

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Vanessa Miranda da Costa

**Desempenho e Reabilitação de Pontes Rodoviárias:
Aplicação a Casos de Estudo**

Tese de Mestrado
Mestrado em Engenharia Civil
Projecto de Estruturas e Geotecnia

Trabalho efectuado sob orientação de
Professor Doutor Daniel Vitorino de Castro Oliveira
Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum

DECLARAÇÃO

Nome Vanessa Miranda da Costa

Endereço electrónico: vanessa.m.costa@gmail.com Telefone: 918173142 / _____

Número do Bilhete de Identidade: 11721369

Título dissertação □/tese

□ Desempenho e Reabilitação de Pontes Rodoviárias: Aplicação a Casos de Estudo

Orientador(es):

Professor Doutor Daniel Vitorino de Castro Oliveira

Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum Ano de conclusão: 2009

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Mestrado em Engenharia Civil Projecto de Estruturas e Geotecnia

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respectiva, deve constar uma das seguintes declarações:

1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;
2. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA TESE/TRABALHO (indicar, caso tal seja necessário, nº máximo de páginas, ilustrações, gráficos, etc.), APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, , MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;
3. DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, 16/11/2009

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação apenas foi possível devido à contribuição de inúmeras pessoas com quem tenho interagido ao longo da minha vida, expressando aqui os meus mais sinceros agradecimentos a todas.

Em especial agradeço aos meus orientadores, Professor Daniel Oliveira e Professor Humberto Varum pelos inestimáveis conselhos e orientações, pela confiança depositada e por tudo quanto aprendi.

A todos aqueles que tiveram a amabilidade de me disponibilizar alguma bibliografia.

Aos meus familiares, amigos e colegas, para todos aqueles que de uma forma ou outra me apoiaram, incentivaram e partilharam alguns dos meus problemas, muito obrigado.

Em especial à Sandra, Helena, Liliana, Ivone, Tito e Faial, pela amizade, estímulo e pelas experiências trocadas, em todo este percurso.

À EP – Estradas de Portugal, S.A., pela autorização para consulta e utilização de alguns elementos necessários à elaboração desta dissertação.

Ao Pedro por todo o apoio, incentivo e carinho, obrigado pela tua compreensão, sem ti nada disto teria sido possível.

Aos meus pais, expresso aqui o meu maior agradecimento, por tudo o que me proporcionaram ao longo de toda a minha vida.

A todos agradeço e dedico o resultado deste trabalho.

RESUMO

O progresso tem permitido o desenvolvimento das redes rodoviárias de todo o mundo e conseqüentemente isso reflecte-se num aumento da construção de Obras de Arte. O ritmo crescente de pontes, aliado ao controlo dos custos e prazos para a sua realização, faz com que se descuidem muitas vezes os aspectos relativos à qualidade e durabilidade das estruturas.

Muitas destas pontes têm mais de 30 anos, tendo sofrido ao longo do tempo diversos mecanismos de deterioração, evidenciando as mais variadas anomalias. Para aferir as suas actuais condições segurança estrutural é necessário recorrer a metodologias de avaliação do seu desempenho, incluindo a realização de inspecções regulares.

A realização de inspecções, permite avaliar a natureza e extensão das patologias, de forma a serem implementadas acções de manutenção, conservação ou reabilitação e reforço, dependendo do estado em que se encontra a estrutura. Estas acções são imprescindíveis para se manter as Obras de Arte em condições de segurança, serviço e aparência aceitável durante a sua vida útil.

Neste contexto, pretende-se com esta dissertação abordar as estratégias de inspecção e de detecção de anomalias, conservação, protecção, reparação e reabilitação de Obras de Arte.

É também objectivo do presente trabalho descrever os danos mais frequentes nas pontes rodoviárias e a sua correlação com factores como a idade, tipologia, material, localização, etc. Serão igualmente apresentadas soluções e técnicas de reabilitação de obras de arte em alvenaria de pedra e em betão armado, com referência a alguns casos práticos.

ABSTRACT

The progress has allowed the development of road networks around the world and consequently this is reflected in an increase in the rate of construction of bridges. The increasing demand for new bridges, combined with their strict cost control and tight deadlines, sometimes leads to negligence with respect to quality control and the long term durability of structures.

Many of our current bridges have now been standing more than 30 years, and over the time have been subject to several forms of deterioration, showing many kinds of damages and much weathering. In order to assess their structural safe conditions it is necessary to make use of structural methodologies to evaluate their performance by conducting regular inspections.

Periodic inspections permit a correct evaluation of the nature and the extent of the anomalies, in order to implement maintenance or rehabilitation and strengthening works, depending on the real state of the structure.

These actions are essential to maintain the safety of the bridges, as well as an acceptable of service and acceptable appearance during their lifetime.

The intention of this thesis is to describe suitable strategies for the inspections and detection of defects, as well as the conservation, protection, repair and rehabilitation of bridges.

It is also the purpose of this work to describe the most common damages in road bridges and any correlation that exists with the age, type, materials used, location, etc.. Further, bridge rehabilitation and repair techniques of stone masonry and reinforced concrete will also be discussed, with reference to some to real-world cases.

RESUMÉ

Le progrès a permis le développement des réseaux routiers dans le monde et par conséquent cela se traduit par une augmentation dans la construction des ouvrages d'art. Le rythme croissant de ponts, combiné à un contrôle rigoureux des coûts et des délais pour leur mise en œuvre, fait souvent négliger l'aspect de la qualité et de la durabilité des structures.

Beaucoup de ces ponts ont été construits il y a plus de 30 ans, ayant subi le logo du temps, plusieurs mécanismes de détérioration, montrent ainsi toutes sortes d'anomalies. Afin d'évaluer leur sécurité actuelle, il est nécessaire d'appliquer des méthodes structurelles pour évaluer leurs performances, y compris la réalisation des inspections régulières.

La réalisation des inspections, vise à évaluer la nature et l'étendue des dégradations visibles, afin de définir les politiques d'entretien futur, la conservation ou la réhabilitation et le renforcement, en fonction de l'état de la structure. La surveillance est essentielle pour garantir la sécurité des usagers, le maintien du niveau de service et l'aspect de la structure au cours de leur vie.

Dans ce contexte, il est prévu, avec la thèse, d'aborder les principes et objectifs de la surveillance et la détection d'anomalies, la conservation, la protection, la réparation et la réhabilitation des ouvrages d'art.

Le travail de recherche a aussi pour but, décrire les désordres les plus communs dans les ponts routiers et leur corrélation avec des facteurs comme l'âge, le type d'ouvrage d'art, les matériaux constitutants, localisation, etc. Des solutions et des techniques de réhabilitation d'ouvrage d'art en maçonnerie et béton armé, seront également fournies avec une référence dans certains cas pratiques.

PALAVRAS-CHAVE

KEYWORDS

MOTS CLÉS

Obra de Arte	Bridge	Ouvrage d'art
Ponte Rodoviária	Highway Bridge	Pont routière
Sistema de Gestão de Obras de Arte	Bridge Management System	Système de gestion des ouvrages d'art
Inspeção	Inspection	Inspection
Manutenção, conservação	Maintenance	Maintenance
Reparação	Repair	Réparation
Reforço	Strengthening	Renforcer
Reabilitação	Rehabilitation	Réhabilitation
Patologia	Pathology, typical damage	Pathologie, désordre
Segurança Estrutural	Structural Safety	Sécurité structural
Avaliação da segurança	Structural Assessment	Évaluation de la sécurité
Durabilidade	Durability	Durabilité
Vida útil	Service life	Vie utile

ÍNDICE DE TEXTO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
RESUMÉ	ix
PALAVRAS-CHAVE	xi
ÍNDICE DE TEXTO	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE TABELAS	xxiii
SIMBOLOGIA	xxv
CAPÍTULO 1 Introdução, Enquadramento e Objectivos	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Enquadramento e objectivos da tese.....	3
1.3. Organização da tese	3
CAPÍTULO 2 Estado da Arte	5
2.1. Aspectos gerais sobre pontes rodoviárias	5
2.1.1. Evolução histórica	5
2.1.2. Tipologias e sistemas estruturais mais comuns	8
2.1.3. Principais componentes das Obras de Arte	12
2.1.4. Processo construtivo	20
2.1.5. “Ciclo de vida”: concepção, construção, exploração e demolição	21
2.2. Sistemas de gestão de Obras de Arte	23
2.2.1. Sistemas de gestão de Obras de Arte adoptados noutros países.....	24
2.2.2. Gestão de Obras de Arte – Realidade Portuguesa	27
2.3. Técnicas de inspecção e diagnóstico	34
2.3.1. Análise visual	34
2.3.2. Realização de ensaios	35
2.4. Monitorização.....	41
2.5. Sistemas de controlo activo “smart structures”.....	48
CAPÍTULO 3 Mecanismos Deterioração e Principais Anomalias das Obras de Arte	49
3.1. Estruturas em betão armado	51
3.1.1. Mecanismos de deterioração do betão	52
3.1.2. Mecanismos de corrosão do aço	56
3.1.3. Factores que podem dar origem ao aparecimento de anomalias	58
3.1.4. Manifestação das anomalias e principais causas	66

