



Reabilitação de Pontes Rodoviárias de Betão Armado

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira
para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

José Venâncio Telo Branco

Licenciado em Engenharia Civil pela Universidade da Madeira

Orientador: Professor Doutor José Manuel Martins Neto dos Santos

Fevereiro de 2014

“É através dos nossos erros que aprendemos”

(Provérbio Popular Português)

Aos meus Pais, Avós, Nossa Senhora da Guia e a todos que acreditaram em mim

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE TEXTO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xv
ABREVIATURAS.....	xvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - CONSERVAÇÃO DE PONTES DE BETÃO ARMADO	5
CAPÍTULO 3 - SOLUÇÕES E TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO	25
CAPÍTULO 4 - REABILITAÇÃO DE DUAS OBRAS DE ARTE	51
CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE NA R.A.M.	79
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS.....	103
ANEXOS.....	109

AGRADECIMENTOS

Para a realização desta dissertação foi necessária a contribuição de inúmeras pessoas e entidades, no qual expresso aqui os meus sinceros agradecimentos. No entanto refiro somente os mais que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Santos por ter aceite a minha proposta de tema de dissertação, pela disponibilidade demonstrada para o esclarecimento de diversas dúvidas existentes, pela informação concedida, pelas sugestões, orientação e incentivo motivacional, que foram dados ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço também, ao Prof. Dr. Paulo França, ao Prof. Paulo Lobo e ao Prof. Jorge Pereira da UMa, ao Prof. Dr. António Costa do I.S.T e ao Prof. Dr. Aníbal Costa da U.A. por todo o auxílio prestado e pela disponibilização de bibliografia que foram muito úteis para a realização deste trabalho.

Agradeço igualmente às entidades responsáveis por algumas pontes e viadutos inseridos em Portugal Continental que se disponibilizaram em ajudar-me, facultando elementos escritos, peças desenhadas, fotografias e alguns esclarecimentos complementares. Assim agradeço à Estradas de Portugal - S.A. principalmente a Eng^a. Ana Rita Pereira e ao Eng^o. Carlos Pimentel, e à Brisa, especialmente ao Técnico Nuno Sequeira.

Relativamente às entidades responsáveis por algumas pontes e viadutos inseridos na R.A.M. agradeço à Vialitoral, principalmente ao Eng^o. Jorge Pereira, por ter-me facultado uma visita guiada ao interior de um viaduto e também aproveito para agradecer ao Técnico Norberto, ao Eng^o. Roberto e ao Encarregado de Obra Paulo Vieira da VSL, pelos esclarecimentos sobre o reforço efetuado ao mesmo. Agradeço igualmente à Viaexpresso, em especial à Eng^a. Sara Neto e ao Eng^o. Nuno Andrade, pelo fornecimento de alguns elementos escritos e pelos esclarecimentos sobre a reabilitação efetuada na ponte sobre a Ribeira do Inferno.

Agradeço também às restantes entidades e membros, nomeadamente: VSL - Portugal; Tensacciai - Portugal; Mota-Engil e ao LREC, por todo o auxílio prestado.

Por fim, agradeço à minha família, pelo acompanhamento e motivação ao longo do curso e especialmente neste estudo, aos meus colegas e amigos que de uma forma indireta e direta contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Cada vez mais na atualidade a reabilitação de obras de arte é de grande importância. Muitas dessas estruturas apresentam degradações e problemas estruturais consideráveis, no qual necessitam urgentemente de ações de reparação e de reforço para garantir um nível de segurança. Em Portugal só se deu uma maior importância à conservação e a reabilitação em obras de arte após a um colapso de uma ponte no concelho de Castelo de Paiva que levou à perda de vidas humanas.

Este trabalho preocupa-se a dar a conhecer os vários tipos de patologias que poderão ocorrer na vida de uma ponte, desde da fase conceção e projeto até a fase de serviço, com o intuito de poder sensibilizar para futuras construções de pontes. De forma esquemática apresentam-se os diferentes tipos de inspeções, ensaios e monitorização, cujo através destes, consegue-se acompanhar o estado de conservação e o aparecimento de eventuais anomalias, que possam implicar possíveis restrições ao tráfego ou até mesmo o encerramento.

De modo a poder garantir as condições de segurança e durabilidade das pontes de betão armado, ilustram-se algumas soluções e técnicas de reparação e de reforço, salientando que estas soluções e técnicas dependem da natureza e grau das anomalias, da necessidade ou não de manter a circulação de veículos e de fatores técnicos e económicos.

De modo a poder exemplificar alguns aspetos importantes, nomeadamente, conservação, patologias, reparação e reforço estrutural, abordam-se duas obras de arte de Portugal Continental (um viaduto e uma ponte) que foram sujeitas a intervenções devido ao seu estado de degradação e a problemas estruturais.

Por fim, apresentam-se algumas obras de arte pertencentes à Região Autónoma da Madeira (RAM) onde foram detetadas alguns problemas. Neste sentido, expõem-se algumas soluções às patologias abordadas no contacto visual, de forma a expor o conhecimento adquirido ao longo deste trabalho.

Palavras-chaves: Obras de Arte, Inspeções, Patologias, Reabilitação, Conservação, Durabilidade, Segurança.

ABSTRACT

Increasingly nowadays the rehabilitation of bridges is of great importance. Many of these structures show considerable deterioration and structural problems, which are in urgent need of repair and reinforcement to ensure the safety of those who use them. Portugal only started giving great importance to the conservation and rehabilitation of bridges after the collapse of the bridge in Castelo de Paiva which led to the loss of human lives.

This work is about publicizing the various types of anomalies that may occur during the lifetime of a bridge, from the design phase until the service phase, with the content for awareness of future construction of bridges. Next it shows schematically the different types of inspection, testing and monitoring, through these one can monitor the condition and development of any anomalies, which may result in possible traffic restrictions or even closure.

In order to be able to guarantee the safety and durability of reinforced concrete bridges, this dissertation illustrates some solutions and techniques for repairing and strengthening, with emphasis that these solutions and techniques depend on the nature and extent of the anomalies, the need or not of maintaining the movement of vehicles and the technical and economic factors.

In recapping some important aspects namely, conservation, anomalies, repair, structural and reinforcement, we refer two structures in Portugal mainland (the viaduct and the bridge) that were subject to interventions due to their degree of degradation and structural problems.

Finally, it is mentioned some bridges belonging to the Autonomous Region of Madeira (RAM) where structural problems were found. The knowledge, facts and evidence presented throughout this work we are able to identify some solutions to the anomalies of these structures.

Keywords: Bridges, Reinforced Concrete, Inspections, Anomalies, Rehabilitation, Conservation, Durability, Safety.

ÍNDICE DE TEXTO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos da dissertação.....	3
1.3. Organização.....	3
2 CONSERVAÇÃO DE PONTES DE BETÃO ARMADO	5
2.1. Degradação de estruturas de betão armado	7
2.1.1. Deterioração do betão.....	7
2.1.2. Corrosão das armaduras	10
2.2. Fatores que podem dar origem ao aparecimento de patologias.....	11
2.2.1. Patologias provenientes de erros de projeto	11
2.2.2. Patologias provenientes de defeitos de construção	13
2.2.3. Patologias provenientes da fase de serviço	15
2.3. Anomalias de índole estrutural.....	16
2.4. Tipos de inspeções e prioridades.....	19
2.5. Monitorização.....	22
2.6. Considerações finais.....	23
3 SOLUÇÕES E TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO	25
3.1. Preparação da superfície degradada e proteção das armaduras.....	26
3.2. Proteção catódica.....	28
3.3. Reparação de fendas.....	30
3.4. Reparação ou reforço com betão projetado	32
3.5. Reparação ou reforço por encamisamento com betão armado.....	32
3.6. Reforço por colagem de chapas metálicas	33
3.7. Reforço com polímeros reforçados com fibras	34
3.8. Reforço pela incorporação de pré-esforço exterior	37
3.8.1. Pré-esforço exterior com cabos de alta resistência.....	38
3.8.2. Pré-esforço exterior com barras	40
3.8.3. Pré-esforço exterior com fibras	41
3.9. Impermeabilização de tabuleiros.....	42
3.10. Soluções e técnicas de reforço sísmico	44
3.11. Especificações da NP EN 1504	46
3.12. Considerações finais.....	50

4 REABILITAÇÃO DE DUAS OBRAS DE ARTE	51
Viaduto de Alhandra.....	52
4.1. Descrição do viaduto	52
4.2. Principais patologias.....	54
4.2.1. Deterioração do betão por corrosão das armaduras	54
4.2.2. Deterioração do sistema de pré-esforço.....	54
4.2.3. Infiltrações de água no tabuleiro	55
4.2.4. Danificação dos aparelhos de apoio	56
4.2.5. Deficiências nas juntas de dilatação	56
4.2.6. Principais patologias associadas ao comportamento estrutural	57
4.3. Soluções para as patologias encontradas no Viaduto de Alhandra.....	58
4.3.1. Reparação das patologias associadas à deterioração dos materiais	58
4.3.1.1. Reparação do betão nas zonas com deterioração e deficiência	58
4.3.1.2. Reparação das bainhas dos cabos monocórdão	58
4.3.1.3. Reparação dos perfis metálicos da laje de separador	59
4.3.1.4. Impermeabilização do tabuleiro	59
4.3.1.5. Introdução de novos aparelhos de apoio.....	60
4.3.2. Reparação das patologias associadas ao comportamento estrutural	60
4.3.2.1. Substituição das juntas entre o tabuleiro e os encontros.....	60
4.3.2.2. Restabelecimento da continuidade do tabuleiro	61
4.3.2.3. Alteração estrutural entre o tabuleiro e o encontro Norte.....	63
4.3.2.4. Reposicionamento e reforço da ligação dos pilares do encontro Sul.....	64
4.3.2.5. Introdução dos dispositivos de controlo sísmico	64
4.3.3. Restantes trabalhos aplicados no Viaduto	65
Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro.....	66
4.4. Descrição da Ponte	66
4.5. Principais patologias observados na Ponte de Mosteirô.....	67
4.5.1. Principais patologias associados à deterioração dos materiais	68
4.5.2. Principais patologias associadas ao comportamento estrutural	68
4.6. Soluções para as patologias encontradas na Ponte de Mosteirô	70
4.6.1. Reparação das patologias associadas à deterioração dos materiais	70
4.6.2. Reparação das patologias associadas ao comportamento estrutural.....	71
4.6.2.1. Reparação de fendas	71
4.6.2.2. Reforço das diagonais tracionadas e dos contraventamentos sobre os pilares	71
4.6.2.3. Reforço da laje inferior no vão principal.....	72
4.6.2.4. Reforço da ligação horizontal do tabuleiro ao encontro fixo.....	75
4.6.2.5. Reforço da ligação vertical do tabuleiro aos encontros	75
4.6.3. Restantes trabalhos aplicados à Ponte de Mosteirô	76
4.7. Considerações finais.....	77
5 AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE NA R.A.M.	79
5.1. Troço da “Via Rápida” sentido Caniçal-Machico	79
5.2. Troço da “Via Rápida” de duas faixas de rodagens em Santo António	81
5.3. Ponte sobre a Ribeira do Inferno	82
5.4. Passagem superior no concelho de Santa Cruz.....	85
5.5. Aqueduto sob a Ponte do Ribeiro Seco	88

5.6.	Ponte em arco no concelho de Santa Cruz	89
5.7.	Pontes sobre as principais ribeiras do concelho do Funchal	91
5.8.	Considerações finais.....	96
6	CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	99
6.1.	Conclusões gerais.....	99
6.2.	Desenvolvimentos futuros.....	101
	REFERÊNCIAS	103
	ANEXOS.....	109
	Anexo A - Especificações da NP EN 1504	109
	Anexo B - Lista de trabalhos realizados.....	115
	Anexo C - Localização das pontes em anomalia.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fatores que podem influenciar numa ponte durante a sua vida útil (adaptado de Rodomski, 2002).	5
Figura 2.2 - Objetivos do sistema GOA (adaptado de Santiago, 2005).	6
Figura 2.3 - Principais fissuras devido às cargas aplicadas (Coutinho, 2005).	16
Figura 3.1 - Diversas etapas de reparação de uma superfície de betão (adaptado de Costa, 2009)	28
Figura 3.2 - Processo catódico e anódico na corrosão (Coutinho, 2005)	29
Figura 3.3 - Proteção catódica por meio de ânodos de sacrifício de zinco (Costa, 2012).	29
Figura 3.4 - Prevenção catódica por meio de corrente impressa (Costa, 2012)	30
Figura 3.5 - Reforço por encamisamento com betão armado (Correia, 2011).	33
Figura 3.6 - Reforço de uma viga com chapas metálicas (Pereira, 2012).	33
Figura 3.7 - Reforço em lajes através da aplicação de laminados e mantas: a) resistência ao corte; b) resistência à flexão (adaptado de Correia, 2011).	34
Figura 3.8 - Comportamento à tração de fibras e metais (Juvandes, 1999).	34
Figura 3.9 - Reforço de elementos de betão através das duas técnicas de colagem de FRP: a) técnica EBR com laminados e mantas; b) técnica NSR com laminados (Juvandes, 2011).	35
Figura 3.10 - Confinamento dos pilares com mantas de fibras de carbono (Pereira, 2012).	35
Figura 3.11 - Reforço de pontes por meio de pré-esforço exterior: a) Cordões de alta resistência; b) Barras de alta resistência; c) Laminados de carbono (adaptado de Neves, 2012; Motavalli e Czaderski, 2007).	37
Figura 3.12 - Disposição dos cabos de pré-esforço exterior (Neves, 2012).	37
Figura 3.13 - Sistema não aderente com produto flexível (Neves, 2012).	38
Figura 3.14 - Tipos de ancoragens de multicordão: a) Ativa (MTAI <i>system</i>); b) Passiva (ST <i>dead end system</i>); c) Continuidade (MTG <i>coupler system</i>) (Tensacciai, 2012).	39
Figura 3.15 - Sistema aderente e não aderente: a) Ancoragem ativa; b) Ancoragem passiva; c) Ancoragem ativa e passiva (adaptado de DSI, 2009)	40
Figura 3.16 - Ancoragem passiva e ativa do tipo LEOBA SLC II (SIKA, 2012b).	41
Figura 3.17 - Ancoragem passiva e ativa do tipo StressHead (SIKA, 2012b).	41
Figura 3.18 - Sistema não aderente com laminados de CFRP (Neves, 2012).	41
Figura 3.19 - Aplicação da membrana de impermeabilização, Viaduto Duarte Pacheco (Imperialum, 2013).	42
Figura 3.20 - Sistemas de Isolamento base: a) FSP; b) HDRB; c) LRB (Guerreiro, 2011).	45

Figura 3.21 - Dissipadores de energia: a) Dissipadores históricos, Ponte Vasco da Gama; b) Apoio de Borracha em associação com dissipador viscoso (Guerreiro, 2003; 2011).....	45
Figura 4.1 - Planta e Corte Longitudinal (Brisa, 2002a).	52
Figura 4.2 - Corte Transversal (Brisa, 2002a).	53
Figura 4.3 - Sistema de pré-esforço exterior nas vigas longitudinais exteriores e carlingas (Brisa, 2002a).	53
Figura 4.4 - Deterioração do betão por corrosão das armaduras: a) Vigas de bordo; b) Vigas de bordadura; c) Travessa dos pilares; d) Articulações dos pilares (Brisa, 2002a).	54
Figura 4.5 - Deterioração do sistema de pré-esforço: a) Pré-esforço transversal das carlingas; b) Bainhas dos cabos monocórdão (Brisa, 2002a).	55
Figura 4.6 - Infiltrações de água no tabuleiro: a) Corrosão do perfil de apoio da laje do Separador Central; b) Infiltração na laje do Separador Central; c) Infiltração e deterioração nas Travessas dos Pilares (Brisa, 2002a).....	55
Figura 4.7 - Danificação dos aparelhos de apoio: a) Apoio fraturado; b) Placa de chumbo deslocada (Brisa, 2002a).....	56
Figura 4.8 - Danificações nas juntas dilatação: a) Encontro Norte; b) Encontro Sul (Brisa, 2002a). ...	56
Figura 4.9 - Deslocamento de um dos pilares no encontro Sul (Brisa, 2002a).	57
Figura 4.10 - Pormenor da zona do Separador Central (adaptado de Brisa, 2002b).	59
Figura 4.11 - Introdução dos apoios com macacos planos incorporados (adaptado de Brisa, 2002b)..	60
Figura 4.12 - Pormenor da colocação da junta dilatação (adaptado de Brisa, 2002b).....	61
Figura 4.13 - Corte parcial do espelho do encontro Norte (Brisa, 2002b).	61
Figura 4.14 - Localização do sistema de ligação, corte transversal (Brisa, 2002b).....	61
Figura 4.15 - Pormenor da ligação das vigas longitudinais (adaptado de Brisa, 2002b).....	62
Figura 4.16 - Pormenor da ligação das vigas e carlingas em corte 1-1 ¹ (Brisa, 2002b).....	62
Figura 4.17 - Sistema de tirantes para travamento transversal (Brisa, 2002b).	63
Figura 4.18 - Pormenor da introdução de aparelhos em corte (adaptado de Brisa, 2002b).....	63
Figura 4.19 - Pormenor do travamento transversal (adaptado de Brisa, 2002b).	64
Figura 4.20 - Pormenor do reforço de um dos pilares do encontro Sul.....	64
Figura 4.21 - Dispositivo de controlo sismo (Monteiro, 2011).	65
Figura 4.22 - Viaduto de Alhandra após os trabalhos de reabilitação (Boléo, 2012).....	65
Figura 4.23 - Aparelho de apoio rotulado metálico no coroamento do pilar P1 (EP, 2011).	66
Figura 4.24 - Corte longitudinal da Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro (EP, 2009b).	67
Figura 4.25 - Deterioração dos materiais: a) Zona de esmagamento dos pilares; b) Desgaste do pavimento (EP, 2009a).....	68

Figura 4.26 - Fissuração nos elementos tracionados: a) Diagonais tracionadas; b) Parede de contraventamento (EP, 2009a).....	69
Figura 4.27 - Fenda transversal com 1,20 mm na laje inferior (EP, 2009a).	69
Figura 4.28 - Reforço das diagonais (EP, 2011).	72
Figura 4.29 - Montagem das ancoragens de betão (EP, 2011).....	73
Figura 4.30 - Corte longitudinal da ponte (EP, 2009b).....	73
Figura 4.31 - Planta da ponte (EP, 2009b).	73
Figura 4.32 - Procedimentos da colocação dos laminados na zona central do meio vão (EP, 2011).....	74
Figura 4.33 - Plinto do encontro fixo (E1) em início de reforço (EP, 2011).....	75
Figura 4.34 - Especificação do reforço de ligação vertical do encontro fixo (adaptado de EP, 2009b).....	76
Figura 4.35 - Especificação do reforço de ligação vertical do encontro móvel (adaptado de EP, 2009b).....	76
Figura 4.36 - Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro (EP, 2011).....	77
Figura 5.1 - Viaduto sentido Caniçal – Machico: a) Vista sobre o tabuleiro; b) Vista sob o tabuleiro (Novembro de 2013).....	80
Figura 5.2 - Reforço com cabos de alta resistência: a) Ancoragem ativa; b) Apoio intermédio (Novembro de 2013).....	80
Figura 5.3 - Reforço com pré-esforço: a) Zona de tensionamento; b) Maciço de desvio; c) Ancoragem passiva (Novembro de 2013).	81
Figura 5.4 - Troço da “Via Rápida” em Santo António (Novembro de 2013).....	82
Figura 5.5 - Ponte sobre a Ribeira do Inferno: a) Vista à Montante; Vista à Jusante (Novembro de 2013).....	82
Figura 5.6 - Erosão provocada pelo temporal de Dezembro de 2009: a) Encontro Oeste b) Talude Sudoeste (Viaexpresso, 2009).	83
Figura 5.7 - Erosão sob os lintéis: a) Encontro Este; b) Encontro Oeste (Viaexpresso, 2010a).	83
Figura 5.8 - Laje de enrocamento argamassado: a) Representação transversal (Viaexpresso, 2010a); b) Aspeto final (Novembro de 2013).....	84
Figura 5.9 - Anomalias do lado Este: a) Muro com degradação; b) Rede de drenagem deficiente (Viaexpresso, 2010b).....	84
Figura 5.10 - Última intervenção: a) Prolongamento da caleia à existente; b) Construção da Valeta; c) Restabelecimento do muro Nordeste (Novembro de 2013).....	85
Figura 5.11 - Laje com exposição de armadura (Novembro de 2013).....	86
Figura 5.12 - Encontro direito: a) Zona central com fissuração; b) Zona lateral com degradação e escorrimento (Novembro de 2013).....	86

Figura 5.13 - Degradação sobre os encontros; a) Guarda degradada com exposição de armadura; b) Pavimento fragmentado (Novembro de 2013).....	87
Figura 5.14 - Ponte sob a ponte do Ribeiro Seco (Novembro de 2013).....	88
Figura 5.15 - Pilares com degradação: a) Pilar P1; b) Pilar P2; c) Pilar P3 (Novembro de 2013).....	88
Figura 5.16 - Ponte em arco de alvenaria de pedra (Novembro de 2013).....	90
Figura 5.17 - Vigas Transversais fissuradas (Novembro de 2013).....	90
Figura 5.18 (C1) - Ponte de São João, fissuração a montante (Dezembro de 2013).....	94
Figura 5.19 (C2) - Ponte Nova, degradação do betão com exposição de armadura a jusante (Dezembro de 2013).....	94
Figura 5.20 (C3) - Ponte do Mercado, deterioração do betão com exposição dos cabos de pré-esforço a montante (Dezembro de 2013).....	94
Figura 5.21 (C4) - Ponte de ligação entre o Anadia e o Oudinot, degradação do betão com exposição dos cabos de pré-esforço a jusante (Dezembro de 2013).....	95
Figura 5.22 (C5) - Ponte do Carmo, exposição de armadura a montante (Dezembro de 2013).....	95
Figura 5.23 (C6) - Ponte de ligação ao Campo da Barca Sul, exposição de armadura a jusante (Dezembro de 2013).....	95
Figura 5.24 (C7) - Ponte de ligação ao Campo da Barca Norte, degradação do betão com exposição das armaduras e infraescavação sob o muro de alvenaria do lado montante (Dezembro de 2013).....	96
Figura 5.26 (C8) - Ponte de ligação entre a Rua do Matadouro e a Rua Dr. Pestana Júnior, infraescavações sob os lintéis de betão armado (Dezembro de 2013).....	96
Figura 5.27 (C9) - Ponte Dom Ernesto Sena Oliveira, deterioração do betão com exposição de armadura (Dezembro de 2013).....	97
Figura B-1- Lista de trabalhos realizados no Viaduto de Alhandra.....	115
Figura B-2 - Lista de trabalhos realizados na Ponte de Mosteirô.....	117
Figura C - Localização das Pontes sobre as principais ribeiras do concelho do Funchal, Escala: 1/10000 (CMF, 2013).....	119

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Deterioração do betão e corrosão das armaduras por ações agressivas naturais (adaptado de Coutinho, 2005).	11
Tabela 2.2 - Principais erros de projeto (adaptado de Costa, 2009; NP EN 1992, 2010; RSA, 1983; REBA, 1967).	12
Tabela 2.3 - Patologias provenientes de defeitos de construção (adaptado de Costa, 2009)	14
Tabela 2.4 - Patologias provenientes da fase de serviço (adaptado de Costa, 2009).	15
Tabela 2.5 - Manifestação patológica e respetivas causas (adaptado de Coutinho, 2005; Costa, 2009; Laner, 2001)	17
Tabela 2.6 - Principais causas de fissuração nas pontes de betão armado (adaptado de IQOA, 1996a, 1996b e 1997).	18
Tabela 2.7 - Tipos de inspeções utilizados em Portugal (adaptado de Costa, 2009; Poças, 2009).	20
Tabela 2.8 - Ensaaios mais usuais nas obras de arte (Andrey, 1987).	21
Tabela 2.9 - Tipos de monitorização (adaptado de Costa, 2009).	22
Tabela 3.1 - Desvantagens e vantagens comparados aos betões “normais” (adaptado de Ferreira, 2001; Santos, 2008c).	27
Tabela 3.2 - Desvantagens e vantagens da resina epóxida (adaptado de Correia, 2011)	31
Tabela 3.3 - Procedimento de reparação por meio de injeção com resina epóxida (adaptado de Correia, 2011; Sika, 2012a).....	31
Tabela 3.4 - Características principais das fibras e metais (adaptado de Juvandes, 1999; Santos, 2008c; Neves, 2012).	34
Tabela 3.5 - Procedimento de reforço por meio de mantas de fibras de carbono (adaptado de Rogertec, 2012; Correia, 2011; Pereira, 2012)	36
Tabela 3.6 - Sistemas de pré-esforço exterior com cordões (Neves, 2012)	39
Tabela 3.7 - Procedimento de aplicação do pré-esforço exterior para cada sistema (adaptado de Neves, 2012).....	40
Tabela 3.8 - Procedimento de aplicação de uma manta impermeabilizante (adaptado de LNEC, 2012; Imperialum, 2013).	43
Tabela 3.9 - Constituição da Norma NP EN 1504.	46
Tabela 3.10 - Princípios de reparação (adaptado da NP EN 1504-9).....	49
Tabela 5.1 - Soluções e técnicas de reparação e de proteção.	96
Tabela A-1 - Requisitos de desempenho para a impregnação hidrofóbica (NP EN 1504-2, 2006) ...	109
Tabela A-2 - Requisitos de argamassas para a reparação estrutural e não estrutural (NP EN 1504-3, 2006)	110

Tabela A-3 - Requisitos de produtos de colagem para o reforço com placas de aço (NP EN 1504-4, 2006).....	111
Tabela A-4 - Requisitos de desempenho dos produtos de injeção para enchimento dúctil (NP EN 1504-5, 2006)	112
Tabela A-5 - Requisitos de aplicação dos produtos de injeção para ancoragens (NP EN 1504-6, 2008).....	112
Tabela A- 6 - Requisitos dos produtos de proteção contra a corrosão (NP EN 1504-7, 2008)	112
Tabela A-7 - Rótulo de um produto de conformidade (NP EN 1504-3, 2006)	113

ABREVIATURAS

RAM	Região Autónoma da Madeira
CMF	Câmara Municipal do Funchal
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
SGOA	Sistema de Gestão de Obras de Arte
EC	Eurocódigo
RSA	Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Ponte
REBA	Regulamento de estruturas de Betão Armado
CEN	Comité Europeu de Normalização
EN	Norma Europeia
NP	Norma Portuguesa
ELU	Estados Limites Últimos
ELS	Estados Limites Serviço
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear
RTD	Detetor de Temperatura Resistivo
Ti/MMO	Titânio revestido com óxidos de metais nobres
FRP	Polímeros Reforçados com Fibras
CFRP	Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (C)
GFRP	Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (G)
AFRP	Polímeros Reforçados com Fibras de Armida (A)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A temática desta dissertação incide sobre a reabilitação de pontes rodoviárias de betão armado. O facto de existir um grande volume de investimentos na melhoria e expansão da rede viária em Portugal nas últimas décadas, torna-se importante conservar estas infraestruturas de forma a potencializar a sua rentabilidade. Estes investimentos na rede viária incluíram a construção de diversas pontes e viadutos, sendo a maioria dos mais recentes compostos por betão armado.

A escolha da constituição de materiais formados por betão e aço advém da própria evolução de processos construtivos e dos materiais em si. Podemos simplificar esta evolução por diversas etapas marcantes como a idade do Bronze, que permitiu a construção de pontes em arco compostas por alvenaria. Outra evolução significativa ocorreu na revolução industrial com o surgimento do ferro e aço utilizado abundantemente na construção de pontes como material de construção. A invenção do cimento Portland permitiu a obtenção de um novo material denominado betão, composto essencialmente por uma mistura de agregados, água e cimento, que na atualidade é muito corrente nas construções de pontes e viadutos.

Mais tarde o surgimento do pré-esforço veio revolucionar ainda mais as estruturas, principalmente as de betão armado, cujo conseguiu-se beneficiar de alguns parâmetros tais como, uma maior esbelteza, vencer vãos maiores, melhoria do comportamento em serviço, diminuição do peso próprio e uma utilização mais racional dos betões e aços de alta resistência. Sendo atualmente uma solução usual de qualquer projeto de execução e de reabilitação de pontes de betão armado.

Ao longo dos tempos tem-se vindo a designar as pontes por obras de arte, que são estruturas especiais de vias de comunicação, que em tempos remotos eram feitas de madeira e de alvenaria de pedra, e que hoje em dia, devido a sua arquitetura e engenharia são autênticas obras de arte.

No entanto, as obras de arte podem ser classificadas sob diversas formas, sendo as mais comuns, por utilização, por sistema estrutural e por material. Quanto à utilização, estas organizam-se em rodoviárias, ferroviárias, pedonais, aquedutos e oleodutos. Relativamente ao sistema estrutural, estas designam-se por diversas tipologias em função do seu comportamento longitudinal, tais como, laje, viga, arco, suspensa, atirantada e treliçado (“*cantilever*”). Em relação aos últimos, estas podem ser organizadas pelo material principal, nomeadamente, betão, aço, pedra, e madeira, ou pelo conjunto de materiais principais, tais como, pontes mistas, de betão armado e de betão pré-esforçado (Santos, 2008a).

Nesta dissertação incide-se um maior interesse nas pontes de betão armado com especial ênfase para as pontes e viadutos rodoviários. No contexto estrutural as pontes e viadutos são semelhantes a única diferença é que as pontes intersejam uma linha de água considerável ou importante enquanto os viadutos podem ou não intersejar, desde que a sua interseção seja pequenos escoamentos de água (ribeiros).

No início da utilização do betão armado como material de construção, considerava-se que o betão armado teria uma duração ilimitada e que as armaduras estavam sempre protegidas pela camada de recobrimento de betão. No entanto, com o passar dos anos, verifica-se que o betão armado degrada-se com o tempo (Costa, 2009).

Nos últimos anos as pontes de betão armado têm sido alvo de inspeções e intervenções devido ao seu estado de degradação e com problemas estruturais. É de salientar que a implementação de programas de reabilitação nem sempre é uma tarefa fácil, pois para resolver determinados problemas é necessário primeiramente resolver as causas que os proporcionou. Existem diversas técnicas e soluções de reparação e de reforço estrutural, e assim torna-se necessário conhecer qual a solução mais conveniente para cada situação, como também garantir o controlo de qualidade dos produtos e sistemas a aplicar.

Atualmente, a implementação de sistemas de gestão informatizados tem possibilitado às entidades responsáveis pelas obras de arte ter o conhecimento geral do seu património, quer a nível do estado de manutenção como também na prevenção de todo o tipo de situações que possam pôr em causa a segurança e a durabilidade das estruturas.

1.2. Objetivos da dissertação

Cada vez mais há uma maior importância e interesse em reabilitar estruturas, principalmente as pontes de betão armado, pois muitas dessas pontes apresentam um pronunciado nível de degradação com problemas estruturais. No entanto, é fundamental desenvolver ações de recuperação e de conservação para as mesmas pontes de modo a poder garantir um nível segurança compatível com a utilização em causa. Assim nesta dissertação pretende-se alcançar de forma faseada os seguintes objetivos relativos à reabilitação de pontes rodoviárias de betão armado:

- Pesquisa bibliográfica sobre as principais anomalias e as suas causas;
- Pesquisa bibliográfica sobre os sistemas e técnicas de reparação e reforço estrutural mais usuais;
- Análise da reparação e reforço de pontes em Portugal;
- Propostas de reparação de algumas pontes na RAM.

1.3. Organização

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. Apresenta-se de seguida, de uma forma sumária, o seu conteúdo.

No capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução da importância da conservação de pontes rodoviárias no panorama atual, e também, uma pequena abordagem sobre a evolução histórica das pontes. Para finalizar o capítulo descreve-se ainda os principais objetivos da tese e a sua organização em capítulos.

O capítulo 2 inicia-se com a importância da implementação de sistemas de gestão nas obras de arte. De seguida, apresentam-se as principais patologias que manifestam-se nas obras de arte de betão armado durante as fases da vida útil. É tido em consideração os diferentes tipos materiais que as constituem e os respetivos componentes, de forma a expor-se medidas preventivas e corretivas para cada fase. Posteriormente descrevem-se, igualmente, as principais causas que estão na origem do aparecimento de danos estruturais. E por último especificam-se a funcionalidade dos diferentes tipos de inspeção, ensaios e monitorização.

No capítulo 3 especificam-se algumas soluções e técnicas de reparação e de reforço durante a fase de serviço. Especificam-se os sistemas de proteção sísmica mais usuais nas pontes e viadutos de betão armado. E por fim descrevem-se algumas definições e objetivos da Norma NP EN 1504, abordando alguns exemplos de especificações de materiais e sistemas, que proporcionam para a proteção, reparação e reforço para estruturas de betão e de betão armado.

No capítulo 4 descrevem-se, não só as principais patologias detetadas ao longo da fase de inspeção, como também as soluções efetuadas em duas obras de arte de betão armado designadamente, o Viaduto de Alhandra e a Ponte de Mosteirô.

No capítulo 5 apresentam-se algumas obras de arte pertencentes à Região Autónoma da Madeira (RAM), nas quais algumas submeteram a intervenções e outras que as necessitam. Após uma breve inspeção visual propõem-se diversas soluções de reparação para as que requerem intervenção.

Por fim, no capítulo 6 abordam-se algumas conclusões gerais sobre a temática desta dissertação, e também, algumas apreciações relacionadas com a conservação e reabilitação que podem ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

CONSERVAÇÃO DE PONTES DE BETÃO ARMADO

Na fase preliminar do projeto de uma ponte, o dono de obra deverá definir a sua vida útil. Esta vida corresponde desde do início até ao termo de funcionamento, em que a ponte deixa de ter capacidades estruturais para cumprir os seus objetivos, caso o plano de reabilitação não seja o suficiente para a reabilitar.

As pontes vulgares são habitualmente projetadas para vidas entre 50 a 60 anos, por sua vez as mais relevantes são projetadas para períodos de vida entre 100 a 120 anos (Branco, 2001). Todas as pontes, para atingirem uma vida útil para quais foram projetadas precisam de intervenção e manutenção, devido às ações exteriores de origem humana (excesso de tráfego, acidentes, vandalismo, poluição) e às ações agressivas naturais (biológico, física, química), (Santos, 2008b), (Figura 2.1).

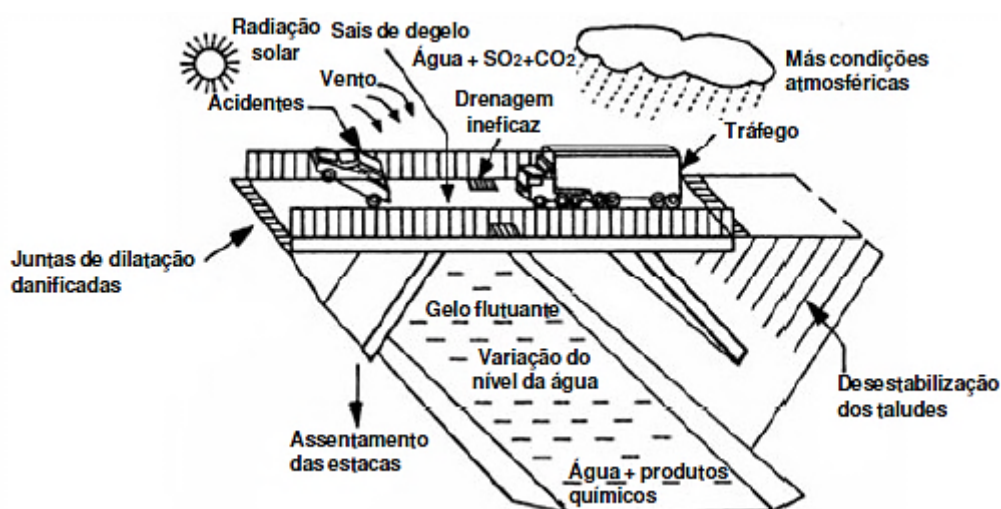


Figura 2.1 - Fatores que podem influenciar numa ponte durante a sua vida útil (adaptado de Rodomski, 2002).

Na fase de conceção e projeto deve-se ter em consideração diferentes tipos de fatores, tais como: a natureza e qualidade dos materiais e equipamentos a utilizar; estratégias, técnicas e organizações construtivas; meio envolvente e fundações; ações ambientais (temperatura, vento, chuvas, neve, radiação solar, etc.) e ações de acidentes naturais (sismo, tsunamis, cheias, tornados/ciclones, movimentos de terra, etc.). Estes cuidados a garantir aumenta a qualidade e a durabilidade das estruturas, sem necessitar de excessivas intervenções (Costa, 2009; Santos, 2008b).

No que se refere à fase de exploração/utilização, é nesta etapa que começa a surgir a maioria dos problemas estruturais nas obras de arte, daí a necessidade de utilizar um sistema de gestão, que permita implementar inspeções periódicas e ações de manutenção e conservação às estruturas (Costa, 2009).

Os problemas estruturais existentes nas pontes manifestam-se de forma diferente, consoante a causa que lhes proporciona. Para evitar que estas questões evoluam e que cause outras dificuldades estruturais, é necessário avaliar as causas dos problemas. Para isso, este sistema de gestão deve contemplar toda a informação geral sobre a obra de arte que esta a ser analisada. Esta informação deve conter elementos relativos ao projeto (peças desenhadas e escritas), o historial da obra, caso efetuado os dados das inspeções anteriores e intervenções submetidas (manutenção, alargamento, reparação, e reforço), e por fim a sua localização e condicionantes da sua periferia.

