força máxima.

Para uma fácil comparação de resultados, agruparam-se os modelos em classes com as mesmas características e calculou-se o valor médio da grandeza em análise. Nos modelos ensaiados com cargas monotónicas determinou-se, igualmente, a percentagem do valor médio da classe em relação ao modelo-padrão. Nos modelos das classes II-D, II-BD e III-BD, ensaiados com acções cíclicas, determinou-se a percentagem do valor médio da classe, respectivamente, em relação às classes MP, II-B e III-B.

Nas figuras 6.8 a 6.12 apresentam-se gráficos com os valores da F_{rot} , $\sigma_{máx}$, $\tau_{med(rot)}$, $\delta_{máx}$ e $K_{0.4}$ para todos os modelos (representados por um pequeno circulo) e com os respectivos valores médios por classe (representados por um traço grosso).

CLASSES	Modelos	№ CICLOS	DE	Força Rotu rot (kN	ra N)	TENSÃO MÁXIMA NO AÇO δ _{s,máx} (MPa) TENSÃO MÉDIA DE ADERÊNCIA NA ROTURA Tmed (rot) (MPa)		Deslocamento máximo δ (mm)			RIGIDEZ DA LIGAÇÃO K _{0.4} (kN/mm)						
			modelo	média	(%)	modelo	média	(%)	modelo	média	(%)	modelo	média	(%)	modelo	média	(%)
MP	I-1	0	42.0			138			2.80			0.38			180		
	I-2	0	34.5			111			2.30			0.46			164		
	I-3	0	39.1			130			2.61			0.29			286		
	I-5	0	44.1	39.9	100	206	146	100	2.94	2.66	100	0.49	0.40	100	167	199	100
α	I-8	0	36.1			110			2.41			0.54			200		
	I-9	0	35.0	35.6	89	88	99	68	2.33	2.37	89	0.29	0.42	105	312	256	129
β	I-4	0	38.0			136			2.53			-			-		
	I-7	0	38.0	38	95	139	138	95	2.53	2.53	95	0.22	0.22	55	506	506	254
γ	I-6	0	38.5			119			2.57			0.22			398		
	I-10	0	32.0	35.3	88	103	111	76	2.13	2.35	88	0.43	0.33	83	396	397	199
II-P	II-P-1	0	49.0		122	175		120	3.27		122	-	-	-	-	-	-
III-P	III-P-1	0	43.6			180			2.91			0.34			148		
	III-P-2	0	45.3	44.5	112	131	156	107	3.02	2.96	112	-	0.34	85	-	148	74
III	III-1	0	46.7			185			3.11			0.23			145		
	III-2	0	43.4	45.1	113	123	154	105	2.89	3.00	113	0.49	0.36	90	92	118	59
II-B	II-B-1	0	63.0			220			4.20			0.32			355		
	II-B-2	0	56.0			201			3.73			0.36			316		
	II-B-3	0	56.0	58.3	146	243	221	151	3.73	3.89	146	0.11	0.26	65	608	426	214
III-B	III-B-1	0	47.3			199			3.15			0.30			315		
	III-B-2	0	42.5	44.9	113	78	139	95	2.83	2.99	113	0.19	0.24	60	264	290	146
II-D	II-D-2	112	14.8			77			0.99			(0.43)			[35]		
	II-D-3	332	32.0	23.4	59	147	112	77	2.13	1.56	59	(0.65)	(0.54)	-	[49]	[42]	-
II-BD	II-BD-1	163	51.6			216			3.44			(0.93)			[56]		
	II-BD-2	219	49.1	50.4	86	192	204	92	3.27	3.36	86	(1.05)	(0.99)	-	[47]	[51]	-
III-BD	III-BD-1	453	29.5			103			1.97			(0.60)			[32]		
	III-BD-2	170	38.8	34.2	76	175	139	100	2.59	2.28	76	(0.78)	(0.69)	-	[50]	[41]	-

() - Deslocamento máximo ($d_{máx}$) imposto nos modelos ensaiados às acções cíclicas.

[] - Rigidez (K = F_{rot} / d_{max}) nos modelos ensaiados às acções cíclicas.

NOTA: A percentagem dos valores médios indicados por classe, é em relação a:

- MP (modelos ensaiados com cargas monotónicas).
- MP, II-B e III-B respectivamente para II-D, II-BD e III-BD (modelos ensaiados às acções cíclicas)

Quadro 6.5 - Quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios dos modelos da ligação LARB com e sem buchas metálicas sujeitos a acções monotónicas e cíclicas e respectivos valores médios por classe.

6.2.1.1 - Força de rotura

Na figura 6.8 representam-se, para os modelos ensaiados, o valor da força de rotura. Indicam-se, igualmente, os valores médios por classe dos modelos com características idênticas.



Figura 6.8 - Força máxima de rotura dos modelos ensaiados e respectivos valores médios por classe.