3.2. Estruturas em alvenaria de pedra.....	77
3.2.1. Mecanismos de deterioração das alvenarias.....	77
3.2.2. Factores que podem dar origem ao aparecimento de anomalias	77
3.2.3. Manifestação das anomalias e principais causas	79
3.3. Estruturas metálicas.....	88
3.3.1. Mecanismos de deterioração das estruturas metálicas.....	89
3.3.2. Factores que podem dar origem ao aparecimento de anomalias	90
3.3.3. Manifestação das anomalias e principais causas	90
3.4. Principais componentes das Obras de Arte.....	94
3.4.1. Aparelhos de apoio	94
3.4.2. Juntas de dilatação	96
3.4.3. Outros elementos (órgãos de drenagem, guarda corpos, guarda de segurança, revestimento das vias e passeios, taludes, etc.....	97
3.5. Principais causas de dano de pontes rodoviárias originadas pela acção sísmica	100
3.6. Principais conclusões.....	103
CAPÍTULO 4 Avaliação do Desempenho, Reabilitação e Reforço de Obras de Arte...105	
4.1. Regulamentação para estruturas existentes.....	106
4.2. Avaliação do desempenho de estruturas existentes.....	109
4.2.1. Metodologias de avaliação da segurança de estruturas existentes	110
4.2.2. Avaliação do estado actual de estruturas existentes	111
4.2.3. Avaliação da segurança de estruturas existentes	112
4.2.4. Caracterização do tipo de intervenção	117
4.3. Soluções e técnicas de reabilitação e reforço de estruturas	118
4.3.1. Reabilitação e reforço estruturas em betão armado.....	118
4.3.2. Reabilitação e reforço de estruturas em alvenaria de pedra.....	125
4.3.3. Reabilitação e reforço de pontes em estrutura metálica.....	129
4.4. Soluções e técnicas de reforço sísmico.....	131
CAPÍTULO 5 Estudo de Pontes Rodoviárias existentes em Portugal .....137	
5.1. Caracterização das Obras de Arte.....	137
5.1.1. Caracterização do parque de Obras de Arte - Portugal Continental.....	137
5.1.2. Caracterização do parque de Obras de Arte - Distrito do Porto.....	142
5.2. Principais patologias observadas nas pontes rodoviárias	155
5.2.1. Estruturas em betão armado	155
5.2.2. Estruturas em alvenaria de pedra.....	159
5.3. Reabilitação e reforço de uma Obras de Arte em alvenaria de pedra	160
5.3.1. Descrição da Ponte	160
5.3.2. Enquadramento histórico e intervenções na ponte	160
5.3.3. Estado da obra antes da intervenção	162
5.3.4. Metodologias adoptadas na reabilitação da ponte	163
5.4. Considerações Finais	164

CAPÍTULO 6 Considerações finais e Desenvolvimentos Futuros.....	167
6.1. Considerações finais	167
6.2. Desenvolvimentos futuros	169
REFERÊNCIAS.....	171
ANEXOS	179

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Colapso da Ponte Hintze Ribeiro	7
Fig. 2.2 – Tipologias de ponte segundo o seu sistema estrutural (Manterola e Cruz 2004).....	8
Fig. 2.3 – Exemplo de uma ponte em Viga simplesmente apoiada: Viaduto das Areias (EP 2007).....	9
Fig. 2.4 – Exemplo de uma ponte em Viga Gerber: Ponte de Amarante (EP 2007)	9
Fig. 2.5 – Exemplo de uma ponte em pórtico: Ponte do Freixo	9
Fig. 2.6 – Exemplo de uma ponte em viga treliçada: Ponte Luís I Santarém.....	9
Fig. 2.7 – Ponte de Alvenaria de Pedra: Ponte Duarte Pacheco.....	10
Fig. 2.8 – Ponte em betão armado: Ponte da Arrábida.....	10
Fig. 2.9 – Ponte em ferro: Ponte Luíz I.....	10
Fig. 2.10 – Ponte 25 de Abril	10
Fig. 2.11 – Ponte Vasco da Gama	10
Fig. 2.12 – Principais componentes das pontes.....	12
Fig. 2.13 – Principais componentes das pontes em alvenaria de pedra em arco	12
Fig. 2.14 – Diferentes tipos de secção transversal de pontes em betão armado	13
Fig. 2.15 – Pormenor de um passeio	13
Fig. 2.16 – Fuste simples (Reis 1997).....	13
Fig. 2.17 – Fuste múltiplo (Reis 1997).....	13
Fig. 2.18 – Fuste simples com apoio em martelo (Reis 1997)	14
Fig. 2.19 – Encontro aparente	15
Fig. 2.20 – Encontro perdido.....	15
Fig. 2.21 – Gárgula ou sumidouro e tubo de queda	19
Fig. 2.22 – Caleira (meia cana)	19
Fig. 2.23 – Construção de um pilar, Pont sur la Mentue	20
Fig. 2.24 – Construção com cimbre ao solo	20
Fig. 2.25 – Construção com vigas de lançamento.....	20
Fig. 2.26 – Construção por deslocamentos sucessivos.....	21
Fig. 2.27 – Construção por avanços sucessivos	21
Fig. 2.28 – Esquema de um Sistema de Gestão de Obras de Arte (BMS 2002).	23
Fig. 2.29 – Desempenho de uma Ponte em função do tempo. (os aumentos de desempenho, “traços” verticais. correspondem a acções de manutenção) (Brime 2002).....	24
Fig. 2.30 – Rácio entre o valor de manutenção anual de Obras de Arte e o valor da sua substituição (%)	25
Fig. 2.31 – Passagem Agrícola.....	28
Fig. 2.32 – Passagem Hidráulica.....	28
Fig. 2.33 – Passagem Superior	28
Fig. 2.34 – Passagem Inferior.....	28

Fig. 2.35 – Passagem de Peões.....	28
Fig. 2.36 – Viaduto.....	28
Fig. 2.37 – Ponte	28
Fig. 2.38 – Túnel	28
Fig. 2.39 – Inspeções principais realizadas com recurso a plataforma.....	33
Fig. 2.40 – Equipamento de inspecção de pontes (EP 2006)	35
Fig. 2.41 – Processo de Monitorização (FiberSensing).....	41
Fig. 2.42 – Extensómetros para medir deformações em armaduras (Carvalho e Gonçalves 2001).....	43
Fig. 2.43 – Extensómetros para medir deformações no betão (Carvalho e Gonçalves 2001).....	43
Fig. 2.44 – Exemplo da aplicação de sensores de deformação embebidos em betão (FiberSensing).....	43
Fig. 2.45 – Modo de Aplicação de um Medidor de juntas (Fibersensing)	44
Fig. 2.46 – Monicorr	45
Fig. 2.47 – Aplicação de um sensor de temperatura (FiberSensing).....	45
Fig. 2.48 – Aplicação de Células de Pressão (FiberSensing)	46
Fig. 2.49 – Acelerómetro (FiberSensing).....	46
Fig. 2.50 – Aplicação de sensores de fibra óptica em estruturas metálicas (FiberSensing).....	47
Fig. 3.1 – Factores que actuam numa ponte durante a sua vida útil (Radomski 2002).....	50
Fig. 3.2 – Factores que podem dar origem ao aparecimento de patologias.....	52
Fig. 3.3 – Patologia originada pela acção do fogo	53
Fig. 3.4 – Patologia originada pela reacção álcalis-silica: a) pilar de betão armado (Silva 1996); b) encontro de uma Passagem Superior (Brouxel 2009).....	55
Fig. 3.5 – Patologia originada pela reacção sulfática (Brouxel 2009).....	55
Fig. 3.6 – Reacção entre o betão e os iões sulfato (Beleza 1996)	56
Fig. 3.7 – Processo de degradação do betão (Andrey 1987)	56
Fig. 3.8 – Tipos de corrosão de armaduras e factores que os originam (Laner 2001).....	57
Fig. 3.9 – Exemplo de uma inadaptação da estrutura ao sítio onde está inserida: sapata sobre aterro.....	58
Fig. 3.10 – Exemplos de deficiente pormenorização de armaduras.....	60
Fig. 3.11 – Exemplos de insuficiente armadura secundária viga parede.....	60
Fig. 3.12 – Aparecimento de fissuras devido ao reduzido recobrimento na zona de sobreposição de armaduras.....	61
Fig. 3.13 – Exemplo das diferenças entre as hipóteses de cálculo e a realidade de construção: pilar sobre uma única fiada de estacas.....	61
Fig. 3.14 – Disposição construtiva a implementar para possibilitar a colocação de macacos para efectuar o levantamento do tabuleiro.....	62
Fig. 3.15 – Acumulação de agregados de grandes dimensões devido a uma má vibração do betão e ao uso de cofragens mal colmatadas (Peter, 1994).....	64
Fig. 3.16 – Fissuração devido à cedência do solo (Castro e Martins, 2006)	64
Fig. 3.17 – Deslocamento de cofragens (Castro e Martins, 2006)	64
Fig. 3.18 – Remoção prematura da cofragem	65
Fig. 3.19 – Exemplos de patologias em Obras de Arte de betão armado.....	67
Fig. 3.20 – Evolução do descasque de betão	70
Fig. 3.21 – Tipos de fendas que podem aparecer devido à aplicação de cargas	72