Em Portugal, o sistema de gestão mais utilizado pelas principais entidades responsáveis pelas obras de arte é o GOA (Figura 2.2). Este sistema é um programa informático que contém vários módulos que interagem entre si, nomeadamente: inventário (características das obras); inspeções de rotina; inspeções principais; inspeções subaquáticas; vistorias; histórico; consultas e registo de transporte especiais, que permitem aos donos de obra e concessionários conhecerem o estado de conservação das estruturas, de forma a prestar apoio na tomada decisão e na definição de estratégias de reabilitação (Mendonça; Brito; Milhazes, 2013).

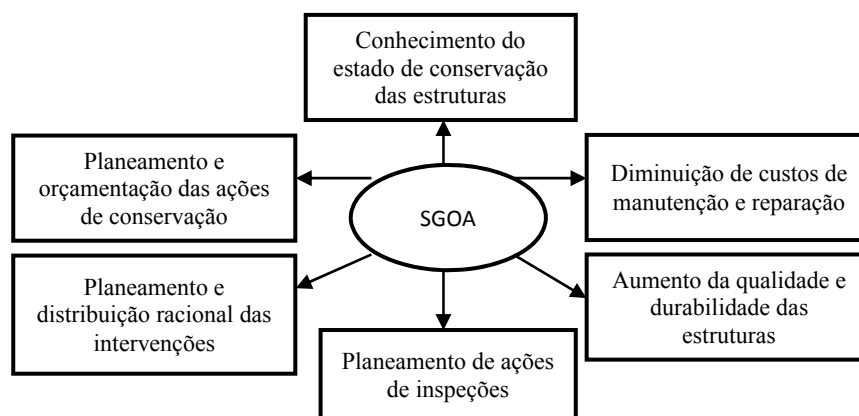


Figura 2.2 - Objetivos do sistema GOA (adaptado de Santiago, 2005).

2.1. Degradação de estruturas de betão armado

As estruturas de betão armado ao longo do tempo vão interagindo com as ações agressivas naturais (química, física, biológica e ambiental). Neste sentido as estruturas deverão ser capazes de resistir estas ações, sem apresentar deformações, desgaste ou rotura, e de não comprometer a segurança para a qual foram projetadas. Quando se avalia uma estrutura com vários anos de idade, deve-se procurar enquadrá-la no período em que foi projetada e construída, isto porque as anomalias observadas poderão estar diretamente relacionadas com as regras de cálculo e as disposições construtivas utilizadas na época (Costa, 2009).

2.1.1. Deterioração do betão

O betão, como qualquer outro material, também degrada-se com o tempo. Logo é necessário que tanto os materiais que o constituem como a mão-de-obra que produz, sejam de boa qualidade, por forma a garantir capacidade de resistência às condições naturais às quais estará exposto (biológica, física, química), de modo a poder alcançar a vida útil para a qual foi proporcionado. Nos parágrafos seguintes apresenta-se uma breve descrição das ações naturais e respetivos problemas que podem causar às estruturas de betão armado.

○ *Origem biológica*

Algumas das degradações surgidas no betão provêm de origem biológica. Este ataque biológico poderá ser originado por diversos fatores, tais como: o crescimento de vegetação (líquenes, musgos, algas, raízes de plantas, etc.) em orifícios ou em fendas que exercem forças expansivas, e de microrganismos que produzem ácidos que contaminam a água onde a estrutura poderá estar em contacto.

○ *Origem física*

Alguns processos físicos conduzem à deterioração do betão, sobretudo a retração, que provoca a diminuição de volume ao betão. No caso da diminuição de volume ser impossibilitada, desenvolvem-se tensões que ao ultrapassarem os valores da resistência à tração do betão, o que provoca a fissuração. Estes fenómenos dependem de vários fatores para se desenvolver: a temperatura, a humidade, a razão água/cimento, a natureza e qualidade dos agregados, adjuvantes e de aditivos (Coutinho, 2005). Após a descrição sumária da influência da retração ao betão expõem-se, seguidamente, alguns aspetos relacionados com os ciclos de gelo/degelo, efeitos térmicos e por abrasão.

- *Ciclos de gelo e degelo*

Algumas estruturas de betão podem estar submetidas a ciclos de temperatura que provocam congelação e descongelação da água. Este mecanismo pode provocar tensões, fissuração e degradações ao betão, desde que os poros e fendas do betão se encontrem saturados. Um dos meios para minimizar este fenómeno é introdução de ar no betão, para que este não fique completamente saturado e consequentemente, não aumente de volume (Coutinho, 2005).

- *Efeitos térmicos*

A temperatura pode ser considerada como uma ação agressiva que pode interagir com o betão. A variação de temperatura devido às condições climáticas, origina variações de volume no betão, podendo resultar na fissuração e desgaste do próprio betão (Costa, 2009; Vieira, 2011).

- *Por abrasão*

A maior parte das estruturas de betão podem estar sujeitas a erosão por abrasão. No caso das estruturas parcialmente imersas em águas, estas podem perder a zona de recobrimento das armaduras, devido ao escoamento de água com elevada velocidade ou com partículas sólidas em suspensão. No caso do tráfego de veículos, estes também pode ser considerado como uma causa de erosão por abrasão, devido ao desgaste que estes provocam no pavimento rodoviário (Coutinho, 2005).

- *Origem química*

Certos elementos químicos, oriundos do meio ambiente, em contato com o betão podem originar reações internas, que são muitas vezes as responsáveis pela danificação do betão. Com base nisto apresentam-se algumas reações que influenciam a deterioração do betão.

- *Ataques pela água do mar*

O ambiente marítimo é um meio muito agressivo para as estruturas de betão armado. Estas não só ficam degradadas devido ao impacto das ondas e variação da maré, como também, devido às reações químicas que podem surgir entre a pasta de cimento e os elementos químicos que possuem a água do mar, nomeadamente: os cloretos, os sulfatos e os iões de magnésio. Estas reações podem dar origem à diminuição de resistência do betão e à oxidação das armaduras (Costa, 2009).

- *Ataque por ácidos*

Certas estruturas de betão armado podem ser afetadas através do ataque por ácidos provenientes de ambientes húmidos, nomeadamente através do dióxido de enxofre (SO_2) e do dióxido de carbono (CO_2), e/ou em contacto com águas ácidas, influenciadas por poluentes industriais. Estes ácidos atacam o betão, principalmente, o betão que não possua características resistentes, originando a degradação e a remoção da pasta de cimento (Lapa, 2008).

Consoante o pH dos ácidos, o ataque pode ser moderado, severo, ou ainda muito severo. Geralmente quando o pH dos ácidos é inferior a 4.5, o ataque é muito severo. Conforme Santos (2008a), a combinação de um ácido com um dos componentes hidratados do betão forma sais, que na presença de água, dissolvem-se e desaparecem, formando orifícios vazios nas estruturas de betão.

- *Reação sulfática interna*

A reação sulfática é uma reação química que pode surgir no interior do betão, é causada pela existência de sulfatos no meio exterior (solos, águas marítimas e subterrâneas) e na composição do próprio betão (alguns agregados e cimentos). Estes sulfatos podem reagir entre si provocando a expansão do betão, motivando o aparecimento de fendas e descamação do próprio betão. Esta expansão resulta da formação de taumasite e etringite, que são reações resultantes dos sulfatos com os aluminatos tricálcico dos cimentos hidratados ou das aluminas dos agregados (Costa, 2009; Coutinho, 2005).

- *Reações alcális-sílica*

A reação alcális-sílica é uma reação química que pode emergir no interior do betão, a qual é causada pela reação entre os álcalis do cimento ou dos agregados, e a sílica de certos agregados reativos ou pela humidade, caso exista. As estruturas de betão que estão mais sujeitas a este tipo de reações são as que estão em contacto com a água, expostas às intempéries e/ou com deficiências de drenagem (Costa, 2009).

Se suceder a reação alcális-sílica no interior do betão, os inertes são os mais afetados, principalmente os que possuam sílica na sua constituição. Nos inertes que são afetados, desenvolvem-se uma membrana rígida e insolúvel (gel) no seu contorno, que contribui para a expansão interna do betão, originando o aparecimento de fissuras e degradações no próprio betão (Santos, 2008a).

2.1.2. Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras é um dos principais problemas existentes nas estruturas de betão armado. As armaduras encontram-se protegidas pelo betão, e desde que o betão se encontre deteriorado, as armaduras poderão ficar expostas às condições ambientais externas (despassivação). Para tal, bastará a presença de água (H_2O) e oxigénio (O_2) para ocorrer a corrosão no aço, que por sua vez esta danifica mais o betão. Do ponto de vista estrutural a corrosão é preocupante pois implica a perda de secção das armaduras, provocando a perda de resistência e ductilidade, que por sua vez compromete a segurança da estrutura.

Devido à forte alcalinidade do betão são ($pH > 12$), as armaduras encontram-se protegidas contra a corrosão, por um fenómeno denominado por passivação. Este fenómeno é uma película microscópica, geralmente de 10 nm de espessura que envolve a armadura e que impede a corrosão do aço. A destruição dessa película poderá ser influenciada pela à ação dos cloretos ou pela possível carbonatação que ocorre no betão (Coutinho, 2005).

- *Ação dos cloretos*

Os cloretos além de atacarem o betão são os principais causadores da corrosão das armaduras, pois destroem a camada de passivação, fazendo com que as armaduras fiquem mais suscetíveis aos ataques exteriores. Os cloretos existentes no betão podem surgir por duas formas, primeiramente pelos materiais que constituem o próprio betão nomeadamente, o cimento, os agregados, a água da amassadura e alguns aditivos, e/ou pelo meio exterior, designadamente da água do mar e de ambientes que contenham cloro (Santos, 2008a).

- *Carbonatação*

A carbonatação é um fenómeno que ocorre no betão, sendo originada pela reação do carbono atmosférico (CO_2) com os cimentos hidratados na presença de humidade. Esta reação ocasiona a formação de carbonato de cálcio, e tem como consequência a redução da alcalinidade do betão, o que leva à destruição da camada de passivação das armaduras. Quando o pH do betão baixa para valores inferior a 9, em consequência da carbonatação, é destruída a camada de passivação que protege as armaduras, o que na presença de água (H_2O) ou oxigénio (O_2) provoca a corrosão nas armaduras (Romano; Brito, 2012).

Com base o que foi dito anteriormente ilustra-se na Tabela 2.1 os diversos mecanismos que influenciam na deterioração do betão e na corrosão das armaduras e algumas medidas preventivas e corretivas.

Tabela 2.1 - Deterioração do betão e corrosão das armaduras por ações agressivas naturais (adaptado de Coutinho, 2005).

Tipos	Processo	Causa	Efeito	Solução
Biológica	Ataque dos ácidos: • Sulfídrico • Húmico • Sulfúrico	Em sistema de esgotos	Deterioração do betão	<ul style="list-style-type: none"> Boa ventilação Cimento de aluminatos cálcicos Permeabilidade baixa Proteção adicional
Física	• Ciclos gelo/degelo	Aumento de volume de água ao congelar		<ul style="list-style-type: none"> Introdução de ar Permeabilidade baixa Não usar adições (ex.: sais descongelantes)
	• Por abrasão	Desgaste		<ul style="list-style-type: none"> Aumento do recobrimento Permeabilidade baixa Maior percentagem de grossos Aditivos: cinzas volantes ou sílica de fumo
Química	Por ácidos: • Água decarbonante • Sais de magnésio • Sais amoniacais	Destruição da pasta de cimento		<ul style="list-style-type: none"> Permeabilidade baixa Proteção adicional.
	• Sulfatos	Reação expansiva		<ul style="list-style-type: none"> Cimento pobre em aluminatos Evitar agregados com alumina Proteção adicional
	• Água do mar	Reações químicas		<ul style="list-style-type: none"> Permeabilidade baixa Usar cimento rico em aluminatos Evitar penetração de cloro
	• Por alcalis	Reações químicas		<ul style="list-style-type: none"> Não usar agregados com sílica reativa Limitação dos alcalis no cimento (0,6 %) Adições de pozolana ou sílica de fumo Baixa permeabilidade e baixa razão A/C
	• Carbonatação	Redução da alcalinidade do betão	Corrosão das armaduras	<ul style="list-style-type: none"> Permeabilidade baixa Proteção adicional
	• Penetração dos cloretos	Destruição da camada de passivação		<ul style="list-style-type: none"> Permeabilidade baixa Tipos de cimentos com escórias, sílica de fumo, cinzas volantes e pozolanas

2.2. Fatores que podem dar origem ao aparecimento de patologias

A maioria dos problemas existentes nas obras de arte advém de três fases, nomeadamente, a de conceção e projeto, a de execução e a de serviço. Normalmente esses problemas manifestam-se, pela deterioração do betão, pela corrosão das armaduras e pela fissuração do betão. Em casos mais extremos, ainda manifestam-se por excessivas deformações (flechas) como também, por excessivas vibrações.

2.2.1. Patologias provenientes de erros de projeto

É na fase de conceção e projeto de uma obra de arte que deve-se ter em consideração, a possibilidade de ocorrer certas patologias alusivos aos materiais e estruturais, de modo a poder aumentar a qualidade

e durabilidade da estrutura e a adaptar para possíveis inspeções e manutenções periódicas durante a fase de serviço.

Para prevenir determinados erros de projeto, é necessário garantir uma boa qualidade na fase de projeto, de modo a cumprir as especificações regulamentares com rigor, a utilizar modelos de cálculo adequados com uma modelação correta e rigorosa, a utilizar uma correta e complexa pormenorização de todos os elementos estruturais e a conhecer todas as condicionantes e periferia do lugar onde vai ser implantada a estrutura. Assim, o projetista evita determinadas patologias e contribui para uma vida duradoura da estrutura projetada. Na Tabela 2.2, apresenta-se uma breve descrição dos principais erros de projeto que podem suceder numa obra de arte.

Tabela 2.2 - Principais erros de projeto (adaptado de Costa, 2009; NP EN 1992, 2010; RSA, 1983; REBA, 1967).

Erros de projeto mais usuais	Fundamentação	Possíveis causas	Possíveis patologias
Cargas subestimadas	Devido à subestimação de cargas de exploração ou das cargas permanentes, alusivo ao dimensionamento de uma obra de arte, podem contribuir para o aparecimento de anomalias.	Ações: <ul style="list-style-type: none"> • Acidentais • Tráfego • Neve • Sismo • Vento • Térmicas Outros: <ul style="list-style-type: none"> • Peso próprio • Sobrecargas 	<ul style="list-style-type: none"> • Fissuração • Deformações excessivas • Vibrações excessivas
Erros de modelação	Os programas de cálculo automático apesar de serem uma ferramenta útil na análise estrutural, podem originar problemas de mau funcionamento global de uma obra de arte, caso a modelação estrutural esteja incorreta ou demasiada simplificada.	<ul style="list-style-type: none"> • Incompatibilidade entre o modelo adotado e a estrutura analisada • Desprezamentos de importantes condicionantes • Incorreta transmissão de esforços tendo em conta as ações que a estrutura estará submetida 	
Carência da verificação da segurança regulamentar	Muitos dos problemas estruturais e deterioração dos materiais, referente às obras de arte, advêm da falta de rigor, verificação e indicações impostas pelos regulamentos em vigor.	Estados limites últimos <ul style="list-style-type: none"> • Flexão • Encurvadura • Esforço transversal • Torção Estados limites de utilização <ul style="list-style-type: none"> • Fissuração • Deformação • Vibrações 	
Deficiência pormenorização das armaduras	Desde que a pormenorização das armaduras não seja devidamente legível, correta e rigorosa pode originar anomalias estruturais.	<ul style="list-style-type: none"> • Recobrimento inferior ao mínimo; • Distâncias reduzidas entre armaduras • Amarrações e emendas em zonas de momentos/esforços elevados • Curvatura mínima entre armaduras nas zonas de canto. 	Armadura: <ul style="list-style-type: none"> • Corrosão Betão: <ul style="list-style-type: none"> • Degradação • Fissuração • Esmagamento

Tabela 2.2 - Principais erros de projeto (adaptado de Costa, 2009; NP EN 1992, 2010; RSA, 1983; REBA, 1967) (Continuação).

Erros de projeto mais usuais	Fundamentação	Possíveis causas	Possíveis patologias
Inadequada qualidade dos materiais	A consideração incorreta das propriedades dos materiais pode conduzir ao aparecimento de anomalias, caso estas não possuam capacidade suficiente para suportar as ações agressivas naturais.	Origem biológica: <ul style="list-style-type: none"> • Vegetação • Poluição biológica. Origem física: <ul style="list-style-type: none"> • Tensões térmicas • Ciclos de gelo e degelo • Abrasão Origem química: <ul style="list-style-type: none"> • Carbonatação • Reações devido o meio ácido • Ação dos cloretos • Reação alcalis-sílica • Reação sulfática interna 	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioração do betão • Corrosão das armaduras • Fissuração
Insuficiência recobrimento das armaduras	Os elementos que contenham um recobrimento insuficiente e estejam expostos a ambientes agressivos estão mais vulneráveis a degradações.		
Insuficiência ou inexistência da armadura passiva	Para além das armaduras principais que são calculadas para resistir os esforços principais, é necessário armaduras passivas, cujo principal objetivo é limitar o alargamento da fendilhação e/ou assegurar a ligação entre as partes dos elementos estruturais.	<ul style="list-style-type: none"> • Variações brusca de geometria • Atuações de forças em zonas restritas dos elementos estruturais 	<ul style="list-style-type: none"> • Fissuração
Dificuldades de realizar trabalhos de manutenção e conservação	Muitas das obras de arte não foram projetadas na fase de projeto para a ocorrência de inspeções periódicas durante a fase de serviço, o que provoca alguns constrangimentos na fase de serviço/utilização das estruturas.	Impossibilidade de visitar: <ul style="list-style-type: none"> • Interior das vigas-caixão • Fustes de pilares de secção oca • Aparelhos de apoio • Juntas dilatação • Sumidouros ou sarjetas. 	Ausência de: <ul style="list-style-type: none"> • Manutenção • Conservação • Limpeza.
Conceção estrutural inadequada	Diversos problemas estruturais, referentes às obras de arte, advêm do sítio onde está inserido, pois a estrutura poderá estar submetida a ações exteriores superiores às quais está dimensionada.	Zonas: <ul style="list-style-type: none"> • Chuvas • Ventosidade • Variação de temperatura; • Solos desconhecidos ou incoerentes • De nível freático elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deformações • Infiltrações • Vibrações excessivas • Fissuração • Assentamentos/movimentos diferenciais

2.2.2. Patologias provenientes de defeitos de construção

A fase de execução de uma obra de arte é muitas vezes a responsável pelo aparecimento de algumas patologias, que podem manifestar-se durante a fase de construção ou durante a fase de serviço. É no decorrer da construção das pontes que ocorre a maior percentagem de acidentes e de patologias futuramente observadas. Estas patologias podem estar relacionadas com os materiais inadequados ou de má qualidade, com a execução deficiente, com a má interpretação dos projetos, com a carência de qualidade técnica, bem como com a inexistência ou ineficaz controlo de qualidade pela parte da fiscalização. Para evitar determinados defeitos de construção, a qualidade dos materiais e sua

composição deverá depender do cumprimento das especificações impostas no projeto, no qual estas dependem das especificações técnicas dos materiais, fornecidas pelos fabricantes e pelas especificações regulamentares dos materiais (ex.: betão, aço).

No caso de ocorrer alterações em obra que não estão previstas no projeto de execução, tais como: erros, omissões, ou ainda, situações não previstas; é sempre recomendado a consulta prévia do projetista. No entanto, para obter uma boa qualidade de construção, convém ter uma equipa especializada para cada função de trabalho e um bom controlo de qualidade por parte da fiscalização. Na tabela seguinte expõem-se uma breve descrição de algumas patologias, provenientes da fase de construção.

Tabela 2.3 - Patologias provenientes de defeitos de construção (adaptado de Costa, 2009)

Elementos	Origem	Consequência	Patologias
Cofragem	• Restos de cofragem após a obra estar finalizada	• Putrefação • Corrosão	• Deterioração do betão
	• Não estanque	• Perda de calda de cimento • Segregação	• Ninho de inertes • Penetração de água
	• Deficiente/ demasiada flexível	• Perda de resistência	• Fissuração
	• Remoção prematura	• Deformação estrutural (flechas excessivas e deslocamentos)	• Fissuração • Ninho de vazios
Escoramentos	• Remoção prematura • Mal dimensionados ou mal fundados	• Deformação estrutural (flechas excessivas e deslocamentos)	• Fissuração
Armaduras	• Má conservação em obra	• Perda de resistência	• Oxidação
	• Má disposição	• Recobrimento insuficiente • Perda de resistência • Ninho de vazios	• Início de corrosão • Fissuração • Descasque do betão • Carbonatação
Betão	• Inadequada vibração	• Segregação • Concentração de água • Sedimentação • Perda de resistência	• Ninho de inertes • Descasque • Retração • Fissuração
	• Má cura	• Secagem rápida	• Fissuração
	• Má qualidade • Má execução em obra • Recobrimento insuficiente	• Penetração de agentes agressivos através de água e do ar	• Rotura da passivação das armaduras • Início da corrosão
Pré-esforço	• Montagem incorreta	• Deformação estrutural	• Fissuração
Junta de dilatação	• Montagem incorreta	• Impossibilidade de movimentos relativos • Infiltrações de águas	• Fissuração • Destruição da camada de transição • Oxidação dos elementos metálicos • Danificação (junta dilatação)
Aparelhos de apoio	• Montagem incorreta	• Deficiente funcionamento	• Fissuração • Degradação • Rutura
Impermeabilização e rede de drenagem	• Montagem incorreta	• Escorrências • Humidades • Eflorescências	• Deterioração do betão • Corrosão

2.2.3. Patologias provenientes da fase de serviço

Maior parte dos problemas estruturais e degradações dos materiais advêm da fase de concepção e projetos e da fase de construção, no qual só se manifestam com o passar dos anos, aquando da utilização da estrutura, na fase de serviço. Contudo, na fase de serviço, podem manifestar-se alguns problemas estruturais e degradações, tais como: provenientes pela falta de manutenção, alterações das condições de exploração (aumento do tráfego rodoviário) e por ações agressivas naturais acidentais e exteriores de origem humana (Costa, 2009).

Para acautelar determinadas patologias provenientes da fase de serviço, é necessário que na fase de concepção e projeto seja tido em consideração a possibilidade de ocorrerem possíveis ações agressivas naturais e acidentais, de modo a poder minimizar os impactos negativos (económicos, materiais e populacionais), caso ocorram. No entanto, a ocorrência de inspeções periódicas na vida de uma obra de arte é fundamental pois permite detetar anomalias que poderão por em causa a segurança de quem as utiliza. Na Tabela 2.4, apresenta-se uma breve descrição de algumas patologias, ocasionadas pela fase de serviço.

Tabela 2.4 - Patologias provenientes da fase de serviço (adaptado de Costa, 2009).

Causas	Origem	Consequência	Patologias
Modificação da plataforma	<ul style="list-style-type: none">• Aumento do número de vias em cada sentido (sem reforço)	<ul style="list-style-type: none">• Aumento das cargas rodoviárias• Fadiga	<ul style="list-style-type: none">• Fissuração• Deformações
Evolução do tráfego rodoviário	<ul style="list-style-type: none">• Aumento do número de veículos• Passagem mais frequente de cargas pesadas		
Agressões exteriores de origem humana	<ul style="list-style-type: none">• Colisões de veículos ou barcos nos elementos estruturais• Explosões• Incêndios• Atos de vandalismos• Queda de objetos	<ul style="list-style-type: none">• Danificação	<ul style="list-style-type: none">• Degradação• Corrosão• Deformações

2.3. Anomalias de índole estrutural

O aparecimento de fissuração nas estruturas de betão armado, pode surgir não só devido a erros de projeto e/ou de defeitos de construção, como também provenientes da fase de serviço. Segundo Costa, (2009) as fissuras finas ($w \leq 0,3$ mm) presentes nas estruturas de betão armado não são consideradas anomalias, caso estas não evoluam progressivamente que possa comprometer a funcionalidade da estrutura.

A presença de fissuração de maior abertura ($w > 0,4$ mm) pode permitir a penetração de agentes agressivos, que podem ocasionar a corrosão das armaduras. A ocorrência de fissuração de maior calibre ($w \geq 1,2$ mm), é proporcionada pelas excessivas deformações existentes na estrutura o que implica sinais de plastificação pela parte das armaduras (Costa, 2009). A situação anteriormente referida é de evitar pois pode implicar a restrição de cargas e de velocidade ou até mesmo o encerramento do tráfego.

A maior parte dos problemas estruturais em que são diagnosticados fissuração de maior abertura, surgem devido às cargas aplicadas, que são superiores às que a estrutura está dimensionada. As principais causas deste problema resultam da ausência ou insuficiência de armaduras para cada solicitação nomeadamente: flexão, tração, cargas concentradas, corte, aderência, torção e pelo seu posicionamento incorreto. Na Figura 2.3, ilustra-se os principais tipos de fissuras que podem surgir numa estrutura de betão armado, em função ao tipo de carga aplicada.

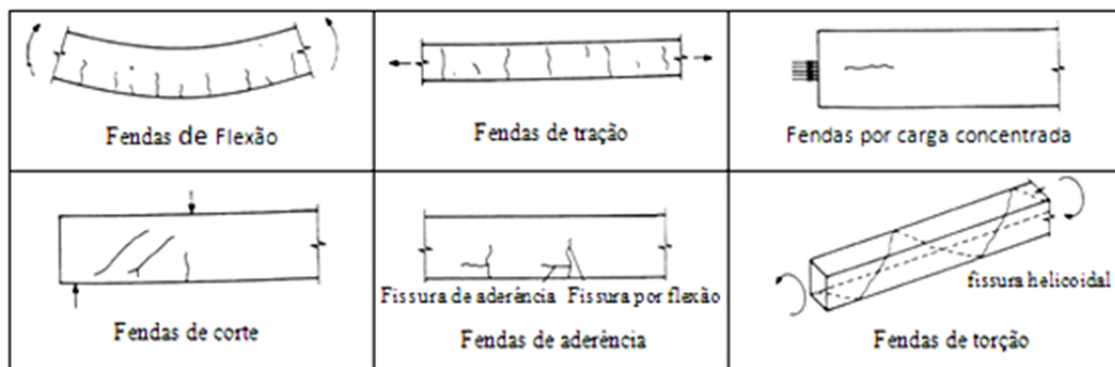


Figura 2.3 - Principais fissuras devido às cargas aplicadas (Coutinho, 2005).

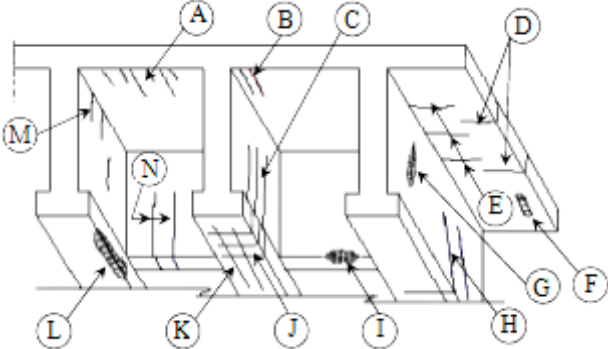
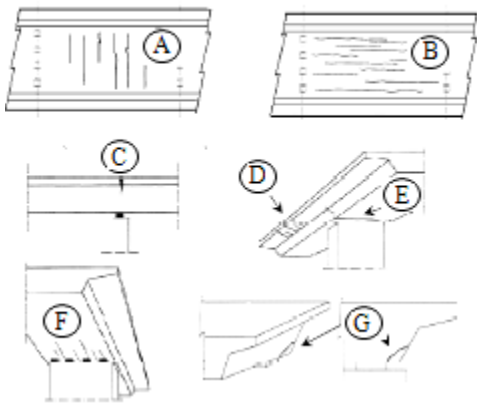
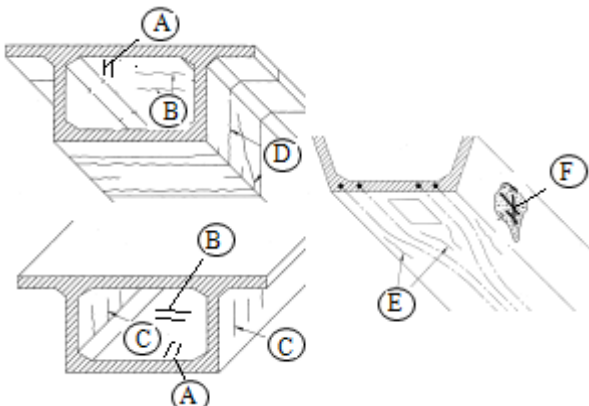
No caso de existirem deformações excessivas, acompanhadas por fissuração de excessiva abertura, convém corrigir a causa da fissuração através de um processo de reforço estrutural, antes de proceder a devida reparação das fissuras. Na Tabela 2.5, ilustra-se uma breve descrição dos diferentes tipos de fendilhação que surgem nas estruturas de betão armado, e algumas medidas preventivas e corretivas para cada situação exposta.

Tabela 2.5 - Manifestação patológica e respetivas causas (adaptado de Coutinho, 2005; Costa, 2009; Laner, 2001)

Tipo de fissura	Manifestação patológica	Locais de surgimento	Principais causas	Período de formação	Medidas preventivas e corretivas
Assentamento plástico	Fissura longitudinal ao longo da armadura	<ul style="list-style-type: none"> • Secções espessas • Topo dos pilares • Lajes de seção variável 	<ul style="list-style-type: none"> • Impedimento de assentamento das partículas do betão, pela cofragem ou armaduras 	Após a betonagem (10 minutos a 3 horas)	Cuidados na: <ul style="list-style-type: none"> • Colocação • Compactação • Cura • Proteção Revibração
Retração plástica	Por tensões capilares nos poros	<ul style="list-style-type: none"> • Lajes contínuas • Pavimentos 	Deficiente: <ul style="list-style-type: none"> • Cura • Proteção • Colocação • Compactação Armadura próxima da superfície Exsudação lenta	Após a betonagem (2a 4 horas)	
Contração térmica	Fissuras longas nas juntas de betonagem	<ul style="list-style-type: none"> • Paredes espessa • Lajes espessa 	<ul style="list-style-type: none"> • Calor excessivo • Gradiente térmico excessivo • Resfriamento rápido 	Após a betonagem (1dia a 3 semanas)	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir o calor ou isolar
Retração	Semelhantes às fendas flexão ou de tração	<ul style="list-style-type: none"> • Lajes • Parede 	<ul style="list-style-type: none"> • Juntas ineficazes • Retração excessiva • Cura deficiente 	Algumas semanas ou alguns meses após a construção	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir a água • Melhorar a cura
Corrosão da armadura	Fissuras ao longo das armaduras	<ul style="list-style-type: none"> • Pilares • Vigas 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão das armaduras • Reduzido recobrimento • Betão de baixa qualidade 	Vários meses ou anos após a construção	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminar as causas • Betão adequado
Cargas durante a utilização	Depende do tipo de estrutura e a das cargas aplicadas	<ul style="list-style-type: none"> • Vigas • Pilares • Lajes • Paredes 	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas aplicadas • Deficiente dimensionamento 	Depende do uso da estrutura	<ul style="list-style-type: none"> • Projeto cuidado

Na Tabela 2.6, apresenta-se as principais causas de fissuras, que habitualmente sucedem nos diferentes tipos de tabuleiros das pontes e viadutos de betão armado.

Tabela 2.6 - Principais causas de fissuração nas pontes de betão armado (adaptado de IQOA, 1996a, 1996b e 1997).

Pontes com tabuleiro vigado	
	<ul style="list-style-type: none"> A) Esforços de flexão transversal; B) Retração diferencial entre a laje e as vigas ou armadura transversal insuficiente; C) Flexão longitudinal normal ou excessiva; D) Flexão longitudinal na consola; E) Retração do betão da consola após a betonagem; F) Falta de estanquidade da cofragem; G) Falta de recobrimento das armaduras transversais; H) Insuficiência resistência aos esforços transversos (concentração de esforços da zona dos apoios); I) Falta de recobrimento das armaduras; J) Retração do betão causada pela cofragem; K) Insuficiência recobrimento das armaduras longitudinais; L) Insuficiência recobrimento das armaduras longitudinais, provocando descasque ao betão; M) Retração diferencial entre os dois betões; N) Esforços originados pelo encastramento da carlinga nas longarinas;
Pontes com tabuleiro em laje maciça	
<p>Fase inferior do tabuleiro</p> 	<ul style="list-style-type: none"> A) Falta de resistência à flexão longitudinal ou retração longitudinal do betão originada pelas cofragens; B) Falta de resistência à flexão transversal ou retração transversal do betão originada pelas cofragens; C) Falta de resistência à flexão longitudinal da laje sobre os apoios ou assentamento do apoio; D) Falta de resistência à flexão ou devido a retração do betão; E) Assentamentos do apoio; F) Insuficiência resistência à flexão transversal ou a um assentamento local do escoramento, ou devido a retração do betão; G) Insuficiência armadura face aos esforços que advém das reações dos apoios;
Pontes com tabuleiro em caixão	
	<ul style="list-style-type: none"> A) Esforços de flexão transversal excessivos; B) Esforços de flexão longitudinal excessivos; C) Exclusão do efeito gradiente térmico ou falta de resistência à flexão longitudinal; D) Retração longitudinal do betão entre a alma e a laje inferior; E) Desvio ou impulsos exercidos pelos cabos de pré-esforço; F) Vibração insuficiente ou betão de má qualidade.

2.4. Tipos de inspeções e prioridades

Relativamente a Portugal, foi a partir do colapso de uma ponte em 2001 (Ponte Hintze Ribeiro), no concelho de Castelo de Paiva, que levou à perda de vidas humanas, que a preocupação com a questão da durabilidade e do estado de conservação das pontes portuguesas se colocou. Neste sentido iniciou-se a realização de um grande número de inspeções às pontes nacionais, o que resultou numa considerável lista de pontes degradadas e com deficiências estruturais, carecidas de manutenção e intervenção (Fernandes; Lourenço, 2009).

As inspeções a realizar nas obras de arte são da responsabilidade das entidades proprietárias ou concessionários das obras, nomeadamente, os Donos de Obra (ex.: EP, REFER, Direção Regional de Estradas, algumas Câmaras Municipais) e alguns concessionários. Estes últimos são entidades adjudicadas pelos Donos de Obra para gerir as respetivas obras de arte, como por exemplo a Brisa, Autoestradas do Atlântico, Ascendi, Vialitoral, Viaexpresso, etc.

Segundo Costa, (2009) as inspeções devem ser realizadas periodicamente por técnicos especializados, de forma a garantir uma avaliação mais precisa e rigorosa. Estes profissionais devem visitar o local e observar detalhadamente a obra, e se a situação assim o exigir usarem equipamentos e técnicas apropriadas que permitam fazer um correto diagnóstico ao estado da estrutura.

As inspeções devem ser convenientemente preparadas antecipadamente para que não haja qualquer condicionamento que possa impedir ou dificultar a avaliação do estado das obras de arte. Assim, é recomendado ter como apoio os elementos do projeto (peças escritas e desenhadas), o historial da obra, caso efetuado os dados das inspeções anteriores e, por fim, a sua localização e condicionantes da sua periferia.

Ao longo da vida útil de uma ponte devem ser realizados diferentes tipos de inspeções, nomeadamente, a de rotina, a principal, a especial e a subaquáticas; esta última só é aplicável se existirem elementos estruturais submersos. Na Tabela 2.7, descrevem-se resumidamente os diversos tipos de inspeção que são utilizados em Portugal.

Tabela 2.7 - Tipos de inspeções utilizados em Portugal (adaptado de Costa, 2009; Poças, 2009).

Insp.	Discrição	Objetivos	Equipamentos
Rotina	São, geralmente, anuais e consta, basicamente, de exames visuais e registos dos principais elementos estruturais.	<ul style="list-style-type: none"> Classificação do estado de manutenção (Bom (B) ou Mau (M)); Deteção de patologias e ou defeitos superficiais que possa levar a futuras anomalias; Especificação de trabalhos de manutenção e custos associados; Antecipar as inspeções principais caso de anomalias mais complexas. 	<p>Limpeza Simples</p> <ul style="list-style-type: none"> Espátula Escova Canivete <p>Visão</p> <ul style="list-style-type: none"> Binoculo Lupa Lanterna
		Elaboração do relatório de inspeções	
Principal	São, geralmente, realizadas em ciclos de 5 anos, com a exceção de pontes mais degradadas ou de idade mais avançada que são realizadas em ciclos de 2 anos. Estas inspeções constam, basicamente, de exames visuais e registos mais detalhados às obras de arte.	<ul style="list-style-type: none"> Classificação do estado de manutenção (Bom (B) ou Mau (M)); Classificação do estado de conservação (0 a 5). (0 é melhor situação e 5 a pior situação); Especificações de reparação em períodos distintos consoante o estado de conservação; Identificação das anomalias mais gravosas que possam comprometer a durabilidade e segurança; Especificação de trabalhos de reparação e reforço estrutural, no caso de anomalias mais gravosas; Solicitação para inspeções especiais caso de incerteza em relação à causa, extensão ou gravidade da anomalia. 	<p>Medição simples</p> <ul style="list-style-type: none"> Termómetro Fita métrica Distanciómetro laser Réguas de escala Inclinómetro <p>Registo</p> <ul style="list-style-type: none"> Fichas de avaliação Máquina fotográfica Marcadores <p>Acesso</p> <ul style="list-style-type: none"> Veículo de inspeção Andaimes Escadas
		Elaboração do relatório de inspeções	
Especial	São realizadas por técnicos especializados e, são mais detalhadas em determinados elementos estruturais, nos quais, poderão ser realizados ensaios pouco destrutivos e não destrutivos “in situ” e em laboratório.	<ul style="list-style-type: none"> Verificação de anomalias ou situações diversas que possa por em causa a estabilidade da estrutura e segurança; Especificação de trabalhos de reparação e reforço estrutural. 	<p>Outros</p> <ul style="list-style-type: none"> Martelo Chave de fendas
		Elaboração do relatório de inspeções	<p>De ensaio:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pouco destrutivos Não destrutivos
Subaquática	Geralmente, são efetuadas por equipas de mergulho especializados e podem ser realizadas em ciclos de 5 anos.	<ul style="list-style-type: none"> Verificação de zonas críticas ou anomalias submersas na estrutura ou na zona envolvente. 	Mergulho Medição
		Elaboração do relatório de inspeções	

De forma resumida, e não exaustiva referem-se na Tabela 2.8, alguns métodos de ensaio e a sua aplicabilidade, que são mais usuais nas pontes e viadutos. A tabela apresenta os métodos de ensaio em 6 grupos principais, tais como: Visuais, Físicos-químicos, Electro-físicos, Mecânicos, Dinâmicos e Geométricos.