Em seguida faz-se uma análise do valor da força de rotura, em função dos diversos parâmetros considerados (*geometria da ligação, tipo de betão, tipo de resina, tipo de ligação e tipo de acção*). Nesta análise, têm-se por base os valores apresentados no quadro 6.5 e na figura 6.8.

Geometria da ligação

Na série I ensaiaram-se os modelos I-1, I-2, I-3 e I-5, caracterizadores do modelo-padrão (MP). Nos restantes modelos pretendeu-se observar o efeito da geometria na zona de ancoragem e da espessura da chapa de aço no comportamento da ligação LARB. Da análise dos resultados obtidos constata-se que:

- Existe uma ligeira dispersão de resultados nos valores da força ocorrida na rotura dos modelos caracterizadores do MP (b_s×l_s = 100×150 mm² e e_s = 3 mm), que está, eventualmente, relacionada com os diferentes modos de rotura ocorridos nestes modelos (I-1 e I-5 rotura *tipo-1a*, I-2 e I-3 *rotura tipo-1b*). Contudo, na classe β (b_s×l_s = 75×200 mm² e e_s = 4 mm) o modo de rotura dos modelos I-4 e I-7 foi diferente, sendo, no entanto, o valor da força máxima na rotura idêntico.
- O valor médio da força na rotura (F_{rot}) nas classes α ($b_s \times l_s = 100 \times 150 \text{ mm}^2$, $e_s = 4 \text{ mm}$), β ($b_s \times l_s = 75 \times 200 \text{ mm}^2$, $e_s = 4 \text{ mm}$) e γ ($b_s \times l_s = 150 \times 100 \text{ mm}^2$, $e_s = 3 \text{ mm}$) foi inferior, respectivamente em 11%, 5% e 12% ao valor correspondente no MP ($b_s \times l_s = 100 \times 150 \text{ mm}^2$ e $e_s = 3 \text{ mm}$), o que não é significativo. Pode-se afirmar que a variação da geometria da zona de ancoragem nestes modelos foi pouco condicionante no valor de F_{rot} .
- Uma situação curiosa é a verificada nos modelos da classe α (b_s×l_s = 100×150 mm²) com uma espessura da chapa de aço de 4 mm e cujo valor médio de F_{rot} foi inferior ao do MP, modelo este que tem uma geometria da zona de ancoragem idêntica e uma espessura da chapa de aço de 3 mm. Este resultado vem de encontro a uma recomendação do CEB [19], a qual sugere que não se utilizem espessuras da chapa de aço que daí não advém qualquer vantagem, a menos que se utilizem buchas metálicas ou sistemas especiais de ancoragem.

Tipo de betão

Para avaliar a influência deste parâmetro realizaram-se ensaios de modelos LARB com dois tipos de betão de características bastante díspares, betão tipo A ($f_{cm} = 47.8$ MPa, $f_{ctm} = 3.7$ Mpa, $E_m = 29.5$ MPa) e betão tipo B ($f_{cm} = 18.8$ MPa, $f_{ctm} = 2.3$ Mpa, $E_m = 26.6$ MPa), tendo-se constatado que:

- Nos ensaios dos modelos III-1 e III-2 (betão tipo B) o valor médio de Frot foi 13% superior ao do modelo padrão (betão tipo A), o que é estranho, porque a qualidade do betão tipo B é bastante inferior à do betão tipo A. Uma possível justificação para este resultado poderá estar na maior velocidade no ensaio destes modelos. No entanto, a velocidade do ensaio no modelo III-P-1 foi diferente de III-P-2, sendo contudo, o valor de F_{rot} análogo nestes dois modelos.
- A força na rotura obtida no modelo II-P-1 (betão tipo A, resina tipo P) foi superior em 10% ao valor médio obtido para F_{rot} na classe III-P (betão tipo B, resina tipo P).
- Relativamente aos modelos com bucha, o valor médio de F_{rot} na classe II-B (betão tipo A) foi cerca de 30% superior ao da classe III-B (betão tipo B).
- Atendendo à relação verificada entre o valor de F_{rot} no modelo II-P-1 e na classe III-P e à relação verificada entre as classes II-B e III-B, pode-se afirmar que os resultados de F_{rot} nos modelos III-1 e III-2 não devem estar correctos o valor de F_{rot} deveria ser cerca de 20% inferior ao obtido.

Tipo de resina

Ensaiaram-se modelos com dois tipos de resinas: tipo V (σ_{rot} = 50.1 Mpa, E_m = 2722 MPa) e tipo P (σ_{rot} = 68.8 Mpa, E_m = 3948 MPa).

- A qualidade da resina parece afectar a resistência da ligação, embora tal facto seja evidente apenas no resultado de um ensaio.
- Realizou-se apenas um ensaio da classe II-P (betão tipo A, resina tipo P), tendo sido a força máxima no modelo II-P-1 superior em 22% ao valor médio da F_{rot} no modelo padrão (betão tipo A, resina tipo V).