Fig. 3.22 – Exemplos de deformações excessivas.....	75
Fig. 3.23 – Exemplos de patologias em Obras de Arte de alvenaria de pedra (EP 2007).....	79
Fig. 3.24 – Tipos de fissuras transversais e possíveis causas (IQA 1996)	83
Fig. 3.25 – Tipos de fissuras longitudinais e possíveis causas (IQA 1996)	83
Fig. 3.26 – Danos que afectam os tímpanos (Gilbert 1993; Oliveira e Lourenço 2002).....	84
Fig. 3.27 – Tipos de fissuras que podem aparecer nos muros tímpano (IQA 1996)	85
Fig. 3.28 – Tipos de fissuras nos arcos devido ao movimento dos apoios (IQA 1996)	85
Fig. 3.29 – Mecanismo de rotura devido a uma carga pontual central.....	86
Fig. 3.30 – Mecanismo de rotura devido a uma carga pontual excessiva e assimétrica.....	86
Fig. 3.31 – Gráfico σ/ϵ para os diferentes tipos de materiais	88
Fig. 3.32 – Exemplos de patologias em Obras de Arte em estrutura metálica.....	91
Fig. 3.33 – Patologia específica do ferro pudlado, (folhagem, formação de bolsas de ferrugem entre chapas)	92
Fig. 3.34 – Exemplos das principais patologias nos aparelhos de apoio: a) Descolagem ou destacamento das camadas neoprene; b) Sair da guia ou tranca do rolete ou rolo; c) Corrosão do metal. ..	94
Fig. 3.35 – Exemplos de patologias em junta de dilatação: a) Deterioração da banda de transição; b) Ausência de pares da junta metálica; c) Deterioração do pavimento	97
Fig. 3.36 – Exemplos de patologias nos órgãos de drenagem: a) Obstrução da gárgula ou sumidouro; b) Obstrução do tubo de queda; c) Obstrução da sarjeta.....	97
Fig. 3.37 – Exemplos de patologias nos guarda corpos: a) Corrosão dos elementos; b) Perda de secção; c) Elemento danificado; d) Deficiências da pintura; e) Falta de elementos de fixação; f) Deslocamento de pedras.	98
Fig. 3.38 – Exemplos de patologias nas guardas de segurança: a) Dano devido a um embate de um veículo; b) Corrosão das chapas de fixação e ausência de elementos de ligação.	98
Fig. 3.39 – Exemplos de patologias no revestimento da via: a) Fendas no pavimento; b) Buraco no pavimento; c) Fendilhação em “pele de crocodilo”	99
Fig. 3.40 – Exemplos de patologias nos passeios: a) Fendilhação da argamassa de revestimento; b) Falta de elementos e ausência de chapa de prolongamento da junta no passeio; c) Desgaste da argamassa esquadrelada.....	99
Fig. 3.41 – Exemplos de patologias nos taludes: a) Infiltrações de água; b) Existência de elementos soltos; c) Deslizamento do talude	99
Fig. 3.42 – Exemplos de patologias nas cornijas: a) Delaminação pontual do betão originado por um embate /colisão; b) Descasque do betão de recobrimento	100
Fig. 3.43 – Exemplos de danos em pontes causados pela acção sísmica: a) Kobe 1995 Japão; b) San Fernando, California; c) Katrina, USA (Padgett e all 2008).....	101
Fig. 3.44 – Esquemas de colapso de pontes: a) originado por problemas nas fundações; b) originado pela rotura por corte dos pilares (Kawashima 2009).....	101
Fig. 3.45– Exemplos de danos em pilares devido à acção sísmica Kobe 1995: a) falta de confinamento lateral; b) dano num pilar curto (Kawashima 2009).	102
Fig. 3.46 – Danos causados pela acção sísmica: a) queda de um tabuleiro, kobe 1995; b) queda de blocos de pedra numa ponte em alvenaria, Turquia 1998 (Wenk 2005).....	103
Fig. 4.1 – Fluxograma com a metodologia para intervenções estruturais do ICOMUS 2004 (Lourenço 2005).....	110
Fig. 4.2 – Estratégias de avaliação do estado de uma estrutura existente (Castro e Martins 2006).	111

Fig. 4.3 – Diferentes etapas de preparação da superfície de betão degradada: a) zona afectada b) remoção do betão degradado; c) limpeza da superfície; d) protecção dos aços; e) aplicação de novo betão (adaptado de Calgaro e Lacroix 1997)	120
Fig. 4.4 – Reparação do betão e reforço das armaduras (Ponte da Barra, EP 2007)	121
Fig. 4.5 – Pormenor de execução de betão projectado (Rodrigues 2005).....	122
Fig. 4.6 – Injecção de fendas com resina epoxy (Rodrigues 2005).....	123
Fig. 4.7 – Pormenor de colocação de buchas e chapas metálicas (Rodrigues 2005).....	123
Fig. 4.8 – Reforço de pilares com CRP.....	124
Fig. 4.9 – Colocação de pré-esforço exterior (Ponte da Barra, EP2007).	124
Fig. 4.10 – Reforço do arco com tirantes: a) alçado; b) corte transversal: pormenor do furo; c) exemplo (Ponte Candeeira, EP 2008).....	126
Fig. 4.11 – Reforço do arco com gatos metálicos (Ponte Dom Zameiro, EP 2008).	126
Fig. 4.12 – Injecção de alvenarias: a) selagem de fenda; b) preenchimento de vazios (Roque 2002)..	126
Fig. 4.13 – Reforço do enchimento do encontro: a) furo: b) execução da injecção por gravidade (Ponte Meinedo, EP 2009)	127
Fig. 4.14 – Impermeabilização do tabuleiro (Ponte Meinedo, EP 2009)	127
Fig. 4.15 – Reconstrução de elementos estruturais: a) numeração e desmonte das pedras; b) reconstrução do muro (Ponte Dom Zameiro, EP 2008).....	128
Fig. 4.16 – Esquema da colocação de barras de pré-esforço para equilibrar os esforços no elemento a substituir (Calgaro e Lacroix 1997).....	129
Fig. 4.17 – Reforço de elementos com chapas, Ponte Metálica de Vila Real sobre o Rio Corgo, (EP 2003).....	129
Fig. 4.18 – Exemplo do reforço de um tabuleiro metálico por aplicação de pré-esforço.....	130
Fig. 4.19 – Exemplo de aplicação de pré-esforço exterior na Ponte sobre o Rio Congo, (EP 2003): a) sela de desvio; b) maciço de amarração, c) ancoragem dos cabos	131
Fig. 4.20 – Dispositivo passivo de dissipação de energia.	132
Fig. 4.21 – Dissipadores histeréticos Algasism PND e PNUD (Catálogo Alga)	134
Fig. 4.22 – Dissipadores Viscosos Algasism FD (Catálogo Alga).....	134
Fig. 4.23 – Dissipadores Viscosos Algasism FD (Catálogo Alga).....	134
Fig. 5.1 – Número de Obras de Arte por Distrito.....	138
Fig. 5.2 – Número de Obras de Arte por tipo de obra.....	138
Fig. 5.3 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura	139
Fig. 5.4 – Número de Obras de Arte do tipo III por tipo de estrutura	139
Fig. 5.5 – Número de Obras de Arte do tipo II por tipo de estrutura	140
Fig. 5.6 – Número de Obras de Arte do tipo I por tipo de estrutura.....	140
Fig. 5.7 – Percentagem de Obras de Arte por comprimento	141
Fig. 5.8 – Percentagem de Obras de arte por ano de construção.....	141
Fig. 5.9 – Percentagem de Obras de Arte por tipo de material	141
Fig. 5.10 – Percentagem de Obras de Arte por componente	142
Fig. 5.11 – Número de Obras de Arte por Concelho.....	143
Fig. 5.12 – Número de Obras de Arte por tipo de obra.....	143
Fig. 5.13 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura	144

Fig. 5.14 – Número de Obras de Arte do tipo de Obra e estrutura.....	144
Fig. 5.15 – Percentagem de Obras de Arte segundo o número de vãos	144
Fig. 5.16 – Número de Obras de arte por tipo de obra e por número de vãos.....	145
Fig. 5.17 – Número de Obras de arte com mais de 5 vãos por tipo de obra e por n.º de vãos	145
Fig. 5.18 – Percentagem de Obras de Arte por comprimento	146
Fig. 5.19 – Percentagem de Obras de Arte, por tipo de material	146
Fig. 5.20 – Número de Obras de Arte do tipo de Obra e material.....	147
Fig. 5.21 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura e material	147
Fig. 5.22 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura e material	148
Fig. 5.23 – Número e percentagem de obras de arte, segundo a década de construção	148
Fig. 5.24 – Percentagem de obras de arte de betão armado segundo ano de construção	149
Fig. 5.25 – Percentagem de obras de arte de alvenaria de pedra segundo ano de construção.....	149
Fig. 5.26 – Percentagem de Obras de Arte por componente	149
Fig. 5.27 – Percentagem de obras de arte que possuem cada componente, por tipo de obra.....	151
Fig. 5.28 – Número de obras de arte com aparelhos de apoio por tipo de obra e estrutura	152
Fig. 5.29 – Número de Obras de Arte que possuem aparelhos de apoio segundo a sua tipologia e localização	153
Fig. 5.30 – Número de obras de arte com juntas de dilatação por tipo de obra	153
Fig. 5.31 – Número de obras de arte que possuem juntas de dilatação segundo a sua tipologia	154
Fig. 5.32 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipo de patologia.	155
Fig. 5.33 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipologia e tipo de anomalia não estrutural.	156
Fig. 5.34 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipologia e tipo anomalia estrutural.	157
Fig. 5.35 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipo de estrutura e anomalia estrutural.	158
Fig. 5.36 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por ano de construção e anomalia estrutural.	158
Fig. 5.37 – Percentagem de Obras de Arte em Alvenaria de Pedra por tipo de patologia.	159
Fig. 5.38 – Planta esquemática da ponte	160
Fig. 5.39 – Alçado esquemático da Ponte – Lado de montante	160
Fig. 5.40 – Vista de jusante da Ponte, arco em ogiva.....	160
Fig. 5.41 – Vista montante da Ponte	160
Fig. 5.42 – Vista sobre a Ponte, lajeado de granito	160
Fig. 5.43 – Estado da ponte após colapso de 2001	161
Fig. 5.44 – Estado da pontes após colapso de 2004	161
Fig. 5.45 – Principais patologias da Obra de Arte por elemento estrutural.....	163
Fig. 5.46 – Trabalhos de reabilitação e reforço realizados na Ponte Dom Zameiro.	164