Tabela 2.8 - Ensaios mais usuais nas obras de arte (Andrey, 1987).

			ESTADOS DOS MATERIAIS																								
			Análise visual	Físico-químicos				Electro-físicos					Mecânico					Dinâmico			Geométrico						
Absorção	Análise microscópica	Análise química		Indicador	Radiografia	Ultra-sônicos	Indução magnética	Termografia	Potencial de sonda	Radar	Decapagem	Penetração	Esclerómetro	Arrancamento	Impulsos mecânicos	Carotagem	Extensómetro elétrico	Extensómetro mecânico	Dinamómetro	Nivelamento	Medidas geométricas	Medidas vibratórias					
	Betão	Homogeneidade					x	x					x														
		Permeabilidade		x	x												x										
		Carbonatação			x	x	x																				
		Cloretos				x	x																				
		Fissuração	x						x							x											
		Composição			x	x																					
		Resistência							x				x	x	x		x										
	Armaduras	Espessura do recobrimento						x		x		x															
		Afastamento das armaduras						x		x	x	x		x													
		Corrosão	x					x	x		x		x														
		Injeção das bainhas	x					x	x																		
		Rotura							x	x													x				
	Aspetto geral	Zonas desagregadas	x	x				x	x				x														
		Qualidade da superfície	x						x						x		x										
		Humidade	x								x	x	x					x									
	Deformações /deslocamentos	Flecha	x																		x	x					
		Deformações Locais	x																x			x					
		Deslocamentos relativos																				x					
	Fissuração	Localização	x					x	x																		
		Abertura																	x			x					
	Corrosão	Deteção	x							x		x		x													
		Amplitude										x		x													
	Tensão	Betão																x	x								
		Aço								x								x	x								
Pré-esforço									x								x	x	x			x					

2.5. Monitorização

A monitorização consiste na aquisição de registos, através de equipamentos eletrónicos e/ou mecânicos, que permitem avaliarem o estado da obra e detetar eventuais anomalias em tempo útil, de forma a poder intervir, previamente, certificando a segurança. A avaliação do comportamento estrutural de uma obra de arte, recorrendo a este sistema, é feita durante a fase de construção e de exploração, proporcionando uma avaliação mais rigorosa do estado de conservação, um auxílio na definição de estratégias de inspeção e de reparação, e um contributo para a redução de custos das atividades de inspeção e conservação.

A inclusão de sensores nas estruturas permite, não só detetar eventuais situações de acidente (ex. sismo, vento, movimentos de terra), como também permite acompanhar a evolução de vários parâmetros, tais como: deformações estruturais, temperaturas e humidades em vários locais, profundidades de carbonatação, resistividade e grau de humidade do betão, difusidade do cloro, absorção capilar e permeabilidade (Costa, 2009). Na tabela seguinte, descrevem-se os tipos de monitorização mais usuais que são utilizados nas pontes, juntamente com a sua aplicabilidade e seus equipamentos.

Tabela 2.9 - Tipos de monitorização (adaptado de Costa, 2009).

Tipos de monitorização	Avaliar/ prever	Equipamentos de monitorização
Deformação	<ul style="list-style-type: none">• Deformação do Betão• Deformação da Armadura	<ul style="list-style-type: none">• Extensómetro• Sensores de Bragg em fibra ótica
Deslocamento	<ul style="list-style-type: none">• Medição do deslocamento	<ul style="list-style-type: none">• Defletómetros• LVDTs (transdutores de deslocamentos)
	<ul style="list-style-type: none">• Comprimento do deslocamento	<ul style="list-style-type: none">• Blocos padrão
	<ul style="list-style-type: none">• Assentamentos de apoio	<ul style="list-style-type: none">• Fios de invar
	<ul style="list-style-type: none">• Abertura de fendas	<ul style="list-style-type: none">• Alongómetros analógicos ou digitais• Fissurómetros de corda vibrante
	<ul style="list-style-type: none">• Inclinação	<ul style="list-style-type: none">• Clinómetros
Forças	<ul style="list-style-type: none">• Cargas aplicadas à estrutura	<ul style="list-style-type: none">• Transdutores mecânicos• Transdutores elétricos• Transdutores pieze-elétricos
Corrosão	<ul style="list-style-type: none">• Corrosão das armaduras	<ul style="list-style-type: none">• Monicorr
Temperatura	<ul style="list-style-type: none">• Humidade• Constituição interna do maciço• Resistência do betão• Deterioração do betão	<ul style="list-style-type: none">• Termopares• RTD (detetor de temperatura resistivo e termístores)• Sensores de Bragg em fibra ótica
Pressão	<ul style="list-style-type: none">• Interior do maciço de solo• Interface do maciço de solo com a estrutura	<ul style="list-style-type: none">• Células de pressão• Sensores de Bragg em fibra ótica
Aceleração	<ul style="list-style-type: none">• Vibrações	<ul style="list-style-type: none">• Acelerómetro• Sensores de Bragg em fibra ótica

2.6. Considerações finais

A maior parte das pontes existentes em Portugal são de betão armado. Estas precisam de ser conservadas de modo a prolongar a sua vida útil. Assim sendo, neste capítulo mostrou-se a importância da manutenção de obras de arte.

De modo a proceder uma avaliação do estado de conservação e estabelecer ações de prevenção e reabilitação apresentaram-se as principais anomalias que podem surgir na vida de uma estrutura de betão armado, desde da fase de conceção até à fase de utilização. As anomalias apresentadas referem-se essencialmente à deterioração dos materiais e a problemas estruturais, nas quais as primeiras se desencadeiam com a presença de água e com o recobrimento reduzido enquanto as segundas, geralmente se desenvolvem devido a erros de projetos e a erros de construção.

Para cada fase, explicaram-se as medidas preventivas e corretivas a ter em consideração em futuras construções de obras de arte de betão armado, de forma a poder minimizar os trabalhos de reparação e reforço que geralmente têm custos associados. É de salientar que os trabalhos de manutenção periódicos são obrigatórios na vida de uma ponte, pois previnem a ocorrência e a evolução das patologias que podem implicar futuros trabalhos de reparação e reforço, cujos são geralmente, bem mais caros que os trabalhos de manutenção.

Porém, a resolução de determinados problemas estruturais nem sempre é uma tarefa fácil. Por vezes, a solução implica o conhecimento da causa que os proporcionou. Tendo isso em mente, na maioria das vezes é necessário recorrer programas de cálculo automático; ter sempre presente os elementos de projeto de execução; conhecer os dados sobre a periferia e seus condicionantes, e também as normas em vigor, como por exemplo o Regulamento de Segurança e Ações para edifícios e pontes (RSA 1983) e os Eurocódigos (EC).

CAPÍTULO 3

SOLUÇÕES E TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO

A reparação e o reforço de estruturas têm aumentado nos últimos. Como foi referido no segundo capítulo, a deterioração das pontes e viadutos resulta do seu envelhecimento, do projeto e/ou construção deficiente, da falta de manutenção e de causas acidentais. A necessidade de reparação e reforço depende essencialmente do estado em que se encontra a estrutura e das novas funções a que poderá estar submetida, designadamente do aumento da capacidade de carga devido ao aumento do tráfego.

Quando se efetua um projeto de reabilitação, além da importância de ter sempre em consideração os regulamentos, normas e especificações relativos às estruturas de betão armado, é fundamental conhecer o funcionamento da estrutura em anomalia, as características dos materiais que a constituem, as causas de deterioração, os métodos disponíveis de avaliação, e também as medidas de proteção e técnicas de reabilitação (Costa, 2009).

Segundo Correia (2011), as técnicas de reabilitação podem ser divididas em três grupos, particularmente: proteção, reparação e reforço. A proteção é no sentido de aumentar as defesas contra os agentes agressivos e reduzir as condições de degradação. Geralmente, esta proteção é por meio de impregnações, pinturas, revestimentos, membranas impermeabilizantes, selagem de juntas e ou por injeções. Por sua vez, a reparação, consiste em restaurar as características iniciais dos materiais, nomeadamente as fendas, vazios e zonas porosas e/ou zonas fragmentadas e desagregadas. Por último, o reforço consiste em aumentar a capacidade resistente, que usualmente pode ser aplicado por meio de betão projetado, encamisamento, adição de chapas e elementos em FRP, pré-esforço exterior ou por elementos antissísmicos.

Existem numerosas soluções e técnicas que podem ser adotadas para reabilitar uma obra de arte. Há que escolher a solução e técnica mais conveniente para cada tipo de problema. Quando se adota uma solução deve-se ter em atenção os seguintes aspetos, tais como: custos e disponibilidade dos materiais, equipamentos e mão-de-obra especializada e a sua eficácia de intervenção.

Independente da solução escolhida para reabilitar uma ponte, é necessário conhecer os seguintes princípios base de reparação do betão danificado (Costa, 2009):

- 1) Análise do problema e definição das estratégias de reforço e de reparação;
- 2) Seleção dos materiais e técnicas de aplicação;
- 3) Preparação da superfície deteriorada;
- 4) Reparação e proteção das armaduras;
- 5) Ligação entre os materiais de reparação e o betão primitivo.

3.1. Preparação da superfície degradada e proteção das armaduras

A eficácia da reparação e do reforço estrutural depende, essencialmente, da preparação da superfície degradada e da aderência do novo material ao betão existente. A preparação da superfície consiste em remover o betão deteriorado ou desagregado. A remoção ocorre consoante a dimensão da superfície a intervir, seja através de escarificação manual, para pequenas dimensões ou de difícil acesso, ou através de meios mecânicos (martelo elétrico ou pneumático, jato de areia ou de água, discos de desbaste) para as grandes superfícies (Costa, 2009).

Assim sendo, após a preparação da superfície procede-se à limpeza, que consiste na remoção de gorduras no betão, da corrosão das armaduras, poeiras e outras sujidades. Para proceder à limpeza existem várias técnicas, desde o lixamento e escovamento manual ou mecânico, os jatos de areia (por via seca ou húmida), os jatos de água ou ar comprimido, a aspiração e as lavagens com soluções ácidas ou alcalinas (Santos, 2008c).

No caso das armaduras com corrosão, deve-se inspecionar o estado de conservação e o grau da corrosão. Quando o diâmetro de varão corroído é inferior a 15% do diâmetro do varão inicial, a sua proteção pode consistir na aplicação de um sistema de pintura anticorrosivo ou de um revestimento epoxídico. No caso da perda de secção do varão, devido à corrosão ser superior a 15%, é recomendado colocar um novo varão com o mesmo diâmetro, estabelecendo o comprimento de amarração, de modo poder garantir uma boa ligação entre armaduras (Riper, 2000).

Em relação ao processo de aplicação do novo betão, este deve preencher todos os espaços, de modo a evitar bolsas de ar. A cura deve ser adequada, seja por meio de molhagem, por meio de cofragem saturada ou ainda por adição de um aditivo de cura (Santos, 2008c). Existem vários tipos de betões e argamassas com características distintas para cada tipo de trabalho de reparação e de reforço estrutural, no entanto deve-se seguir as instruções e aplicações dos fabricantes de cada material para as situações específicas.

Os produtos de reparação podem ser classificados em três grupos: produtos à base de resina (Ligantes sintéticos), produtos modificados por polímeros e produtos à base de ligantes hidráulicos (cimento) (Costa, 2009; Santos, 2008c). Na Tabela 3.1, apresenta-se uma breve descrição das vantagens e desvantagens dos betões à base de resinas e dos betões modificados por polímeros, comparados com os betões normais (base de ligantes hidráulicos).

Tabela 3.1 - Desvantagens e vantagens comparados aos betões “normais” (adaptado de Ferreira, 2001; Santos, 2008c).

	Desvantagens comparados aos betões “normais”	Vantagens comparados aos betões “normais”
Betões à base de resinas	<ul style="list-style-type: none"> • Não fornece proteção à penetração de dióxido de carbono e à carbonatação do betão armado sob o encamisamento; • Módulo de elasticidade inferior; • Baixa resistência ao calor (>100 °C) e humidade; • Normalmente, não tem uma boa aderência ao betão já existente, necessitando sobre o betão existente, uma camada de resina pura; • Reações fortemente exotérmicas, que em tempos quentes, estão sujeitas possíveis retrações importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidade baixa; • Melhor resistência a ataques químicos e a outros agentes corrosivos; • Melhor resistência à abrasão; • Melhor resistência aos ciclos gelo/degelo.
Betões modificados por polímeros	<ul style="list-style-type: none"> • Mais sensível a elevadas temperaturas (ação do fogo); • Menor resistência à carbonatação do betão armado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Melhor trabalhabilidade; • Influencia na redução da retração do betão; • Melhor aderência ao betão já existente; • Atua como agente de cura; • Resistência a alguns ataques químicos.

Na Figura 3.1, ilustra-se um possível procedimento de reparação de uma superfície contaminada pela ação dos cloretos e pela carbonatação.

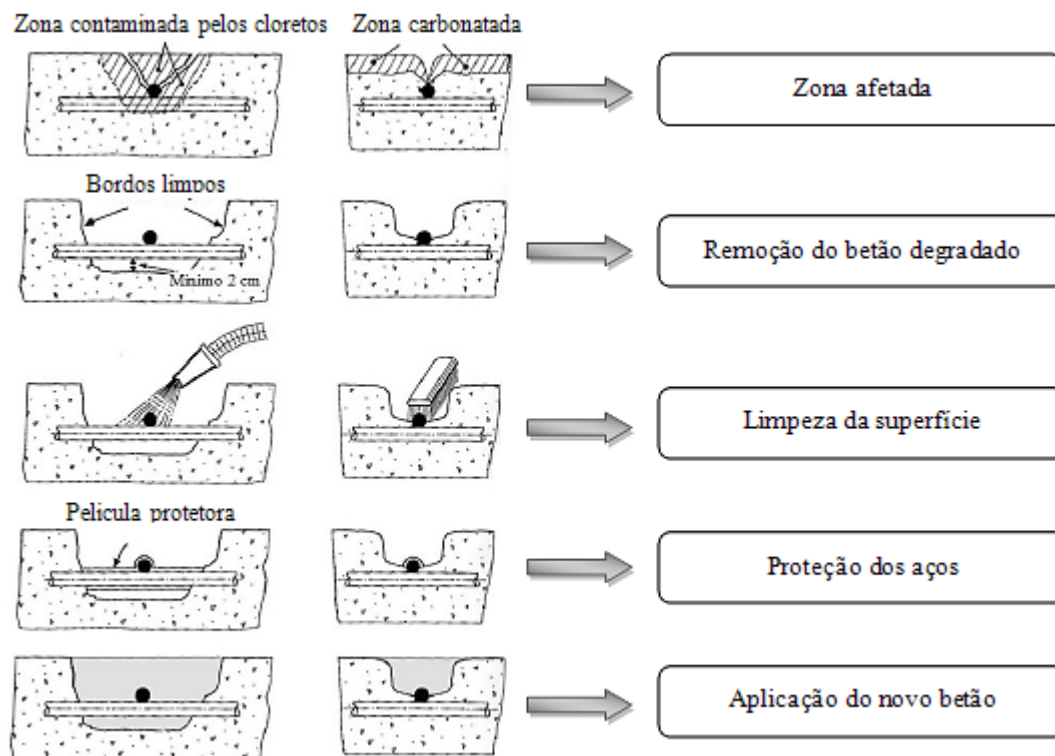


Figura 3.1 - Diversas etapas de reparação de uma superfície de betão (adaptado de Costa, 2009)

3.2. Proteção catódica

Antes de referir no que consiste a proteção catódica, convém primeiramente, entender o mecanismo de corrosão que incide sobre o aço no meio húmido. Após a destruição da camada de passivação das armaduras (ver Seção: 2.1.2), a origem da corrosão é provocada por uma corrente elétrica entre as áreas anódicas e catódicas, devido a um fluxo de eletrões.

No ânodo ocorre a dissolução do ferro, ou seja, a formação de iões Fe^{2+} com a libertação de eletrões. Estes eletrões deslocam-se pela armadura até ao cátodo, onde reagem com o oxigénio (O_2) e a água (H_2O) provenientes do meio exterior, formando iões hidróxidos (OH^-). Por fim, estes iões deslocam-se através do eletrólito (betão) até ao ânodo, cujo reagem com os iões ferro (Fe^{2+}), desencadeando o fenómeno designado por corrosão (Coutinho, 2005). De uma forma simplificada ilustra-se na Figura 3.2, o mecanismo de corrosão no meio húmido.

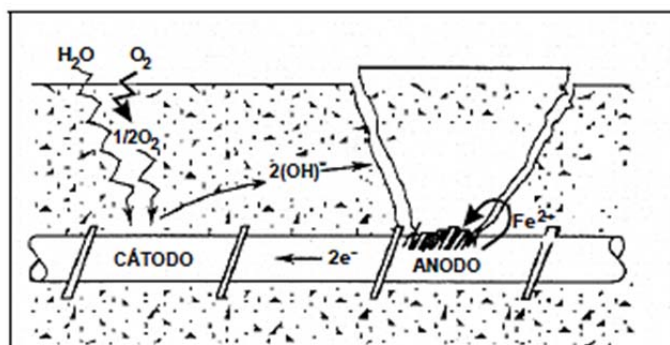


Figura 3.2 - Processo catódico e anódico na corrosão (Coutinho, 2005)

A proteção catódica é uma das técnicas eletroquímicas mais utilizadas para o controlo do processo de corrosão, principalmente devido à contaminação do betão por ação dos cloretos e sulfatos, oriundos de ambientes marítimos. Nos últimos anos, a proteção catódica tem sido instalada durante a fase de construção de algumas estruturas de forma a prevenir a corrosão.

O principal objetivo da proteção catódica como técnica de reabilitação é reduzir ou eliminar a corrosão das armaduras, tornando o potencial elétrico do aço mais negativo, o que elimina as áreas anódicas e estabelece somente as áreas catódicas. O abaixamento do potencial elétrico do aço é obtido através da passagem duma corrente contínua de baixa intensidade a qual é transferida do betão para o aço (Lourenço, 2007). A corrente contínua, geralmente, é obtida através de duas formas, seja através da inserção de ânodos de sacrifício nas armaduras após a limpeza das mesmas ou em furos realizados no próprio betão (ordem de 0,2 a 2 mA/m²) (Figura 3.3), ou através de ânodos de corrente imposta através de uma fonte externa de alimentação (ordem de 5 a 20 mA/m²) (Correia, 2011).



Figura 3.3 - Proteção catódica por meio de ânodos de sacrifício de zinco (Costa, 2012).

Relativamente aos ânodos de corrente imposta, estes são os mais utilizados nas estruturas de betão armado. Além de eliminar ou reduzir a corrosão, esta técnica restaura a passividade das armaduras e elimina os agentes agressores designadamente os cloretos e os sulfatos. Numa outra abordagem, os iões negativos (cloretos e sulfatos) são repelidos pelo cátodo (armaduras), enquanto os iões positivos

(Fe^{2+}) são repelidos pelo ânodo e consequentemente resulta a produção de íons hidróxido (OH^-) que por sua vez, aumenta a alcalinidade do betão (Lourenço, 2007).

O tipo de ânodos a utilizar varia conforme o tipo de estrutura, o elemento a proteger, as condições ambientais que os elementos estão expostos e também, do tempo de vida útil estabelecido. Os ânodos de corrente imposta são usualmente, de ferro-silício ou de titânio revestido com óxidos de metais nobres (Ti/MMO) (Figura 3.4), que se apresentam em forma tubular, rede, malha ou de placas, quando fixados superficialmente ao betão ou em roços pouco profundos, são protegidos por argamassa de recobrimento (Lourenço, 2007).

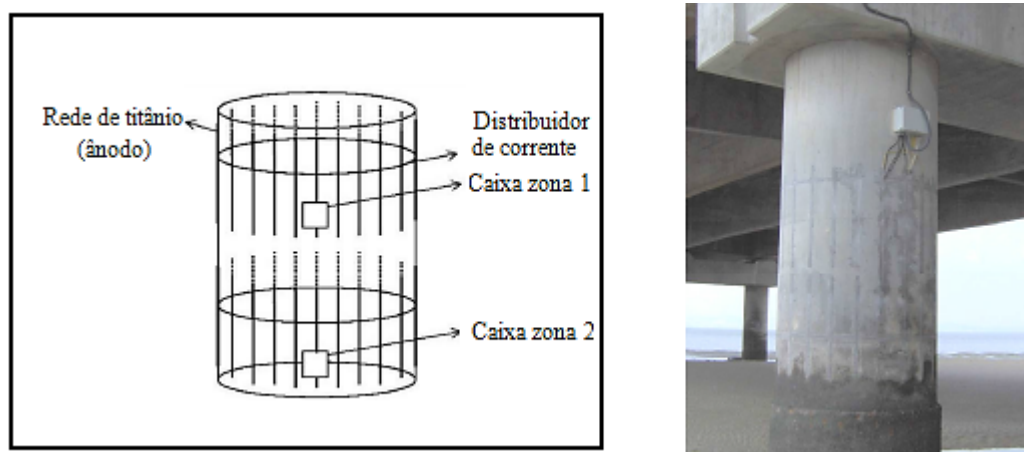


Figura 3.4 - Prevenção catódica por meio de corrente impressa (Costa, 2012)

A seção anterior referiu-se à reparação convencional das armaduras com corrosão, no entanto segundo, Lourenço (2007), apresenta-se as vantagens da proteção catódica referente à reparação tradicional, particularmente:

- Maior eficiência na prevenção à corrosão;
- Maior durabilidade da estrutura;
- Custos mais baixos, associados a longo prazo;
- Menor tempo de execução;
- Menor enfraquecimento estrutural.

3.3. Reparação de fendas

A fissuração que ocorre nas estruturas de betão armado, além de poder ser um indício de falta de capacidade resistente, faz com que estas fiquem vulneráveis ao ingresso de agentes químicos (oxigénio, dióxido de carbono, humidade e íons agressivos) resultando na corrosão das armaduras e na lixiviação da pasta de cimento (Ribeiro, 2000)

Antes de efetuar a reparação das fissuras nas obras de arte, convém analisar e corrigir as causas que as proporcionou, pois a probabilidade do betão voltar a fendilhar no mesmo local ou próximo deste, é muito favorável. Segundo Correia (2011), as fendas podem ser consideradas ativas ou inativas. As ativas são aquelas que possuam grandes amplitudes de movimento, enquanto as inativas possuam movimentos praticamente nulos. Para as fendas ativas, o material de enchimento deve ser elástico ou plástico (resinas acrílicas ou de poliuretano), enquanto para fendas inativas, a reparação é geralmente com injeção de resina epóxida.

A escolha do material de reparação depende, essencialmente, da abertura das fendas. As resinas epóxidas são mais usuais para a reparação de fendas de pequena ou de média abertura. Em alternativa para as fendas de maior abertura, a reparação é feita, usualmente, com calda de cimento (Correia, 2011). Na Tabela 3.2, descrevem-se algumas vantagens e desvantagens da resina epóxida, enquanto na Tabela 3.3, pretende-se demonstrar as várias etapas necessárias à reparação da fissuração por meio de injeção com resina epóxida.

Tabela 3.2 - Desvantagens e vantagens da resina epóxida (adaptado de Correia, 2011)

Desvantagens	Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Mau comportamento para temperaturas elevadas; • Não adere a superfícies húmidas (resinas epóxidas correntes); • Mau desempenho a 15% da tensão de rotura para tensões permanentes (fluência, viscoelasticidade). 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa trabalhabilidade; • Cura rápida; • Retração inexistente; • Resistência aos agentes químicos; • Impermeabilidade; • Boa resistência à tração; • Ótima aderência às superfícies de betão.

Tabela 3.3 - Procedimento de reparação por meio de injeção com resina epóxida (adaptado de Correia, 2011; Sika, 2012a)

Procedimento de aplicação	
	<ol style="list-style-type: none"> 1) Remoção do betão degradado na zona da fenda *; 2) Alargamento da abertura superficial (em V) em todo o comprimento da fenda (martelo pneumático, coroas diamantadas, escopro) *; 3) Limpeza (jacto de água, jacto de ar comprimido) *; 4) Furação da superfície ao longo da fenda; 5) Aplicação de tubos metálicos ou plástico e da mangueira de injeção; 6) Selagem da superfície da fenda (para o material de reparação não sair durante operação de injeção); 7) Injeção do material de reparação; 8) Remoção da selagem superficial da fissura e acabamento final.

*(1-3) Dispensável quando o betão apresentar boas condições

3.4. Reparação ou reforço com betão projetado

Esta técnica é usualmente utilizada na reparação e reforço de obras de arte. Trata-se de um processo mecânico de aplicação de betão sob pressão por projeção, de uma forma contínua sem a necessidade de cofragem. Esta técnica é mais propícia para os casos em que se pretende aumentar o recobrimento ou substituir o betão degradado, quando se necessita de grandes volumes de betão para substituir e/ou de zonas com dificuldades de colocação de cofragens (Costa, 2009).

O betão a projetar deve possuir as características idênticas ao betão existente, deve ser de base cimentícia, conter agregados de tamanho reduzido e possuir uma baixa retração (Costa, 2009). A ótima compactação e baixa relação água/cimento certificam as boas características de resistência (Santos, 2008c; Pereira, 2012). Segundo Correia (2011), a aplicação do betão por projeção deve ser através de camadas finas (25 mm a 75 mm) e a um 1,0 m de distância de forma perpendicular, pois este último minimiza o efeito de ricochete do betão.

Na projeção do betão, existem essencialmente duas técnicas de aplicação, uma por via seca e outra por via húmida. Na via seca, os agregados húmidos e o cimento são misturados e lançados por ar comprimido através de uma pistola de projeção, onde lhes é acrescentado água sob pressão. Na via húmida os elementos que constituem o betão nomeadamente a água, o cimento, e os agregados são misturados previamente e transportados por ar comprimido até ao canhão de projeção onde é aplicado ar comprimido para realizar a projeção (Santos, 2008c).

3.5. Reparação ou reforço por encamisamento com betão armado

A reparação ou reforço recorrendo ao encamisamento com betão armado consiste no aumento da dimensão dos elementos a reforçar, através da adição de armadura suplementar e de uma camada de betão, que envolve toda ou parcial a secção a reforçar (Costa, 2009).

O encamisamento com betão armado (Figura 3.5), além de reforçar a estrutura garante maior proteção ao fogo e à corrosão das armaduras. Por outro lado, apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente o tempo necessário para que o betão ganhar resistência e a possibilidade de ocorrer fissuração, consequência da retração, devido a ligação do betão velho com o betão novo (Santos, 2008c). No caso de superfícies extensas é recomendado a utilização de armadura de pele e uma cura adequada, por meio de repetidas molhagens, de maneira a minimizar o risco de fissuração por retração (Costa, 2009).



Figura 3.5 - Reforço por encamisamento com betão armado (Correia, 2011).

3.6. Reforço por colagem de chapas metálicas

O reforço de uma estrutura com chapas metálicas é uma técnica muito eficiente, desde que seja bem executada. Este reforço é fixado ao betão através de resina epóxi, adicionando ou não buchas metálicas. Antes de proceder ao reforço é necessário preparar a superfície de betão a reforçar e as chapas metálicas, de forma a garantir uma boa ligação entre o betão e as chapas (Pereira, 2012; Santos, 2008c).

Relativamente à resina, esta poderá ser aplicada por espalhamento ou por injeção. Contudo, além de fixar as chapas aos elementos a reforçar, tem como função selar pequenas e médias fissuras, de maneira a proteger as armaduras das ações ambientais (Costa, 2009).

Esta técnica de reforço é de rápida execução, e tem com função resistir à flexão, ao corte e à torção. Contudo, esta técnica é mais propícia para o reforço de pilares, vigas (Figura 3.6), lajes, nós viga-pilar e nós pilar-fundação (Santos, 2008c). De uma forma geral, os inconvenientes desta técnica são que necessita de pessoal qualificado e especializado para as fixarem; existe a possibilidade de ocorrer corrosão no aço, mais precisamente na zona interface do betão e chapa; a dificuldade de manobração; e a necessidade de suportes provisórios durante o tempo de cura da resina epóxi (Costa, 2009; Pereira, 2012).



Figura 3.6 - Reforço de uma viga com chapas metálicas (Pereira, 2012).

3.7. Reforço com polímeros reforçados com fibras

Uma das técnicas de reforço estrutural que se aplica numa obra de arte é a utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP). Esta técnica de reforço apresenta numerosas vantagens, nomeadamente: a sua elevada resistência ao corte, flexão, tração, oxidação, o seu peso reduzido, bom comportamento ao choque e fadiga e, fácil manuseamento (Figura 3.7), (Correia, 2011). Em contrapartida, existem alguns constrangimentos designadamente: o elevado custo, a baixa resistência ao fogo e aos raios ultravioletas, a elevada toxicidade, a necessidade de pessoal qualificado e um controlo de qualidade muito rigoroso (Costa 2009; Pereira 2012).

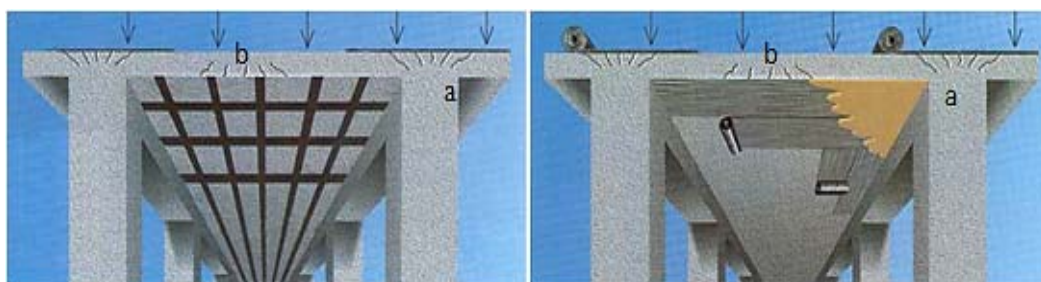


Figura 3.7 - Reforço em lajes através da aplicação de laminados e mantas: a) resistência ao corte; b) resistência à flexão (adaptado de Correia, 2011).

Os sistemas FRP são constituídos por resinas e fibras, nos quais estas últimas podem ser de vidro, de aramida ou de carbono. De acordo a Juvandes (1999) e Correia (2011), as fibras apresentam uma grande resistência à tração axial e um elevado módulo de elasticidade, no entanto são as fibras de carbono (CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) que tem maiores potencialidades, relativamente às fibras de aramida (AFRP - *Aramid Fiber Reinforced Polymer*) e às de vidro (GFRP - *Glass Fiber Reinforced Polymer*), podendo ser demonstrando através da Figura 3.8 e Tabela 3.4.

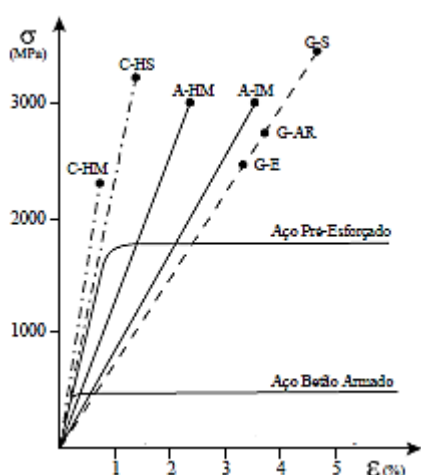


Figura 3.8 - Comportamento à tração de fibras e metais (Juvandes, 1999).

Tabela 3.4 - Características principais das fibras e metais (adaptado de Juvandes, 1999; Santos, 2008c; Neves, 2012).

Material		Mod. Elast. (Gpa)	Res. Tração (Mpa)	Densidade (Kg/m³)
Betão		20-40	1-3	2400
Aço normal	Varões	190-200	240-690	7800
Aço de Pré-esforço	Cabos	190-200	1770-1860	7800
	Barras	170	1030	7800
Fibras	Vidro (G)	74	3500	1200-2100
	Carbono (C)	230-640	2940-4900	1500-1600
	Aramid (A)	74-111	3500	1200-1500

Geralmente, o sistema FRP pode ser executado por colagem exterior, denominado por EBR (*Externally Bonded reinforcement*) ou por colagem num rasgo designado por NSR (*Near-Surface Mounted reinforcement*) com a hipótese, ou não, de introdução de pré-esforço ao material (Figura 3.9). A escolha da técnica de reforço a aplicar depende do tipo de reforço que se pretende executar, seja à flexão, ao corte ou por confinamento (Juvandes, 2011).



Figura 3.9 - Reforço de elementos de betão através das duas técnicas de colagem de FRP: a) técnica EBR com laminados e mantas; b) técnica NSR com laminados (Juvandes, 2011).

O encamisamento com compósitos FRP é uma técnica bastante eficaz no reforço estrutural, face à ocorrência de um sismo com determinada intensidade. Esta técnica é geralmente realizada com tecidos ou mantas de fibras de carbono, coladas por meio de resina epóxi em torno do elemento a confinar. Este reforço permite aumentar a resistência ao corte e a ductilidade dos elementos, principalmente dos pilares (Figura 3.10), que são os que mobilizam os esforços mais elevados (Costa, 2009; Pereira, 2012).



Figura 3.10 - Confinamento dos pilares com mantas de fibras de carbono (Pereira, 2012).

Na Tabela 3.5, ilustra-se as várias etapas necessárias para proceder o reforço com mantas de fibras de carbono (CFRP) numa superfície de betão.

Tabela 3.5 - Procedimento de reforço por meio de mantas de fibras de carbono (adaptado de Rogertec, 2012; Correia, 2011; Pereira, 2012)

Processo de aplicação									
 <p>1º Preparação do substrato</p>	<p>Reparação do betão deteriorado (caso necessário)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Remoção de betão danificado; • Tratamento das armaduras e eventual reforço das mesmas; • Reposição de secções em betão com argamassas de reparação ou microbetão. <p>Reparação de fissuras (caso necessário)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Selagem e injeção de fissuras com resina epóxida. <p>Preparação dos cantos e arestas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arredondamento dos cantos <p>Preparação da superfície</p> <ul style="list-style-type: none"> • Remoção de poeira, sujidade, e outros materiais que possam prejudicar a aderência, por exemplo, com o recurso a um jacto de ar; 								
 <p>2º Aplicação do primário</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar argamassa de regularização; • Aplicar resina epóxida (primário), para assegurar uma superfície plana e regularizada; 								
 <p>3º Aplicação da manta</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Espalhar uma resina epóxi na superfície (após a secagem do primário); • Espalhar resina epóxi na manta; • Colocar a manta de FRP sobre a superfície a reforçar; • Aplicar uma última camada de resina epóxi de modo a garantir a total impregnação da manta; 								
 <p>4º Aplicação do revestimento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pintura de proteção contra o fogo e os raios ultravioletas. 								
	<table border="0"> <tr> <td>1) Pintura protetora;</td><td>5) Epóxi de regularização;</td></tr> <tr> <td>2) 2ª Demão de resina epóxi;</td><td>6) Argamassa de regularização;</td></tr> <tr> <td>3) Manta de fibras de carbono;</td><td>7) Substrato de betão a ser reforçado.</td></tr> <tr> <td>4) 1ª Demão de resina epóxi;</td><td></td></tr> </table>	1) Pintura protetora;	5) Epóxi de regularização;	2) 2ª Demão de resina epóxi;	6) Argamassa de regularização;	3) Manta de fibras de carbono;	7) Substrato de betão a ser reforçado.	4) 1ª Demão de resina epóxi;	
1) Pintura protetora;	5) Epóxi de regularização;								
2) 2ª Demão de resina epóxi;	6) Argamassa de regularização;								
3) Manta de fibras de carbono;	7) Substrato de betão a ser reforçado.								
4) 1ª Demão de resina epóxi;									

3.8. Reforço pela incorporação de pré-esforço exterior

Uma das técnicas de reforço estrutural que se aplica nas pontes e viadutos é a técnica pela incorporação de pré-esforço adicional, que normalmente é utilizado pelo lado exterior. O reforço com esta técnica pode ser por meio de cordões, barras de alta resistência, por laminados (Figura 3.11) ou cordões à base de fibras, designados por FRP (*Fiber Reinforcement Polymer*).



Figura 3.11 - Reforço de pontes por meio de pré-esforço exterior: a) Cordões de alta resistência; b) Barras de alta resistência; c) Laminados de carbono (adaptado de Neves, 2012; Motavalli e Czaderski, 2007).