Tipo de ligação

Os modelos da ligação aço-resina-betão foram ensaiados com e sem buchas metálicas para se poder avaliar o comportamento da ligação a este parâmetro.

Nos modelos da classe II-B (betão tipo A, com bucha) o valor médio de F_{rot} é superior em 46% ao valor correspondente no modelo-padrão (betão tipo A, sem bucha), o que mostra o bom comportamento da ligação com bucha metálica.

Tipo de acção

Foram ensaiados seis modelos com acções cíclicas. Comparando os resultados obtidos nestes ensaios com os obtidos nos ensaios com cargas monotónicas pode-se constatar que:

- Houve uma significativa redução na capacidade resistente dos modelos ensaiados às acções cíclicas sem buchas metálicas (classe II-D) em relação ao MP. O valor médio da F_{rot} nos modelos da classe II-D foi 59% do valor correspondente no modelo-padrão. Além disso, a força de rotura no modelo II-D-2 foi 46% do valor de F_{rot} no modelo II-D-3. Atendendo a este grau de dispersão de resultados e à redução significativa na capacidade resistente da ligação (41%), não se pode considerar nada satisfatório o comportamento sem buchas metálicas da ligação aço-resina-betão às acções cíclicas.
- Nos modelos com bucha metálica II-BD-1, II-BD-2 e também no modelo III-BD-2 ensaiados às acções cíclicas o comportamento da ligação foi muito bom. A força de rotura ocorrida em cada um destes modelos foi aproximadamente 86% do valor médio de F_{rot} nos modelos de características idênticas, ensaiados com cargas monotónicas. Isto significa que, nestes modelos com bucha metálica, a ligação açoresina-betão, sujeita às acções cíclicas, teve uma perda de resistência de cerca de 14% e que o comportamento da ligação é independente do tipo de betão.

6.2.1.2 - Tensão máxima na chapa de aço

Apresenta-se na figura 6.9 um gráfico idêntico ao da figura 6.8 com a particularidade de, neste caso, a grandeza em evidência ser a tensão máxima na chapa de aço. Indicam-se também os respectivos valores médios por classe dos modelos com características idênticas.



Figura 6.9 - Tensões máximas nas chapas de aço dos modelos ensaiados e respectivos valores médios por classe.

O valor máximo da tensão na chapa de aço ($\sigma_{s,máx}$) apresenta um comportamento global semelhante ao da força de rotura.

Verifica-se, pelo gráfico da figura 6.9 e pelo quadro 6.5, que existe uma dispersão de valores entre os modelos da mesma classe superior à verificada para a força de rotura.

Em seguida, comentam-se pontualmente algumas situações em que o valor da tensão máxima na chapa de aço apresente um comportamento diferente do referido para a força de rotura.

Geometria da ligação

- Nos modelos das classes α (b_s×l_s = 100×150 mm², e_s = 4 mm) e γ (b_s×l_s= 150×100 mm², e_s = 3 mm) o valor médio da tensão máxima na chapa de aço foi inferior à do MP (b_s×l_s = 100×150 mm² e e_s = 3 mm), visto que as áreas das secções transversais das chapas destes modelos são superiores.
- A tensão máxima nas chapas de aço dos modelos I-4 e I-7 (classe β) foi praticamente idêntica. A reduzida dispersão nos valores de $\sigma_{s,máx}$ e de F_{rot} , assim como a maior uniformização das tensões ao longo das chapas de aço nestes modelos, revela um melhor comportamento da LARB com uma ancoragem onde o comprimento é cerca de 2,7 vezes a largura. Nos restantes casos estudados esta relação foi de 1,5 no MP e de 0,7 na classe γ .

Relativamente aos parâmetros <u>*Tipo de betão*</u> e <u>*Tipo de resina*</u> o comportamento da ligação em termos de tensões máximas na chapa de aço é semelhante ao referido para a força rotura.

Tipo de ligação

• No modelo III-B-2 a tensão máxima na chapa de aço é significativamente inferior ao valor obtido no modelo III-B-1, e ao valor que seria de esperar. Esta é a razão pela qual o valor médio de $\sigma_{s,máx}$ nos modelos da classe III-B apresenta um comportamento inferior em relação aos outros modelos, quando comparado com a situação análoga em termos de força de rotura.

Tipo de acção

- Globalmente, as tensões máximas nas chapas de aço dos modelos ensaiados com cargas monotónicas nunca ultrapassaram o valor da tensão de cedência no aço $(\sigma_{m,ced} = 271 \text{ MPa})$. O valor médio das tensões máximas na chapa de aço do modelo-padrão (betão tipo A, sem bucha) atingiu os 55% do valor da tensão de cedência, enquanto na classe II-B (betão tipo A, com bucha) esse valor chegou a 82% do valor da tensão de cedência no aço.
- Em alguns modelos ensaiados com bucha metálica às acções cíclicas verificou-se ter existido uma plastificação local da chapa de aço, junto à bucha metálica, nos últimos ciclos de deslocamento e antes da rotura. No entanto, esta situação tratou-se apenas de um fenómeno local.