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Análise de todos os colapsos de pontes conhecidos editada por Scheer em 2001 (Kühn et al 2008).....	7
Tabela 2.2 – Alguns recordes mundiais	11
Tabela 2.3 – Tipos de aparelhos de apoio	16
Tabela 2.4 – Tipos de aparelhos de apoio (Adaptado de Leonhardt, Setra 2007, etc).....	17
Tabela 2.5 – Tipos de juntas (Lima 2006).....	18
Tabela 2.6 – Esquemas tipos de juntas (Lima 2006).....	19
Tabela 2.7 – Relação entre o custo de manutenção anual das Obras de Arte o valor da sua substituição (Brime 2002) e (Póvoa 2008).	25
Tabela 2.8 – Principais características dos Sistemas de Gestão de Obras de Arte (Almeida 2003).	26
Tabela 2.9 – Tipos de estrutura considerados na classificação das obras de arte.....	29
Tabela 2.10 – Listagem de Componentes das Obras de Arte e respectivos elementos.....	30
Tabela 2.11 – Classificação do estado de degradação da estrutura (EP 2006).....	32
Tabela 2.12 – Métodos de Controlo do Estado de Conservação de uma Obra de Arte (Andrey 1987)...	36
Tabela 2.13 – Domínios de aplicação dos diferentes métodos de ensaio (Andrey 1987)	39
Tabela 2.14 – Campos de aplicação dos principais métodos actualmente disponíveis para a avaliação e inspeção de pontes de alvenaria em arco (Rodrigues 2008)	40
Tabela 2.15 – Fases de intervenção da avaliação do estado de uma estrutura (Oliveira e Lourenço 2003)	41
Tabela 3.1 – Patologias provenientes de defeitos de construção(Tridon 2009)	65
Tabela 3.2 – Classificação das principais anomalias existentes nas Obras de Arte de betão armado, elementos em betão.....	67
Tabela 3.3 – Classificação de patologias não estruturais e principais causas	69
Tabela 3.4 – Manifestação patológica e causas do aparecimento de fissuras nas estruturas de betão (adaptado de Radomski 2002 e Laner 2001)	71
Tabela 3.5 – Principais causas de fissuras em Obras de Arte em betão armado: Quadros e pórticos e pontes com tabuleiro em laje maciça (IQA 1996)	73
Tabela 3.6 – Principais causas de fissuras em Obras de Arte em betão armado: Pontes de tabuleiro vigado e Estruturas tubulares em betão fabricado in situ (IQA 1996).....	74
Tabela 3.7 – Classificação de anomalias estruturais e principais causas, alguns exemplos.....	76
Tabela 3.8 – Classificação das principais anomalias existentes nas Obras de Arte em alvenaria de pedra (Adaptado de Rodrigues 2008).....	80
Tabela 3.9 – Principais problemas, acções preventivas, causas, técnicas de manutenção, conservação e reabilitação associadas às patologias não estruturais das Obras de Arte em Alvenaria (Adaptado Rodrigues 2008).....	81
Tabela 3.10 – Patologias de índole estrutura das Obras de Arte e respectivas causas	86
Tabela 3.11 – Características mecânicas dos materiais.....	88
Tabela 3.12 – Valores de cálculo das tensões resistentes.....	89

Tabela 3.13 – Classificação das principais anomalias existentes nas Obras de Arte em estrutura metálica.....	91
Tabela 3.14 – Principais anomalias dos aparelhos de apoio e causas prováveis (adaptado de Freire 2008)	95
Tabela 3.15 – Classificação das principais anomalias existentes nas juntas de dilatação (Adaptado Lima 2006).....	96
Tabela 4.1 – Normas e directivas regulamentares disponíveis noutros países aplicadas a construções existentes	108
Tabela 4.2 – Normas e directivas regulamentares disponíveis noutros países no domínio do dimensionamento sísmico de estruturas	109
Tabela 4.3 – Sequência de cálculo do valor dos esforços actuantes na verificação de segurança aos E.L.U. em estruturas existentes (Santos 2008)	117
Tabela 4.4 – Sistemas de protecção sísmica (Filiatrault 2004)	133
Tabela 5.1 – Número de Obras de Arte por comprimento	141
Tabela 5.2 – Número de Obras de arte por ano de construção.....	141
Tabela 5.3 – Número de Obras de Arte por tipo de material	141
Tabela 5.4 – Percentagem de Obras de Arte por componente	142
Tabela 5.5 – Número de Obras de Arte segundo o número de vãos	144
Tabela 5.6 – Número de Obras de Arte por comprimento	146
Tabela 5.7– Número de Obras de Arte, por tipo de material	146
Tabela 5.8 – Percentagem de Obras de Arte que possuem cada componente.....	149
Tabela 5.9 – Numero de Obras de Arte que possuem aparelhos de apoio segundo a sua tipologia e localização	152
Tabela 5.10 – Número de Obras de Arte que possuem juntas de dilatação segundo a sua tipologia.....	154

SIMBOLOGIA

EP	Estradas de Portugal
BRIME	Bridge Management in Europe
NBI	National Bridge Inventory
ICOMOS	International Council on Monuments and Sites
ACI	American Concrete Institute
SGOA	Sistema de Gestão de Obras de Arte
OA	Obra de Arte
PT	Ponte
TU	Túnel
VT	Viaduto
PH	Passagem Hidráulica
PA	Passagem Agrícola
PP	Passagem de Peões
PS	Passagem Superior
PI	Passagem Inferior
GT	Galeria Técnica
AA	Aparelho de Apoio
JA	Junta Aberta
JOPC	Juntas Ocultas sob Pavimento Contínuo
JBM	Juntas de Betume Modificado
JSME	Juntas Seladas com Material Elástico
JPEC	Juntas em Perfil de Elastómero Comprimido
BFE	Bandas Flexíveis de Elastómero
PMD	Placas Metálicas Deslizantes
JEA	Juntas de Elastómero Armado
PMC	Pentes Metálicos em Consola
JEAC	Juntas de Elastómero Armado Compostas
PMR	Placas Metálicas com Roletes
JPEM	Juntas de Perfis de Elastómero Múltiplos

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO, ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

1.1. Considerações gerais

Portugal é um país com um vasto património de obras de arte. Muitas destas estruturas apresentam um pronunciado nível de degradação, pelo que é fundamental desenvolver acções de recuperação e conservação para garantir um nível de segurança compatível com a utilização em causa.

Como é do conhecimento geral, o problema não reside unicamente nas pontes antigas, em geral construídas em alvenaria de pedra. Devido ao elevado ritmo de construção de novas vias de comunicação nos últimos anos, tem-se observado que o estado de degradação das obras de arte, principalmente das pontes de betão, é considerável. Estes problemas têm como principal motivo os reduzidos prazos de execução e a falta de inspecção e manutenção periódicas adequadas.

Para se prevenir o aparecimento de patologias, é necessário que se projecte e construa com qualidade, que se conheça as causas das patologias encontradas, fazendo com que haja uma “realimentação do sistema”, evitando a repetição dos mesmos erros.

Além disto, é importante salientar que a reparação, recuperação, reforço, são, geralmente, bem mais caros do que a realização de uma manutenção periódica, que previna a ocorrência e evolução de patologias nas pontes.

O estado de conservação e a avaliação da segurança das pontes existentes são temas actuais que têm suscitado uma crescente preocupação, em toda a sociedade e nas autoridades competentes.

O desenvolvimento de sistemas de gestão de obras de arte tem dado um contributo importante no planeamento e gestão das redes.

A avaliação do desempenho e da segurança das obras de arte passa pela realização de inspecções, que culminam com a identificação do estado de conservação da obra de arte.

As inspecções a realizar devem ser periódicas, de modo a permitir a identificação de anomalias, sugerindo a adopção de procedimentos com vista a garantia de adequadas condições de durabilidade das estruturas, ou seja de modo a garantir a aptidão da estrutura para desempenhar as funções para que havia sido concebida durante o período de vida previsto, sem que para tal seja necessário incorrer em custos de manutenção e reparação imprevistos.

As técnicas de inspecção visual e observação de obras de arte têm-se desenvolvido consideravelmente, permitindo realizar diagnósticos rigorosos do estado de conservação das pontes, que poderão dar indicações, por exemplo, das zonas que necessitam de inspecções mais detalhadas ou até reparação.

Recorrendo a inspecções visuais, ensaios e monitorização, consegue-se acompanhar a evolução do estado de conservação e o aparecimento de eventuais patologias nas obras, de modo a identificar as que tendem para uma grave deterioração e intervir atempadamente, podendo ser evitado neste cenário os danos severos, ou até o seu colapso.

A monitorização das estruturas em engenharia civil poderá ter como objectivo a avaliação da durabilidade e integridade estrutural, permitindo estudar e analisar o seu comportamento durante as fases de construção e/ou de exploração.

Um sistema de monitorização deverá incluir a instrumentação das secções e elementos principais da estrutura, englobando o controlo efectivo da evolução da deformação dos materiais constituintes, o registo dos gradientes térmicos e a sua evolução, o estado de corrosão das armaduras e as acelerações induzidas por sismos, entre outros parâmetros.

O conceito de estrutura inteligente subentende a existência de sistemas automáticos de monitorização, de estruturas auto-adaptativas e de um sistema capaz de controlar a resposta estrutural. Estes sistemas de monitorização deverão ser capazes de detectar a ocorrência de situações de excepção predefinida, por exemplo através do controlo de determinados valores de parâmetros caracterizadores dos efeitos das acções em termos de deformações e/ou deslocamentos. Recentemente, têm-se desenvolvido diversos estudos nesta área, nomeadamente na caracterização do comportamento dinâmico das estruturas e protecção sísmica.

Com o intuito de avaliar o comportamento das estruturas ao longo do tempo e de as proteger contra eventuais acções de acidente severas, pretende-se ainda com esta dissertação analisar e apresentar algumas técnicas de reabilitação e reforço de estruturas.

1.2. Enquadramento e objectivos da tese

Com a realização desta dissertação pretende-se alcançar, de forma faseada, os seguintes objectivos:

- Recolha bibliográfica sobre aspectos gerais sobre pontes rodoviárias: estado da arte (evolução histórica, tipologias e sistemas estruturais mais comuns, processos construtivos, ciclo de vida); estratégias de inspecção, sistemas de gestão de obras de arte, monitorização, sistemas de controlo activo “smart structures”.
- Descrição das patologias mais frequentes em pontes rodoviárias
- Principais causas de dano de pontes rodoviárias originadas pela acção sísmica;
- Metodologias de avaliação de segurança;
- Regulamentação existente a nível internacional para avaliar a segurança estrutural de pontes existentes;
- Soluções e técnicas de reabilitação e reforço de Obras de Arte. Reforço sísmico de pontes.
- Caso de estudo sobre um conjunto de pontes existentes em Portugal. Análise estatística dos danos mais frequentes e correlação com factores como a idade, tipologia, método construtivo, localização, etc.

1.3. Organização da tese

A presente dissertação está organizada em sete capítulos, apresentando-se de uma forma sumária o conteúdo de cada um deles.

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução à temática da necessidade de avaliação do desempenho e reabilitação e reforço de Obras de Arte. Descrevem ainda os principais objectivos da tese e a sua organização em capítulos.