O pré-esforço exterior (Figura 3.12), além de ser considerado uma técnica de rápida de execução, apresenta algumas vantagens estruturais, nomeadamente, o aumento da capacidade resistente à flexão e ao corte, a correção do comportamento de serviço (flechas e fissuração excessiva) e a possibilidade de modificar o comportamento estrutural (Costa, 2009; Correia, 2011). Os únicos constrangimentos desta técnica, além do seu elevado custo associado às bainhas e suas ligações e desviadores, incidem sobre a necessidade, de mão-de-obra especializada, de elementos de ancoragem, de reforço devido à aplicação do pré-esforço (concentração de tensões) e de proteção para os elementos pré-esforçados devido ao fogo (para o caso dos laminados de carbono) e à corrosão (com a exceção dos laminados) (Correia, 2011).

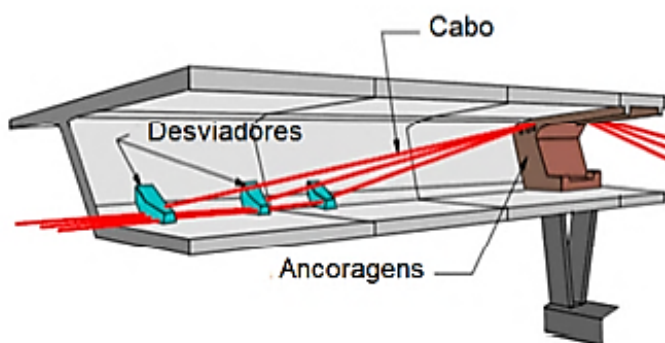


Figura 3.12 - Disposição dos cabos de pré-esforço exterior (Neves, 2012).

3.8.1. Pré-esforço exterior com cabos de alta resistência

De acordo com Neves (2012), o pré-esforço exterior com cabos de alta resistência tem alguns benefícios em relação aos cabos pré-esforçados incorporados no interior da estrutura. O pré-esforço exterior permite a possibilidade de ser inspecionado, de retensionar ou destensionar e a possibilidade de substituição. As desvantagens que subsistem nos cabos exteriores face aos incorporados, é que têm traçados exclusivamente retos, com exceção das zonas de desvio que transmitem forças devido aplicação do pré-esforço, enquanto os segundos têm um traçado parabólico, cujo no ponto de vista estrutural são mais eficazes.

Os cabos de pré-esforço podem ser compostos por um cordão (monocordão) ou vários cordões. Cada cordão é composto por fios de aço de alta resistência. Os cordões, por sua vez, são ancorados a maciços de betão, por intermédio de ancoragens. Estes cordões, além de poderem ser auto embainhados com galvanização, graxa ou cera, são, normalmente revestidos por uma bainha de plástico ou de metal, de maneira a poder inibir a corrosão. Por outro lado, no caso da utilização de bainhas, o vazio deixado entre as bainhas e os cabos, é injetado com um material aderente (calda de cimento) ou por material não aderente (produtos flexíveis: graxa ou ceras petrolíferas) (Figura 3.13) (Neves, 2012).

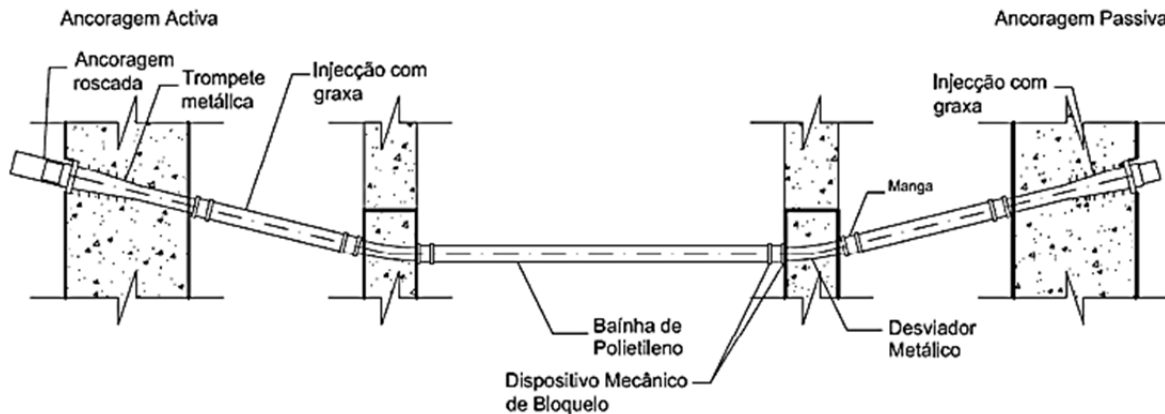


Figura 3.13 - Sistema não aderente com produto flexível (Neves, 2012).

Para os cabos de alta resistência existem dois tipos de pré-esforço exterior, o aderente e o não aderente. O primeiro é um sistema que funciona por aderência, cuja uma das particularidades é a utilização da calda de cimento. Como este sistema não permite a variação do comprimento dos cordões sem a fissuração do material envolvente, torna-se impraticável o retensionamento e, caso seja necessário a substituição dos cabos, será na sua totalidade, utilizando meios destrutivos. Em relação ao não aderente, é possível o retensionamento dos cabos dentro das bainhas como também a possibilidade

de os substituir (Neves, 2012). Na Tabela 3.6, apresentam-se vários casos possíveis de cada sistema, o aderente e o não aderente.

Tabela 3.6 - Sistemas de pré-esforço exterior com cordões (Neves, 2012)

Aderência	Bainha coletiva	Injeção com calda de cimento	Injeção de graxa ou cera	Aço desprotegido	Aço auto embainhado	Substituição	Retensionamento
Aderência	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não
Aderência	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim (a)	Não
Não aderente	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim (b)	Sim (b)
Não aderente	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Não aderente	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim (b)	Sim (b)

(a) – O sistema necessita de dupla trompette nas ancoragens para ser substituível

(b) – Depende do tipo de aço auto embainhado

As ancoragens têm um papel de extrema importância, pois possibilitam o tensionamento dos cabos, e a transmissão das forças de pré-esforço à estrutura. Para os cabos, existem três tipos de ancoragens, ativas, passivas e de continuidade. As passivas são aquelas que estão incorporadas no betão sem aplicação direta da tensão, as ativas são aquelas em que é aplicado o tensionamento, e por último, as de continuidade, promovem a continuação dos cabos, sendo elas ativas e passivas em simultâneo (Neves, 2012). Existe uma enorme variedade de tipos de ancoragem, pois estes variam consoante a quantidade e o diâmetro dos cabos de pré-esforço a utilizar, e do próprio molde (Figura 3.14).

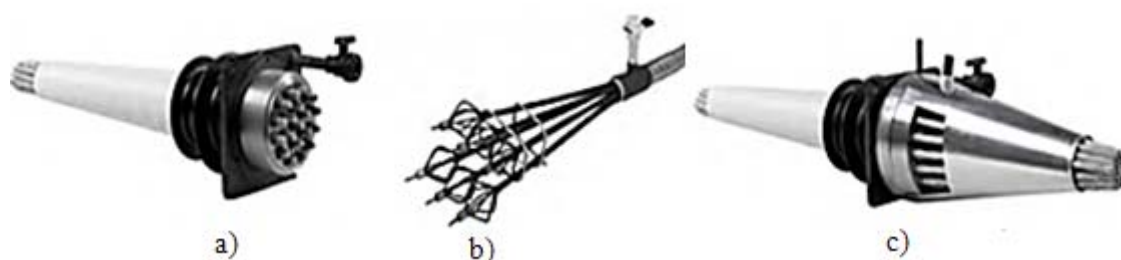


Figura 3.14 - Tipos de ancoragens de multicordão: a) Ativa (MTAI system); b) Passiva (ST dead end system); c) Continuidade (MTG coupler system) (Tensacciai, 2012).

A aplicação de tensão de pré-esforço consiste em puxar os cabos com uma determinada força (de acordo ao projeto). Esta força é aplicada através de um macaco hidráulico com a colaboração de uma bomba de óleo, cujo este macaco é seleccionado conforme a quantidade e diâmetro dos cabos a tensionar. Na Tabela 3.7, expõem-se para cada sistema o procedimento de aplicação do pré-esforço exterior.

Tabela 3.7 – Procedimento de aplicação do pré-esforço exterior para cada sistema (adaptado de Neves, 2012)

Pré-esforço exterior não aderente	Pré-esforço exterior aderente
(1) Pré-montagem das bainhas.	(1) Montagem das bainhas.
(2) Enfiamento dos cordões, um a um, com imediata pré-tensão (baixo nível)	(2) Enfiamento dos cordões.
(3) Fecho das bainhas.	(3) Tensionamento dos cabos.
(4) Injeção do material.	(4) Injeção do material
(5) Tensionamento final dos cabos	

3.8.2. Pré-esforço exterior com barras

Outro meio de reforço é a utilização de barras de aço de alta resistência. Esta técnica é mais propícia para o reforço localizado, nomeadamente para vigas e lajes, nas zonas dos momentos negativos e/ou positivos. Esta técnica também é, usualmente, utilizada como reforço dos maciços de ancoragem dos cabos de pré-esforço de modo a reforçar o maciço e utilizar menos armadura de reforço.

O sistema de reforço com barras é semelhante ao dos cordões, diferindo somente nas ancoragens e do sistema. Consoante o material de injeção o sistema pode ser aderente ou não aderente. No caso não aderente é permitido, o retensionamento do aço, bem como a possível substituição, desde que o material de injeção seja flexível, (injeção com cera ou graxa). Enquanto no sistema aderente, não é permitido o retensionamento do aço nem mesmo a sua substituição, pois o material de injeção é rígido, designadamente com injeção com calda de cimento (Figura 3.15) (Neves, 2012).

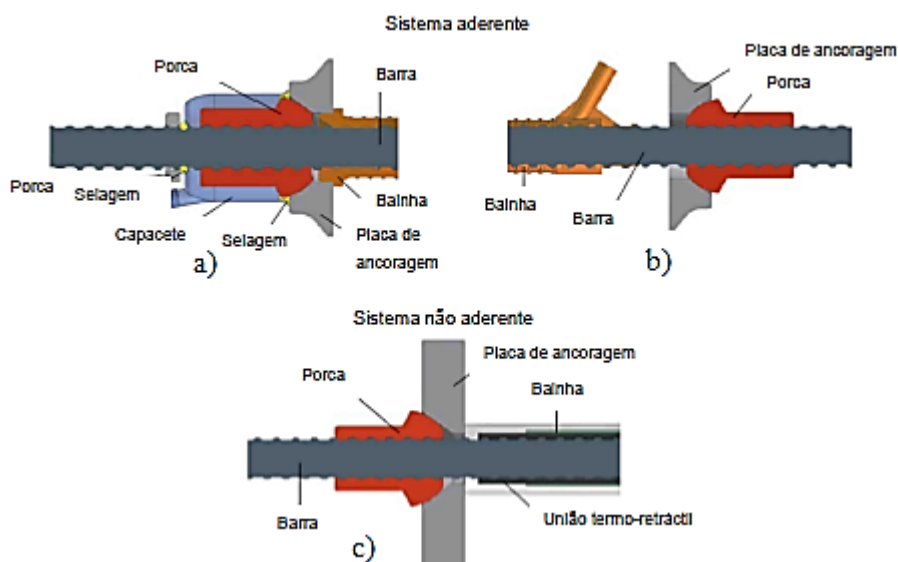


Figura 3.15 - Sistema aderente e não aderente: a) Ancoragem ativa; b) Ancoragem passiva; c) Ancoragem ativa e passiva (adaptado de DSI, 2009)

3.8.3. Pré-esforço exterior com fibras

O sistema de pré-esforço exterior com fibras é uma técnica mais recente, e apesar de ser muito dispendiosa ainda se encontra em fase de investigação (Neves, 2012). Segundo França (2007), as desvantagens desta técnica no que toca ao custo podem ser compensadas através da redução dos custos de execução e pela resolução dos problemas a partir do fortalecimento, comparado com outras técnicas de reforço. O pré-esforço exterior com fibras é semelhante aos cordões e barras de alta resistência, são fixados nas extremidades por ancoragens (Figura 3.16 e Figura 3.17) e são tensionados por macacos hidráulicos (França, 2007; Neves, 2012).



Figura 3.16 - Ancoragem passiva e ativa do tipo LEOBA SLC II (SIKA, 2012b).



Figura 3.17 - Ancoragem passiva e ativa do tipo StressHead (SIKA, 2012b).

O reforço com laminados, designados por FRP, é idêntico aos reforços com cabos e barras. Existem dois tipos, o aderente e o não aderente. A única diferença de ambos é devido à existência de resina epóxi no aderente. Ou seja, para o caso aderente, o laminado é colado à estrutura por intermédio de resina epóxi que funciona como um todo, enquanto o não aderente, não é colado à estrutura mas em compensação, possui uma sela de desvio (Figura 3.18) (Neves, 2012).

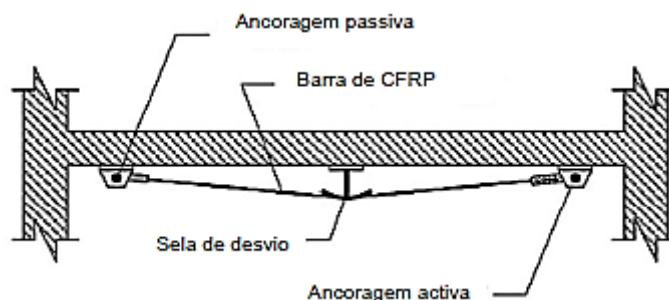


Figura 3.18 - Sistema não aderente com laminados de CFRP (Neves, 2012).

3.9. Impermeabilização de tabuleiros

A maior parte dos problemas que surgem nas pontes e viadutos são relacionados com a degradação dos materiais devido a ação da água por meio de infiltração. Habitualmente, esta infiltração resulta da inexistência ou incorreta impermeabilização e da rede de drenagem.

Devido à ocorrência de precipitação, as águas que são escoadas poderão conter elementos químicos que agredem o betão, desencadeando reações químicas no seu interior (ex.: carbonatação, reações sulfáticas, reações ácidas), provocando a degradação do betão e a corrosão das armaduras (Ramos, 2009). A aplicação de sistemas de impermeabilização nos tabuleiros de pontes e viadutos é de extrema importância, contribuindo não só para a durabilidade das estruturas como também na redução dos custos de manutenção e reabilitação (Figura 3.19).

Uma outra característica importante, no que se refere à necessidade de impermeabilização, é a possibilidade de ocorrências de fissuração na laje do tabuleiro, que possibilita a entrada de água; esta fissuração ocorre devido ao diferente coeficiente de dilatação térmica da camada betuminosa e da camada de betão (laje) (Ramos, 2009).

De uma forma generalizada, Ramos (2009), indica que o sistema de impermeabilização promove a durabilidade de uma estrutura através dos seguintes aspetos:




- Proteção efetiva do betão, evitando fenómenos de carbonatação;
- Controlo superficial das águas escoadas, controlando o seu encaminhamento e recolha;
- Redução da manutenção e reparação.



Figura 3.19 - Aplicação da membrana de impermeabilização, Viaduto Duarte Pacheco (Imperialum, 2013).

Na Tabela 3.8, ilustram-se as várias etapas necessárias e respetivas recomendações, para proceder à aplicação de uma manta impermeabilizante, num pavimento rodoviário de uma ponte ou viaduto. Ilustra-se também as várias etapas realizadas no decorrer da impermeabilização no Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.

Tabela 3.8 - Procedimento de aplicação de uma manta impermeabilizante (adaptado de LNEC, 2012; Imperialum, 2013).

Viaduto Duarte Pacheco	Processo de aplicação
 <p>Colocação do primário</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A superfície do tabuleiro deve ser limpa de maneira a não conter manchas de óleos ou produtos com base em solventes orgânicos, e ser o mais regular possível, de modo a evitar camadas de nivelamento ou de regularização; • Nos casos de reabilitação do tabuleiro, o pavimento existente convém ser fresado e depois regularizado através da aplicação de um micro betão betuminoso; • A impermeabilização é aplicada em sistema de total aderência, como tal é indispensável o primário de aderência que normalmente constituído por uma emulsão betuminosa;
  <p>Colocação da impermeabilização</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A impermeabilização é geralmente constituída por uma membrana betuminosa de betume modificado no qual é aplicada através da ação da chama de um maçarico; • A membrana betuminosa deve estar plana, com reentrâncias não superiores a 3 mm e as saliências não superiores a 2 mm; • A ligação entre membranas faz-se ao longo das juntas de sobreposição, unicamente por soldadura por meio de chama, não sendo aconselhado por outro meio, designadamente por: resinas, betumes e adesivos;
 <p>Colocação da camada protetora</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sobre o sistema de impermeabilização é aplicado uma camada de proteção, normalmente de betão betuminoso (a quente) que deverá ser aplicado 24 horas após a colocação da impermeabilização; • Para a aplicação da camada protetora é recomendado uma espessura de 30 mm, dimensão do inerte inferior a 4 mm e na sua compactação a temperatura deve rondar entre os 140 C° e os 90 C°; • Posteriormente sobre a camada de proteção é aplicado a camada de desgaste que normalmente é de misturas betuminosas.

3.10. Soluções e técnicas de reforço sísmico

Os sismos são um dos desastres naturais que mais afetam a população humana, pela sua imprevisibilidade, podendo originar imensas vítimas mortais, como também enormes prejuízos estruturais e económicos. O aumento das novas tecnologias possibilita a adaptação da capacidade das estruturas para resistir à ação sísmica, sobretudo nas obras de arte com mais de 30 anos implantadas em zonas propícias a sismos.

Na ocorrência de um sismo, uma estrutura só desempenha corretamente as suas funções, quando esta não atinge o colapso e os ocupantes conseguem evacuar em segurança, mesmo que a ponte não volte a ficar novamente operacional (Costa, 2009). A contabilização da ação sísmica num projeto de estruturas previne a perda de vidas humanas como também a minimização os estragos, face a existência de um sismo.

Durante a ação sísmica a energia cinética é transmitida à estrutura. Esta energia deve ser equilibrada ou dissipada, de modo a garantir a segurança da estrutura e da população que a utiliza. No caso das pontes e viadutos de betão armado existem varias técnicas antissísmicas, sendo as mais comuns os isolamentos de base e os dissipadores de energia.

Em relação à regulamentação a ação sísmica é definida na Parte 1 do Eurocódigo 8, no qual esta é complementada para o caso português pelo respetivo Anexo Nacional (NP EN 1998-1, 2010).

○ Isolamento de base

O isolamento de base consiste em separar o movimento do solo, proveniente de uma ação sísmica, da estrutura, com o intuito de reduzir a propagação das acelerações horizontais do solo à estrutura. Esta separação é conseguida por meio de aparelhos de apoio, com grande flexibilidade horizontal, criando uma superfície de descontinuidade (Santos, 2008d; Monteiro, 2011). Geralmente, estes apoios são instalados no topo dos pilares e dos encontros das pontes e viadutos.

Outra característica importante dos aparelhos de apoio é que estes através da sua capacidade de amortecimento dissipam grande parte da energia, proveniente de uma ação sísmica, evitando assim grandes deformações aos elementos estruturais. Segundo Guerreiro (2011), um sistema de isolamento de base deve garantir quatro funções principais, nomeadamente: capacidade de suporte; baixa rigidez horizontal; capacidade de dissipação de energia e capacidade de reposição à posição inicial.

Atualmente existe no mercado, uma enorme variedade de sistemas de isolamento base (Figura 3.20), sendo os mais comuns os sistemas pendulares com atrito (FPS - *Friction Pendulum System*), os blocos de apoio em borracha de alto amortecimento (HDRB - *High Damping Rubber Bearings*) e os blocos de borracha com núcleo de chumbo (LRB - *Lead Rubber Bearings*) (Monteiro, 2011).

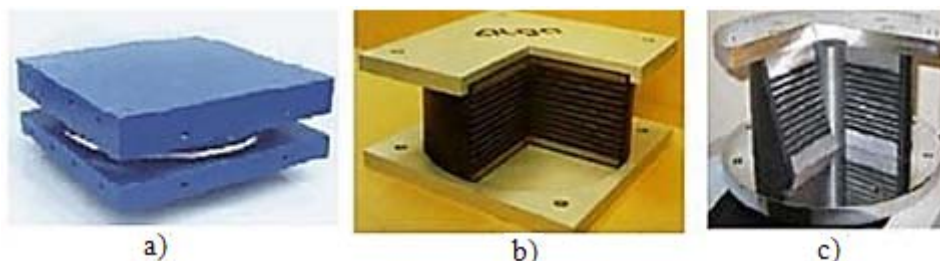


Figura 3.20 - Sistemas de Isolamento base: a) FPS; b) HDRB; c) LRB (Guerreiro, 2011).

○ *Dissipadores de energia*

Outro meio de reduzir os efeitos negativos causados por um sismo é a introdução de dispositivos de dissipação de energia. Estes equipamentos têm como fundamento dissipar grandes níveis de energia, evitando assim grandes estragos nas estruturas. Tal como os sistemas de isolamento base, os dispositivos de dissipação de energia existem numa grande variedade, sendo os mais comuns os dissipadores histeréticos e os dissipadores do tipo viscoso. Segundo Guerreiro (2011) e Monteiro (2011), estes dois sistemas apresentam uma grande versatilidade, que permite ao projetista definir as suas características e possibilita uma fácil inserção no sistema estrutural.

Os dissipadores histeréticos (Figura 3.21 a)) são normalmente em aço, dissipando a energia através da sua capacidade de deformação plástica causada pelos deslocamentos impostos aos dissipadores. Por sua vez, os dissipadores viscosos (Figura 3.21 b)) dissipam a energia através da passagem de um fluido no interior do mecanismo, consoante a velocidade de vibração da estrutura. Este último sistema é semelhante aos sistemas de amortecimento utilizados nos automóveis, denominados por amortecedores (Guerreiro, 2003).



Figura 3.21 - Dissipadores de energia: a) Dissipadores histeréticos, Ponte Vasco da Gama; b) Apoio de Borracha em associação com dissipador viscoso (Guerreiro, 2003; 2011).

3.11. Especificações da NP EN 1504

Como foi referido no segundo capítulo algumas patologias que sucedem nas pontes e viadutos advêm da falta de rigor e verificação dos regulamentos, normas e especificações existentes. A Norma NP EN 1504 reúne toda a informação sobre produtos e sistemas de manutenção, proteção, reabilitação e reforço para as estruturas de betão e de betão armado em fase de serviço.

Por volta da década de 80, o Comité Europeu de Normalização (CEN) iniciou a preparação de um conjunto de normas referentes à reparação e proteção de estruturas de betão armado, o que mais tarde originou a Norma EN 1504 sob o título de *“Products and systms for the protection and repair of concrete structures”*, traduzida para a versão portuguesa através da Norma NP EN 1504 (Sousa, 2011). A Norma está dividida em 10 partes, nas quais, cada parte é um recurso que auxilia nas tomadas decisões, estratégias e técnicas, aos projetistas, empreiteiros e fabricantes. Na Tabela 3.9, mostra-se como está estruturada a respetiva Norma.

Tabela 3.9 - Constituição da Norma NP EN 1504.

Partes da NP EN 1504	Produtos e sistemas para proteção e reparação de estruturas de betão
EN 1504-1	Descreve os termos e definições compreendidos na norma.
EN 1504-2	Fornece especificações para produtos/sistemas de proteção superficial do betão.
EN 1504-3	Fornece especificações para a reparação estrutural e não-estrutural.
EN 1504-4	Fornece especificações para colagem estrutural.
EN 1504-5	Fornece especificações para injeção do betão.
EN 1504-6	Fornece especificações para injeção de caldas em ancoragens.
EN 1504-7	Fornece especificações para proteção contra a corrosão das armaduras.
EN 1504-8	Descreve o controlo da qualidade e avaliação da conformidade dirigindo aos fabricantes.
EN 1504-9	Define os princípios gerais para o uso de produtos e sistemas, na reparação e proteção de betão.
EN 1504-10	Fornece informação sobre a aplicação e o controlo da qualidade dos trabalhos.

De forma geral, a parte 1 da NP EN 1504 descreve definições e objetivos da respetiva Norma. Nas partes 2 à 7 são referidos os sistemas (conjunto de dois ou mais produtos) e produtos que permitem realizar as operações de reabilitação, com o estabelecimento de valores limites de todas as propriedades a verificar. A parte 9 apresenta os princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas. E por fim, as partes 8 e 10 tratam da avaliação de conformidade, da aplicação e do controlo de qualidade (Sousa, 2011).

Princípios gerais de cada parte da Norma NP EN 1504

A parte 1 da NP EN 1504 (2006) descreve as definições e os objetivos da respetiva norma, abordando os tipos de materiais e sistemas para a manutenção, proteção, reparação e reforço para as estruturas de betão simples e de betão armado, e descreve, de forma sucinta, a constituição dos produtos e sistemas para a proteção e reparação.

Na parte 2 da NP EN 1504 (2006) são especificados os requisitos mínimos dos sistemas para a proteção superficial do betão. Estes sistemas são, por meio de impregnação (tratamento ao betão para reduzir a porosidade e reforçar a superfície), impregnação hidrofóbica e por revestimento por pintura. Na Tabela A-1 do Anexo A, descrevem-se as características de desempenho, necessárias para a impregnação hidrofóbica (tratamento ao betão para ser repelente à água), de acordo a NP EN 1504-2.

Na parte 3 da NP EN 1504 (2006) são apresentadas especificações e indicações de produtos de reparação, por meio de argamassas e betões, de modo a restaurar ou substituir o betão degradado e proteger as armaduras. Contudo nesta parte, é definido 4 classes de argamassa de reparação (R1, R2, R3 e R4) para cada tipo de aplicação, indicando valores limites de todas as propriedades a verificar. Na Tabela A-2 do Anexo A, são apresentados os requisitos propostos para as argamassas de reparação estrutural e não estrutural, referidos a norma NP EN 1504-3.

A parte 4 da NP EN 1504 (2006) são especificados os requisitos para os produtos e sistemas a utilizar para a colagem estrutural, nomeadamente: colagem de placas de aço ou outro tipo de material (ex. sistemas FRP) à superfície do betão para efeitos de reforço; colagem entre peças de betão endurecido, geralmente associados a elementos pré-fabricados e por último a colagem de betão fresco em betão endurecido (betões com diferença de idade). Na Tabela A-3 do Anexo A, descrevem-se os requisitos necessários dos produtos de colagem para o reforço com placas de aço, conforme a NP EN 1504-4.

A parte 5 da NP EN 1504 (2006) são apresentados os requisitos dos produtos de injeção para fendas e cavidades internas no betão. Esta norma especifica três tipos de produtos de injeção, designadamente: para enchimento dúctil (produtos flexíveis capazes de suportar movimentações); para transmissão de forças e, por último, para enchimento expansivo (produtos capazes de, após a reação, expandir por meio de absorção de água). Na Tabela A-4 do Anexo A, descrevem-se os requisitos de desempenho necessários para um enchimento dúctil das fissuras, através de produtos poliuretanos e acrílicos, segundo a NP EN 1504-5.

A parte 6 da NP EN 1504 (2008) especifica os requisitos dos produtos de injeção de caldas em ancoragens, sendo estes produtos à base de ligantes hidráulicos (cimento) e de resinas sintéticas. Na Tabela A-5 do Anexo A, apresenta-se os requisitos mínimos de aplicação dos produtos de injeção para ancoragens, conforme a NP EN 1504-6.

A parte 7 da NP EN 1504 (2008) especifica os requisitos dos produtos e sistemas de prevenção da corrosão das armaduras e dos aços embebidos no betão, utilizando revestimentos ativos e de barreira. Os revestimentos ativos contêm pigmentos electroquimicamente ativos, que funcionam como inibidores de corrosão e proporcionam proteção catódica localizada, cujos estes revestimentos estão associados ao cimento Portland pela sua alcalinidade. Em relação ao revestimento por barreira, são revestimentos que isolam as armaduras da água provenientes dos poros da pasta de cimento. Na Tabela A- 6 do Anexo A, descrevem-se os requisitos necessários dos produtos de proteção contra a corrosão, conforme a NP EN 1504-7.

A parte 8 da NP EN 1504 (2006), dirigida principalmente aos fabricantes dos produtos e ao instituto de certificação (organismo notificado), especifica procedimentos para o controlo de qualidade e para a avaliação da conformidade, incluindo a marcação e rotulagem, de produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão simples e de betão armado. Na Tabela A-7 do Anexo A, ilustra-se um exemplo do rótulo de conformidade de um produto (argamassa de reparação), conforme a NP EN 1504.

A parte 9 da NP EN 1504 (2009) define os princípios básicos e fornece orientações para seleção dos produtos em função da proteção e reparação de estruturas de betão simples e de betão armado, que tenham sofrido ou possam vir a sofrer danos ou deteriorações estruturais. Esta parte da Norma explicita alguns aspetos importantes em função da reabilitação estrutural, nomeadamente:

- Determinação das condições da estrutura;
- Identificação das causas da deterioração;
- Definição dos objetivos de proteção e reparação em conjunto com os donos-de-obra;
- Seleção dos princípios de proteção e reparação apropriado;
- Seleção dos métodos de proteção e de reparação;
- Definição das propriedades dos produtos e sistemas (descritas em EN 1504-2 a 7);
- Especificação dos requisitos de manutenção posteriores à proteção e reparação.

Por último, a parte 10 da NP EN 1504 (2008), apresenta os requisitos para armazenamento, preparação e aplicação de produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão simples e de betão armado, envolvendo também, o controlo de qualidade, manutenção, saúde e segurança. Na Tabela 3.10, descrevem-se os princípios de reparação em função dos defeitos do betão e da corrosão das armaduras, para o caso das pontes e viadutos rodoviários, segundo a NP EN 1504.

Tabela 3.10 - Princípios de reparação (adaptado da NP EN 1504-9)

Princípio	Métodos baseados nos princípios	Parte relevante da NP EN 1504
Proteção contra o ingresso Redução ou prevenção da absorção de agentes agressivos, ex.: água, outros líquidos, vapores, gases químicos e agentes biológicos.	Impregnação hidrofóbica	2)
	Impregnação	2)
	Revestimento	2)
	Enchimento de fendas	5)
Controlo da humidade Evita a acumulação de humidade, reações adversas, ataques por sulfatos e saturamento do betão	Impregnação hidrofóbica	2)
	Impregnação	2)
	Revestimento	2)
Restauro do betão Restituição do betão original em função das suas características originais	Argamassa aplicadas à mão	3)
	Novo betão ou argamassa cofrado	3)
	Betão ou argamassa projetada	3)
Reforço estrutural Aumento ou restituição da capacidade de carga	Adição de armaduras ancoradas em furos abertos ou por abrir	6)
	Reforço com placas coladas	4)
	Adição de argamassa ou betão	3) e 4)
	Injeção de fendas e vazios	5)
	Enchimento de fendas e vazios	5)
Aumento da resistência física Aumento da resistência a ataques físicos (ex. impactos, abrasão)	Revestimento	2)
	Impregnação	2)
	Adição de argamassa ou betão	3)
Resistência aos químicos Aumento da resistência da superfície do betão à deterioração por ataque químico (ex. ácidos, sulfatos, ações bacterianas)	Revestimentos	2)
	Impregnação	2)
	Adição argamassa ou betão	3)
Preservação ou restauração da passividade Criação de condições químicas nas quais a superfície da armadura mantém ou volta adquirir a sua condição passiva.	Aumento do recobrimento com novo betão ou argamassa	3)
	Substituição do betão contaminado ou carbonato	3)
Aumento da resistividade Aumento da resistência do betão devido ao efeito de carbonatação e humidades	Impregnação hidrofóbica	2)
	Impregnação	2)
	Revestimento	2)
Controlo das áreas anódicas Criação de condições nas quais as áreas potencialmente anódicas da armadura são incapazes de produzir reações de corrosão	Revestimento ativo da armadura	7)
	Revestimento barreira da armadura	7)

3.12. Considerações finais

No capítulo anterior, destacou-se a importância da conservação na vida de uma ponte, através da descrição das principais anomalias que surgem desde da fase de conceção até a fase de utilização. Neste capítulo pretendeu-se apresentar as soluções e técnicas de reparação e de reforço para as pontes de betão armado, as quais estas possibilitam eliminar e corrigir as anomalias existentes, de modo a melhorar o desempenho global e garantir as condições de segurança.

Existem numerosas técnicas de reparação e de reforço, que por sua vez dependem da natureza e grau das anomalias, da necessidade ou não de manter a circulação de veículos e de fatores técnicos e económicos. Porém, para o mesmo problema existem várias soluções, e assim há que saber qual a solução mais conveniente para cada situação, de forma a ter conhecimento das vantagens e desvantagens de cada material a aplicar. Por exemplo, para estruturas que estão sujeitas a temperaturas altas ($> 45\text{ C}^\circ$), os produtos de reparação à base de resinas não é aconselhável pois podem existir possíveis retrações importantes, originando fissuração; em alternativa os produtos à base de ligantes hidráulicos (argamassa) são recomendados. No caso de um reforço com cabos de pré-esforço exterior é recomendado que o material de injeção seja de produtos flexíveis (graxa ou ceras petrolíferas) de maneira a poder posteriormente, caso necessário, retensionar os cabos ou até mesmo substituí-los.

Após a execução dos trabalhos de reparação e de reforço, convém sempre verificar se estes foram bem executados, principalmente em caso de reforço, pois estes podem ou não estabelecer corretamente a sua função. Estas verificações geralmente são realizadas por meio de contacto visual, ensaios e monitorização (ver Tabela 2.9 e Tabela 2.10)

Em relação aos produtos e sistemas de reabilitação, não basta para cada problema aplicar a solução mais conveniente, é também importante certificar o controlo qualidade e durabilidade dos materiais a aplicar. É essencial que estes produtos e sistemas sejam certificados de forma a poderem garantir a qualidade e não causar constrangimentos mais tarde. Um dos meios para garantir a qualidade e durabilidade destes produtos e sistemas, é através da certificação pela Norma EN 1504, que especifica os requisitos mínimos para garantir o controlo de qualidade e durabilidade dos produtos e sistemas de manutenção, proteção e de reforço (ver: Anexo A).

A incorporação de sistemas antissísmicos em pontes e viadutos são relevantes, pois além de evitar catástrofes que possam causar perdas humanas e económicos providos de um sismo, ajudam a dissipar e transferir os deslocamentos longitudinais do tabuleiro oriundos da transição rodoviária, desde que a estrutura seja flexível.

CAPÍTULO 4

REABILITAÇÃO DE DUAS OBRAS DE ARTE

Na continuidade do segundo e do terceiro capítulo desta dissertação, abordam-se, neste capítulo, dois casos práticos de obras que foram recentemente reabilitadas, de modo a poder pôr em prática alguns aspetos importantes descritos anteriormente.

O Viaduto de Alhandra em Lisboa e a Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro são, duas obras de arte que foram sujeitas a intervenção, devido ao seu estado de degradação e a algumas deficiências a nível estrutural. Ao longo deste capítulo, serão abordadas as principais patologias detetadas ao longo da fase de inspeção, bem como as soluções apresentadas para a resolução destas patologias. A informação que irá ser exposta neste capítulo sobre as duas obras de arte é referente a alguns elementos informativos dos projetos de reabilitação de cada estrutura em análise. Estes elementos informativos referentes aos projetos foram fornecidos pelas entidades responsáveis pelas obras, nomeadamente a Auto Estradas de Portugal S.A. (Brisa) e a Estradas de Portugal S.A. (EP). Refira-se que o autor não tem qualquer intervenção nos projetos ou nas obras de reabilitação.

Diferentes tipos de patologias serão abordados, como a deterioração dos materiais e o comportamento estrutural. As soluções propostas serão expostas consoante o tipo de anomalia encontrada em função das inspeções e mapeamento de anomalia realizadas nas estruturas.

Nos trabalhos de inspeção e reabilitação, vários membros das entidades responsáveis pela reabilitação, participaram na deteção e reparação das patologias, em destaque: o Eng.º Júlio Appleton e o Eng.º António Costa no Viaduto de Alhandra, o Eng.º João Pinho e o Eng.º José David na Ponte de Mosteirô

Viaduto de Alhandra

4.1. Descrição do viaduto

Segundo a Memória Descritiva e Justificativa do Projeto de Execução de Reabilitação do Viaduto de Alhandra (Brisa, 2002a)¹, este viaduto pertence à Autoestrada do Norte (A1), mais precisamente no Sublanço Lisboa-Alverca e foi projetado em 1958 e posteriormente inaugurado em 1961.

O Viaduto de Alhandra tem uma extensão de 275,66 m que corresponde ao somatório de 16 vãos (14,05 m + 14 x 15,00 m + 14,01 m) mais os encontros Sul (18,10m) e Norte (19,50 m) (Figura 4.1). O tabuleiro do viaduto, com largura de 26,50 m, é constituído por duas faixas de rodagem, com três vias de circulação em cada sentido. Estas faixas têm 15 cm de espessura, no qual estão ligadas por uma laje de separador central, com um comprimento transversal de 1,50 m e 0,12 m de espessura.