6.2.1.3 - Tensão média de aderência na rotura

Apresenta-se na figura 6.10 um gráfico com o valor da tensão média de aderência na rotura para os modelos da ligação aço-resina-betão (LARB). Indica-se, igualmente, nos modelos com características idênticas, um traço horizontal representando o valor médio de $\tau_{med(rot)}$ por classe.



Figura 6.10 - Tensão média de aderência na rotura para os modelos ensaiados - LARB e LAR - e respectivos valores médios por classe. Valor médio da tensão de rotura à tracção dos betões A e B.

O valor da tensão média de aderência na rotura é dependente da força de rotura $(\tau_{med(rot)} = F_{rot}/A_{anc})$, pelo que uma análise da variação desta grandeza, em termos dos diferentes parâmetros considerados nos modelos, é semelhante à efectuada para a força de rotura.

Uma vez que a rotura da ligação aço-resina-betão ocorreu normalmente pelo betão e/ou pela resina, pretende-se tirar algumas ilações sobre o tipo de rotura ocorrido nos ensaios dos modelos LARB. Assim, representam-se, igualmente, na figura 6.10 os valores da tensão média de aderência na rotura ($\tau_{med(rot)}$) nos modelos da ligação aço-resina (LAR)

e os valores médios da força de rotura à tracção nos betões tipo A e B ($f_{ctm}(A) = 3.7$ MPa, $f_{ctm}(A) = 2,3$ MPa).

No quadro 6.6 indicam-se os valores de $\tau_{med(rot)}$ nos ensaios dos modelos LAR realizados com a resina V e P , assim como os respectivos valores médios.

CLASSES	MODELOS	Tensão média de aderência na rotura t _{med} (rot) (MPa)			
		modelo	valor médio		
	V1	2.54			
LAR-V	V2	2.06	2.32		
	V3	2.36			
	P1	2.94			
LAR-P	P2	3.50	3.19		
	Р3	3.14			

 $\begin{array}{l} \textbf{Quadro 6.6 - Valores da tensão média de aderência na rotura (\tau_{med(rot)}) \\ e respectivos valores médios dos ensaios com a resina V e P \\ dos modelos LAR. \end{array}$

O valor da tensão média de aderência na rotura dos modelos LAR-V (resina V) e LAR-P (resina P) representa nos modelos LARB a situação em que ocorre uma rotura exclusivamente pela resina V ou P (*rotura tipo-2*).

No betão, a resistência à tracção não é igual à resistência por corte. A tensão média de tracção no betão não é uma tensão tangencial. No entanto, nos modelos LARB, representa aproximadamente a situação em que ocorre uma rotura totalmente pelo betão (*rotura do tipo-1a* ou *1b*).

Atendendo aos valores de $\tau_{med(rot)}$ nos modelos LARB e nos modelos LAR, e aos valores de f_{ctm} nos betões tipo A ou B é possível constatar que:

- Nos modelos LARB ensaiados com cargas monotónicas sem buchas metálicas o valor da tensão média de aderência na rotura encontra-se normalmente entre o valor médio correspondente nos modelos LAR-V ou LAR-P e o valor médio de f_{ctm} no betão tipo A ou tipo B.
- A rotura é quase sempre condicionada pelo valor de τ_{med(rot)} na ligação aço-resina, nos modelos sem bucha, e pelo valor da tensão de rotura à tracção do betão, nos modelos ensaiados com bucha metálica.

6.2.1.4 - Deslocamento relativo da chapa de aço em relação ao betão



Figura 6.11 - Deslocamento máximo ($\delta_{máx}$) na rotura, nos modelos ensaiados e respectivos valores médios por classe.

Na figura 6.11 representam-se os valores máximos do deslocamento relativo da chapa de aço em relação à resina ($d_{máx}$) nos modelos LARB ensaiados com cargas monotónicas.

É visível no gráfico da figura 6.11 uma certa dispersão dos valores máximos do deslocamento, que está relacionada com o facto de nos ensaios se retirar o deflectómetro antes da rotura da ligação, com o intuito de não o danificar. Como o momento em que se retirou o deflectómetro nem sempre coincidiu em todos os ensaios, isto provocou que em alguns modelos não se tenha medido o deslocamento na parte final do ensaio, altura em que é maior.

Apesar da dispersão verificada pode-se constatar que:

 O valor médio de δ_{máx} nos modelos da classe II-B (betão tipo A, resina tipo V, com bucha) é cerca de 35% inferior ao do verificado no modelo-padrão (betão tipo A, resina tipo V, sem bucha)

6.2.1.5 - Rigidez da ligação para 40% da força de rotura

Em alguns modelos LARB não foi possível obter o deslocamento relativo (δ) da chapa de aço em relação ao betão. No entanto, para aqueles em que tal foi possível, representa-se na figura 6.12 a rigidez da ligação a 40% da força de rotura ($K_{0.4} = F_{0.4} / \delta$) para os modelos ensaiados com cargas monotónicas.