Com o capítulo 2 pretende-se introduzir alguns conceitos gerais sobre o estado da arte das pontes rodoviárias, particularmente no que diz respeito à sua evolução histórica, tipologias e sistemas estruturais mais comum, bem como aos processos construtivos mais utilizados. Procura-se evidenciar que em todas as fases da vida útil de uma estrutura se deve ter sempre em

mente a durabilidade das estruturas. Refere-se a importância de se implementar sistemas de gestão de obras de arte, apresentando alguns sistemas adoptados noutros países e a realidade portuguesa. Descrevem-se as principais técnicas de inspecção e diagnóstico, fazendo referência à implementação de sistemas de monitorização de estruturas e sistemas de controlo activo.

O capítulo 3 tem como finalidade apresentar as principais patologias que se manifestam nas Obras de Arte, tendo em consideração os diferentes materiais estruturais que as constituem e os respectivos componentes. Descrevem-se as principais causas que estão na origem do aparecimento de danos nas estruturas, particularizando para as que tiveram origem na acção sísmica.

Com o capítulo 4 procurou-se tecer algumas considerações sobre a avaliação do desempenho de estruturas existentes, começando por fazer referência à regulamentação em vigor a aplicar em estruturas existentes. Pretendeu-se igualmente apresentar as principais etapas a ter em consideração na elaboração de um projecto de reabilitação e descrever as principais técnicas de reabilitação e reforço de estruturas de betão armado, alvenaria de pedra e estruturas metálicas. Termina-se o capítulo apresentando alguns sistemas de protecção sísmica

O capítulo 5 é dedicado à análise de um conjunto de pontes rodoviárias existentes em Portugal, apresentando uma análise estatística dos danos mais frequentes, procurando correlacionar com factores como a idade, tipologia, método construtivo, localização, etc.

No Capítulo 6 são tecidas algumas considerações gerais sobre a tese, destacando-se os principais aspectos do trabalho, propondo-se também algumas linhas de orientação a desenvolver em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Aspectos gerais sobre pontes rodoviárias

2.1.1. Evolução histórica

Ao longo dos tempos tem-se vindo a designar por Obra de Arte todas as obras especiais de vias de comunicação, tais como pontes, viadutos, pontões, que em tempos eram projectadas por artificies que utilizando a sua grande intuição e empirismo idealizaram obras que hoje em dia são inquestionavelmente autenticas Obras de Arte.

O Homem desde sempre teve necessidade de se deslocar e transpor rios. Até ao final do século XVIII as Pontes eram construídas em alvenaria ou madeira, a partir dessa data e com a revolução industrial começaram a ser construídas as primeiras pontes em ferro fundido e aço estrutural. É a partir de 1900 que surgem as pontes em betão armado e a partir de 1938 começa-se a utilizar o betão pré-esforçado nas pontes.

Com a descoberta de novos materiais de construção, como o betão, o aço, os materiais compósitos, conseguiu-se melhorar significativamente o desempenho mecânico das estruturas e desde então tem-se vindo a verificar acréscimo sem precedentes da construção de novas Obras de Arte.

Além do emprego de novos materiais e técnicas, são também responsáveis por estas mudanças as condições criadas pelo desenvolvimento das sociedades, as exigências do clima e a necessidade de expressar novas aspirações e ideais.

Actualmente verifica-se que os recordes mundiais (Tabela 2.2) vão sendo continuamente ultrapassados pela construção de novas estruturas arrojadas. O desejo e a utopia de atingir um novo recorde é um acto de exaltação do ego dos engenheiros que desencadeia o desenvolvimento de novas técnicas estruturais e construtivas.

O progresso tem permitido o desenvolvimento das redes rodoviárias de todo o mundo e consequentemente isso reflecte-se num aumento crescente da construção de Obras de Arte.

O ritmo crescente do número de obras de arte, aliado ao controlo dos custos e prazos para a sua realização, faz com que se descuidem muitas vezes dos aspectos relativos à qualidade e durabilidade das estruturas.

Se até há pouco tempo, se pensava que as construções, mais precisamente as pontes, durariam indefinidamente, actualmente, já está provado que isto não é verídico. Todas as pontes, para atingirem uma vida útil para as quais foram projectadas, necessitam de manutenção.

Uma grande percentagem das Obras de Arte existentes encontram-se deterioradas devido à sua idade, às condições ambientais a que estão submetidas e à insuficiente capacidade para resistir ao tráfego actual.

Tomando consciência que a durabilidade das estruturas das pontes e dos equipamentos nela instalados, não é eterna, já se começa a constatar um aumento do investimento na manutenção e conservação de Obras de Arte, no sentido de se permitir a circulação do tráfego em condições de comodidade, segurança e fluidez.

Para se manter o bom funcionamento das pontes, torna-se necessário gerir a sua manutenção e para tal, tem-se vindo a recorrer à implementação de sistemas de gestão com módulos informáticos semi-inteligentes que auxiliam na prevenção do estado geral das estruturas (Santiago 2000).

O recurso a Sistema de Gestão de Obras de Arte tem permitido às entidades competentes, ter conhecimento do seu património e do seu estado de manutenção e conservação. Estas aplicações informáticas têm um papel importante na prevenção de todo o tipo de situações que possam pôr em perigo a segurança do tráfego rodoviário e pedonal.

A primeira entidade pública que foi criada tendo como um dos seus objectivos a manutenção das obras de arte da rede de estradas foi o Corps des Ponts et Chaussées, fundado em França em 1716. Nessa altura, todas as pontes importantes eram em alvenaria de pedra e o seu período de vida útil era praticamente ilimitado, conforme se pode testemunhar pela existência de diversas

pontes deste tipo, algumas mesmo do período romano, capazes ainda de suportar tráfego pesado actual (Brito 1992).

A preocupação por manter, conservar e reabilitar as Obras de Arte, tem sido impulsionada ao longo dos tempos pelo colapso inesperado de pontes. Estes acidentes trágicos, têm um custo inestimável para a sociedade, especialmente quando originam a perdas de vidas humanas.

Na publicação “Collapse of Works, Part 1 Bridges” editada pelo Scheer em 2001 foram analisados todos os tipos de colapso de pontes. A tabela que se segue mostra 8 categorias de colapso de pontes construídas com diferentes tipos de material.

Tabela 2.1 – Análise de todos os colapsos de pontes conhecidos editada por Scheer em 2001 (Kühn et al 2008).

N.º	Colapso	Número de colapsos	
		Com informação detalhada	Sem informação detalhada
1	Durante a construção	93	20
2	Em serviço sem influências externas	86	35
3	Devido a impacto de barcos	48	4
4	Devido à influência do tráfego sob a ponte	16	0
5	Devido à influência do tráfego sobre a ponte	18	5
6	Devido ao elevado nível da água ou gelo	32	10
7	Causado por fogo, explosões, etc	15	2
8	Na estrutura de suporte	48	14
TOTAL		356	90

Nos Estados Unidos foi por volta dos anos 60, após o colapso da Silver Bridge, que se verificou uma maior consciencialização por parte das autoridades competentes para esta problemática (Small and Cooper 1998).

Em Portugal talvez essa maior consciencialização se tenha verificado com a mesma intensidade em 2001, com o colapso da ponte centenária Hintze Ribeiro em Entre-os-rios (Fig. 2.1), que vitimou cerca de meia centena (59) de pessoas no Inverno de 2001 e com a queda de uma passagem de peões sobre o IC19, em Setembro de 2003.



Fig. 2.1 – Colapso da Ponte Hintze Ribeiro

Em Portugal, o investimento de novas Obras de Arte ainda é superior ao dispendido na manutenção e conservação, no entanto tem-se vindo a verificar uma maior preocupação por parte das entidades responsáveis no sentido de preservar as estruturas existentes.

As primeiras inspecções realizadas em Portugal, com recurso a um Sistema de Gestão de Obras de Arte, decorreram no final da década de 90 (Mendonça e Brito 2008)

2.1.2. Tipologias e sistemas estruturais mais comuns

As diferentes tipologias e sistemas estruturais que podemos observar no património de Obras de Arte rodoviário e ferroviário foram desde sempre motivadas por diferentes factores, tais como os diferentes materiais utilizados, as diferentes tecnologias e o “know-how” da época, associados aos diferentes desafios impostos pelos condicionalismos topográficos e aos meios económicos existentes.

A escolha por uma tipologia em detrimento de outra é sempre condicionada pelo seu comportamento estrutural aliado a sua expressão estética, permitindo ao projectista escolher uma grande variedade de formas e usar a sua liberdade arquitectónica.

De entre a variedade de sistemas estruturais, poderemos referir a existência de 3 grandes famílias: as pontes em viga, as pontes em arco e as pontes de cabos, ilustrada na Fig. 2.2.

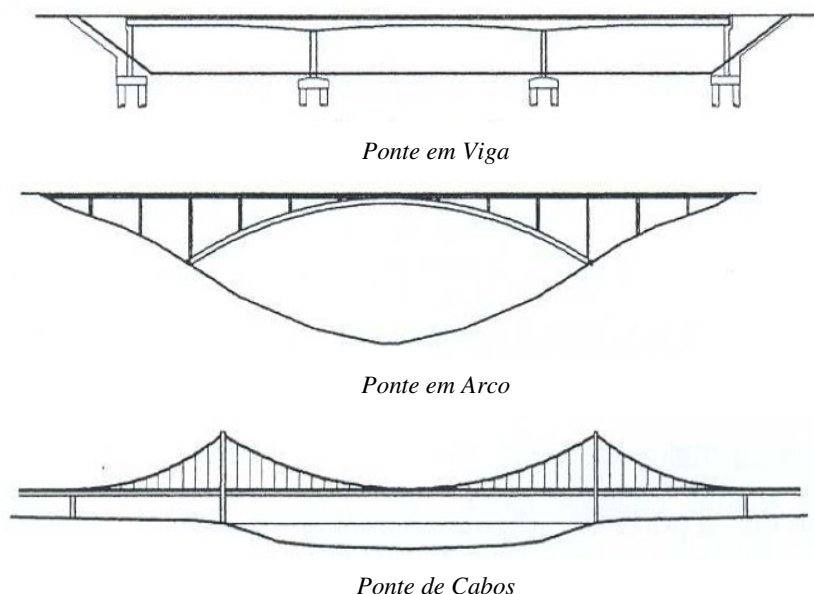


Fig. 2.2 – Tipologias de ponte segundo o seu sistema estrutural (Manterola e Cruz 2004)

Naturalmente estas três famílias de pontes utilizam-se com os diferentes materiais: pedra, madeira, aço e betão.