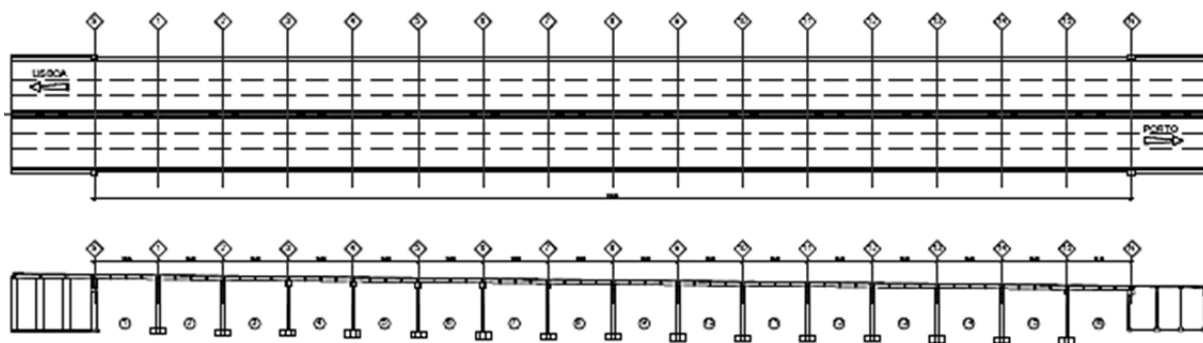


Figura 4.1 - Planta e Corte Longitudinal (Brisa, 2002a).

Cada faixa de rodagem está apoiada em 9 vigas longitudinais pré-esforçadas (pré-fabricadas *in situ*) de 1,00 m de altura, afastadas entre si de 0,18 m e de 1,44 m em relação eixo central, sendo estas ligadas à laje, exclusivamente, por pré-esforço transversal. Por sua vez, as vigas longitudinais estão interligadas a carlingas (0.20 m x 1.00 m) sobre os alinhamentos dos apoios, a meio e a quarto de vão, igualmente ligadas por pré-esforço transversal. Cada alinhamento dos apoios apoia-se nas vigas transversais (travessas dos pilares), sendo estas travessas apoiadas em 2 pilares com 11 m de altura em forma de Y, que por sua vez estes transmitem as ações ao terreno através de estacas (6 por pilares com diâmetro de 0.60 m), (Figura 4.2).

¹ Toda a informação escrita, exposta sobre o Viaduto de Alhandra está conforme a fonte bibliográfica: Brisa, Reabilitação do viaduto de Alhandra, Memória Descritiva e Justificativa, Projeto de Execução, 2002a: 3-32.

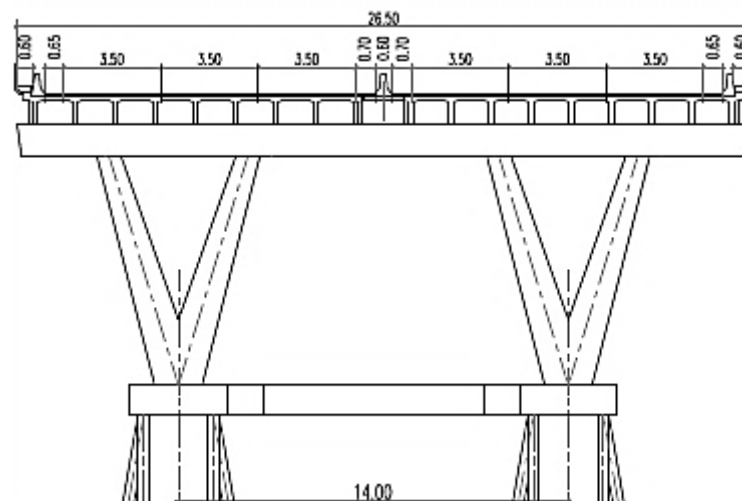


Figura 4.2 - Corte Transversal (Brisa, 2002a).

Cada extremidade do viaduto apoia-se em encontros ocos. No encontro Sul, as faixas de rodagem de 0,20 m de espessura, são sustentadas numa grelha de vigas, enquanto no encontro Norte as faixas de rodagem são sustentadas numa grelha formada por paredes com 0,30 m de espessura. Ambos os encontros são fundados por meio de estacas de Ø 0.50 m. No encontro Sul a ligação entre o tabuleiro e o encontro é móvel através de pêndulos, enquanto a ligação entre o tabuleiro e o encontro Norte é fixo mediante a um sistema de ferrolhos.

○ Alteração do Projeto

Em 1991, o Viaduto de Alhandra foi sujeito a intervenções associadas ao aumento de 2 para 3 vias de circulação para cada faixa de rodagem. Além desta intervenção, foi realizado um reforço com cabos monocordão pré-esforçados nas carlingas e nas vigas laterais de cada tabuleiro (Figura 4.3), um alinhamento dos tabuleiros através da introdução de aparelhos apoios, compensando os assentamentos de fundação existentes e por último, a introdução de uma laje no separador central interligando os tabuleiros.

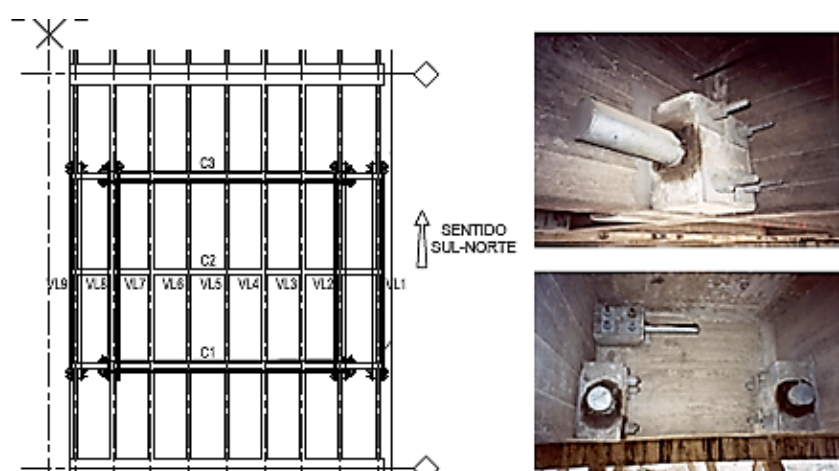


Figura 4.3 - Sistema de pré-esforço exterior nas vigas longitudinais exteriores e carlingas (Brisa, 2002a).

4.2. Principais patologias

O viaduto apresentava várias patologias associadas à deterioração dos materiais e ao comportamento estrutural. Relativamente às primeiras patologias, estas referem-se à degradação do betão, corrosão das armaduras, deterioração do sistema de pré-esforço, corrosão dos perfis metálicos da laje do separador central, danificação dos aparelhos de apoio e deficiências nas juntas de dilatação. Quanto às segundas patologias, o Viaduto de Alhandra não satisfazia os critérios de segurança regulamentares para um possível sismo com intensidade significativa, o que provocaria elevados danos à estrutura caso sucedesse.

4.2.1. Deterioração do betão por corrosão das armaduras

A deterioração do betão mediante a corrosão das armaduras, afetava principalmente, as vigas de bordo de cada tabuleiro, as vigas de bordadura e as travessas e articulações dos pilares. A principal causa deste tipo de deterioração foi a carbonatação do betão relacionado com o baixo recobrimento das armaduras. Na Figura 4.4, demonstra-se algumas ilustrações do viaduto que mais comprovava este tipo de deterioração.



Figura 4.4 - Deterioração do betão por corrosão das armaduras: a) Vigas de bordo; b) Vigas de bordadura; c) Travessa dos pilares; d) Articulações dos pilares (Brisa, 2002a).

4.2.2. Deterioração do sistema de pré-esforço

O sistema de pré-esforço transversal das carlingas empregues no projeto inicial apresentava-se danificado com corrosão. Estes danos causados pela corrosão foram gerados pelo défice de proteção de argamassa que motivou o desenvolvimento de corrosão dos cabos. As bainhas dos cabos

monocórdão pré-esforçados, empregados no projeto de alargamento do tabuleiro, também evidenciavam deficiências. Estas deficiências poderiam provocar corrosão nos cabos e, consequentemente poderia levar a rotura dos cabos, devido à elevada sensibilidade do aço à corrosão sob tensão.

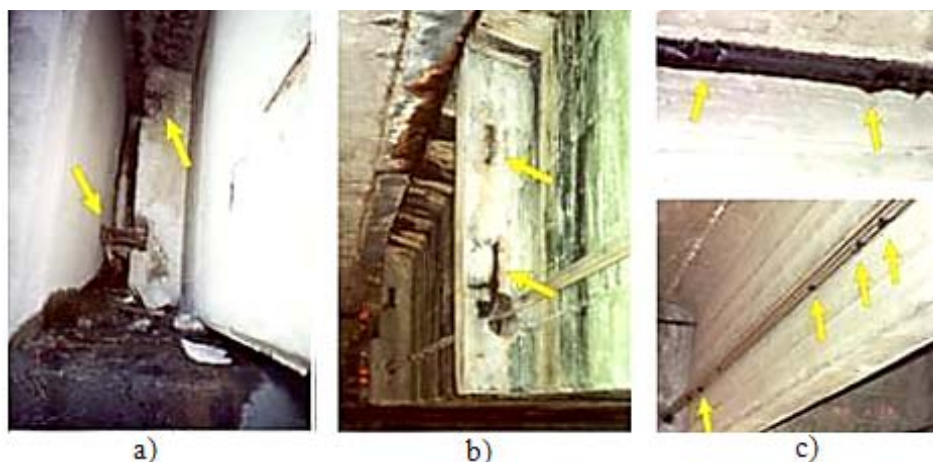


Figura 4.5 - Deterioração do sistema de pré-esforço: a) Pré-esforço transversal das carlingas; b) Bainhas dos cabos monocórdão (Brisa, 2002a).

4.2.3. Infiltrações de água no tabuleiro

Estas infiltrações sucediam especialmente na laje do separador central e nas juntas dos passeios, o que levou à corrosão dos perfis metálicos que apoiam a laje do separador e à deterioração das travessas dos pilares e das vigas de bordo de cada tabuleiro, tendo estes dois últimos problemas de carbonatação surgido devido ao baixo recobrimento, descrito na anterior anomalia na Subseção 4.2.1. Na Figura 4.6, é possível visualizar a corrosão dos perfis metálicos e a infiltração que sucedia nas travessas dos pilares e nas vigas de bordo.

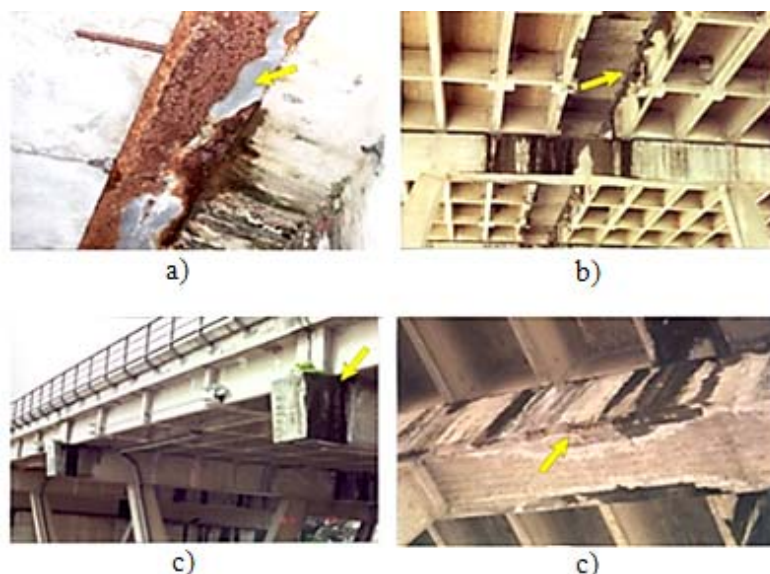


Figura 4.6 - Infiltrações de água no tabuleiro: a) Corrosão do perfil de apoio da laje do Separador Central; b) Infiltração na laje do Separador Central; c) Infiltração e deterioração nas Travessas dos Pilares (Brisa, 2002a).

4.2.4. Danificação dos aparelhos de apoio

Alguns aparelhos de apoio situados nos vãos centrais, apresentavam-se fraturados e/ou com deslocamento da placa de chumbo, principalmente os apoios inseridos na alteração do projeto em 1991. Geralmente, estas danificações dos aparelhos de apoio estavam relacionadas com as vibrações do tabuleiro, ocasionadas pela passagem de veículos sobre o tabuleiro (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Danificação dos aparelhos de apoio: a) Apoio fraturado; b) Placa de chumbo deslocada (Brisa, 2002a).

4.2.5. Deficiências nas juntas de dilatação

As juntas de dilatação do Viaduto de Alhandra apresentavam danos superficiais, em realce a junta do encontro móvel (Sul), que também se encontrava deslocada. Estas evidências foram ocasionadas pelo desgaste, proporcionado pelos veículos (Figura 4.8).

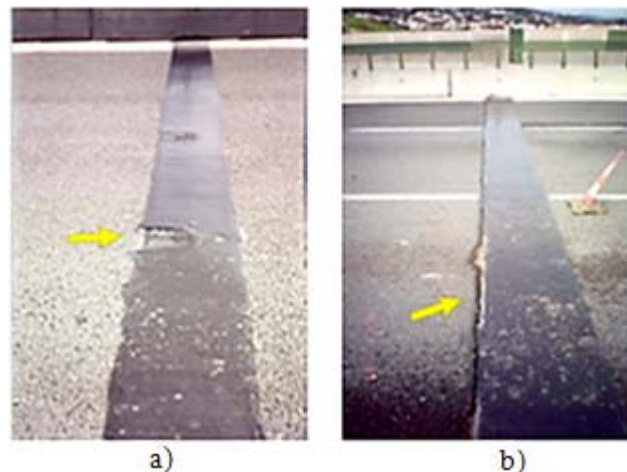


Figura 4.8 - Danificações nas juntas dilatação: a) Encontro Norte; b) Encontro Sul (Brisa, 2002a).

4.2.6. Principais patologias associadas ao comportamento estrutural

Como foi referido anteriormente, mais precisamente na Seção 4.2, o Viaduto não tinha capacidade estrutural para resistir um sismo com certa intensidade. Como tal, nas seguintes alíneas são demonstradas as razões que levaram a esta afirmação.

a) Juntas de dilatação entre o tabuleiro e os encontros

O viaduto para resistir a uma ação sísmica, implicaria absorver deslocamentos longitudinais, no qual a capacidade de deformação das juntas introduzidas no tabuleiro era incompatível para um sismo. No entanto, a junta entre a carlinga e o espelho do encontro Norte era insuficiente para permitir o deslocamento longitudinal, pois apresentava uma largura insignificante.

b) Continuidade do tabuleiro

Devido à alteração do projeto de 1991, em que foram cortados os ferrolhos que serviam como ligação entre o tabuleiro e as travessas dos pilares, eliminou-se a continuidade estrutural do tabuleiro no sentido longitudinal. Por outro lado, se se mantivesse os ferrolhos de ligação do tabuleiro às travessas dos pilares, estes não apresentariam resistência suficiente para resistir ao suposto sismo.

c) Ligação do tabuleiro a um encontro fixo

A ligação entre o encontro Norte e o tabuleiro era fixo por meio de ferrolhos, nos quais estes elementos não possuíam capacidade suficiente para resistir a uma ação sísmica, pois perante um sismo com uma intensidade significativa provocaria, elevados danos à estrutura.

d) Deslocamento dos pilares de apoio do encontro sul

Alguns pilares do encontro Sul, localizados atrás do pêndulo apresentavam deslocamentos significativos no topo e/ou na base, o que poderia pôr em causa a estabilidade da laje, caso viessem a sair de posição. Na Figura 4.9, é ilustrado o modelo de um dos pilares em anomalia.

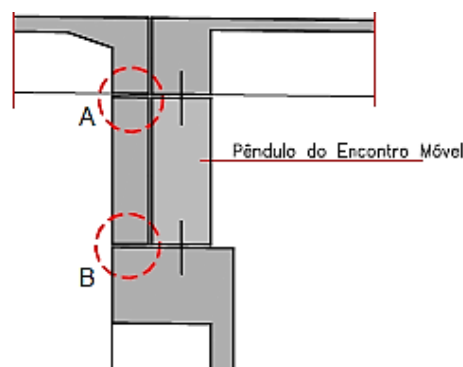


Figura 4.9 - Deslocamento de um dos pilares no encontro Sul (Brisa, 2002a).

4.3. Soluções para as patologias encontradas no Viaduto de Alhandra

Consoante o tipo de patologia e deficiência encontrado no Viaduto de Alhandra, foram realizados vários tipos de trabalhos de reparação e de reforço. Os trabalhos de reabilitação, basicamente, consistiram na reparação dos materiais, nomeadamente do betão, das armaduras, do sistema de pré-esforço e dos perfis metálicos do separador central. Relativamente aos trabalhos de reforço estrutural, foram proporcionados para garantir a resistência face a ação sísmica.

4.3.1. Reparação das patologias associadas à deterioração dos materiais

Conforme o grau e tipo de deterioração dos materiais e equipamentos, as estratégias e técnicas de reparação vão modificando. Nos subcapítulos seguintes, é demonstrado como se procedeu à reparação de alguns elementos estruturais e equipamentos do Viaduto de Alhandra.

4.3.1.1. Reparação do betão nas zonas com deterioração e deficiência

Os trabalhos de reparação basearam-se na remoção do betão e na substituição por uma argamassa de reparação de alta resistência ou por um microbetão, consoante a espessura necessária. A aplicação da argamassa de reparação foi restringida a zonas com área inferior a $0,5 \text{ m}^2$ e a espessuras inferiores a 5 cm enquanto nas restantes zonas foi aplicado o microbetão. Estas operações foram efetuadas após a limpeza das armaduras e a preparação da superfície do betão existente. Relativamente às armaduras, que se apresentavam com perda de seção significativa, foram reforçadas com um novo varão de forma a repor a área inicial. No caso das zonas de baixo recobrimento foi necessário aumentar o recobrimento para mais de 2 cm.

A reparação das ancoragens das carlingas consistiu essencialmente na remoção e reposição da argamassa de proteção das ancoragens. O trabalho iniciou-se com a remoção da camada de argamassa existente sobre as placas de ancoragem, por meio de martelo pneumático ligeiro, de forma a não danificar os dispositivos de amarração dos cabos de pré-esforço. De seguida, procedeu-se à limpeza das placas de ancoragem com jacto de areia. E por fim, repôs-se a argamassa de reparação de alta resistência.

4.3.1.2. Reparação das bainhas dos cabos monocordão

A reparação das bainhas dos cabos monocordão envolveu um estudo preliminar, onde se verificou o estado dos cordões de pré-esforço nas zonas onde a bainha se encontrava danificada. Este estudo baseou-se em desmontar um cabo monocordão que foi submetido ao corte de três troços e, posteriormente, ensaiados a 100 ciclos de carga a uma tensão máxima de 70 % da tensão de rotura.

Mediante os resultados obtidos foram tomadas as seguintes medidas:

- No caso de rotura dos provetes ensaiados, todos os cabos monocórdão foram alvos de substituição.
- No caso de não romper os provetes ensaiados, procedeu-se à reparação das bainhas danificadas, em que se procedeu ao seu corte, substituição da massa de proteção, finalizando com a junção da nova bainha à existente.

4.3.1.3. Reparação dos perfis metálicos da laje do separador

A laje do separador central apoia-se lateralmente em dois perfis metálicos em Z que estão cravados à laje do tabuleiro por meio de conectores (Figura 4.10). Estes perfis apresentavam em ambos os banzos corrosão, (ver Subseção: 4.2.3), o que promoveu a sua reparação. A reparação consistiu em remover a corrosão e a pintura existente, por meio de jacto abrasivo e posteriormente na aplicação de uma camada protetora de alta resistência. Os trabalhos realizados na parte superior do banzo ocorreram após a remoção da camada betuminosa na zona do separador central e do deslocamento do separador central (perfil “New Jersey”).

4.3.1.4. Impermeabilização do tabuleiro

O viaduto apresentava vastas infiltrações de água na zona da laje do separador central, e nas juntas dos passeios (ver Subseção: 4.2.3). Para eliminar essas infiltrações, recorreu-se à impermeabilização do tabuleiro na zona do separador central e nas juntas dos passeios. A impermeabilização do tabuleiro na zona do separador central consistiu na colocação de uma tela de betume, alterado com elastómeros (Figura 4.10), enquanto nas juntas dos passeios consistiu em colocar uma resina à base de alcatrão de hulha e elastómeros.

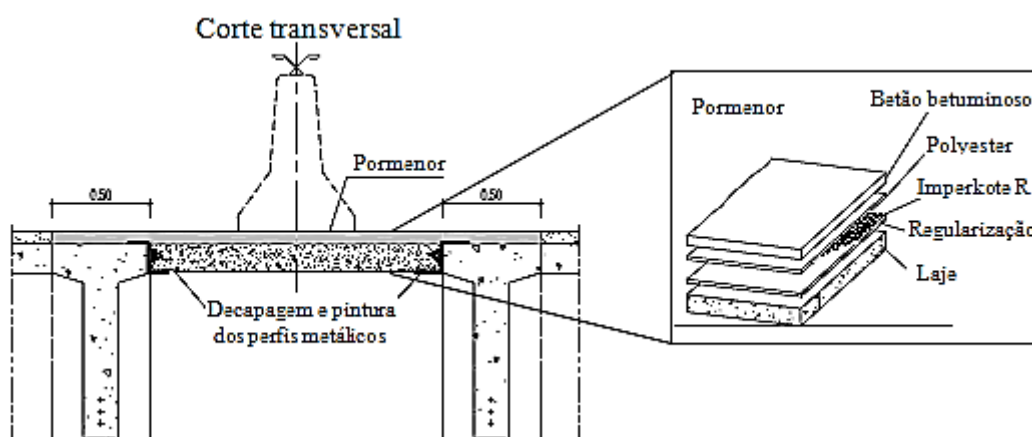


Figura 4.10 - Pormenor da zona do Separador Central (adaptado de Brisa, 2002b).

4.3.1.5. Introdução de novos aparelhos de apoio

A solução adotada consistiu no reforço dos apoios existentes danificados, através da introdução de novos aparelhos de apoio, junto aos mesmos. Esta solução foi a mais adequada pois não foi necessário substituir os aparelhos fraturados, o que implicaria a danificação dos restantes aparelhos de apoio em boas condições.

Os novos aparelhos de apoio são de aço inoxidável incorporados em macacos planos (Figura 4.11). O material de injeção utilizado para os macacos planos foi calda de cimento expansiva, endurecendo após os aparelhos estarem em carga. Nas interfaces dos aparelhos de apoio, de modo a unificar a carga, foram colocadas membranas de betume modificado com polímero plastómero.

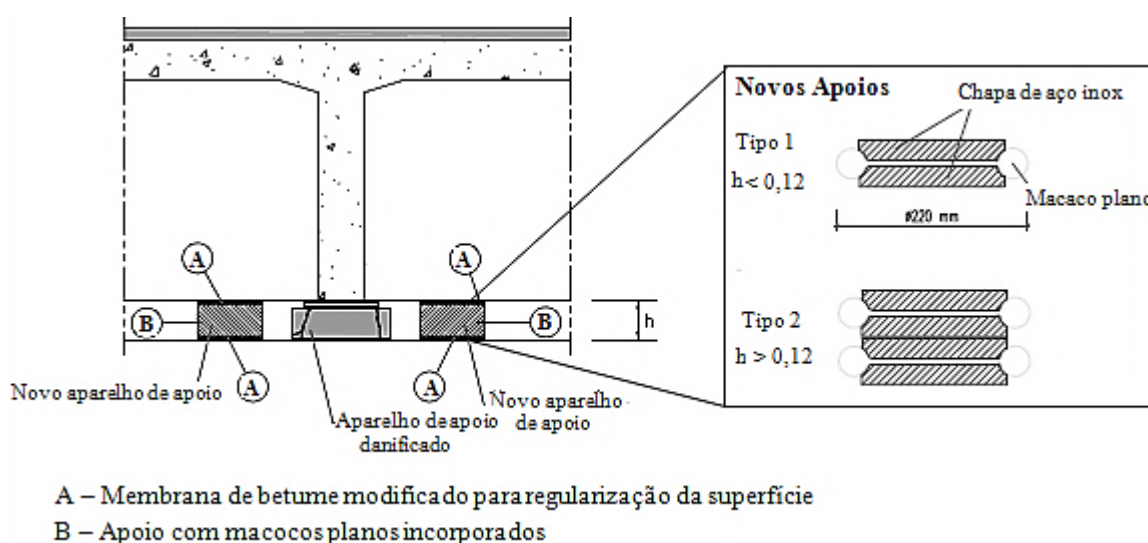


Figura 4.11 - Introdução dos apoios com macacos planos incorporados (adaptado de Brisa, 2002b).

4.3.2. Reparação das patologias associadas ao comportamento estrutural

Consoante o que foi abordado na Subseção 4.2.6, o viaduto necessitava de intervenção a nível estrutural para resistir um possível sismo. Salienta-se que o viaduto está inserido numa zona propícia a sismos e que segundo o RSA (1983) se encontra na zona A (zona propícia a sismo). Nos subcapítulos seguintes, descreve-se os trabalhos realizados em função do comportamento estrutural do viaduto.

4.3.2.1. Substituição das juntas entre o tabuleiro e os encontros

Devido às anomalias descritas na Subseção 4.2.5 e 4.2.6 (alínea a), houve a necessidade de substituir as juntas de dilatação entre o tabuleiro e os encontros. As novas juntas de dilatação foram fixadas por meio de pernes a um maciço de betão armado, inserido no limite do tabuleiro e no termo de cada encontro (Figura 4.12).

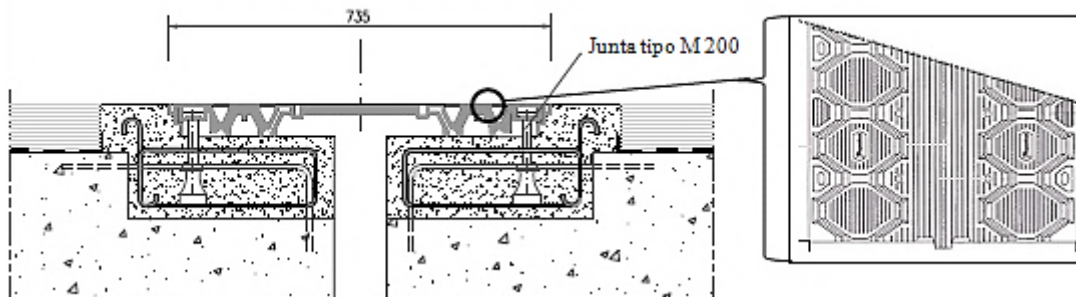


Figura 4.12 - Pormenor da colocação da junta dilatação (adaptado de Brisa, 2002b).

Relativamente ao encontro Norte, foi aumentada a junta entre a carlinga e o espelho do encontro, onde foi cortada uma tira do espelho com 8 cm de espessura por meio de carotagem, a partir da face superior do espelho. Posteriormente aos trabalhos de corte do espelho foram iniciados os trabalhos de substituição e selagem de varões (Figura 4.13).

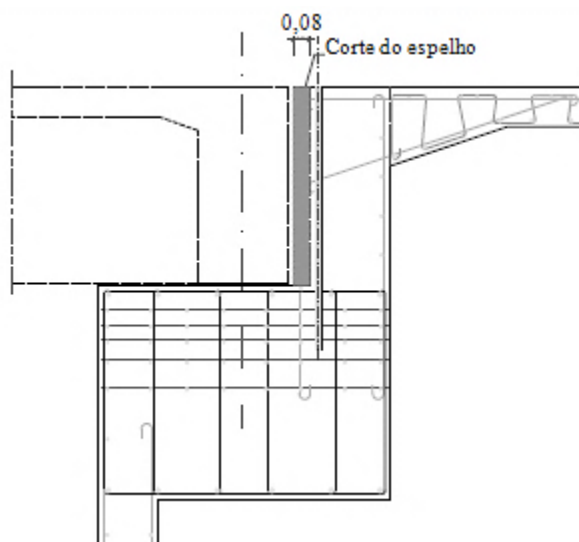


Figura 4.13 - Corte parcial do espelho do encontro Norte (Brisa, 2002b).

4.3.2.2. Restabelecimento da continuidade do tabuleiro

Para restabelecer a continuidade do tabuleiro, devido à patologia referida na Subseção 4.2.6 (alínea b), foram introduzidos dois sistemas constituídos por barras de pré-esforço em aço inoxidável (Figura 4.15 e Figura 4.16), um que atravessa as carlingas e outro, perpendicularmente, que liga as faces verticais de cada longarina, de bordo de cada tabuleiro (Figura 4.14) nos alinhamentos 4 a 15 (Figura 4.15).

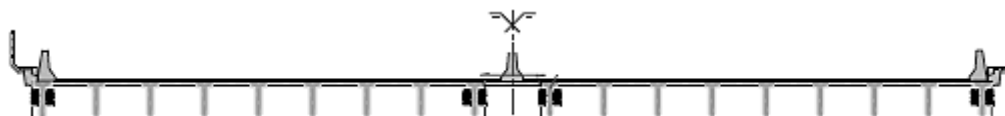


Figura 4.14 - Localização do sistema de ligação, corte transversal (Brisa, 2002b).

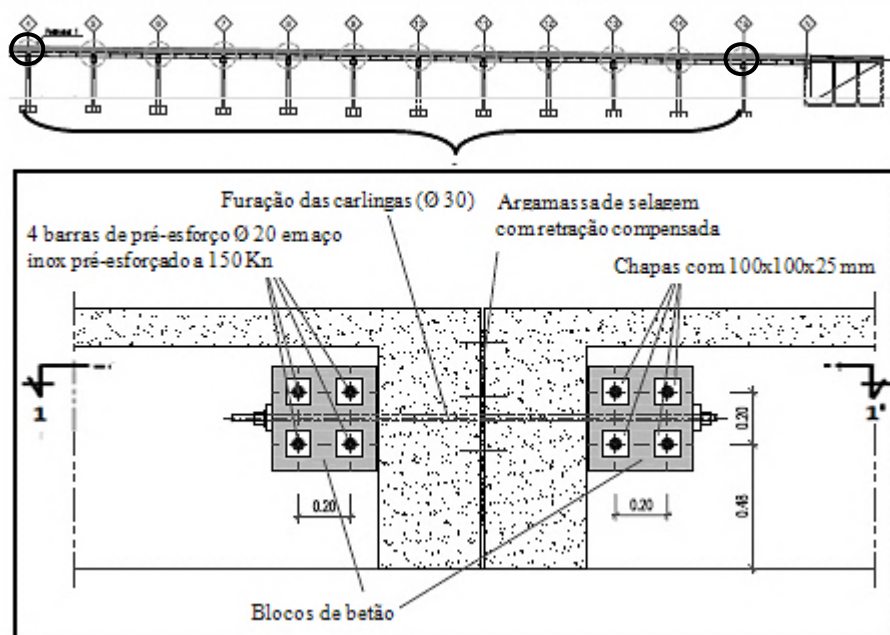


Figura 4.15 - Pormenor da ligação das vigas longitudinais (adaptado de Brisa, 2002b).

A transmissão das forças de pré-esforço é feita por atrito, através de blocos de betão que se situam em cada face da viga longitudinal junto às carlingas (Figura 4.15 e Figura 4.16). Para que a força de compressão, introduzida pelas barras de pré-esforço longitudinais fosse transmitida, foi necessário preencher a junta entre as carlingas com argamassa de selagem.

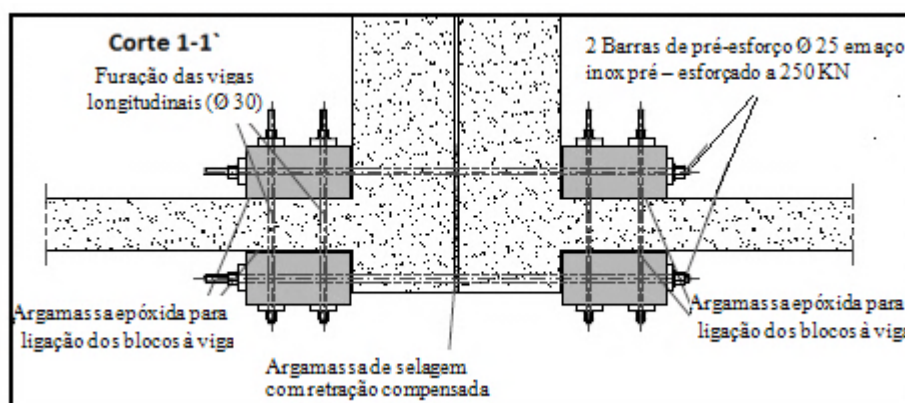


Figura 4.16 - Pormenor da ligação das vigas e carlingas em corte 1-1' (Brisa, 2002b).

Para impedir os deslocamentos transversais e permitir os deslocamentos longitudinais, foi realizado um sistema constituído por dois tirantes por cada meio tabuleiro, inclinados a 45° com a direção perpendicular (Figura 4.17). Cada sistema é constituído por duas chapas de ancoragem ligadas a um tirante em aço, no qual cada chapa está cravada à travessa dos pilares e à carlinga por meio de chumbadouros.

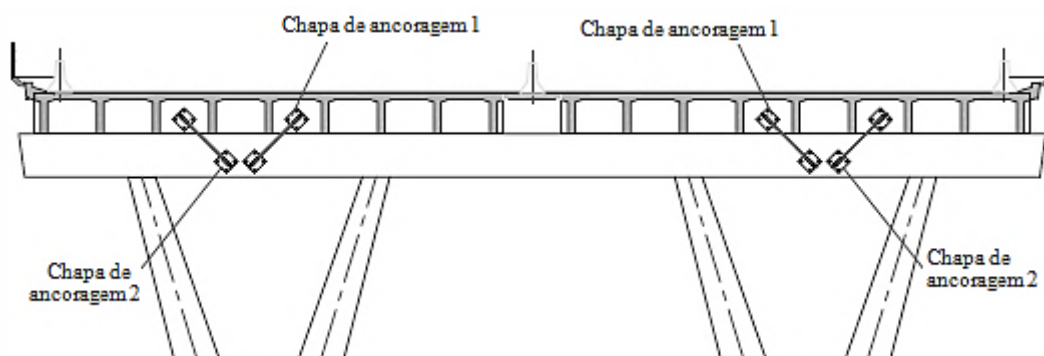


Figura 4.17 - Sistema de tirantes para travamento transversal (Brisa, 2002b).

4.3.2.3. Alteração estrutural entre o tabuleiro e o encontro Norte

Consoante a anomalia exposta na Subseção 4.2.6 (alínea c), foi necessário cortar os chumbadouros (ferrolhos) que ligavam a carlinga às vigas longitudinais do encontro Norte e introduzir apoios móveis sob as mesmas vigas. O acesso e corte dos chumbadouros ocorreram após a demolição da zona inferior da carlinga entre as vigas longitudinais. Após o demolimento nestas zonas foram colocados macacos planos em paralelo, cujo objetivo foi levantar ligeiramente o tabuleiro para a colocação dos novos aparelhos de apoios.

Estes aparelhos de apoio são constituídos por uma placa de neoprene, lâminas de teflon e chapas em aço inoxidável (Figura 4.18). A sua colocação foi efetuada após a regularização das superfícies em betão. Relativamente às chapas metálicas, estas são em U e são fixas às vigas longitudinais por meio de buchas metálicas e com resina epóxi.

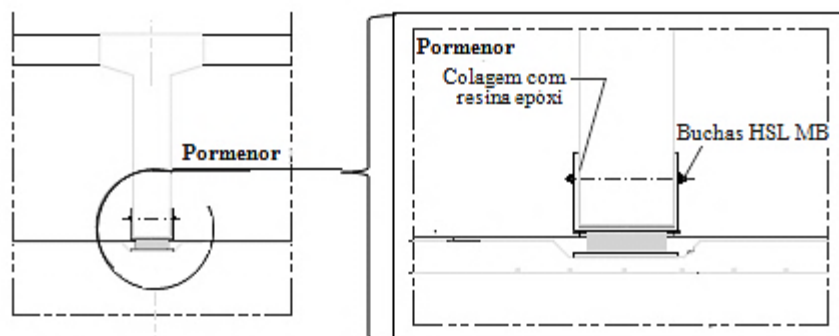


Figura 4.18 - Pormenor da introdução de aparelhos em corte (adaptado de Brisa, 2002b).

Os deslocamentos transversais foram impedidos através da inserção de apoios laterais, que estão colocados nas almas das vigas longitudinais. Estes aparelhos são constituídos por placas de neoprene com lâmina de teflon baseadas numa chapa metálica que transmite a força lateral à viga do encontro por meio de chumbadouros (Figura 4.19). Foram colocados 8 aparelhos de apoio em 4 vigas, mais precisamente em duas por cada meio tabuleiro.

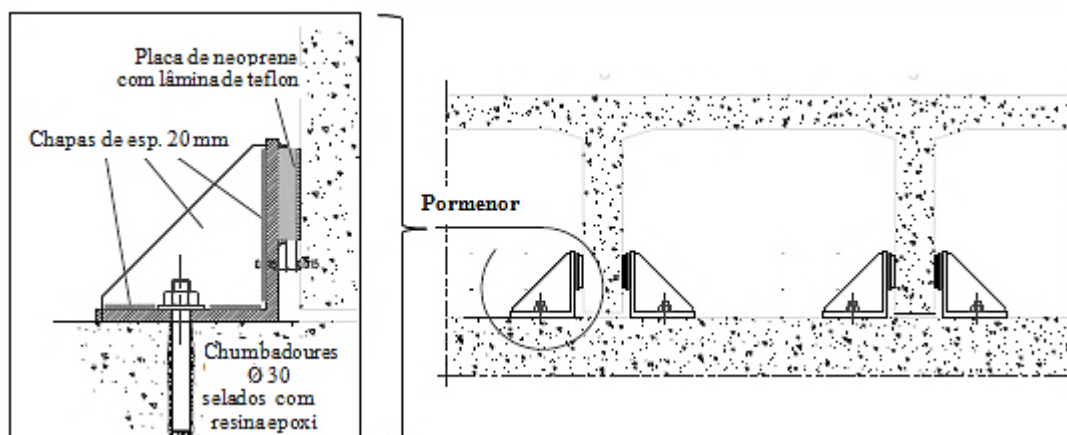


Figura 4.19 - Pormenor do travamento transversal (adaptado de Brisa, 2002b).