Figura 6.12 - Rigidez da ligação nos modelos ensaiados e respectivos valores médios por classe.

Da análise do quadro 6.5 e da figura 6.12 é possível constatar que:

- O valor médio de K_{0.4} nas classes α (b_s×l_s = 100×150 mm², e_s = 4 mm), β (b_s×l_s = 75×200 mm², e_s = 4 mm) e γ (b_s×l_s = 150×100 mm², e_s = 3 mm) foi superior respectivamente em 29%, 154% e 99% ao valor correspondente no MP (b_s×l_s = 100× 150 mm², e_s = 3 mm). O valor elevado da rigidez da ligação no modelo I-7 (classe γ) pode explicar-se por a zona de ancoragem neste modelo ser mais longa e estreita que a do MP, apesar de ter a mesma área.
- Nos modelos III-1 e III-2 (betão B) o valor médio da rigidez da ligação para 40% da força de rotura foi 41% inferior à do MP (betão A).

- A rigidez da ligação nos modelos com bucha metálica da classe II-B (betão A, com bucha) foi 114% superior à do MP (betão A, sem bucha).
- Nos modelos da classe III-B (betão B, com bucha) o valor médio da rigidez da ligação K_{0.4} foi superior em 145% ao da classe III (betão B, sem bucha).

6.2.2 - Análise de resultados dos modelos ensaiados às acções cíclicas

Analisam-se em seguida os valores obtidos nos modelos LARB em função do número de ciclos a que a ligação resistiu nos ensaios com forças cíclicas.

Nas figuras 6.13 e 6.14 apresentam-se gráficos que têm em ordenadas as grandezas F_{rot} e $\tau_{med(rot)}$ e em abcissas o número de ciclos a que resistiu a ligação.

Os resultados dos ensaios às acções cíclicas encontram-se assinalados nos gráficos, conforme a classe dos modelos. Representam-se igualmente, no eixo das ordenadas, os valor médios das classes MP, II-B e III-B, correspondentes aos modelos ensaiados com cargas monotónicas. Uniram-se, através de uma recta, os pontos dos gráficos representando os modelos ensaiados. Pode-se, desta forma, analisar o efeito da grandeza em questão com o número de ciclos.

No quadro 6.7 indicam-se as características de alguns desses modelos para uma melhor compreensão dos gráficos apresentados.
Classes ⇔	MP	II-B	III-B	II-D-2	II-BD-1	III-BD-1
♣ Parâmetros				II-D-3	II-BD-2	III-BD-2
$b_s \times l_s (mm^2)$	100×150					
e _s (mm)	3					
BETÃO	Α		В			В
RESINA	V					
LIGAÇÃO	s/ bucha	c/ bucha	c/ bucha		c/ bucha	c/ bucha
ACÇÃO	monot.			cíclica	cíclica	cíclica
NOTA: os valores em branco são iguais aos valores do modelo padrão (MP)						

Quadro 6.7 - Características dos modelos das classes MP, II-B, III-B, II-D, II-BD e III-BD.

No gráfico da figura 6.13 representam-se os valores obtidos para a F_{rot} em função do número de ciclos a que resistiu a ligação.



Figura 6.13 - Relação entre a força de rotura nos modelos e o número de ciclos a que resistiu a ligação.

Da observação da figura 6.13 constata-se:

• Um certo alinhamento entre os modelos com as mesmas características ensaiados com buchas metálicas.

 Uma grande disparidade entre os resultados obtidos nos modelos II-D-2 e no II-D-3, pelo que não se pode considerar satisfatório o comportamento da ligação aço-resinabetão sem bucha às acções cíclicas.

A inclinação das rectas que unem os modelos com buchas representam a diminuição da força com o aumento do numero de ciclos de carga e, de certa forma, a perda de rigidez da ligação.

Apresentam-se no gráfico da figura 6.14 os valores obtidos para a $\tau_{med(rot)}$ nos modelos LARB em função do número de ciclos a que resistiu a ligação às acções cíclicas.



Figura 6.14 - Relação entre a tensão média de aderência na rotura dos modelos e o número de ciclos a que resistiu a ligação

O valor de $\tau_{med(rot)}$ é dependente do valor da força de rotura ($\tau_{med(rot)} = F_{rot} / A_{anc}$) no modelo, pelo que uma análise da figura 6.14 trará conclusões semelhante às já efectuada para a força máxima na rotura.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo apresenta-se uma síntese das principais conclusões referidas ao longo deste trabalho, assim como um resumo dos principais aspectos nele desenvolvidos. Referem-se ainda alguns temas que poderão ser objecto de desenvolvimentos futuros.