- *Pontes em viga*

Este é o sistema estrutural mais antigo, já usado pelas civilizações primitivas na travessia de rios, através do recurso a troncos de árvores e pedras achatadas.

É a partir do comportamento das vigas quando flectidas que se desenvolvem os diversos tipos de sistemas estruturais das pontes.

De uma maneira geral, as pontes em viga, são pontes que se apoiam em dois encontros extremos e numa série de pilares intermédios. De um ponto de vista resistente poderíamos afirmar que são pontes que utilizam a flexão generalizada (flexão, corte, torção, etc.) como mecanismo fundamental para transmitir as cargas.

Há diferentes tipos de pontes em viga que se distinguem de acordo com o seu comportamento estrutural, a referir a viga simplesmente apoiada (Fig. 2.3), a viga gerber (Fig. 2.4), a viga contínua (pórtico) (Fig. 2.5), e a viga em treliça (Fig. 2.6).



Fig. 2.3 – Exemplo de uma ponte em Viga simplesmente apoiada: Viaduto das Areias (EP 2007)



Fig. 2.4 – Exemplo de uma ponte em Viga Gerber: Ponte de Amarante (EP 2007)



Fig. 2.5 – Exemplo de uma ponte em pórtico: Ponte do Freixo

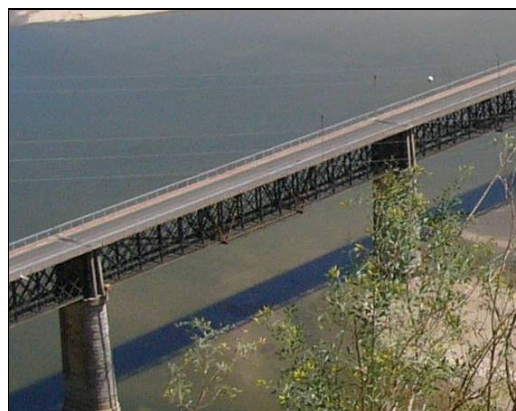


Fig. 2.6 – Exemplo de uma ponte em viga treliçada: Ponte Luís I Santarém

▪ *Pontes em Arco*

Os romanos foram os primeiros grandes construtores de pontes em arco. Esta técnica permitia a utilização de materiais com dimensões mais pequenas e a possibilidade de se construir pontes com maiores vãos.

As estruturas em arco, devido à sua forma curvilínea desenvolvida segundo a linha de pressões, funcionam essencialmente à compressão. Este é o tipo estrutural mais apropriado para os materiais de construção como a pedra e o betão. O arco é muitas vezes utilizado como elemento fundamental de suporte do tabuleiro.

As figuras que se seguem pretendem ilustrar alguns tipos de pontes em arco presentes em Portugal.



Fig. 2.7 – Ponte de Alvenaria de Pedra: Ponte Duarte Pacheco



Fig. 2.8 – Ponte em betão armado: Ponte da Arrábida



Fig. 2.9 – Ponte em ferro: Ponte Luíz I

▪ *Pontes de cabos*

As estruturas com cabos fazem parte das estruturas que integram elementos traccionados, em que os cabos são os principais elementos de suporte.

Normalmente distingue-se dois tipos de pontes com cabos, as pontes suspensas e as pontes atirantadas.

Nas Pontes suspensas (Fig. 2.10) os cabos constituem a principal estrutura de suporte, assumindo uma determinada configuração entre as ancoragens e eventuais pontos de fixação intermédios, que permitem suspender a restante estrutura (tabuleiro). Nas Pontes atirantadas o tabuleiro é suspenso por meio de cabos inclinados que são fixados em torres (Fig. 2.11).






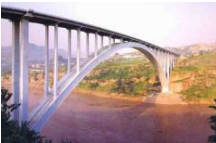





Fig. 2.10 – Ponte 25 de Abril



Fig. 2.11 – Ponte Vasco da Gama

Na tabela que se segue (Tabela 2.2) apresentam-se as Pontes por tipologia que são actualmente recordes mundiais.

Tabela 2.2 – Alguns recordes mundiais

Tipologia	Designação da Ponte	Material	País	Vão máximo (m)	Ano Construção
Ponte em Arco	Danhe 	Alvenaria de pedra/betão	China	146	2000
	Hu-Pu, Shanghai 	Aço/betão	China	550	2003
	Chaotianmen 	Aço	China	572	2008
	Wanxian 	betão	China	425	1997
	Flisa 	Madeira	Noruega	70,34	2003
Ponte Suspensa	Ponte de Messina 		Italia	3300	Incompleta (2011)
	Ponte Akashi 		Japão	1991	1998
Ponte Atirantada	Suzhou-Nantong (Sutong) 		China	1088	2008
Pontes Cantilever	Quebec 	Aço	Canadá	549	1917

2.1.3. Principais componentes das Obras de Arte

As Obras de Arte apresentam diferentes componentes consoante a sua tipologia e material, no entanto todas as infraestruturas são constituídas por elementos estruturais que absorvem as cargas provenientes do tráfego (tabuleiro) e as transmitem às fundações (encontros, pilares, aparelhos de apoio). As figuras que se seguem (Fig. 2.12 e Fig. 2.13) pretendem ilustrar os principais componentes das pontes em betão armado e das pontes em arco de alvenaria de pedra.

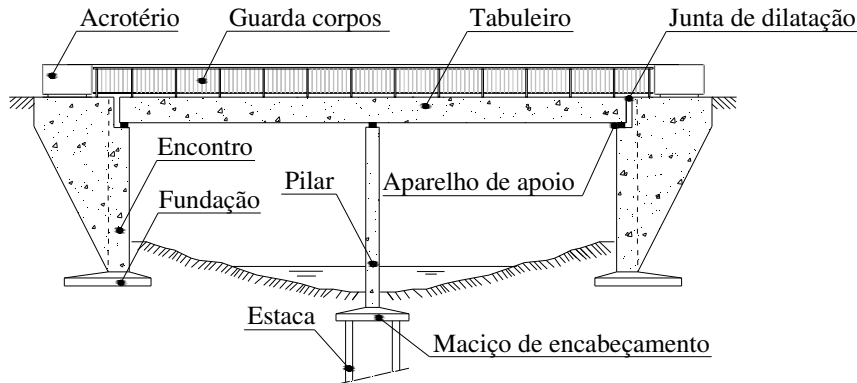


Fig. 2.12 – Principais componentes das pontes

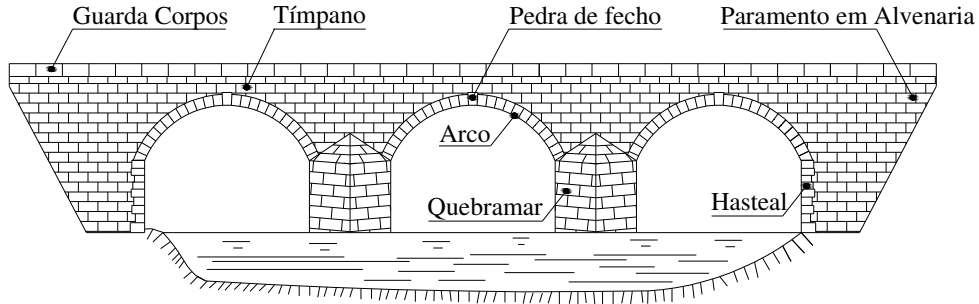


Fig. 2.13 – Principais componentes das pontes em alvenaria de pedra em arco

- *Tabuleiro*

O tabuleiro, durante a fase construtiva e em serviço, é solicitado por cargas de diferente natureza, actuando quer na direcção vertical (peso próprio, as restantes cargas permanentes e sobrecargas), quer na direcção horizontal (frenagem, vento e sismo). Actuam também na ponte acções que induzem nos elementos estruturais deformações impostas, tais como a variação da temperatura, a retracção e o pré-esforço.

Dependendo da largura do tabuleiro, do material estrutural em causa, do sistema estrutural longitudinal, do vão e do processo construtivo, poderemos encontrar diferentes tipos de secções

transversais. Nas figuras que se seguem apresentam-se alguns exemplos dos diferentes tipos de secção transversal de pontes em betão armado.

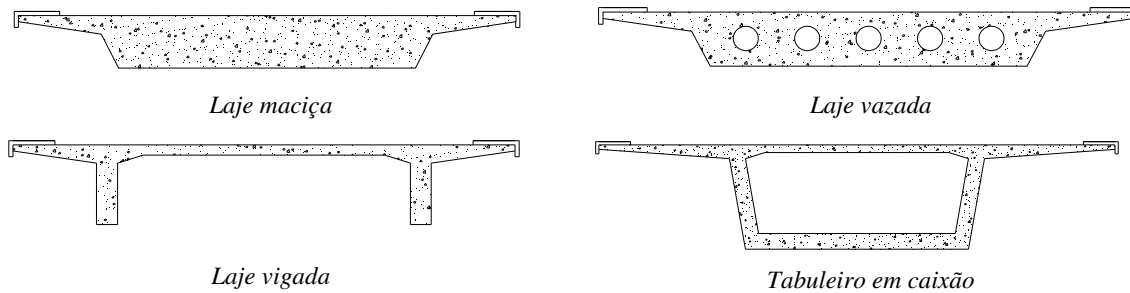


Fig. 2.14 – Diferentes tipos de secção transversal de pontes em betão armado

O pormenor tipo de um passeio de uma ponte rodoviária em betão armado é ilustrado na Fig. 2.15, e inclui, em geral, além dos elementos estruturais propriamente ditos, os seguintes elementos: revestimento da via, passeios, guarda corpos, guarda de segurança, cornijas, juntas de dilatação, sistema de drenagem, dispositivos para instalação de serviços e dispositivos para a instalação da iluminação da ponte.