4.3.2.4. Reposicionamento e reforço da ligação dos pilares do encontro Sul

De modo a corrigir os deslocamentos descritos na Subseção 4.2.6 (alínea d), foi necessário reforçar as ligações dos pilares através do auxílio de macacos hidráulicos, com a finalidade de aliviar a carga atuante sobre os pilares. Os reforços basearam-se em duas chapas metálicas cravadas por conetores em aço em cada lado oposto na base e no topo de cada pilar anómalo (Figura 4.20).

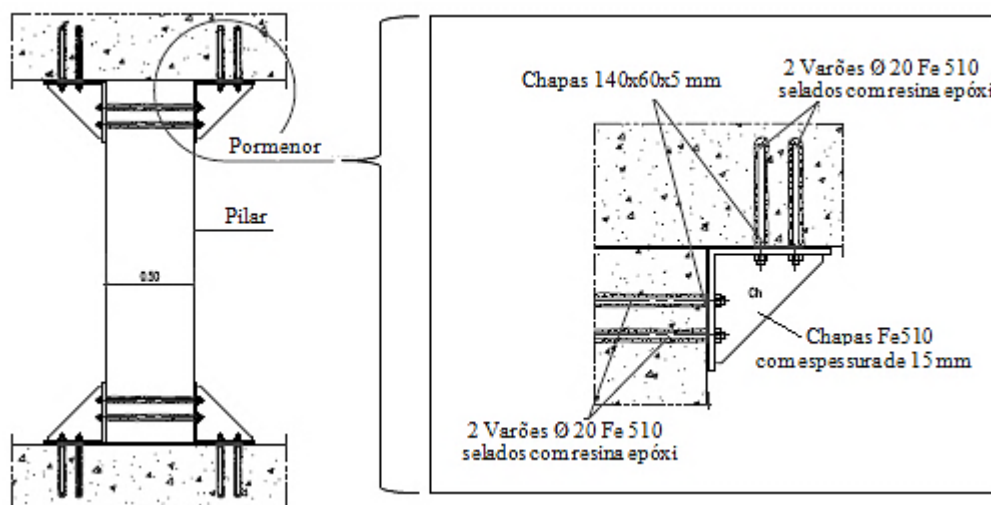


Figura 4.20 - Pormenor do reforço de um dos pilares do encontro Sul (adaptado de Brisa, 2002b).

4.3.2.5. Introdução dos dispositivos de controlo sísmico

Em consequência das alterações efetuadas ao viaduto de Alhandra para um possível sismo, foi introduzido no tabuleiro junto ao encontro norte mecanismos de controlo sísmico (dissipadores viscosos), com a finalidade de dissipar alguma energia e transferir a restante para um conjunto de estacas, executadas para esse efeito. Por sua vez, os dispositivos de controlo sísmico (Figura 4.21) são

ligados às vigas longitudinais do tabuleiro, por um sistema triangular de perfis metálicos que estão fundados por meio de estacas.



Figura 4.21 - Dispositivo de controlo sismo (Monteiro, 2011).

4.3.3. Restantes trabalhos aplicados no Viaduto

Após a conclusão dos trabalhos de reparação do Viaduto de Alhandra, iniciaram-se os trabalhos de pintura baseada em resinas acrílicas com o intuito de garantir a durabilidade da obra (Figura 4.22). A escolha das resinas acrílicas foi feita devido às suas excelentes características, nomeadamente a durabilidade, a resistência e a sua impermeabilidade.



Figura 4.22 - Viaduto de Alhandra após os trabalhos de reabilitação (Boléo, 2012)

Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro

4.4. Descrição da Ponte

Segundo a Memória Descritiva e Justificativa do Projeto de Execução de Reabilitação da Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro (EP, 2009a)², a superestrutura tem 194 m de comprimento e permite a circulação em ambos os sentidos da EN211 sobre o Rio Douro (Figura 4.24). A ponte foi projetada em 1971 pelo Prof. Edgar Cardoso e finalizada em 1973. Esta obra foi uma construção nova com a exceção dos dois pilares e dos encontros, que foram uma reabilitação da antiga ponte metálica sobre o rio Douro. Os pilares de alvenaria de pedra estão situados na albufeira da Barragem do Carrapatelo, enquanto os encontros situam-se um no Concelho de Cinfães e o outro no Concelho de Baião.

Os pilares de seção oval com 3.4 m na direção longitudinal e 8 m na direção transversal, são articulados no coroamento, nomeadamente na seção de apoio do tabuleiro, o que permite movimentos na direção longitudinal (Figura 4.23). Relativamente aos encontros, estes são constituídos por paredes de betão armado. *“O encontro do lado de Cinfães é fixo enquanto do lado de Mosteirô é móvel. No encontro fixo, o apoio faz-se por intermédio de aparelhos de apoio rotulados metálicos, enquanto no encontro móvel, o apoio faz-se por intermédio de pêndulo constituído por aparelhos rotulados metálicos e por um bloco de betão armado”* (EP, 2009). Os aparelhos de apoio de ambos os encontros estão dotados de um sistema de tirantes em aço de alta resistência, destinados a resistir os esforços impostos ao tabuleiro. Tanto os pilares como os encontros estão fundados diretamente por meio de sapatas.



Figura 4.23 - Aparelho de apoio rotulado metálico no coroamento do pilar P1 (EP, 2011).

² Toda a informação escrita exposta sobre a Ponte de Mosteiro sobre o Rio Douro está conforme a fonte bibliográfica: EP, Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro, Reabilitação e Reforço Estrutural, Tomo 1- Memória Descritiva e justificativa, Projeto de execução, julho 2009a: 1-9, 22, 27-52.

Esta ponte tem três tramos, com um vão central de 110 m e vãos extremos de 42 m e, é constituída por um tabuleiro de 9 m de largura, apoiado sobre uma “viga caixa” em betão armado pré-esforçado na direção longitudinal (Figura 4.24).

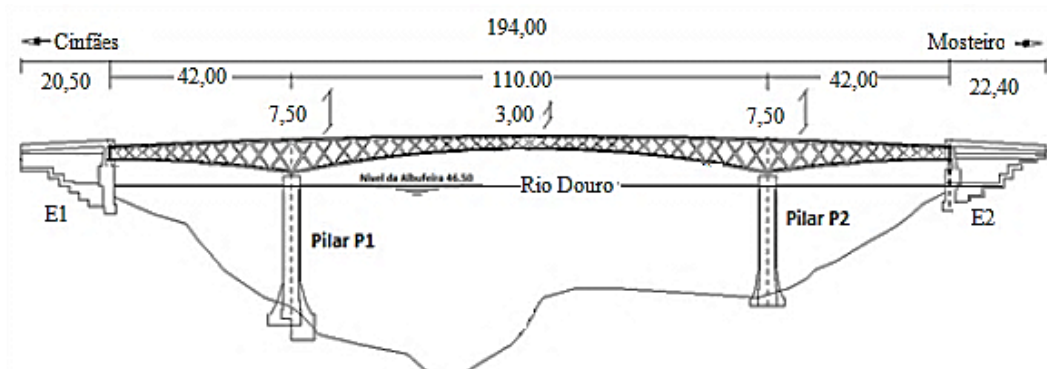


Figura 4.24 - Corte longitudinal da Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro (EP, 2009b).

Este tabuleiro de 9 m de largura é composto por uma faixa de rodagem com dois sentidos, dois passeios laterais e por vigas de bordadura de 1 m em cada extremidade. A “viga caixa” é em betão armado pré-esforçado, de inércia variável com almas vazadas, dispondo de elementos de travamento transversais junto aos pilares e encontros.

4.5. Principais patologias observados na Ponte de Mosteirô

Relativamente às inspeções efetuadas à Ponte (emersa e submersa), foram observadas algumas patologias associadas à deterioração dos materiais e outras referentes ao comportamento estrutural. As primeiras basearam-se na degradação dos pilares, nas juntas de dilatação e através do desgaste do pavimento sobre o tabuleiro. Relativamente às últimas, estas colocavam em causa os níveis de segurança regulamentares, nomeadamente:

- Estados Limites Últimos (ELU)
 - Insuficiente resistência à tração das diagonais tracionadas;
 - Insuficiente resistência à tração da laje inferior na zona central do vão principal;
 - Insuficiente resistência da ligação horizontal do tabuleiro ao encontro fixo em relação à ação sísmica.
- Estados Limites Serviço (ELS)
 - Fissuração excessiva na laje inferior do tabuleiro;
 - Deficiente ligação vertical do tabuleiro aos encontros.

4.5.1. Principais patologias associados à deterioração dos materiais

No coroamento dos pilares o betão apresentava-se esmagado (Figura 4.25 a)). Contudo, os blocos de pedra que constituem os mesmos apresentavam partidos e fissurados com aberturas excessivas, com destaque para o pilar P1 que se encontrava mais degradado. Por sua vez, as juntas de dilatação apresentavam corrosão elevada, com perda de secção e defeituosas. E por fim, o pavimento de microbetão armado apresentava em zonas pontuais, um nível de desgaste elevado e degradado, deixando à vista a armadura de pele e a laje do tabuleiro (Figura 4.25 b)).



Figura 4.25 - Deterioração dos materiais: a) Zona de esmagamento dos pilares; b) Desgaste do pavimento (EP, 2009a).

4.5.2. Principais patologias associadas ao comportamento estrutural

Os problemas associados ao comportamento estrutural advêm, essencialmente da falta de armadura para resistir aos esforços impostos à estrutura. Esta falta de armadura poderá estar relacionada com erros de projeto. Nas alíneas seguintes descrevem-se as principais anomalias referentes ao comportamento estrutural, conforme a memória descritiva e justificativa do projeto de reabilitação da Ponte de Mosteirô (EP, 2009).

a) Fissuração nas diagonais tracionadas e contraventamentos

As diagonais da superestrutura que se encontram tracionadas, sobretudo as localizadas no vão central, evidenciavam fissuração transversal com vestígios de óxido de ferro (Figura 4.26 a)). A causa do aparecimento desta fissuração deveu-se à insuficiente quantidade de armadura para resistir à tração, realçando que em termos de Estado Limite Último de Tração (ELU) não verificava a segurança. Relativamente aos contraventamentos transversais (paredes) sobre os pilares, ocorriam igualmente fissuração, denunciando a existência de trações, pela carência de armadura (Figura 4.26 b)).



Figura 4.26 - Fissuração nos elementos tracionados: a) Diagonais tracionadas; b) Parede de contraventamento (EP, 2009a).

b) Fissuração na laje inferior do vão principal

Esta fissuração ocorria, essencialmente, na direção transversal da laje inferior na zona central do vão principal (Figura 4.27), salientando duas fendas de grande abertura nas zonas de dispensa dos varões, que surgiram após a plastificação das armaduras longitudinais, causando a redução de rigidez da estrutura. Esta fissuração deveu-se à baixa quantidade de armadura para resistir aos esforços de tração e de serviço, realçando que em termos Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último de tração (ELU), não verificava a segurança.



Figura 4.27 - Fenda transversal com 1,20 mm na laje inferior (EP, 2009a).

c) Ligação horizontal do tabuleiro ao encontro fixo

O encontro do lado Cinfães, que é fixo, está sujeito às ações horizontais do tabuleiro. A transmissão destas ações faz-se através de plintos que servem de suporte aos aparelhos de apoio e às chapas metálicas ligadas ao espelho do encontro. As ligações existentes eram insuficientes para garantir a segurança e a estabilidade da ponte para a ação sísmica.

d) Ligação vertical do tabuleiro aos encontros

Os aparelhos de apoio sofriam variações de tensão, entre trações e compressões para as cargas de serviço, o que provocava excessivas vibrações ao tabuleiro, levando à redução de rigidez da estrutura. Esta anomalia deveu-se ao número insuficiente de cabos pré-esforçados verticais que ligava o tabuleiro aos encontros.

e) Fissuração nos encontros

Através de uma equipa de inspeção subaquática, foi observada fissuração em ambos os encontros. Estas fissuras eram verticais e inclinadas, com grande desenvolvimento de abertura entre 0,3 a 0,5 mm, desenvolvendo-se desde a zona emersa até a zona submersa dos encontros. É de realçar que esta anomalia foi motivada pela anomalia descrita na alínea anterior (alínea d).

4.6. Soluções para as patologias encontradas na Ponte de Mosteirô

Conforme o tipo de patologia encontrada na Ponte sobre o rio Douro, foram aplicados vários tipos de trabalhos de reparação e de reforço estrutural. Os trabalhos de reparação, basicamente, consistiram na reparação dos pilares, principalmente do pilar P1, que se encontrava mais degradado, e na restauração das juntas de dilatação e do pavimento sobre o tabuleiro. Relativamente aos trabalhos de reforço, estes foram proporcionados para compensar a falta da armadura estrutural, de forma a poder verificar a segurança regulamentar, designadamente os ELU e os ELS.

4.6.1. Reparação das patologias associadas à deterioração dos materiais

Tal como no Viaduto de Alhandra, consoante o grau e o tipo de deterioração e deficiência dos materiais, as técnicas e estratégias de reabilitação alteram-se de local para local. Nas alíneas seguintes são expostos os principais trabalhos de reparação referentes à Ponte de Mosteirô.

a) Reparação dos pilares

Devido à fissuração e deterioração existente nos blocos de pedra que constituem os pilares, procedeu-se ao refechamento e à reparação através de injeção com resina epóxi nas fissuras de pequena abertura. As aberturas de grande calibre foram reparadas com argamassa cimentícia através de uma espátula. Relativamente à reparação do coroamento dos pilares, esta consistiu na remoção do betão degradado e posteriormente na aplicação de uma argamassa epóxi-cimento.

Os trabalhos de reparação nas zonas submersas dos pilares foram realizados por mergulhadores especializados. A qualidade dos materiais de reparação foi adequada para as zonas subaquáticas, com

destaque para a resina epóxi que é um excelente material para zonas submersas que foi utilizado na selagem de fissuras na zona imersa dos pilares.

b) Reparação das juntas de dilatação

As chapas metálicas das juntas que apresentavam corrosão, com perda de seção e defeitos foram substituídas, enquanto as menos degradadas foram submetidas à limpeza, à reparação dos elementos de fixação em betão e à pintura anticorrosiva dos elementos metálicos.

c) Reparação do pavimento sobre o tabuleiro

Devido a patologia descrita na Subseção 4.5.1, a solução basicamente baseou-se na reparação das zonas afetadas e na aplicação geral de um microbetão betuminoso rugoso de 2 cm de espessura sobre o pavimento.

4.6.2. Reparação das patologias associadas ao comportamento estrutural

Conforme o que foi abordado na Seção 4.6, a ponte necessitava de intervenção a nível estrutural para resistir aos ELU e aos ELS. Os reforços aplicados na ponte foram instalados a fim de compensar a falta de armadura. As evidências da falta de armadura através da fissuração implicavam reforçar na direção perpendicular à fissuração. Nos subcapítulos seguintes descrevem-se os trabalhos de reforço realizados em função do comportamento estrutural da Ponte de Mosteirô.

4.6.2.1. Reparação de fendas

As fendas de abertura superior a 0,3 mm, foram reparadas por meio de injeção com resina de epóxi, enquanto as restantes fendas com abertura menor que 0,3 mm, foram seladas por meio de barramento com massa cimentícia à espátula. De uma forma geral, a ponte encontrava-se praticamente toda fissurada, nomeadamente na laje inferior do vão principal, nas diagonais tracionadas, nos contraventamentos, nos encontros e nos pilares.

4.6.2.2. Reforço das diagonais tracionadas e dos contraventamentos sobre os pilares

Ao longo da ponte foi necessário reforçar 48 diagonais, sendo 44 diagonais no tramo central e 4 diagonais nos tramos laterais. Os reforços basearam-se em chapas metálicas de aço laminado do tipo S235JR e S355JR. Os primeiros foram inseridos nas zonas diagonais e superior dos elementos tracionados, enquanto os segundos foram nas zonas inferiores dos mesmos elementos (Figura 4.28). Relativamente às chapas superiores, estas foram fixas ao betão por meio de buchas metálicas,

encamisadas em aço galvanizado de classe 8.8, enquanto as chapas inferiores ficaram cravadas na face superior da laje inferior por meio de varões (aço A 500NR).

Por razões de estética estas chapas metálicas foram aplicadas nas faces interiores das diagonais, não ficando visíveis quando se observa a ponte do lado exterior. Estes trabalhos de reforço tiveram início, após a conclusão dos trabalhos de reparação e limpeza das diagonais.



Figura 4.28 - Reforço das diagonais (EP, 2011).

Por outro lado, as paredes de contraventamento sobre os pilares, descritas na Subseção 4.5.2 (alínea a), foram também reforçadas com chapas de aço. Além de serem fixas ao betão por meio de buchas metálicas foram também coladas através de resina epóxi.

4.6.2.3. Reforço da laje inferior no vão principal

A solução para a patologia descrita na Subseção 4.5.2 (alínea b) foi reforçar a laje inferior na zona central do vão principal. Foram colocados cabos de pré-esforço exterior e, por meio de colagem, laminados de fibras de carbono (CFRP), de modo a poder resistir ao estado limite último de tração e de serviço. Os cabos de pré-esforço, por razões estéticas, foram colocados na face superior da laje inferior. A solução projetada consistiu em 10 cabos de pré-esforço, constituído por 9 cordões auto-embainhados de 150 mm² de diâmetro, injetados com calda de cimento, nos quais são substituíveis e retensionáveis, por serem auto-embainhados (sistema não aderente). Na figura seguinte, ilustra-se algumas etapas da construção dos blocos de ancoragens de betão armado.

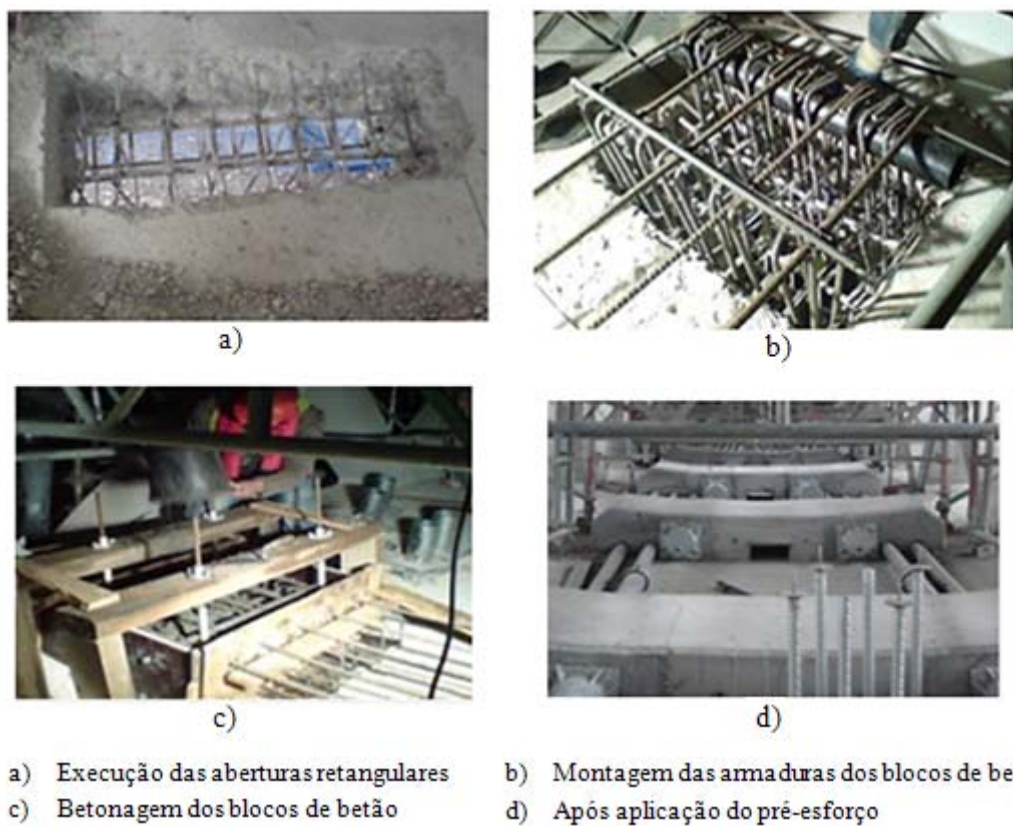


Figura 4.29 - Montagem das ancoragens de betão (EP, 2011).

Os cabos de pré-esforço foram colocados centrados, no meio vão, com extensão variável entre 36 m a 64m, e ancorados dois a dois, em seções coincidentes com os nós das diagonais, de modo a garantir uma melhor distribuição dos esforços e a tornar menos visíveis as respetivas ancoragens de blocos de betão (Figura 4.29). O sistema de pré-esforço foi calculado com o objetivo de garantir a compressão e anular as forças de tração da laje inferior do tabuleiro para a combinação frequente de ações, tendo em conta a flexão local (Figura 4.30 e Figura 4.31).

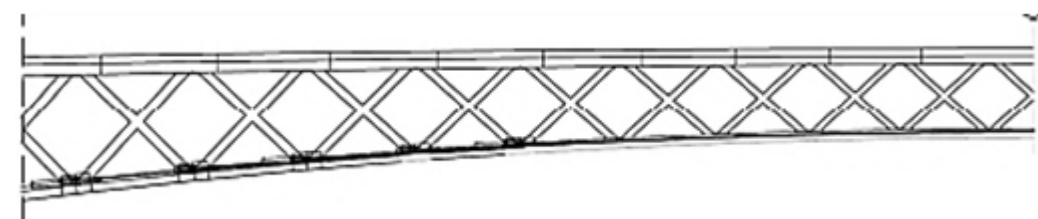


Figura 4.30 - Corte longitudinal da ponte (EP, 2009b).

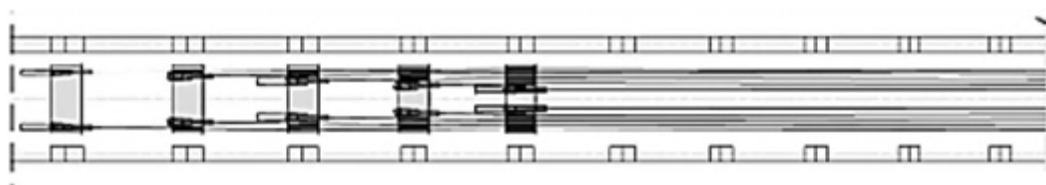
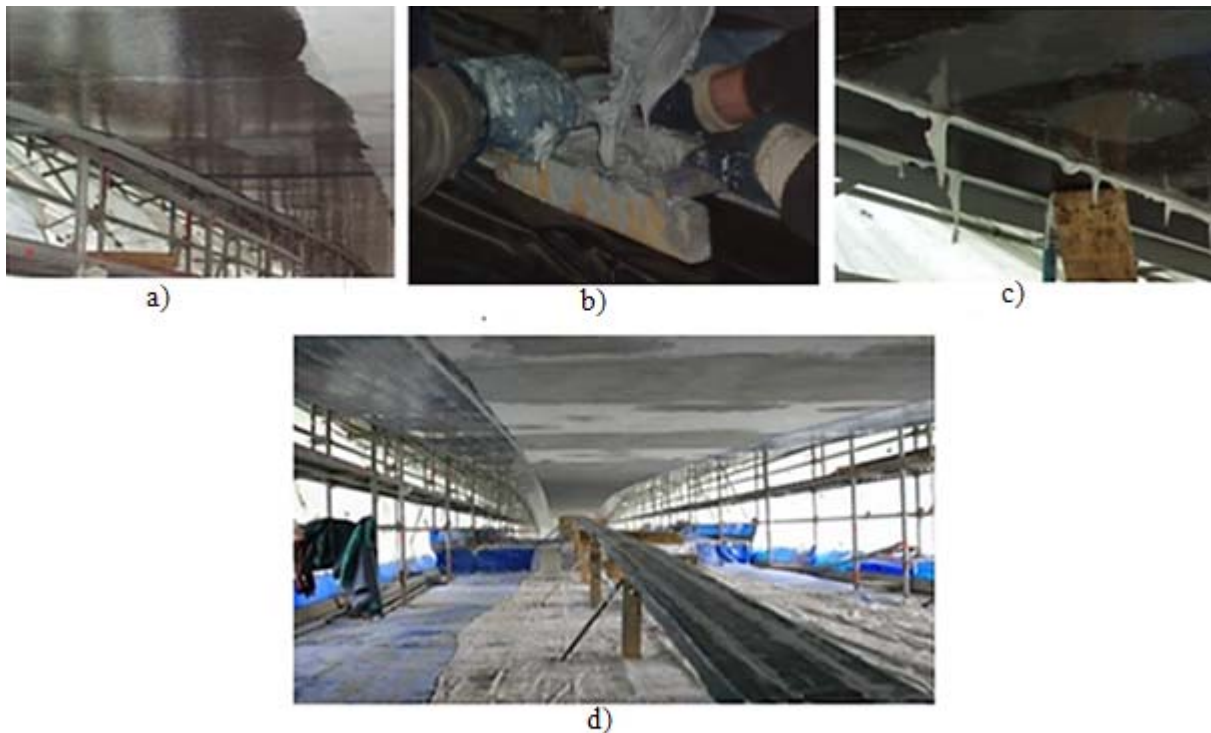


Figura 4.31 - Planta da ponte (EP, 2009b).

Relativamente à aplicação dos CFRP, estes consistiram em laminados com 120 mm de largura e 1,4 mm de espessura, sobrepostos, dois a dois, e foram fixos à laje por meio de colagem através de resina epóxi. De uma forma generalizada, foram aplicados 24 (2 x 6 x 2) laminados na face inferior, da laje inferior, de 50 m de comprimento, centrados a meio vão (Figura 4.32).

A aplicação do reforço com laminados, efetuou-se após a aplicação do pré-esforço exterior, e este último, após a selagem das fendas com resina epóxi. No entanto, antes de proceder à devida aplicação foi preparada a superfície de forma a estar limpa e regularizada. A primeira etapa de aplicação foi a colocação do primário epóxi (Figura 4.32 a), no qual este permitiu que a superfície de betão ficasse mais aderente à colocação dos laminados. De seguida foi aplicado uma argamassa de base epóxi de colagem sobre os laminados, através do auxílio de uma régua de gabarito de forma a limitar a espessura para 3 mm (Figura 4.32 b). Posteriormente a este, foram colocados manualmente os laminados, de modo a que ficassem bem pressionados contra a superfície (Figura 4.32 c).



- a) Colocação do primário epóxi
- b) Colocação da argamassa de base epóxi de colagem sobre o laminado CFRP
- c) Colocação do laminado CFRP na face superior da laje inferior
- d) Início da colocação dos laminados CFRP na zona lateral direita

Figura 4.32 - Procedimentos da colocação dos laminados na zona central do meio vão (EP, 2011).

4.6.2.4. Reforço da ligação horizontal do tabuleiro ao encontro fixo

De modo a reforçar a obra para a ação sísmica, referente à anomalia exposta na Subseção 4.5.2 (alínea c), reforçaram-se os plintos (Figura 4.33), o que levou a um aumento da espessura em 10 cm de argamassa de alta resistência em toda a peça (encamisamento de betão), provocando um aumento da largura da base para 4.85 m, formando um único plinto. Devido às boas condições, mantiveram-se os aparelhos de apoio e as respetivas chapas metálicas.



Figura 4.33 - Plinto do encontro fixo (E1) em início de reforço (EP, 2011).

4.6.2.5. Reforço da ligação vertical do tabuleiro aos encontros

Perante a anomalia exposta na Subseção 4.5.2 (alínea d), foi aumentado o número de cabos de pré-esforço verticais. Este aumento permitiu comprimir os aparelhos de apoio dos encontros, nomeadamente 2 cabos de 7 cordões de 150 mm² de diâmetro, um em cada lado na base da carlinga de cada encontro. A passagem dos novos cabos foi por meio de furação por carotagem em cada encontro.

Cada ancoragem do cabo, está disposta em peças metálicas que constituem o nó de uma treliça, formada por uma escora horizontal, que apoia no lado exterior da base da carlinga e de um tirante inclinado que amarra no topo da carlinga. Esta amarração é feita com peças metálicas, amarradas à carlinga por barras de pré-esforço (4 por tirante). De uma forma generalizada, os tirantes são barras comerciais de 72 mm de diâmetro com tensão de cedência de 460 MPa, e por sua vez, as barras pré-esforçadas são de 50 mm de diâmetro (Ø) com rosca fina nas extremidades (Figura 4.34 e Figura 4.35).

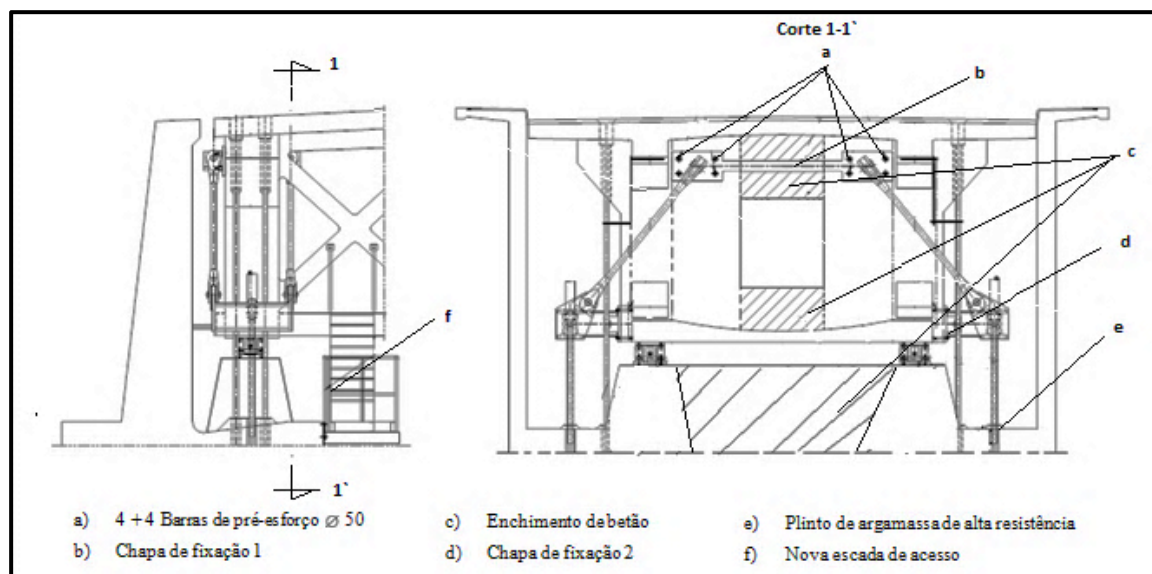


Figura 4.34 - Especificação do reforço de ligação vertical do encontro fixo (adaptado de EP, 2009b).

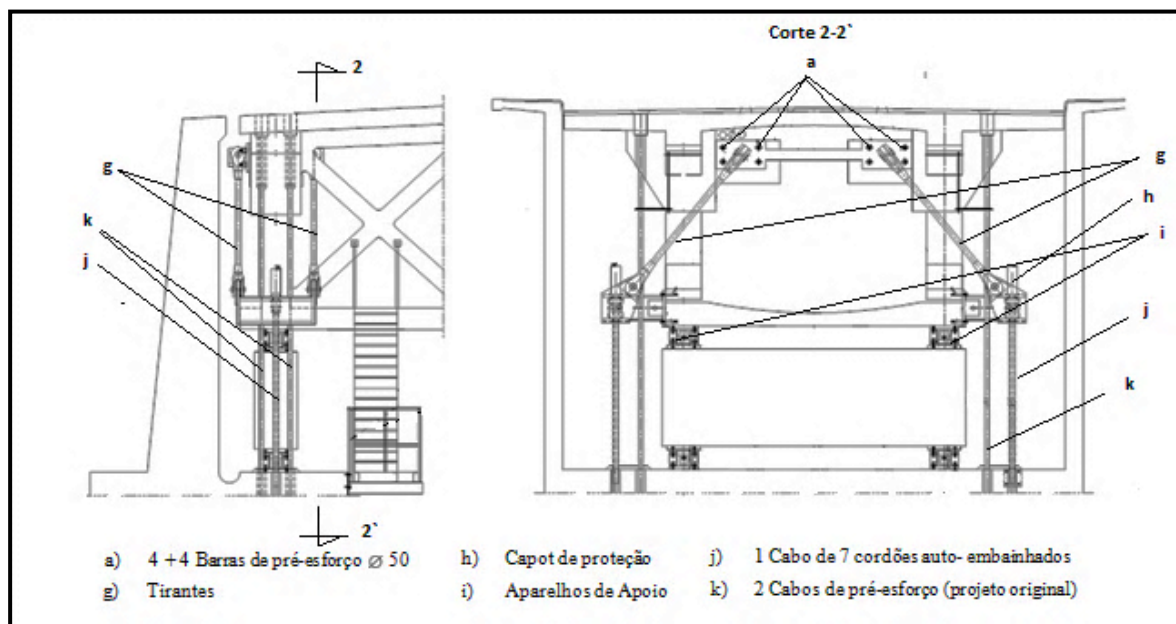


Figura 4.35 - Especificação do reforço de ligação vertical do encontro móvel (adaptado de EP, 2009b).

4.6.3. Restantes trabalhos aplicados à Ponte de Mosteirô

Além dos trabalhos de reparação e reforço foi instalado um coletor de saneamento debaixo do passadiço do lado montante, sendo este suspenso e fixo ao passadiço através de elementos metálicos em aço inox. Foi aplicada uma proteção geral à estrutura após os trabalhos de reparação e reforço, com o intuito de poder garantir a durabilidade da obra.

Devido à localização da obra sobre o Rio Douro e os riscos de contaminação ambiental, esta proteção foi baseada em tinta acrílica de base aquosa, que tem uma boa resistência à carbonatação, e à penetração da água. Os aparelhos de apoio dos pilares e dos encontros, guarda-corpos, portas de acesso, escadas metálicas e candeeiros foram pintados com uma tinta anticorrosiva. Na Figura 4.36, ilustra-se a Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro após os trabalhos de reabilitação.



Figura 4.36 - Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro (EP, 2011).

4.7. Considerações finais

Neste capítulo foram abordadas as principais patologias detetadas ao longo da fase de inspeção de duas obras de arte, bem como as suas soluções para a resolução destas patologias. No Anexo B ilustram-se, de forma esquemática os vários trabalhos realizados nas duas obras de arte, nomeadamente o Viaduto de Alhandra e a Ponte de Mosteirô.

Qualquer uma das duas obras de arte apresentava várias anomalias associadas à deterioração dos materiais e ao comportamento estrutural. Referentes aos primeiros, estas deteriorações eram mais evidenciadas no Viaduto de Alhandra, no qual este tinha problemas de infiltrações que sucediam na laje do separador central e nas juntas dos passeios, indicando que a maior parte das deteriorações existentes nas estruturas de betão armado desencadeiam-se com a presença de água. Em relação aos segundos, só a Ponte de Mosteirô que evidenciava problemas estruturais, pois apresentava excessiva fissuração. A maior parte destas fissurações eram evidências de falta de armadura devido a erros do projeto de execução.

A ocorrência de inspeções nas duas obras de arte foi de extrema importância pois não só conseguiu detetar patologias a nível dos materiais e ao comportamento estrutural como também proporcionou a variedades de ensaios e modelações estruturais, que veio a confirmar que as pontes não tinham capacidades regulamentares de segurança e de durabilidade. Salienta-se também, que as inspeções,

ensaios e modelações estruturais originaram soluções de reparação e de reforço para as devidas obras de arte.

Relativamente ao viaduto, foi necessário reforçar estruturalmente para a eventualidade de ocorrer um sismo com intensidade significativa, o que seria problemático pois este está inserido numa zona propícia a sismo de nível A, segundo o RSA. Na Ponte de Mosteirô foi apenas efetuado um reforço nos plintos, de forma aumentar a resistência da ligação horizontal do tabuleiro ao encontro fixo em relação à ação sísmica, o que é aceitável, visto que a estrutura está inserida numa zona pouco propícia a sismos de nível D, segundo o RSA.

Um outro erro de projeto que convém destacar, surge na Ponte de Mosteirô, que devido ao número insuficiente de cabos pré-esforçados verticais que liga o tabuleiro aos encontros, os aparelhos de apoio sofriam variações entre trações e compressões, originando fissuração excessiva nos encontros. A solução adotada para este problema foi um desafio a nível da engenharia, pois baseou-se em sistemas de tirantes em aço de alta resistência de forma a poder comprimir os aparelhos de apoio aos encontros.

Ainda neste capítulo, salienta-se que consoante o tipo de estrutura, a localização, origem e tipo de patologia, as técnicas e estratégias de reabilitação vão alterando. Através destas duas obras de arte, por serem diferentes estruturalmente e inseridas em locais distintos, as técnicas e estratégias de reabilitação foram, praticamente, distintas. No entanto, existiram trabalhos de reabilitação que foram semelhantes, nomeadamente: sobre o pavimento rodoviário em que foi efetuada a reparação das juntas de dilatação e a recolocação de um novo pavimento rodoviário após a sua fresagem, sendo estes motivados pelo desgaste rodoviário sobre o pavimento.