7.1 - CONCLUSÕES

No <u>capítulo 2</u> apresentaram-se alguns trabalhos de investigação realizados por vários autores acerca do reforço de elementos estruturais com chapas de aço coladas ao betão com resina epoxy. Referiram-se em particular alguns estudos realizados sobre o comportamento do reforço de elementos estruturais à flexão, ao esforço transverso, à fadiga e à fluência. Constatou-se a necessidade de investigação nesta área, em especial no comportamento do reforço a acções cíclicas e indicaram-se alguns métodos para a verificação da ligação.

Fez-se no <u>capítulo 3</u> a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados - aço, betão (A e B) e os dois tipos de resinas epoxy (V e P). Apresentaram-se os ensaios realizados para caracterizar a ligação aço-resina.

Da caracterização das propriedades mecânicas das resinas constatou-se que os valores médios da tensão de rotura e do módulo de elasticidade da resina P eram superiores aos da resina V em 37% e 45%, respectivamente. Verificou-se igualmente que a tensão média de aderência na rotura da ligação aço-resina era superior na resina P (3,19 MPa) em 39% em relação à resina V (2,32 MPa). Este tipo de ensaio poderá revelar-se muito útil em termos de controlo de qualidade das resinas e da ligação.

No <u>capítulo 4</u>, caracterizaram-se os modelos utilizados nos ensaios experimentais da ligação aço-resina-betão. Apresentaram-se os parâmetros a estudar (geometria da ligação, tipo de betão, tipo de resina, tipo de ligação e tipo de acção) e referiram-se os preparativos e cuidados tidos na execução dos modelos. Descreveu-se o sistema de ensaio, a instrumentação dos modelos e os procedimentos utilizados nos ensaios.

Apresentaram-se, no <u>capítulo 5</u>, os resultados dos ensaios experimentais dos modelos da ligação aço-resina-betão, com e sem buchas metálicas, submetidos a acções monotónicas ou a acções cíclicas. Observou-se nos ensaios dos modelos com buchas metálicas, que após a rotura da ligação aço-resina-betão, a ligação com bucha metálica fica ainda com uma capacidade de carga superior a 50% do valor da força de rotura da ligação aço-resina-betão, o que revela um comportamento mais dúctil deste tipo de ligação relativamente à ligação sem bucha. Constatou-se também nos modelos com bucha o aparecimento de uma fissura envolvendo todo o modelo e provocada pelo efeito de compressão da bucha sobre o betão (efeito semelhante ao "splitting").

No <u>capítulo 6</u>, apresentou-se um estudo paramétrico realizado com um modelo numérico de elementos finitos, considerando o comportamento elástico linear dos materiais. A simulação dos modelos da ligação aço-resina-betão, com e sem bucha metálica, através deste modelo numérico, tornou-se particularmente interessante na compreensão do comportamento da ligação, em especial na ligação com bucha, onde é notória a mobilização do betão provocada por esta. Devido à transmissão das tensões em profundidade por parte da bucha, observou-se uma redução significativa das tensões máximas de tracção no betão nos modelos com bucha (31%). Com a análise paramétrica realizada, constatou-se a grande influência dos parâmetros - tipo de resina e existência de bucha metálica - no comportamento da ligação aço-resina-betão. Contudo, a qualidade do betão pouco influiu no comportamento da ligação, pelo facto de a análise realizada ter sido elástica linear.

200

No <u>Capítulo 6</u>, fez-se igualmente uma análise global dos resultados dos ensaios experimentais da ligação aço-resina-betão apresentados no capítulo 5. Analisaram-se algumas grandezas que caracterizam o comportamento da ligação aço-resina-betão, em função dos diversos parâmetros estudados.

Em seguida faz-se uma síntese das principais conclusões em função dos diversos parâmetros observados.

Geometria da ligação

Em termos globais, verificou-se não ser muito significativa a influência da geometria da ligação dos modelos ensaiados na força de rotura. No entanto, este facto poderá estar associado às reduzidas dimensões do modelo - que foram condicionadas pelo tipo de equipamento de ensaio necessário para realizar os ensaios com cargas cíclicas - e ao consequente reduzido comprimento de ancoragem. Poder-se-á, pois, concluir que este não é o tipo de modelo mais indicado para testar o efeito da variação da geometria da ligação.

<u>Tipo de betão</u>

Nos modelos III-1 e III-2 (betão tipo B, resina tipo V) ensaiados sem bucha, verificou-se que os resultados não devem estar correctos. Contudo, atendendo aos restantes modelos ensaiados, é possível concluir que a influência do valor da força de rotura com o tipo de betão, não é muito significativa nos modelos sem bucha. Relativamente aos modelos com bucha, a influência do tipo de betão no valor médio da força de rotura já é considerável - cerca de 30% superior no betão tipo A. Conclui-se, pois, que a qualidade do betão afecta fundamentalmente a ligação com bucha.