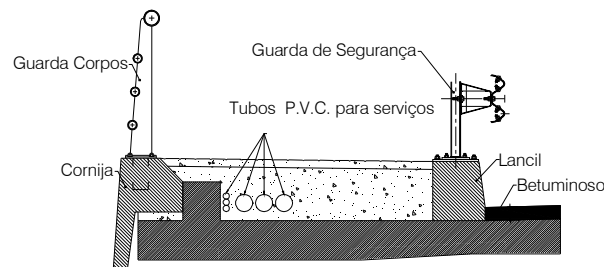


Fig. 2.15 – Pormenor de um passeio

▪ Pilares

Um pilar compõe-se essencialmente de um fuste simples (Fig. 2.16) ou múltiplo (Fig. 2.17) e de uma fundação. No topo, o fuste recebe a carga da superestrutura por intermédio de uma ligação realizada por aparelhos de apoio ou de uma ligação monolítica, como acontece nas pontes em pórtico.

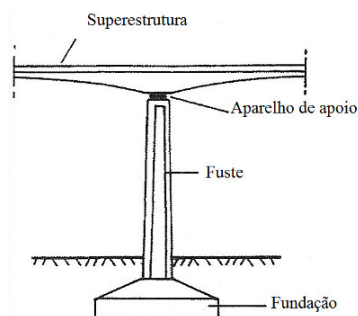


Fig. 2.16 – Fuste simples (Reis 1997)

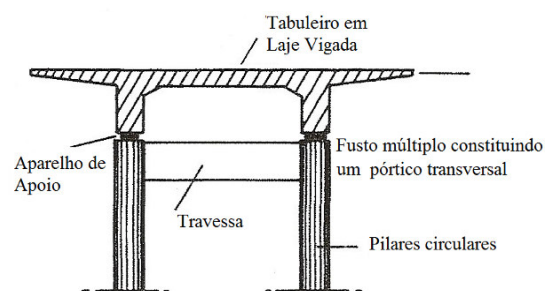


Fig. 2.17 – Fuste múltiplo (Reis 1997)

O fuste do pilar pode ser alargado no topo para acomodar a superestrutura, como acontece nos pilares com apoio em martelo, ilustrado na figura que se segue.

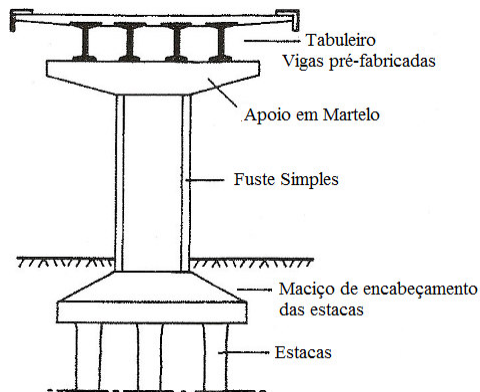


Fig. 2.18 – Fuste simples com apoio em martelo (Reis 1997)

A forma da secção transversal varia consoante as acções ao qual está submetido (acções permanentes e variáveis, vento, sismo, etc) e a topografia do local.

O tipo de ligação do pilar ao tabuleiro, depende do tipo de pilar, da sua altura, da sua rigidez e da sua distância ao centro de rigidez da obra. A ligação pode ser monolítica, com rótula impedindo os deslocamentos (aparelhos de apoio fixos) e com rótula, permitindo deslocamentos em uma ou duas direcções (aparelhos de apoio deslizantes sobre teflon).

▪ *Encontros*

O encontro é o elemento estrutural que estabelece a ligação entre a Obra de Arte e a via de comunicação que lhe dá acesso por intermédio de um aterro. Este componente tem como finalidade suportar as cargas verticais e horizontais transmitidas pela superestrutura, transmitindo-as ao solo de fundação, bem como suportar os impulsos de terras transmitidas pelo solo adjacente ou por ele contido e evitar a erosão do aterro.

Os encontros têm um papel importante no funcionamento geral da Obra de Arte, pois permitem que a superestrutura sofra dilatações, assentamentos de apoio ou outras deformações, sem que isso implique riscos maiores para o seu funcionamento.

Associado ao encontro existem normalmente muros que podem estar ou não ligados ao encontro, dependendo de se encontrarem inclinados ou perpendiculares ao encontro, podem ser muros ala, avenida ou asa.

Os tipos de encontros dependem muito das condições topográficas e geotécnicas e também do tipo de superestrutura. Podem-se distinguir dois tipos de encontro: encontros aparentes (Fig. 2.19) e encontros perdidos (Fig. 2.20) (Reis 1997).

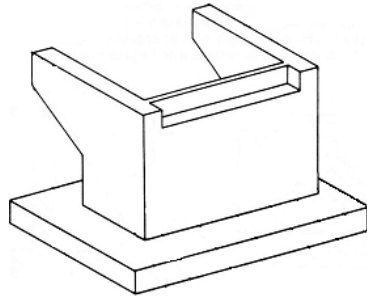


Fig. 2.19 – Encontro aparente

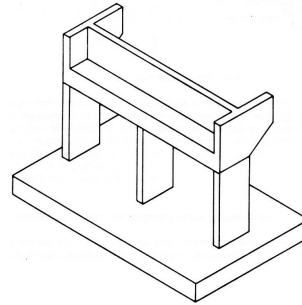


Fig. 2.20 – Encontro perdido

▪ Fundações

As fundações dos pilares e encontros dividem-se em dois tipos: as fundações directas e as fundações indirectas.

As fundações directas são utilizadas quando existe solo de boa resistência (bed-rock) a pouca profundidade, são em geral de betão armado, podendo ser constituídas por blocos ou sapatas.

Quando o solo de boa resistência não é superficial, é necessário executar fundações indirectas ou profundas, recorrendo-se a estacas, pegões ou barretas.

▪ Aparelhos de apoio

Os Aparelhos de Apoio são dispositivos concebidos para assegurar a transmissão de cargas do tabuleiro para os apoios (pilares e encontros), permitindo a eventual restrição de alguns movimentos relativos (deslocamentos e/ou rotações).

A utilização de Aparelhos de apoio visa criar uma descontinuidade entre a superestrutura e a infra-estrutura, com interrupção da transmissão de alguns tipos de esforços entre ambas as partes.

Quando se prevê a incorporação destes dispositivos numa Obra de Arte, além das acções a que irá estar submetido e do tipo de aparelho de apoio a utilizar, deve-se ter em consideração as disposições construtivas que permitam a visita para inspecção e a sua substituição.

Os aparelhos de apoio podem ter diferentes designações, de acordo com os graus de liberdade que restringem. Para movimentos de translação, poderemos ter aparelhos de apoio fixos (todos os graus de liberdade bloqueados), unidireccionais (um grau de liberdade) e livres (2 graus de liberdade). Para movimentos de rotação, teremos dispositivos de rotação multi-direccional ou dispositivos de rotação unidireccional.

Existem vários tipos de aparelhos de apoio que podem ser agrupados conforme os materiais constituintes e o tipo de deslocamento que proporcionam. A classificação dos aparelhos de apoio que se apresenta teve em consideração a norma europeia EN1337.

A nova norma europeia estabelece uma classificação baseada na forma do deslocamento destes elementos. Teremos assim as seguintes categorias de Aparelhos de Apoio:

Categoria 1: Aparelho de Apoio de rotação completa Aparelho de Apoio em elastómero

- Aparelho de Apoio “panela”
- Aparelho de Apoio esférico
- Aparelho de Apoio pêndulo pontual
- Aparelho de Apoio guiado com bloqueamento

Categoria 2: Aparelho de Apoio de rotação axial AA de pêndulo

- Aparelho de Apoio cilíndrico guiado segundo direcção longitudinal ou segundo a direcção longitudinal mais a direcção transversal.
- Aparelho de Apoio de rolete simples

Categoria 3: Aparelho de Apoio esférico e cilíndrico onde a carga horizontal é suportada pela superfície de deslizamento curva

- Aparelho de Apoio esférico fixo ou com elementos de deslizamento unidireccional
- Aparelho de Apoio cilíndrico fixo ou guiado na direcção transversal

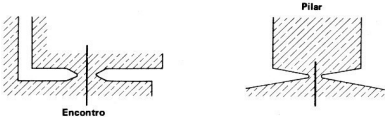
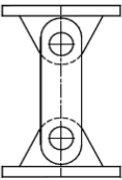
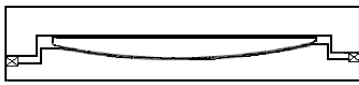
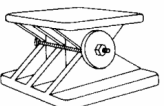
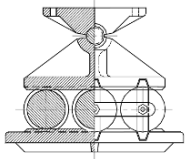
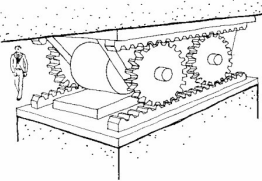


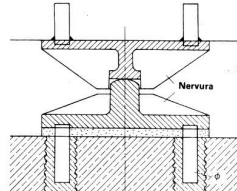
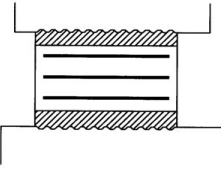
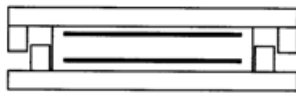
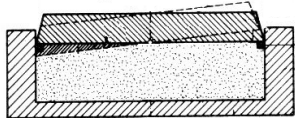
Categoria 4: todos os restantes Aparelho de Apoio

Nas tabelas que se seguem apresenta-se um esquema representativo de cada tipo de aparelhos de apoio mais usados.