De uma forma geral comparando com outras pontes de betão armado, destaca-se que os trabalhos de reparação destas pontes praticamente são semelhantes pois envolvem a reparação do betão degradado e das armaduras com corrosão, com o devido recobrimento adequado pela regulamentação em vigor (ex. EC 2). Os problemas estruturais manifestam-se maioritariamente por fissuração, mas a solução de reabilitação, além de depender do tipo e da origem da fissuração, varia consoante o tipo de estrutura e a sua localização. Para terminar, há que saber qual a solução mais conveniente para cada situação anómala, de forma a poder garantir sempre a segurança e a durabilidade das estruturas de betão armado.

CAPÍTULO 5

AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE NA RAM

Neste capítulo são apresentadas algumas obras de arte pertencentes à Região Autónoma da Madeira (RAM). Relativamente aos três primeiros casos, apresentados posteriormente, dispõem-se do contacto visual, dos esclarecimentos de técnicos responsáveis pela sua manutenção e de documentos informativos. Os casos referidos foram objeto de apresentação de soluções de reparação ou de reforço aos trabalhos anteriormente realizados, ou programados para futuras intervenções. Em relação aos últimos casos os dados recolhidos basearam-se apenas nas patologias visualmente observadas pelo autor, para os quais expõem-se as soluções propostas.

5.1. Troço da “Via Rápida” sentido Caniçal-Machico

Todas as pontes e viadutos de betão armado pertencentes aos troços da “Via Rápida” e das “Vias Expresso” são relativamente recentes, tendo idades inferiores a 20 anos. O único reforço que até agora foi inserido numa dessas pontes e viadutos, foi num viaduto de quatro pilares no concelho de Machico, mais precisamente o viaduto que faz a ligação Caniçal-Machico (sentido único).

Este viaduto tem uma faixa de rodagem com duas vias de circulação atravessando uma linha de água (ribeiro). Em relação ao comprimento, este tem uma extensão de 225 m no total, sendo que os primeiros 171 m do tabuleiro, apoia-se numa viga em caixão, enquanto nos restantes 54 m do tabuleiro, apoia-se em duas vigas de betão maciço (Figura 5.1 b)). A largura, da zona Este, é de 14 m, enquanto a zona Oeste tem uma largura de 21 m. Esta variação de largura deve-se ao aumento da largura da faixa de rodagem, visto que a zona Oeste possui um desvio (via) para a zona Norte de Machico (Figura 5.1 a)).



Figura 5.1 - Viaduto sentido Caniçal – Machico: a) Vista sobre o tabuleiro; b) Vista sob o tabuleiro (Novembro de 2013).

○ *Reforço por meio de pré-esforço*

Na fase de construção do viaduto, alguns cabos de pré-esforço inseridos no tabuleiro, romperam a partir do seu tensionamento, o que originou a inserção no projeto original, um reforço por meio de cabos de pré-esforço. Este reforço foi inserido no tabuleiro em caixão, exatamente entre os dois pilares centrais na direção longitudinal, e teve início no mês de Maio de 2013, situação que ocorreu após alguns anos o viaduto estar em serviço, de acordo com o dono de obra. O facto da inserção do reforço ter sido posterior à construção, originou uma ligeira deformação (flecha) na zona central do meio vão, onde a concentração de esforços é mais alta.

O reforço baseou-se em 13 monocordões auto-embainhados com cera (massa consistente) junto de cada alma da viga caixão, nos quais estes podem ser retensionados ou substituídos (sistema não aderente). Na execução do reforço não foi necessário introduzir maciços de ancoragem, visto que o viaduto já os possuía, pois foram inseridos na altura de construção. No entanto, foram introduzidos apoios intermédios para suportar os cabos (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Reforço com cabos de alta resistência: a) Ancoragem ativa; b) Apoio intermédio (Novembro de 2013).

Relativamente ao traçado dos cabos, estes são compostos por troços retos e estão organizados da seguinte forma: na zona superior do diafragma, sobre o pilar P2, foram inseridas as ancoragens ativas, nas quais foi aplicado o tensionamento dos cabos (Figura 5.3 a)); na zona a meio vão, entre os dois pilares centrais, existem maciços de desvio que têm como função, através do tensionamento dos cabos, exercer forças no sentido ascendente (Figura 5.3 b)). Por fim, junto à base do diafragma, sobre o pilar P3, existem os maciços de ancoragem passiva que tem como fundamento suportar o tensionamento dos cabos vindo da zona do diafragma sobre o pilar P2 (Figura 5.3 c)).

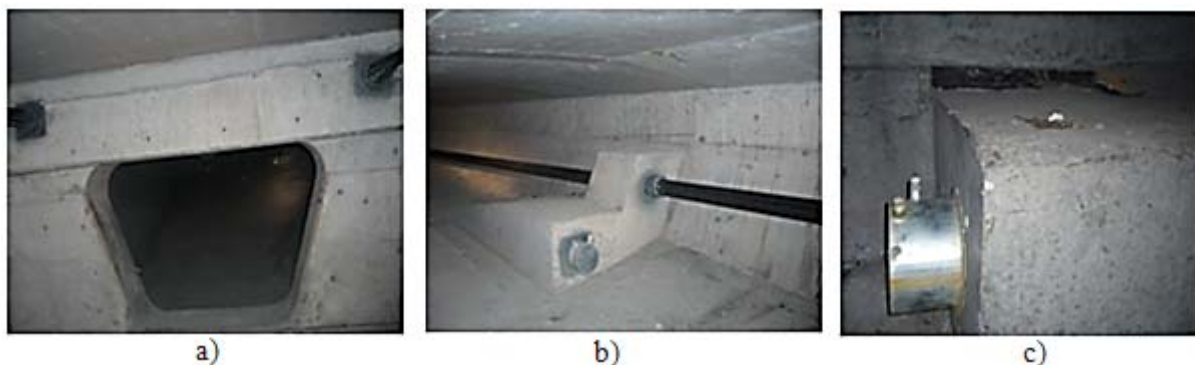


Figura 5.3 - Reforço com pré-esforço: a) Zona de tensionamento; b) Maciço de desvio; c) Ancoragem passiva (Novembro de 2013).

5.2. Troço da “Via Rápida” de duas faixas de rodagens em Santo António

Como foi referido no capítulo 2 a manutenção das obras de arte é da responsabilidade dos donos de obra ou dos concessionários, nos quais podem, ou não, adjudicar empresas especializadas em inspeções para inspecionar as suas obras de arte. A Betar é uma das empresas que analisa e avalia o estado de manutenção e conservação das obras de arte da RAM.

Num viaduto com tabuleiro em caixão, que faz parte do troço da “Via Rápida” situada na freguesia de Santo António, foi diagnosticado pela Betar que os aparelhos de apoio que se situam sobre os dois pilares centrais necessitam de ser substituídos.

o *Substituição dos aparelhos de apoio*

Constata-se que estes aparelhos de apoio sobre os dois pilares centrais estão demasiado comprimidos o que dificulta a transmissão das cargas do tabuleiro para os pilares (Figura 5.4). Esta situação deveu-se, aos vários ciclos de oscilação derivados ao tráfego rodoviário. Para garantir que os aparelhos de apoio desempenhem corretamente as suas funções, estes aparelhos têm de oscilar (sentido descendente e ascendente) com a passagem dos automóveis, o que na realidade não ocorre pois estão demasiados comprimidos.



Figura 5.4 - Troço da “Via Rápida” em Santo António (Novembro de 2013).

Em princípio os trabalhos de substituição vão ser realizados para meados do ano 2014, para os quais serão necessários seis macacos hidráulicos, um para cada encontro e pilar, de modo a poderem levantar ligeiramente o tabuleiro em caixão por forma substituir os aparelhos de apoio.

5.3. Ponte sobre a Ribeira do Inferno

A Ponte sobre a Ribeira do Inferno é um troço de uma via regional (Antiga E.R. 101) que faz a ligação do concelho de São Vicente ao concelho do Porto Moniz. Esta ponte de alvenaria em arco foi sujeita a algumas intervenções pelo concessionário do dono de obra (Viaexpresso). No total foram realizadas três intervenções de forma descontínua (Figura 5.5). Embora esta ponte não seja de betão armado, foi incluída nesta dissertação pois alguns dos seus problemas poderiam consistir nas pontes de betão armado.



Figura 5.5 - Ponte sobre a Ribeira do Inferno: a) Vista à Montante; Vista à Jusante (Novembro de 2013).

o *Intervenções de reforço e de reparação*

Em Dezembro de 2009, a costa norte da Ilha da Madeira sofreu fortes precipitações o que provocou o aumento e turbulência do caudal da Ribeira do Inferno, levando a fortes infraescavações de ambos os encontro da ponte e à erosão do talude Sudeste (Figura 5.6). Em janeiro de 2010, foi realizado a primeira intervenção na ponte em arco, no qual foram executados lintéis de betão armado para proteção e recalçamento das fundações de ambos os encontros e, a reconstrução do talude Sudoeste por meio de enrocamento (Viaexpresso, 2010a).



Figura 5.6 - Erosão provocada pelo temporal de Dezembro de 2009: a) Encontro Oeste b) Talude Sudoeste (Viaexpresso, 2009).

Relativamente ao procedimento de execução dos lintéis de betão armado este consistiu:

- No saneamento da zona envolvente ao encontro;
- Na realização de pregagens no terreno rochoso através da selagem de varões;
- Na criação de rugosidade na parede do encontro;
- Na execução de ferrolhos nas paredes dos encontros através da selagem de varões;
- Na execução de cofragens e posteriormente armação dos lintéis, deixando tubos que funcionaram como pontos de injeção;
- Na execução da betonagem dos lintéis com betão autonivelante;
- No preenchimento das zonas sob os encontros através de injeções com calda de cimento a partir dos tubos de injeção.

A segunda intervenção ocorreu após o temporal de 20 de Fevereiro de 2010, que originou o abaixamento generalizado do leito da ribeira, provocando erosão das fundações de ambos os encontros, ficando visíveis diversas cavidades sob os lintéis de betão armado, construídos em janeiro do mesmo ano (Figura 5.7).



Figura 5.7 - Erosão sob os lintéis: a) Encontro Este; b) Encontro Oeste (Viaexpresso, 2010a).

Relativamente à solução proposta, de forma não obstruir a secção de escoamento e aumentar a velocidade, foi executado uma laje em enrocamento argamassado de montante para jusante, sobre um

enrocamento geral e duas vigas de betão ciclópico (Figura 5.8). Após a execução da laje de enrocamento, foi regularizado de forma generalizada o leito da ribeira.

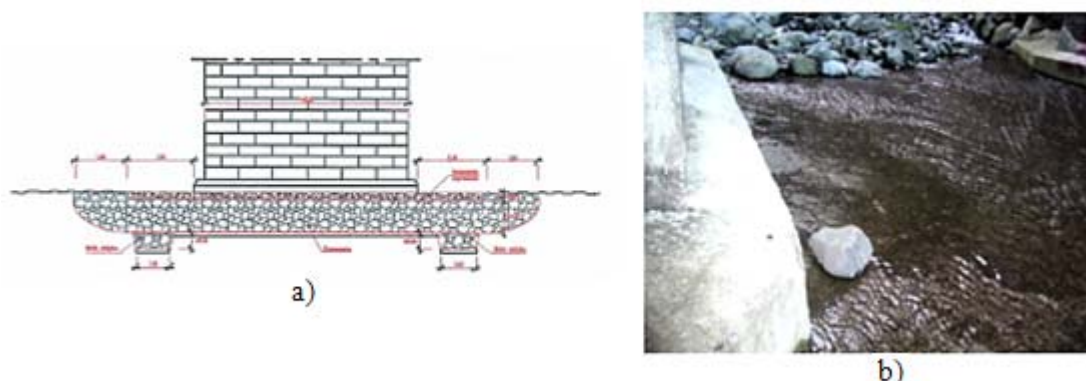


Figura 5.8 - Laje de enrocamento argamassado: a) Representação transversal (Viaexpresso, 2010a); b) Aspeto final (Novembro de 2013).

A última intervenção ocorreu a partir de Setembro de 2010, motivada por uma inspeção efetuada pela Betar. A principal anomalia (Viaexpresso, 2010b) consistiu numa deformação na zona superior do muro Nordeste, aparentemente relacionada com a deficiente rede de drenagem (Figura 5.9 b)). Houve acumulação excessiva de água, por meio de infiltração, que provocou a lavagem do aterro no tardo do muro, o que permitiu a deterioração do material de preenchimento das juntas entre os blocos de pedra, fazendo com que a estabilidade do muro fosse afetada (Figura 5.9 a)).

Foi verificado ainda pela Betar que, no topo do muro, constituído por um lintel, este apresentava-se fissurado e com existiam vestígios de vegetação. Segundo a Betar este último contribuiu igualmente para a deterioração do material de enchimento do muro de pedra (Viaexpresso, 2010b).



Figura 5.9 - Anomalias do lado Este: a) Muro com degradação; b) Rede de drenagem deficiente (Viaexpresso, 2010b).

As soluções de reparação propostas pela Betar (Viaexpresso, 2010b), e que posteriormente foram postas em prática basearam-se na melhoria do sistema de drenagem da via e na reparação do muro.

Relativamente ao sistema de drenagem, este consistiu na construção de um troço de caleira no prolongamento da existente com uma extensão de 4.50 m que une a uma caixa de ligação (Figura 5.10 a)), que por sua vez, liga por meio de uma valeta a uma caixa de dissipação, inserida no lado montante da ponte (Figura 5.10 b)). Os trabalhos de reparação do muro (Figura 5.10 c)) basearam-se:

- Na demolição com recurso a martelo pneumático das secções do lintel com fissuração;
- Na demolição da zona afetada do muro;
- Na reconstrução do muro, em que houve a reposição dos blocos de pedra e preenchimento das juntas entre blocos por meio de argamassa;
- Na demolição do pavimento com a finalidade inserir uma manta geotêxtil e executar o aterro no tardo do muro;
- Na execução do lintel em betão no coroamento do muro, deixando um negativo para a colocação de um tubo de drenagem na zona baixa da via;
- Na reconstrução do revestimento da via.

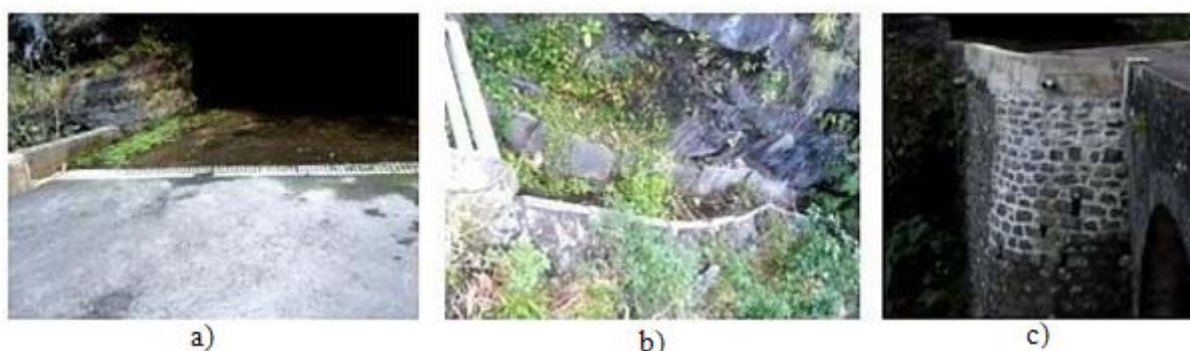


Figura 5.10 - Última intervenção: a) Prolongamento da caleira à existente; b) Construção da Valeta; c) Restabelecimento do muro Nordeste (Novembro de 2013).

5.4. Passagem superior no concelho de Santa Cruz

Esta passagem superior, de duas vias de sentidos opostos, é um sistema em pórtico, que é encastrado nas duas extremidades. Pelo aspeto desta passagem e pela sua localização (Rua Bom Jesus), possivelmente os encontros são de betão ciclópico enquanto a laje que forma o tabuleiro é de betão armado. A laje basicamente não tem qualquer anomalia de grande amplitude, apesar de serem visíveis, em algumas zonas localizadas, a armadura com corrosão (Figura 5.11). Relativamente aos encontros, estes possuem patologias mais significativas, com maior evidência para o encontro direito.



Figura 5.11 - Laje com exposição de armadura (Novembro de 2013)

Na zona central do encontro direito foi possível visualizar vestígios de líquenes e de fissuração (Figura 5.12 a)) nos quais estes aparentemente foram desencadeados pela existência de humidade, ocasionada pelos escorrimentos de água da zona lateral (Figura 5.12 b)). Pelo aspeto da fissuração houve reações no interior do betão através de reações alcalis-sílica, que progrediram a partir da humidade existente. Em relação ao lado lateral do mesmo encontro, foi possível visualizar que o betão superficial encontrase degradado, fissurado, com desenvolvimento de líquenes, de vegetação e com formação de eflorescências, devido há existência dos devidos escorrimentos.



Figura 5.12 - Encontro direito: a) Zona central com fissuração; b) Zona lateral com degradação e escorrimento (Novembro de 2013)

Além destas, ainda referente à zona lateral do encontro direito foi possível observar a desorganização e degradação dos tubos de água e dos cabos de rede/telefone. Relativamente ao pavimento rodoviário e ao sistema de proteção (guardas), o primeiro encontra-se fragmentado enquanto o segundo, de betão armado, apresentava-se muito degradado na zona da viga de bordadura, com exposição da armadura com corrosão (Figura 5.13).



Figura 5.13 - Degradação sobre os encontros; a) Guarda degradada com exposição de armadura; b) Pavimento fragmentado (Novembro de 2013).

O maior problema encontrado nesta obra de arte são, sem dúvida, os escoamentos de água, pois além de contribuir para a degradação do betão e para o aparecimento de líquenes, está em contacto com os cabos de rede/telefone. Estes escoamentos de água, possivelmente, têm origem da obstrução ou danificação do sistema de canalização da água municipal, situado sob o pavimento rodoviário.

○ *Soluções propostas*

Conforme o que foi abordado no capítulo 2, para garantir a durabilidade e a segurança de uma ponte ou viaduto é necessário que haja manutenção e reparação. Como tal, de uma forma simplificada, descrevem-se algumas medidas de intervenção desta passagem superior do concelho de Santa Cruz, propostas pelo autor:

- 1) Reparação do sistema de canalização da água municipal sob o pavimento rodoviário, a partir do rasgamento lateral do pavimento;
- 2) Substituição do sistema de proteção (guardas);
- 3) Substituição da camada de desgaste do pavimento rodoviário;
- 4) Desvio e organização dos tubos de água e dos cabos de rede/telefone (caso possível);
- 5) Limpeza superficial dos encontros e da face inferior do tabuleiro (meio mecânico e manual);
- 6) Remoção do betão degradado, contaminado e com deficiência;
- 7) Limpeza geral dos encontros e da face inferior do tabuleiro;
- 8) Aplicação de pintura anticorrosiva ou de um revestimento epoxídico em pontos localizados na face inferior do tabuleiro, sobre a armadura exposta;
- 9) Aplicação do novo betão de base de ligante hidráulico, de forma manual ou por meio mecânico (betão projetado);
- 10) Proteção geral por pintura com tinta acrílica de base aquosa;
- 11) Recolocação de forma organizada os tubos de água.

5.5. Aqueduto sob a Ponte do Ribeiro Seco

Este aqueduto está situado no concelho do Funchal fica, sobre o Ribeiro Seco, e tem como função suportar um grande coletor de água, podendo esta ser potável ou impotável (Figura 5.14). Este aqueduto é constituído por quatro pilares de betão armado e um tabuleiro de estrutura metálica. Aparentemente a estrutura metálica que constitui o tabuleiro não apresenta nenhuma patologia.



Figura 5.14 - Ponte sob a ponte do Ribeiro Seco (Novembro de 2013)

Ao contrário da estrutura metálica, os quatro pilares apresentam um nível de degradação avançado (Figura 5.15). O betão que constitui os pilares manifesta-se descascado com exposição excessiva da armadura com corrosão. Pelo grau e espectro da deterioração e da corrosão, estas anomalias desencadearam-se devido à má qualidade do betão e ao pouco recobrimento pela parte do betão às armaduras.

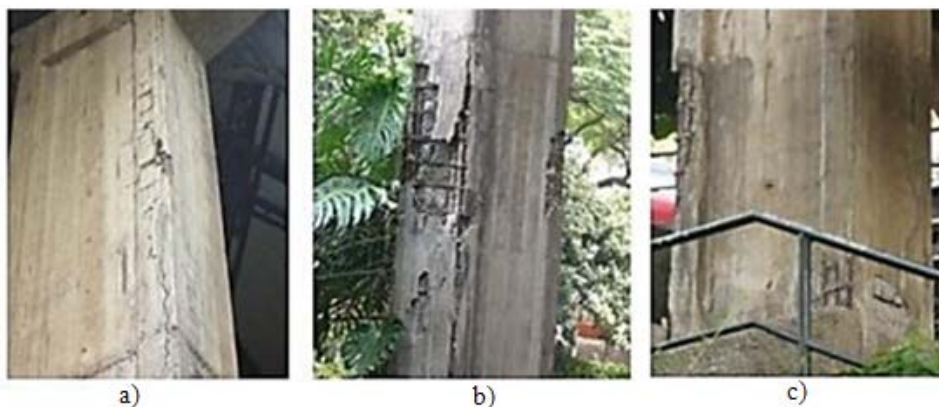


Figura 5.15 - Pilares com degradação: a) Pilar P1; b) Pilar P2; c) Pilar P3 (Novembro de 2013)

○ *Soluções propostas*

Devido ao excessivo estado de degradação do betão e da corrosão das armaduras, convém tomar medidas interventivas, nomeadamente nos pilares. Para garantir uma boa qualidade de reparação é necessário remover todo o betão superficial dos pilares, de modo que as armaduras pudessem ficar

expostas para serem limpas e ser removida a oxidação. Este processo de remoção poderá ser feito manualmente, com escopro e martelo, ou por meio mecânico, com jacto de água com alta pressão. No caso das armaduras que perderam secção devido a oxidação convém seguir os seguintes parâmetros:

- Para secções entre 10% e 30%, a secção do varão deverá ser complementada por um novo varão, de forma a repor a área inicial. Sendo a sua amarração realizada com um comprimento de amarração adequado.
- Para secções superiores a 30%, a secção do varão deverá ser substituída através da adição de um varão que deverá ser ligado ao existente por intermédio de soldadura.

Logo após a limpeza e reparação das armaduras, procede-se à colocação de um revestimento epoxídico, de modo a envolver totalmente as armaduras. Este revestimento tem como finalidade proteger as armaduras pelo fenómeno de passivação, criando uma barreira impermeável.

Contudo, para terminar a reparação dos pilares procede-se a aplicação do novo betão de base de ligante hidráulico, para que as armaduras possuam mais de 3cm de recobrimento. A aplicação do novo betão poderá ser feita manualmente ou por meio mecânico, como betão projetado. Após os trabalhos de reparação, procede-se à proteção geral por meio de pintura, feita com tinta acrílica de base aquosa que tem uma boa resistência à carbonatação e à penetração da água.

5.6. Ponte em arco no concelho de Santa Cruz

Um das primeiras pontes construídas na RAM, foram as pontes em arco, que tal como muitas outras são de alvenaria de pedra (basalto). Algumas destas pontes, com o passar dos anos, sofreram ligeiras alterações estruturais como também algumas reparações, por meio de outros materiais, como o betão armado e o aço estrutural. Estas alterações foram motivadas pelo aumento das cargas rodoviárias e por algumas degradações existentes, principalmente, na base dos encontros, que eram, exclusivamente, de alvenaria, mas que devido às degradações causadas pelo caudal das ribeiras, em torno da base destes, possuem neste momento lintéis de betão ciclópico.

No entanto, no concelho de Santa Cruz, existe uma ponte em arco, na qual a zona dos encontros e tímpano é constituída por alvenaria de pedra, revestido por argamassa, enquanto os passeios são em laje sustentada por vigas transversais e uma viga longitudinal de betão armado (Figura 5.16).



Figura 5.16 - Ponte em arco de alvenaria de pedra (Novembro de 2013)

Os problemas visualizados na ponte situam-se nos passeios sustentados pelas vigas. Ao longo e sob os passeios constatou-se a existência de vestígios de humidade, de vegetação, de líquenes e de eflorescência. Contudo, o maior problema constatado foi nas vigas transversais, quer do lado montante, quer do lado jusante, apresentavam fissuração excessiva (Figura 5.17). Esta situação, possivelmente, foi provocada pela insuficiente ou inexistente armadura transversal das vigas (estribos), o que, posteriormente com a colocação das guardas (varandas) levou a tensões e causou fissuração nestas vigas transversais.

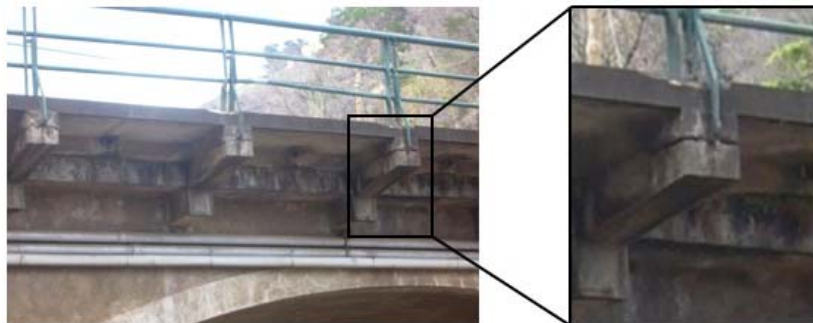


Figura 5.17 - Vigas Transversais fissuradas (Novembro de 2013)

○ *Soluções propostas*

Uma alternativa que se propõe para a reparação destas vigas transversais, além de uma limpeza geral à ponte através de jacto de água e escovagem, e da retirada provisoriamente das guardas, é a injeção com grout (argamassa de alta resistência) nas fissuras das vigas transversais, de modo que todos os espaços vazios no interior da peça fiquem preenchidos.

E, como reforço, colocar-se-ia em cada face das vigas transversais, chapas metálicas, de forma que estas ficassem fixadas ao betão por meio de resina epóxi e de buchas metálicas galvanizadas. Para

terminar, após os trabalhos de reparação, colocar-se-iam as guardas, mas em vez de as bases das guardas estarem inseridas no interior das vigas, o que proporcionou os problemas anteriormente visualizados, colocar-se-ia superficialmente, fixadas às vigas por meio de buchas metálicas galvanizadas.

Para aumentar a durabilidade e segurança da estrutura de alvenaria, propõem-se, em torno da base de cada encontro, um lintel de betão ciclópico, de modo a fortalecer e evitar o efeito de abrasão causado pelo escoamento da ribeira. Para tal, seria necessário remover/limpar os grandes e médios blocos de pedra e a vegetação que se encontrou na inspeção visual da ponte.

Por fim, revestia-se com argamassa a base dos encontros, pois estes estão desproporcionais em relação a zona do tímpano. E por último, aplicar-se-ia uma proteção geral (ex.: pintura, impregnação hidrofóbica) à estrutura, de forma a prevenir a absorção de agentes agressivos, tais como água, gases e agentes biológicos.

5.7. Pontes sobre as principais ribeiras do concelho do Funchal

No dia 20 de Fevereiro de 2010, a Ilha da Madeira foi devastada por um enorme temporal, do qual ainda se encontram alguns vestígios desse temporal. As pontes sobre as principais ribeiras do concelho do Funchal, nomeadamente a Ribeira de São João, a Ribeira de Santa Luzia e a Ribeira de João Gomes também foram afetadas.

É possível visualizar que algumas pontes sobre as três ribeiras apresentam patologias alusivas aos materiais tais como, degradações a nível do betão, exibição de armaduras com corrosão e algumas fissuras não estruturais (fissuração inativa). No caso das pontes sobre a Ribeira de João Gomes, em que as evidências do temporal eram superiores às restantes ribeiras, foi constatado sob algumas pontes, diversas cavidades sob os lintéis de betão armado e dos muros de alvenaria, proporcionadas pela erosão do escoamento da ribeira. Estas situações convêm ser intervencionadas pois, na eventualidade de ocorrer futuros escoamentos turbulentos estes podem provocar a instabilidade dos encontros e dos muros de alvenaria.

Nas seguintes imagens ilustram-se algumas das patologias das várias pontes sobre as principais ribeiras do concelho do Funchal, enquanto no Anexo C ilustra-se o ortofotomapa do centro do concelho do Funchal, com as devidas localizações das pontes onde foram observadas estas patologias.

Sobre a Ribeira de São João



Figura 5.18 (C1) - Ponte de São João, fissuração a montante (Dezembro de 2013).

Sobre a Ribeira de Santa Luzia



Figura 5.19 (C2) - Ponte Nova, degradação do betão com exposição de armadura a jusante (Dezembro de 2013).

Sobre a Ribeira de João Gomes



Figura 5.20 (C3) - Ponte do Mercado, deterioração do betão com exposição dos cabos de pré-esforço a montante (Dezembro de 2013).



Figura 5.21 (C4) - Ponte de ligação entre o Anadia e o Oudinot, degradação do betão com exposição dos cabos de pré-esforço a jusante (Dezembro de 2013).

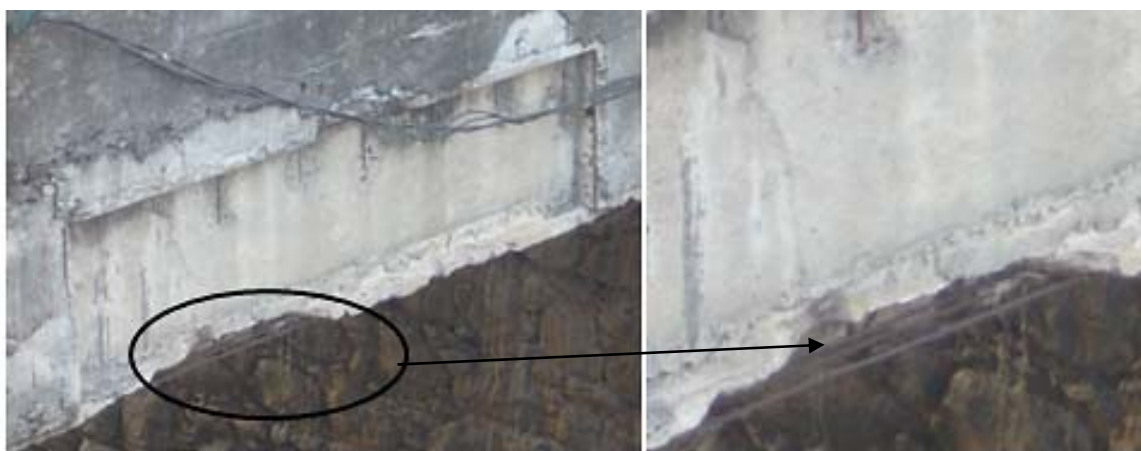


Figura 5.22 (C5) - Ponte do Carmo, exposição de armadura a montante (Dezembro de 2013).



Figura 5.23 (C6) - Ponte de ligação ao Campo da Barca Sul, exposição de armadura a jusante (Dezembro de 2013).



Panorama a jusante



Panorama a montante

Figura 5.24 (C7) - Ponte de ligação ao Campo da Barca Norte, degradação do betão com exposição das armaduras e infraescavação sob o muro de alvenaria do lado montante (Dezembro de 2013).



Figura 5.25 (C8) - Ponte de ligação entre a Rua do Matadouro e a Rua Dr. Pestana Júnior, infraescavações sob os lintéis de betão armado (Dezembro de 2013).



Panorama a jusante



Panorama a montante

Figura 5.26 (C9) - Ponte Dom Ernesto Sena Oliveira, deterioração do betão com exposição de armadura (Dezembro de 2013).

○ *Soluções propostas*

Em relação às diversas cavidades sob os lintéis de betão e dos muros de alvenaria, propõe-se, primeiramente, uma limpeza do leito da ribeira e também da zona infraescavada. De seguida, de forma a poder consolidar as fundações, procede-se ao preenchimento das zonas infraescavadas por meio de betão fluido para as pequenas concavidades e, betão ciclópico para as grandes concavidades, deixando tubos para efetuar, posteriormente, a injeção com calda de cimento. Estas injeções por meio de calda de cimento servirão para a consolidação entre o terreno de fundação e o próprio betão de preenchimento.

Por outro lado, de modo a evitar futuras erosões no leito da ribeira, propõe-se a execução de uma laje em enrocamento argamassado entre os dois encontros, de forma a poder manter o nível do leito da ribeira e evitar futuras infraescavações nos lintéis de betão armado e dos muros de alvenaria.

Relativamente às restantes patologias encontradas no contacto visual, estas, basicamente, são semelhantes às anteriores. De uma forma sistemática e simplificada, pretende-se ilustrar na Tabela 5.1, possíveis técnicas e soluções de reparação e de proteção para as pontes sobre as principais ribeiras do Funchal, interligando com as partes da Norma NP EN 1504.

Tabela 5.1 - Soluções e técnicas de reparação e de proteção.

Procedimentos de reparação	Opções de produtos de reparação e de proteção	Métodos e partes da NP EN 1504	
Preparação da superfície degradada <ul style="list-style-type: none"> Remoção do betão deteriorado; Limpeza do aço e do betão; Tratamento das armaduras e eventual reforço; Reposição das seções com argamassas de reparação. (ver seção: 3.1)	Proteção sobre as armaduras <ul style="list-style-type: none"> Pintura anticorrosiva; Revestimento com resina epóxida. Produtos de reposição <ul style="list-style-type: none"> Produtos à base de ligantes sintéticos (resinas); Produtos à base de ligantes hidráulicos; Produtos modificados com polímeros. 	Revestimentos de barreira sobre o aço.	7)
		Substituição do betão degradado.	3) e 4)
Reparação das fissuras <ul style="list-style-type: none"> Remoção do betão degradado; Limpeza; Selagem da superfície da fenda; Aplicação de tubos metálicos; Injeção do material de reparação; Remoção do ascendente de selagem da superfície. (ver seção: 3.3)	Fissuração inativa <ul style="list-style-type: none"> Injeção com resinas epóxidas (para pequenas e médias aberturas); Injeção com grout (para as de maior abertura). 	Enchimento e injeção de fendas e vazios.	5)
Proteção geral <ul style="list-style-type: none"> Aplicação após a conclusão dos trabalhos de reparação. 	<ul style="list-style-type: none"> Impregnação; Impregnação hidrofóbica; Revestimento por pintura. 	Redução ou prevenção da absorção de agentes agressivos.	2)

5.8. Considerações finais

Neste capítulo, apresentaram-se algumas obras de arte pertencentes à Região Autónoma da Madeira (RAM), cujo objetivo foi explicitar o que se conseguiu assimilar e apresentar soluções às patologias observadas no contacto visual de algumas pontes. Por sua vez, estas soluções foram sugeridas com base no que foi abordado nos capítulos anteriores.

Relativamente ao reforço que foi efetuado no viaduto pertencente ao troço da “Via Rápida”, como foi prevista na fase de projeto, a possibilidade de efetuar um reforço com cabos pré-esforçados, tornou-se mais económico, pois não foi necessário inserir maciços de ancoragem no interior do tabuleiro, o que implicaria outros custos devido à sua execução.

Outro reforço que convém ser destacado é o que foi executado na ponte sobre a Ribeira do Inferno, que ficou danificada devido às condições climáticas. Como foi referido anteriormente, esta ponte não é de betão armado, no entanto foi incluída nesta dissertação, pois os problemas que a subsistiam poderiam estar relacionados com as pontes de betão armado. O temporal de 2010 originou diversas cavidades sob os lintéis de betão armado, que são semelhantes às que se encontrou em algumas pontes de betão armado sobre a Ribeira de João Gomes. Como estas anomalias sob os lintéis são semelhantes, as soluções que se propôs são semelhantes às que foram executadas na ponte sobre a Ribeira do Inferno.

Relativamente aos problemas detetados visualmente, estes assumem-se como problemas não estruturais, tais como a degradação do betão, a corrosão do aço e algumas fissuras não estruturais, que necessitam de reparação e de proteção. Possivelmente, esta falta de manutenção provém do desconhecimento das entidades responsáveis pelas obras de arte e/ou por fatores económicos.

É importante salientar que algumas pontes e viadutos existentes na RAM, principalmente as da “Via Rápida” e das “Vias Expresso”, são estruturas com idades inferiores a 20 anos que estão, constantemente, em manutenção e em reparação. As referidas pontes estão sujeitas, diariamente, a diferentes tipos de tráfego, a velocidades superiores e a colisões de veículos, contrariamente às pontes regionais onde o tráfego é bem mais moderado. De uma forma generalizada, e, tendo em conta os contactos com os diversos donos de obra e as visitas a diferentes tipos de pontes, constatou-se que, aparentemente, a maior parte das estruturas inseridas na RAM não tem qualquer problema estrutural detetável a “olho nu”. No entanto, existem algumas pontes, principalmente as do concelho do Funchal, que precisam de manutenção devido ao seu estado de deterioração.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. Conclusões gerais

A presente dissertação foi desenvolvida com base na consulta de diversos elementos bibliográficos e nos contactos com alguns técnicos especializados em reabilitação de obra de arte, de forma a poder alcançar os objetivos que foram estabelecidos inicialmente nesta dissertação. Ao longo deste estudo foram apresentadas considerações finais relativas aos diferentes assuntos, referentes à temática deste trabalho. Deste modo, o presente capítulo faz referência somente às considerações mais relevantes.

Constatou-se que para identificar as anomalias e conhecer as suas causas, é fundamental a existência de inspeções, ensaios e monitorização na vida de uma ponte, pois só assim se acompanha o estado de conservação e o aparecimento de eventuais anomalias, que possam colocar em causa a estabilidade da estrutura e a sua segurança. É através da existência de inspeções, ensaios e monitorização que se consegue fazer um correto diagnóstico da estrutura, para que posteriormente sejam alvo de reparação e de reforço.