Tipo de resina

A força de rotura no modelo ensaiado com resina tipo P e betão tipo A foi superior em 22% em relação ao valor obtido no modelo-padrão (resina tipo V, betão tipo A). A qualidade da resina parece, portanto, afectar a resistência da ligação, embora esta conclusão se baseie apenas no resultado de um único ensaio.

<u>Tipo de ligação</u>

Verificou-se nos modelos com bucha e resina tipo V que o valor médio da força de rotura foi 46% superior ao dos modelos correspondentes sem bucha.

Nos modelos da ligação aço-resina-betão, ensaiados com cargas monotónicas, sem buchas metálicas, o valor da tensão média de aderência na rotura encontra-se, normalmente, entre o valor médio da ligação aço-resina e o valor médio da tensão de rotura à tracção no betão. A rotura, nos modelos sem bucha, é quase sempre condicionada pelo valor da tensão média de aderência na rotura dos modelos da ligação aço-resina e pelo valor da tensão de rotura à tracção do betão, nos modelos com bucha.

A tensão média de aderência na rotura dos modelos sem bucha, betão tipo A e resina tipo V foi de 2,66 MPa, enquanto que no modelo correspondente com resina tipo P foi de 3,27 MPa. Esta tensão nos modelos com bucha, betão tipo A e resina tipo V, foi de 3,89 MPa e no modelo correspondente com betão tipo B foi de 2,99 MPa.

O deslocamento máximo na ligação é cerca de 35% inferior nos modelos com bucha e a rigidez da ligação, para 40% da força de rotura, foi, nestes modelos, cerca de 114% superior à dos correspondentes modelos sem bucha metálica.

Tipo de acção

Verificou-se que o valor da tensão média de cedência no aço nunca foi ultrapassada com cargas monotónicas . A tensão máxima atingida no aço foi 55% da tensão de cedência nos modelos sem bucha e 82% desse valor nos modelos com bucha.

Em alguns modelos com bucha metálica, ensaiados às acções cíclicas, observou-se um fenómeno local de plastificação da chapa de aço, que ocorreu junto à bucha metálica, nos últimos ciclos de deslocamento antes da rotura.

Os ensaios dos modelos sem bucha às acções cíclicas apresentam um grande grau de dispersão de resultados, não se podendo considerar nada satisfatório o seu comportamento às acções cíclicas.

Nos modelos com bucha metálica, ensaiados às acções cíclicas, verificou-se que a ligação aço-resina-betão teve uma perda de resistência de 14% em relação aos modelos correspondentes ensaiados com cargas monotónicas, e que este comportamento da ligação foi independente do tipo de betão. Pode-se, portanto, considerar bastante razoável o comportamento da ligação aço-resina-betão com buchas metálicas às acções cíclicas.

7.2 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como possíveis desenvolvimentos futuros, nesta área, referem-se, em termos de modelos numéricos, a consideração dos efeitos não-lineares dos materiais e a modelação tridimensional.

É da maior importância o desenvolvimento de um modelo global para verificar a ligação aço-resina-betão com buchas, que sirva como método prático de dimensionamento.

203

Em termos experimentais poder-se-á aprofundar o estudo da interacção bucha-resina e do fenómeno de rotura do betão por compressão provocado pela bucha ("splitting"). A análise do comportamento do reforço de vigas ao esforço transverso e o aprofundamento do estudo do comportamento às acções cíclicas de elementos estruturais reforçados, nomeadamente vigas e pilares, são outros aspectos a considerar.

Com a tendência actual para a certificação de materiais, será necessário desenvolver procedimentos de controlo de qualidade que levem, neste caso particular, à certificação das resinas epoxy e ao controlo de qualidade de execução desta técnica. Neste sentido, o desenvolvimento da aplicação dos modelos da ligação aço-resina e de ensaios de corte "in situ" não destrutivos, para complementar a informação obtida pelos ensaios de arrancamento, poderão constituir um desenvolvimento importante e um contributo valioso para o controlo de qualidade.

REFERÊNCIAS

- "ACI 318-77 Building code requirements for reinforced concrete", American Concrete Institute, Detroit, 1977.
- [2] Alfaiate J.: "Reforço por adição de elementos metálicos em vigas de betão armado flexão simples", Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas pela Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, Agosto 1986.
- [3] Appleton, J.; Almeida, J.; Appleton, J.: "Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado", Comunicação apresentada no 1º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação, LNEC, Lisboa, 1985
- [4] "ASTM C469-83, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression", American Society for Testing and Materials, 1983.
- [5] "ASTM C496-85, *Standard test method for splitting tensile strength cylindrical concrete specimens*", American Society for Testing and Materials, 1985.
- [6] Bresson, J.: "Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures. Béton Plaqué", Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, nº 278, 1971.
- [7] Bresson, J.: "L'Application du Béton Plaqué", Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, nº 349, Avril, 1977.

- [8] "BS1881 Testing Concrete, Part 110 Method for making test cylinders from fresh concrete", British Standards Institution, Londres, 1983.
- [9] "BS1881 Testing Concrete, Part 117 Method for determination of tensile splitting strength", British Standards Institution, Londres, 1983.
- [10] "BS1881 Testing Concrete, Part 121 Method for determination of static modulus of elasticity in compression", British Standards Institution, Londres, 1983.
- [11] Cachadinha, M.G.; Coias e Silva, V.: "Reforço e Reparação de Elementos de Betão Armado. Concepção e Execução", Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº 17, 1983.
- [12] Cánovas, M.F.: "Refuerzo de Elementos Estructurales Mediante Encolado de Bandas de Acero con Resinas Epoxidicas", Intituto Eduardo Torroja de la Construction y del Cemento, nº 382-383, Madrid, Dezembro 1985.
- [13] Cánovas, M.F.: "Reparaciones y Refuerzos en Estructuras de Hormingon Mediante Resinas Epoxi", Revista del IDIEM, vol. 13, nº 1, Maio 1974.
- [14] Cánovas, M.F.: "Refuerzo de Elementos Estructurales de Hormingon Armado Mediante Encolado de Bandas de Acero con Adhesivos Epoxidicos", Informes de la Construcción, vol. 37, nº 373, Agosto-Setembro, 1985.
- [15] CEB GTG 21 Redesign of Concrete Structures Task group: "Redesign of Concrete Structures", November, 1990.
- [16] Chung, B. M.: "Epoxy Repair of Bond in Concrete Members", ACI Journal, Title n° 78-7, Janeiro-Fevereiro 1981, pp. 79-82.

- [17] Chung, B. M.; Lui, L. M.: "Epoxy-Repaired Concrete Joints", ACI Journal, Title n° 74-29, Junho 1977, pp. 264-267.
- [18] Chung, B. M.; Lui, L. M.: "Epoxy-Repaired Concrete Joints Under Dynamic Loads", ACI Journal, Title nº 75-34, Julho 1978, pp. 313-316.
- [19] Comité Euro-International Du Béton, Bulletin d'Information n° 162: "Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (Redesign)", Lausanne, Agosto 1983.
- [20] Comité Euro-International Du Béton, Bulletin d'Information n° 188: "Fatigue of Concrete Structures - State of the Art Report", Lausanne, Junho 1988.
- [21] Especificação LNEC: "Betão Ensaio de Compressão", Lisboa, Dezembro de 1968.
- [22] Fuchs, J.; Persy, J.P.: "Etude du Fontionnement des Toles Collées, Méthode d'Essai -Solicitation à l'Effort Tranchant, Influence du Caractère Dimensionnel des Toles sur la Charge de Rupture - Synthèse", FAER 1.41.31.2, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy, Janeiro 1985.
- [23] Gomes, A. M.: "Comportamento e Reforço de elementos de Betão Armado Sujeitos a Acções Cíclicas", Dissertação submetida para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, Julho 1992.
- [24] L'Hermite, R.: "Le Renforcement du Béton par Résines Renforcement des Ouvrages en Béton et en Maçonnerie par Collage", Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, nº 349, Abril, 1977.

- [25] L'Hermite, R.: "L'Aplication des Colles et Résines dans la Construction. Le Béton a Cofrage Portant", Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, nº 239, Novembro 1967.
- [26] Ladner, M.: "Reinforced Concrete Members with Subsequently Bonded Steel Sheets", IABSE Symposium, Veneza, 1983.
- [27] Ladner, M.; Weder, Ch.: "Concrete Structures with Bonded External Reinforcement", Report n°206, EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, 1981.
- [28] Leonhardt, F.; Mönning, E.; "Construções de concreto"; vol.1, Livraria Interciência, 1ª edição, Rio de Janeiro, 1977.
- [29] Norma Europeia (versão Portuguesa): "EN 10 002-1, Materiais metálicos Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio (à temperatura ambiente)", Comissão Europeia de Normalização, Março 1990.
- [30] Poineau, D.: "Réparations par Toles Collées", Annexe R.B.A. nº1, Janeiro 1987.
- [31] Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado"; Imprensa Nacional- Casa da Moeda, Lisboa, 1986.
- [32] Theillout, J. N.: "Dimensionnement et Vérification du Renforcement par la Technique des Toles Collées", CEBTP, 20-23 Julho 1987.
- [33] Theillout, J. N.: "Renforcement et Réparation des Ouvrages d'Art par la Technique des Toles Collees", Thèse présentée à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées pour obtenir le diplôme de Docteur-Ingénieur de Génie Civil, Paris, Dezembro 1983.

[34] Theillout, J. N.: "Repair and Strengthening of Bridges by means of Bonded Plates",
ISAP 86 - Adhesion between Polymers and Concrete, Aix-en-Provence, Setembro 1986, pp. 601-621.