A maior parte das patologias que sucedem nas pontes rodoviárias de betão armado, desencadeiam-se com a presença de água e/ou por problemas estruturais devido a erros do projeto de execução. Para corrigir os primeiros, é recomendado que as pontes sejam o mais repelente possível à água, nomeadamente por meio de impregnação hidrofóbica, pinturas, membranas impermeabilizantes, sistema de drenagem, etc. Relativamente aos segundos, convém na fase de conceção e projeto, ter em consideração a possibilidade de ocorrer certas patologias estruturais de forma a poder minimizar os mesmos (ver: Subseção 2.2.1).

É importante salientar, que as pontes de betão armado degradam-se ao longo do tempo, por meio das ações agressivas naturais (ambiental, biológico, física, química) e por ações agressivas de origem humana (excesso de tráfego, acidentes, vandalismo, poluição), mas também é importante referir que as pontes com poucos anos de idade podem ter problemas estruturais, devido a erros cometidos nas fases anteriores, nomeadamente na fase de conceção e projeto e na fase de construção. Ou seja, apesar de uma ponte ser recente, pode ter problemas estruturais devido às fases anteriormente referidas.

É fundamental que na fase de conceção se tenha consciência da necessidade de efetuar trabalhos de manutenção e de conservação nas obras de arte, de forma a poder facilitar as inspeções e a substituição de elementos degradados ou com defeito, designadamente: aparelhos de apoio, guarda-corpos, guardas de segurança, juntas de dilatação, etc. Com base nisto, é necessário que as estruturas possibilitem o acesso a todos os elementos estruturais e não estruturais, através da introdução de escadas e de aberturas transitáveis no interior dos tabuleiros, encontros e pilares de seção vazada.

Ainda na fase de conceção, convém ter a perceção de que existem produtos e sistemas de reabilitação, e também ter a perceção de que estes devem ser utilizados como último recurso, em caso de patologias ou de prevenção. Pois, além de necessitarem de pessoal qualificado e especializado, são economicamente desfavoráveis.

Por outro lado, sabendo que é nas fases anteriores à fase de serviço que se ocasionam a maioria dos problemas estruturais, é recomendado que no projeto de execução se incluam possíveis instalações de reforço. Como por exemplo, a inserção de maciços de ancoragens no interior dos tabuleiros em caixão, caso seja necessário efetuar um reforço com cabos de pré-esforço. Assim, consegue-se ter um reforço mais económico, caso for inevitável.

Alusivo aos produtos e sistemas de reabilitação, existe uma enorme variedade de soluções e técnicas de reabilitação. Porém há que saber qual a solução e técnica mais conveniente para cada tipo de problema, e também garantir a qualidade e durabilidade dos materiais e sistemas a aplicar, com o intuito de garantir a segurança e durabilidade das estruturas de betão armado.

Relativamente às duas obras de arte de Portugal Continental, estas vêm a confirmar alguns aspetos que foram abordados anteriormente neste capítulo, nomeadamente: a maior parte das anomalias que sucedem nas pontes de betão armado, desencadeiam-se com a presença de água e/ou por problemas estruturais devido a erros cometidos nas fases anteriores a de serviço; as inspeções, ensaios e modelações são de extrema importância na vida de uma ponte; e, algumas das soluções de reabilitação além de serem consideradas grandes desafios a nível da engenharia e de necessitar de pessoal qualificado e especializado são economicamente desvantajosas.

Alusivo às soluções que foram sugeridas para as patologias das pontes pertencentes à RAM, convém salientar que estas foram baseadas no que foi abordado nos capítulos anteriores e nas causas que as proporcionaram. Isto, no sentido, de que, além de ser necessário ter a perceção das soluções e técnicas de reabilitação, é relevante saber quais as razões que levaram ao seu aparecimento, de modo a facilitar na seleção da técnica e solução mais conveniente, de forma a não proporcionar outros problemas ou até mesmo o mesmo problema que sucedeu anteriormente.

Para terminar, é importante que as entidades responsáveis pelas obras de arte conheçam o seu património e o mantenha em bom estado de conservação, através da implementação de sistemas de gestão, com o objetivo a garantir a segurança dos seus utilizadores e certificando a durabilidade, de forma racional e o mais economicamente possível.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Tendo em conta que a temática desta dissertação incidiu sobre a reabilitação de pontes de betão armado, apresentam-se algumas ideias que podem ser desenvolvidas nesta área:

- Relacionar os vários tipos de anomalias nos diferentes tipos de obra de arte, com fatores como idade, material, tipo de estrutura, localização, etc. De forma a poder compreender o comportamento das estruturas e identificar as patologias mais comuns e respetivas causas, para cada tipo de obra de arte.
- Desenvolver um sistema informático que tenha toda a informação sobre aplicação, técnicas e soluções de reabilitação. Com o objetivo de facilitar qualquer projeto de reabilitação nas definições de seleção para cada situação em anomalia.
- Desenvolver sistemas inteligentes de monitorização, capazes de interpretar, em tempo real, a informação transmitida e traduzir medidas corretivas sobre a obra de arte. Por exemplo, aplicação de cargas ascendentes à estrutura através do tensionamento automático de cabos de pré-esforço.
- Desenvolvimento de modelos numéricos que permitam prever as anomalias dos materiais e elementos estruturais das obras de arte em função do tempo, a partir do cálculo estrutural e do cálculo da degradação dos materiais.

REFERÊNCIAS

A

Andrey, D. (1987) - *Maintenance des ouvrages d'art: Méthodologie de surveillance*, Tese de Doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

Auto-Estradas de Portugal, S.A. (Brisa) (2002a) - *Reabilitação do Viaduto de Alhandra, Memória Descritiva e Justificativa, Projecto de Execução*, A2P, Lisboa.

Auto-Estradas de Portugal, S.A. (Brisa) (2002b) - *Peças desenhadas do Viaduto de Alhandra, Projecto de Execução*, A2P, Lisboa.

B

Boleó, L. (2012) – *Panoramio*, Obtido em 2 de Maio de 2013, de Panoramio: <http://www.panoramio.com>.

Branco, F. (2001) – «Do Projecto à Manutenção - Uma Visão Integrada na Gestão das Pontes», In A. Costa; A. Fonseca; A. Arêde - *Seminário-Segurança e Reabilitação das Pontes em Portugal* (pp. 41-50), FEUP edições, Porto.

C

CMF - Câmara Municipal do Funchal. (2013) - *Município do Funchal*, Obtido em 20 de Dezembro de 2013, de CMF: [http:// www.cm-funchal.pt](http://www.cm-funchal.pt).

Correia, J. (2011) - *Protecção, Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado*, Apontamentos da disciplina Introdução à Reabilitação de Edifícios Contemporâneos, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa

Costa, V. (2009) - *Desempenho e Reabilitação de Pontes Rodoviárias: Aplicação a Casos de Estudo*, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Minho.

Costa, A. (2012) - *Reparação de Estruturas de Betão Armado*, Apontamentos da disciplina Reabilitação e Reforço de Estruturas, Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa.

Coutinho, M. (2005) - *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da confragem*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP edições, Porto.

D

DSI - Dywidag-Systems International (2009) - *DYWIDAG, Sistema de Pretensado con barra*, Catálogo de produtos, DYWIDAG.

E

Estradas de Portugal, S.A.(EP) (2009a) - *Ponte De Mosteirô sobre o Rio Douro, Memória descritiva e Justificativa, Projecto de Execução*,Coba, Lisboa.

Estradas de Portugal, S.A. (2009b) - *Peças Desenhadas da Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro, Projecto de Execução*, Coba, Lisboa.

Estradas de Portugal, S.A. (EP) (2011) - *Elementos fotográficos da Ponte de Mosteirô sobre o Rio Douro, Projecto de Execução*, EP, Mosteirô.

F

Fernandes, F.; Lourenço, P. (2009) – «Sobre a aplicação do georador em ponte», In P. Cruz; T. Mendonça; I. Neves; I. Santos, *Segurança e Conservação de Pontes* (pp. ii-47-ii-54), Associação Portuguesa para a Segurança e Conservação de Pontes, Lisboa.

Ferreira, A. (2001) - *Introdução aos betões e argamassas polimérica*, Apontamentos da disciplina Novos Materiais, Mestrado de Estruturas em Engenharia Civil, FEUP, Porto.

França, P. (2007) - *Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Laminates*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa.

G

Guerreiro, L. (2003) - *Sistemas de Dissipação de Energia*, Apontamentos da disciplina, Dinâmica e Engenharia Sísmica, Mestrado de Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa.

Guerreiro, L. (2011) - *Estratégias para melhoria do comportamento sísmico de edifícios*, Seminário - Reabilitação Sísmica de Edifícios, Lisboa.

I

Imperialum -Sociadade de desenvolvimentos e Impermeabilizações S.A. (2013) - «Impermeabilização de Pontes e Viadutos - Fundamental em obra nova e uma oportunidade em reabilitação», APCMC - *Obras materiais e equipamentos de construção* (p. 11), APCMC - Associação Portuguesa dos Comerciantes de Materiais de Construção, Portugal.

IQOA (1996a) - *Pont a Poutres Sous Chaussée en Beton Arm* - Catálogo de produtos, IQOA.

IQOA (1996b) - *Pont Dalle en Beton Armé* - Catálogo de produtos, IQOA.

IQOA (1997) - *Catalogue des principaux desordres aide a leur classification* - Catálogo de produtos, IQOA.

J

Juvandes, L. (2011) - *Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas*, 1^{as} Jornadas de Materiais na Construção, Porto.

Juvandes, L. (1999) - *Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão usando Materiais Compósitos de "CFRP"*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto FEUP, Porto.

L

Laner, F. (2001) - *Manifestações patológicas nos viadutos, pontes e passarelas do município de Porto Alegre*, Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Lapa, J. (2008) - *Patologias, Recuperação e Reparo das Estruturas de Concreto*, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2012) - *DA 28, Revestimentos de Impermeabilização de Tabuleiros e Pontes, Documento de aplicação com certificação*, LNEC, Lisboa.

Lourenço, Z. (2007) - *Proteção catódica de estruturas de betão armado*, Corros. Prot. Mater., Vol. 26, Nº 3. Julho, 2007, (pp. 79-85), Zetacorr, Torres Vedras.

M

Mendonça, T.; Brito, V.; Milhazes, F. (2013) - *Aplicação de gestão de obras de arte _ GOA _nova geração*, 7ª Congresso Rodoviário Português, Novos desafios para a atividade rodoviária, Lisboa.

Monteiro, M. (2011) - *Dissipação de Energia em Edifícios*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa.

Motavalli, M.; Czaderski, C. (2007) - *FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State-of-the-Art Review*, American Composites Manufacturers Association, USA.

N

Neves, S. (2012) - *Pré-Esforço Exterior no Reforço de Estruturas*, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

NP EN 1504-1 (2006) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 1: Definições*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-2 (2006) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 2: Sistemas de protecção superficial do betão*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-3 (2006) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 3: Reparação estrutural e não estrutural*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-4 (2006) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 4: Colagem estrutural*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-5 (2006) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 5: Injecção do betão*, Instituto Portugues da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-6 (2008) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 6: Ancoragem de armaduras de aço*, Instituto Portugues da Qualidade, Portugal.

NP EN 1504-7 (2008) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 7: Protecção contra a corrosão das armaduras*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.

- NP EN 1504-8 (2006) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 8: Controlo da qualidade e avaliação da conformidade*, Instituto Português de Qualidade, Portugal.
- NP EN 1504-9 (2009) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 9: Princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- NP EN 1504-1 (2008) - *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 10: Aplicação de produtos e sistemas e controlo da qualidade da obra*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- NP EN 1992 (2010) - *Eurocódigo 2 - Projectos de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- NP EN 1998-1 (2010) - *Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*, Instituto Português da Qualidade, Portugal.

P

- Pereira, B. (2012) - *Modelos analíticos para a Previsão do Desempenho de Pilares Confinados com Fibras de Carbono*, Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- Poças, R. (2009) - *Gestão do ciclo de vida de pontes*, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Minho.

R

- Radomski, W. (2002) - *Bridge Rehabilitation*, Imperial College Press, Warsaw University of Technology, Poland.
- Ramos, J. (2009) - «Impermeabilização de tabuleiro de pontes e viadutos», In P. Cruz; T. Mendonça; L. Neves; L. Santos - *Segurança e conservação de pontes*, (pp. iii-109 - iii-116), ASCP - Associação Portuguesa para a Segurança e Conservação de Pontes, Portugal.
- REBA (1967) - Regulamento de Estruturas de Betão Armado, *Decreto-Lei nº 47723 de 20 de Maio*, Portugal.
- Ribeiro, M. (2000) - «Reparação de fissuras», In L.N.E.C - *Seminário, Inspeção e Reparação de estruturas de betão armado com corrosão*, (pp. 247-255), Sector de Edições e Artes Gráficas do CDIT, Lisboa.
- Ripper, T. (2000) - «Reparação de estruturas de betão armado com corrosão», In L.N.E.C - *Seminário, Inspeção e Reparação de estruturas de betão armado com corrosão*, (pp. 213-244), Sector de Edições e Artes Gráficas do CDIT, Lisboa.
- Rogertec (2012) - *Reforço Estrutural com Fibra de Carbono MFC*, Catálogo de Produtos, Rogertec, Brasil.

Romano, P; Brito, P. (2012) - *Estudo da degradação de estruturas de Betão armado exposto ao ataque por sulfatos*, Seminário de I&DT, Centro Interdisciplinar de Investigação e Inovação de Instituto Politécnico de Portalegre, Porto Alegre.

RSA (1983) - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, *Decreto-Lei nº 235/83 de 31 de Maio*, Portugal.

S

Santiago, S. (2005) - *Sistema de gestão de obras de arte, módulo de inspecção*, UNL, Brisa, Lisboa.

Santos, J. (2008a) - *Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes de Betão, o caso da Ponte Nossa Senhora da Guia*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto FEUP, Porto.

Santos, A. (2008b) - *Patologias em Obras-de-Arte*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Santos, T. (2008c) - *Estratégias para Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Minho.

Santos, M. (2008d) - *Protecção Sísmica de Equipamentos com Isolamento de Base*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa.

Sika (2012a) - *Sistemas de Injeção Sika para Estruturas de Concreto*, Catálogo de produtos, Sika, Brasil.

Sika (2012b) - *Prestressing Systems for Structural Stengthening with Sika CarboDur CFRP Plates*, Catalogo de produtos, Sika.

Sousa, J. (2011) - *Inspecção e Reabilitação de Estruturas Segundo a NP EN 1504 - Caso de obra*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto FEUP, Porto.

T

TENSACCIAI (2012) - *Stay cables*, Catálogo de produtos, TENSACCIAI.

V

Viaexpresso (2009) - *Ponte sobre a Ribeira do Inferno, Deficiente Fundação*, Betar, Ilha da Madeira.

Viaexpresso (2010a) - *Ponte sobre a Ribeira do Inferno – Antigo, Execução de laje de ensoleiramento vistoria de apoio à receção provisória, Nota técnica*, Betar, Ilha da Madeira.

Viaexpresso (2010b) - *Ponte sobre a Ribeira do Inferno - Antigo, Reparação do muro de avenida Nordeste, Nota técnica*, Betar, Ilha da Madeira.

Vieira, Ó. (2011) - *A consideração de deformações impostas no projeto de Tanques*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico IST, Lisboa.

ANEXOS

Anexo A - Especificações da NP EN 1504

Tabela A-1 - Requisitos de desempenho para a impregnação hidrofóbica (NP EN 1504-2, 2006).

Características de desempenho	Proteção contra o ingresso	Controlo da humidade	Aumento da resistividade	Requisitos mínimos
Perda de massa após ciclos de gelo/degelo com sais descongelantes (EN 13581)	■	■	■	A perda de massa da superfície de um provete impregnado deve ocorrer pelo menos 20 ciclos mais tarde do que num provete não impregnado.
Profundidade de penetração (EN 14630)	▲	▲	▲	Classe I: <10 mm Classe II: ≥10 mm
Absorção de água e resistência aos álcalis (EN 13580; EN 1766; EN 13579)	▲	▲	▲	Taxa de absorção: <7,5% (comparado como o provete não tratado) <10% (após imersão numa solução alcalina)
Velocidade relativa de secagem (EN 13579)	▲	▲	▲	Classe I: > 30 % Classe II: > 10 %
Difusão dos iões cloreto	■	-	-	Especificações LNEC E 468

■ - Características para certas utilizações

▲ - Características de base obrigatórias

Tabela A-2 - Requisitos de argamassas para a reparação estrutural e não estrutural (NP EN 1504-3, 2006).

Características de desempenho	Método de ensaio	Requisito			
		Estrutural		Não estrutural	
		Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
Resistencia à compressão	EN 12190	≥45 MPa	≥25 MPa	≥15MPa	≥ 10 MPa
Teor de cloretos	EN 1015-17	≤ 0.05%		≤ 0,05%	
Aderência	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥0,8 MPa	
Retração/expansão impedidas	EN 12617-4	Resistência de colagem após ensaio			Sem requisito
		≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥0,8 MPa	
Resistencia à carbonatação ^a	EN 13295	d _k ≤ betão de controlo (MC(0,45))		Sem requisito	
Módulo de elasticidade	EN 13412	≥20GPa	≥15GPa	Sem requisito	
Compatibilidade térmica ^{a,b} (gelo-degelo)	EN 13687-1	Resistência de colagem após 50 ciclos			Inspeção visual após 50 ciclos
		≥2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0.8 MPa	
Compatibilidade térmica ^{a,b} (ciclos termicos com chuva)	EN 13687-2	Resistência de colagem após 30 ciclos			Inspeção visual após 30 ciclos
		≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Compatibilidade térmica ^{a,b} (ciclos termicos a seco)	EN 13687-4	Resistência de colagem após 30 ciclos			Inspeção visual após 30 ciclos
		≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Resistência ao deslizamentos	EN 13036-4	Clasee I: > 40 unidades ensaiadas molhadas Clasee II: > 40 unidades ensaiadaos secas Clasee III: > 55 unidades ensaiados molhados			
Absorção capilar	EN 13057	≤ 0,5 kg.m ⁻² .h ^{-0.5}			Sem requisito
Requesistos para reparação: <div><div><ul style="list-style-type: none">• Reconstituição do betão aplicado argamassa à mão• Reconstituição do betão com betão novo• Reconstituição do betão com betão ou argamassa pojetada</div><div><ul style="list-style-type: none">• Reforço estrutural com argamassa ou betão• Aumento do recobrimento com argamassa ou betão• Substituição betão carbonato ou contaminado</div></div>					
^a Para a durabilidade					
^b A escolha do método depende das condições de exposição.					

Tabela A-3 - Requisitos de produtos de colagem para o reforço com placas de aço (NP EN 1504-4, 2006).

Características de desempenho	Método de ensaio	Requisito								
Módulo de elasticidade em flexão	EN ISSO 178	$\geq 2000 \text{ N/mm}^2$								
Resistência ao corte	EN 12188	$\geq 12 \text{ N/mm}^2$								
Tempo aberto	EN 12189	Valor declarado +/- 20%								
Tempo de trabalhabilidade	EN ISO 9514	Valor declarado • Esta propriedade depende da quantidade do produto e das condições ambientais de utilização, sendo geral mais curta que o tempo de vida útil.								
Módulo de elasticidade em compressão	EN 13412	$\geq 2000 \text{ N/mm}^2$								
Temperatura de transição vítrea	EN 12614	$\geq 40 \text{ }^\circ\text{C}$								
Coefficiente de dilatação térmica	EN 1770	$\leq 100 \times 10^{-6}$ por K								
Retração total para os produtos de colagem estrutural	EN 12617-1 Ou EN 12617-3	$\leq 0.1\%$								
Aptidão para aplicação em superfícies verticais e intradorsos	EN 1799	• O material não deve escoar mais de 1 mm quando apertado sobre uma espessura de menos de 3 mm.								
Aptidão para aplicação em superfícies horizontais	EN 1799	• A área do produto no fim do ensaio não deve ser inferior a 3000 mm^2 (60 mm de diâmetro).								
Aptidão para injeções	EN 12618-2	• No ensaio realizado a seco, a rotura deve-se produzir no betão.								
Aptidão para aplicação e cura em condições ambientais particulares	EN 12188	• Resistência ao corte em compressão dos provetes em bisel, com vários ângulos θ não deve ser inferior aos valores σ : <table><tr><td>θ</td><td>$\sigma(\text{N/mm}^2)$</td></tr><tr><td>50°</td><td>50</td></tr><tr><td>60°</td><td>60</td></tr><tr><td>70°</td><td>70</td></tr></table>	θ	$\sigma(\text{N/mm}^2)$	50°	50	60°	60	70°	70
θ	$\sigma(\text{N/mm}^2)$									
50°	50									
60°	60									
70°	70									
Aderência	EN 12188	• A tensão de tração suportada pela junta colada num ensaio de arrancamento não deve ser inferior a 14 N/mm^2 ; • Resistência ao corte em compressão dos provetes em bisel, com vários ângulos θ não deve ser inferior aos valores σ : <table><tr><td>θ</td><td>$\sigma(\text{N/mm}^2)$</td></tr><tr><td>50°</td><td>50</td></tr><tr><td>60°</td><td>60</td></tr><tr><td>70°</td><td>70</td></tr></table>	θ	$\sigma(\text{N/mm}^2)$	50°	50	60°	60	70°	70
θ	$\sigma(\text{N/mm}^2)$									
50°	50									
60°	60									
70°	70									
Durabilidade (temperatura e humidade)	EN 13733	• Após exposição a ciclos térmicos ou a um ambiente caracterizado por calor húmido, a carga de corte por compressão de rotura dos provetes de betão endurecidos não deve ser inferior à resistência à tração do betão; • A exposição a ciclos térmicos ou a um ambiente caracterizado por calor húmido, não deve provocar a rotura dos provetes em aço sobre aço.								

Tabela A-4 - Requisitos de desempenho dos produtos de injeção para enchimento dúctil (NP EN 1504-5, 2006).

Características de desempenho	Método de ensaio	Requisitos
<i>Características de base</i>		
Aderência e alongamento dos produtos de injeção dúcteis	EN 12618-1	<ul style="list-style-type: none"> • Aderência: valor declarado • Alongamento > 10%
Estanquidade à água	EN 14068	<ul style="list-style-type: none"> • Estanque à água a 2×10^5 Pa • Aplicações particulares: estanque a 7×10^5 Pa
Temperatura de transição vítrea	EN 12614	Para informações
<i>Características de trabalhabilidade</i>		
Injetabilidade em meio seco e não seco	EN 1771	Classe de injetabilidade: <ul style="list-style-type: none"> • <4 Min (injetabilidade elevada) para largura de fissuras de 0.1mm; • <8 Min (pelo menos exequível) para largura de fissuras de 0,2 mm e 0,3mm; • Percentagem de enchimento da fissura > 90%; • Para larguras de fissuras de 0,3 mm a 0,8 mm, deve-se usar-se espaçadores de plásticos flexíveis nas fissuras de igual largura.
Viscosidade	EN ISO 3219	Valor declarado
Expansão e razão de expansão	EN 14406	Valor declarado
<i>Características de reatividade</i>		
Tempo de trabalhabilidade	EN ISO 9514	Valor declarado
<i>Durabilidade</i>		
Comportamento com betão	12637-1	<ul style="list-style-type: none"> • Nenhuma rotura no ensaio de compressão • Perda de trabalho de deformação <20%


Tabela A-5 - Requisitos de aplicação dos produtos de injeção para ancoragens (NP EN 1504-6, 2008).

Características de desempenho	Método de ensaio	Requisito
Arrancamento	Pr EN 1881	Deslocamento $\leq 0,6$ mm sob uma força de 75 kN.
Teor de cloretos	EN 1015-17	$\leq 0,05\%$
Temperatura de transição vítrea	EN 12614	≥ 45 °C ou 20 °C acima da temperatura ambiente máxima em serviço.
Fluência em tração	Pr EN 1544	Deslocamento $\leq 0,6$ mm sob uma carga de 50 kN após 3 meses.

Tabela A- 6 - Requisitos dos produtos de proteção contra a corrosão (NP EN 1504-7, 2008).

Métodos de ensaios	Características de desempenho	Requisitos
EN 15183	Proteção contra a corrosão	Armadura: <ul style="list-style-type: none"> • Isenta de corrosão Placas de aço: <ul style="list-style-type: none"> • Ferrugem na aresta <1 mm
EN 12614	Temperatura de transição vítrea	Pelo menos 10°K acima da máxima temperatura de serviço.
EN 15184	Aderência ao corte (aço revestido sobre o betão)	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão de aderência para um deslocamento de $\Delta=0,1$ mm; • Tensão de aderência da armadura revestida, pelo menos, 80% da armadura não revestida.

Tabela A-7 - Rótulo de um produto de conformidade (NP EN 1504-3, 2006).

 01234	<p>Marcação CE de conformidade, constituída pelo símbolo CE especificado na diretiva 93/68/CEE</p> <p>Número de identificação do organismo de certificação (se aplicável)</p>
<p>Sociedade, Lda., Rua do comércio, 33 0000 local</p> <p>O6</p>	<p>Nome ou marca identificadora e endereço do produto</p> <p>Últimos dois números do ano em que a marca foi proposta</p>
<p>0123-DPC-0456</p> <p>EN 1504-3</p>	<p>Número do certificado (se aplicável)</p> <p>Número da norma europeia</p>
<p>Produtos de reparação do betão com uma argamassa de reparação CC (baseada em cimentos hidráulicos)</p> <p>Resistência à compressão: classe R3 Teor de cloretos: $\leq 0,05\%$ Aderência: $\geq 1,5$ MPa Modulo de elasticidade: ≥ 21 GPa Compatibilidade térmica: $\geq 1,5$ MPa Absorção capilar: $\leq 0,5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-0,5}$ Reação ao fogo: Euroclasse E</p>	<p>Descrição e informação sobre o produto e características regulamentares</p>

Viaduto de Alhandra

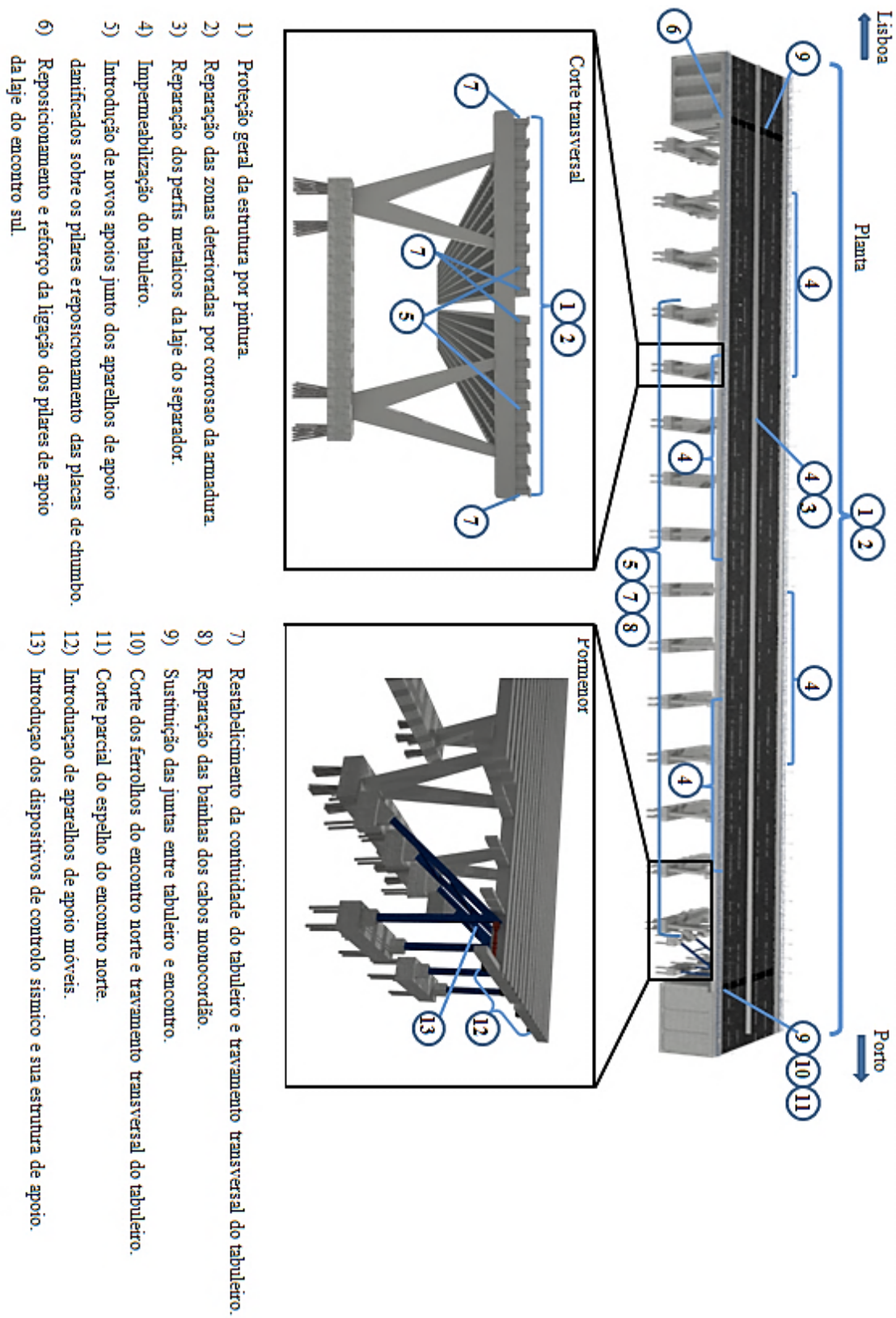


Figura B-1 - Lista de trabalhos realizados no Viaduto de Alhandra.

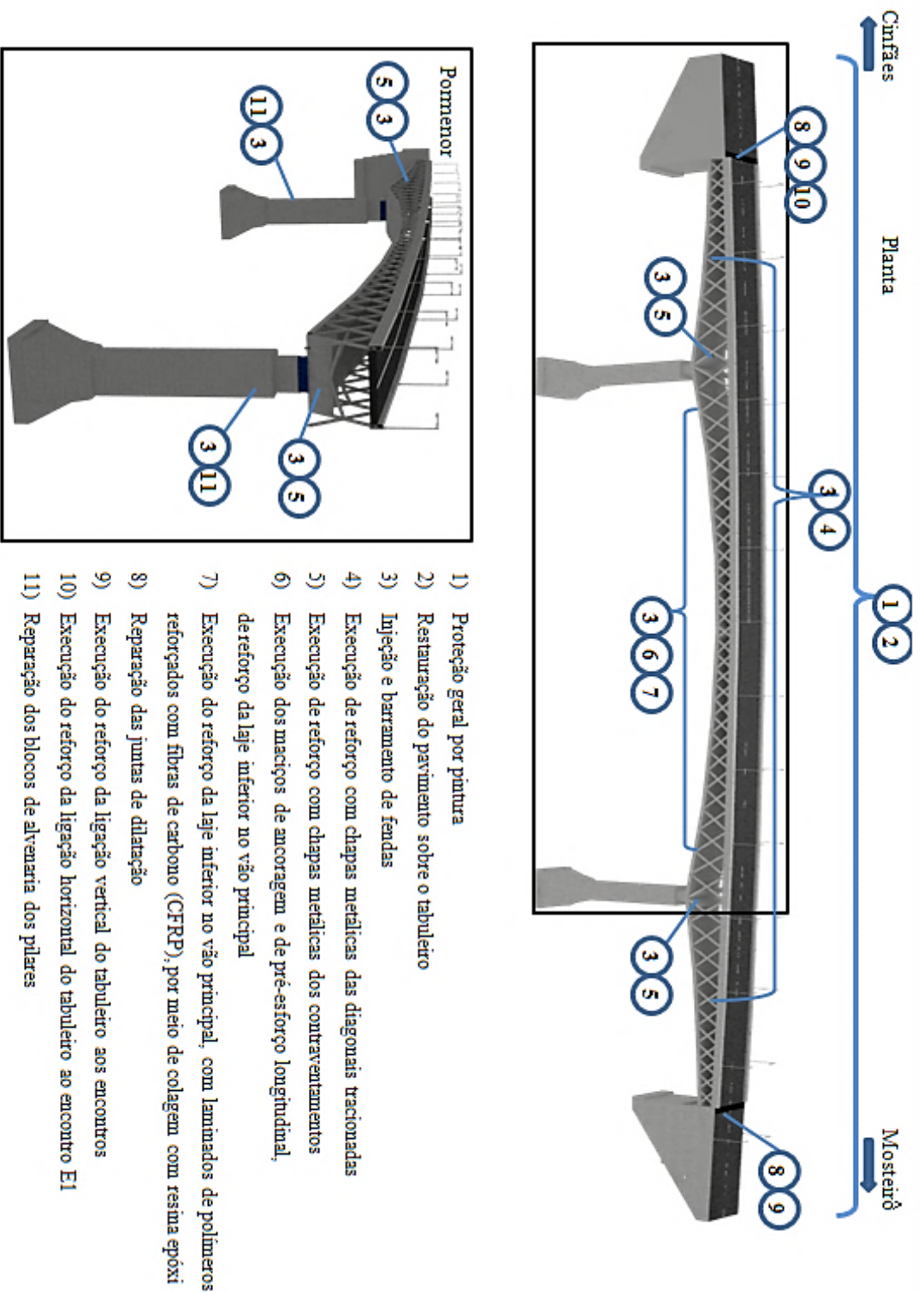


Figura B -2.- Lista de trabalhos realizados na Ponte de Mosteirô.

Anexo C - Localização das pontes em anomalia

Ortofotomapa 2010 (CMF, 2013)

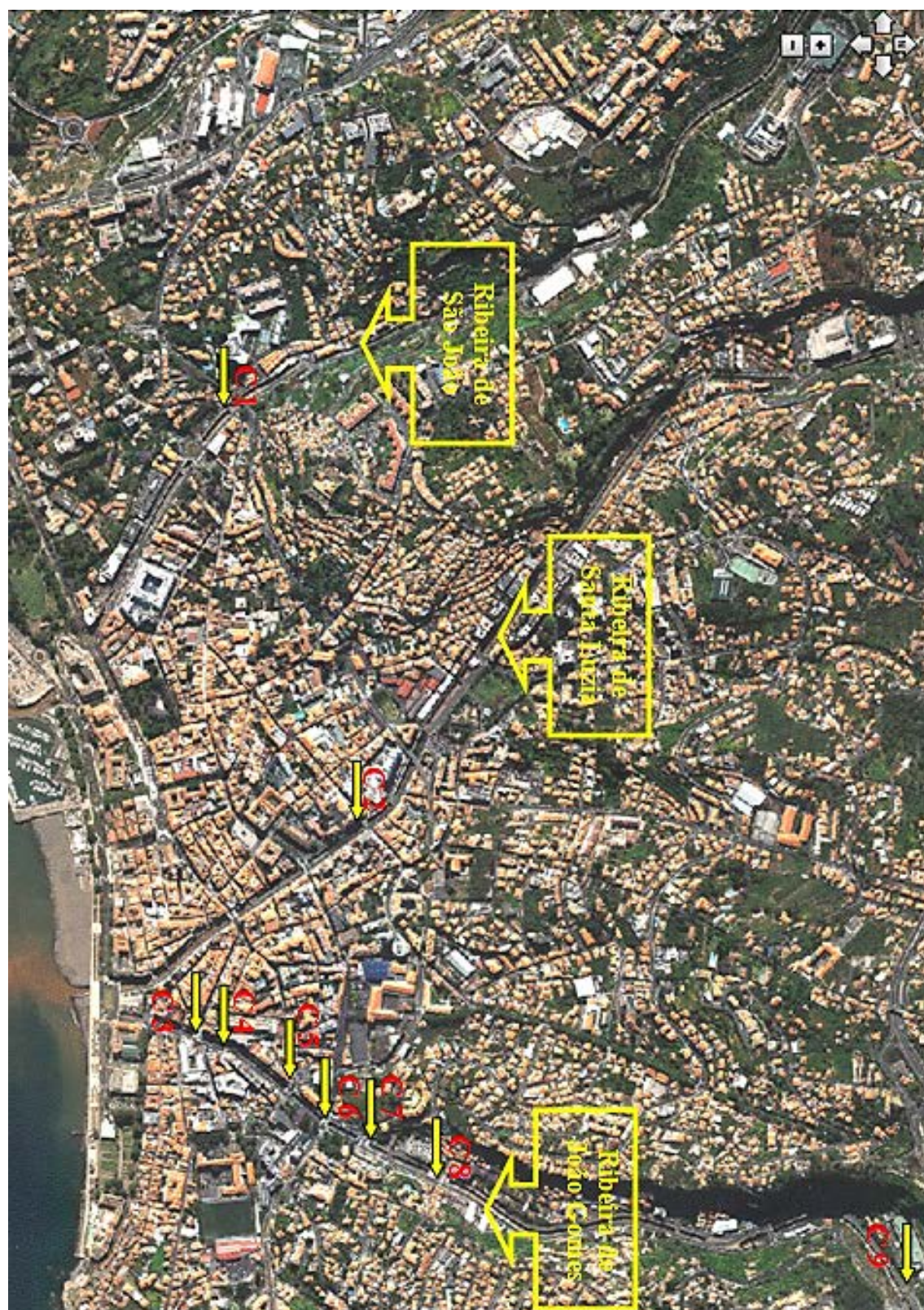


Figura C – Localização das Pontes sobre as principais ribeiras do concelho do Funchal, Escala: 1/10000 (CMF, 2013).