Tabela 2.3 – Tipos de aparelhos de apoio

Tipo	Designação
1	Articulações de betão
2	Aparelhos de apoio metálico de pêndulo ou balanceiro
3	Aparelhos de apoio metálicos de calote esférica ou cilíndrica – tipo “Pot-bearing
4	Aparelhos de apoio metálicos de rolo ou rolete
5	Aparelhos de apoio metálicos de contacto linear
6	Aparelhos de apoio elastómeros ou de Neoprene Cintado
7	Aparelhos de apoio elastómeros ou de Neoprene Cintado, deslizante longitudinalmente sobre teflon
8	Aparelhos de apoio com elastómero e aço – tipo panela

Tabela 2.4 – Tipos de aparelhos de apoio (Adaptado de Leonhardt, Setra 2007, etc)

 <p>Encontro</p> <p>Pilar</p> <p>Tipo 1 – Articulações de betão</p>	 <p>Tipo 2 – AA metálico de pêndulo ou balanceiro</p>	 <p>Tipo 3 – AA Metálicos de calote esférica ou cilíndrica – tipo “Pot-bearing”</p>
 <p>Tipo 4 – AA Metálicos de rolo ou roletes (fixos)</p>	 <p>Tipo 4 – AA Metálicos de roletes múltiplos</p>	 <p>Tipo 4 – AA metálicos de rolete com dentes de guiamento</p>
 <p>Tipo 5 – AA metálicos de contacto linear</p>	 <p>Tipo 5 – AA metálicos de contacto linear</p>	 <p>Nervura</p> <p>Tipo 5 – AA metálicos de contacto linear</p>
 <p>Tipo 6 – AA elastómeros ou de Neoprene Cintado</p>	 <p>Tipo 7 – AA elastómeros ou de Neoprene Cintado, deslizante longitudinalmente sobre teflon</p>	 <p>Tipo 8 – AA de neoprene em caixa fixa, com elastómero e aço – tipo panela</p>

▪ Juntas de dilatação

A junta de dilatação tem como finalidade garantir a continuidade do pavimento, assegurando a exploração da via sem condicionamentos.

As juntas de dilatação são dispositivos deformáveis que permitem assegurar a transição entre os elementos da Ponte móveis e as zonas fixas dos seus acessos, possibilitando a existência de movimentos relativos entre as duas partes em condições de segurança, comodidade e durabilidade.

A sua localização normal é entre o tabuleiro da ponte e cada encontro se bem que, no caso de pontes muito extensas, se possam também situar entre zonas da própria ponte. Neste último

caso, as vigas principais, ou mais geralmente a superestrutura, têm de ser interrompidas criando-se apoios móveis para permitir a livre dilatação na zona da junta (Reis 1997).

As juntas são os elementos das pontes mais sujeitos a desgastes e mais sensíveis. Deste modo, devem ser projectadas para resistir às acções dinâmicas e abrasivas do trânsito bem como aos agentes atmosféricos e à retracção e à fluência dos materiais.

Existem diferentes tipos de juntas de dilatação e a sua classificação pode ser efectuada segundo vários critérios, qualitativos ou quantitativos, tendo em consideração o modo de execução, os materiais utilizados, os movimentos permitidos, o funcionamento estrutural, a sua localização, etc.

A classificação que se apresenta foi proposta no âmbito da tese de mestrado António Lima (2006) e teve como base o panorama de juntas de dilatação instaladas em Portugal. Este sistema adoptou uma classificação qualitativa, que permitisse uma fácil relação entre as anomalias e os diferentes tipos de juntas.

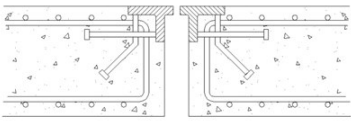
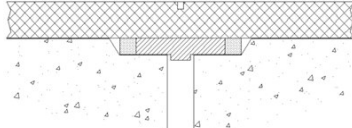
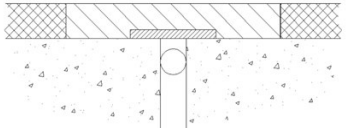
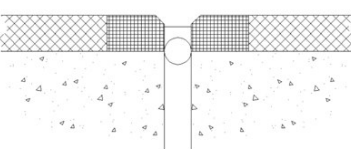
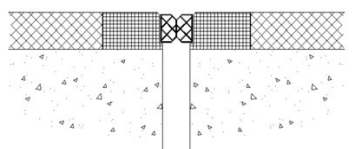
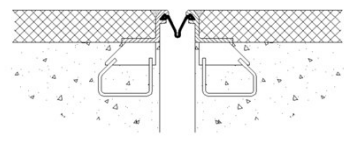
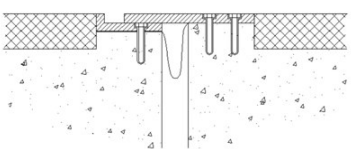
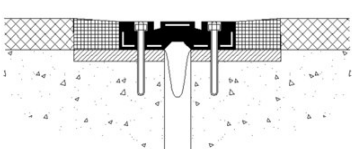
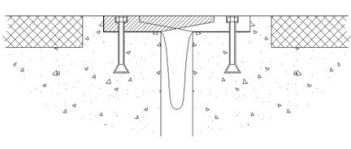
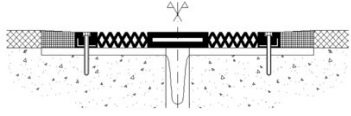
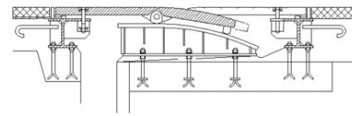
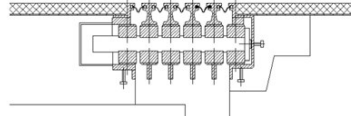
As designações adoptadas para as diversas tipologias foram escolhidas essencialmente a partir dos materiais utilizados e da sua morfologia.

Nas tabelas que se seguem apresenta-se a classificação proposta e um esquema representativo de cada tipo de junta.

Tabela 2.5 – Tipos de juntas (Lima 2006)

Tipo	Designação	Abreviatura
1	Juntas abertas	JA
2	Juntas ocultas sob pavimento contínuo	JOPC
3	Juntas de betume modificado	JBM
4	Juntas seladas com material elástico	JSME
5	Juntas em perfil de elastómero comprimido	JPEC
6	Bandas flexíveis de elastómero	BFE
7	Placas metálicas deslizantes	PMD
8	Juntas de elastómero armado	JEA
9	Pentes metálicos em consola	PMC
10	Juntas de elastómero armado compostas	JEAC
11	Placas metálicas com roletes	PMR
12	Juntas de perfis de elastómero múltiplos	JPEM

Tabela 2.6 – Esquemas tipos de juntas (Lima 2006)

		
Tipo 1 – Juntas abertas	Tipo 2 – Juntas ocultas sob o pavimento contínuo	Tipo 3 – Juntas de betume modificado contínuo
		
Tipo 4 – Juntas seladas com material elástico	Tipo 5 – Juntas em perfil de elastômero comprimido	Tipo 6 – Bandas flexíveis de elastômero
		
Tipo 7 – Placas metálicas deslizantes	Tipo 8 – Juntas de elastômero armado	Tipo 9 – Pentes metálicos em consola
		
Tipo 10 – Juntas de elastômero armado compostas	Tipo 11 – Placas metálicas com roletes	Tipo 12 – Juntas de perfis de elastômero múltiplos

▪ Órgãos de drenagem

Os órgãos de drenagem têm como função recolher e encaminhar as águas superficiais para um sistema de drenagem geral.

Salienta-se que a durabilidade das estruturas é muitas vezes comprometida devido à falta ou má execução dos órgãos de drenagem.

As figuras que se seguem pretendem ilustrar exemplos de órgãos de drenagem.

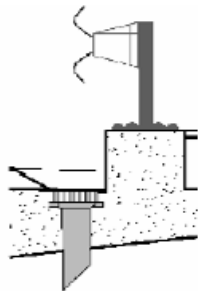


Fig. 2.21 – Gárgula ou sumidouro e tubo de queda

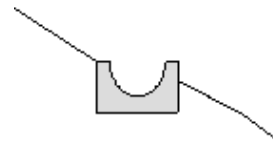


Fig. 2.22 – Caleira (meia cana)

2.1.4. Processo construtivo

O processo construtivo de uma obra além de ter uma enorme influência na sua concepção estrutural, na qualidade e prazo da obra, podem ser responsáveis pelo aparecimento de patologias, quando não são correctamente executados.

A metodologia adoptada na construção das pontes depende do material constitutivo dos elementos estruturais. Hoje em dia existem variadíssimos métodos para a construção de pontes, pelo que apenas se irá fazer referência às principais tecnologias utilizadas.

Os processos construtivos mais utilizados na realização de pilares em betão armado de pontes são:

- Cofragens tradicionais
- Moldes deslizantes ou moldes saltantes (Fig. 2.23)
- Pré-fabricação



Fig. 2.23 – Construção de um pilar, Pont sur la Mentue

A construção do tabuleiro das pontes pode ser executada, com um dos seguintes métodos:

- Construção com cavalete apoiado sobre o terreno (Fig. 2.24)

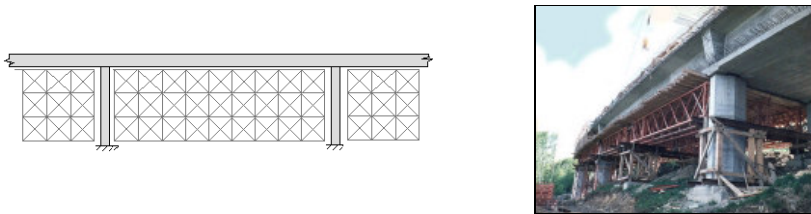


Fig. 2.24 – Construção com cimbra ao solo

- Construção com vigas de lançamento (cimbra móvel autoportante) (Fig. 2.25)



Cimbra móvel autoportante superior



Cimbra móvel autoportante inferior

Fig. 2.25 – Construção com vigas de lançamento

- Método dos deslocamentos sucessivos (Fig. 2.26)

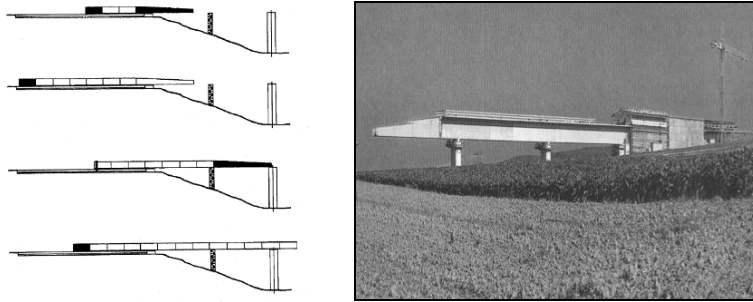


Fig. 2.26 – Construção por deslocamentos sucessivos

- Construção por avanços sucessivos (Fig. 2.27)

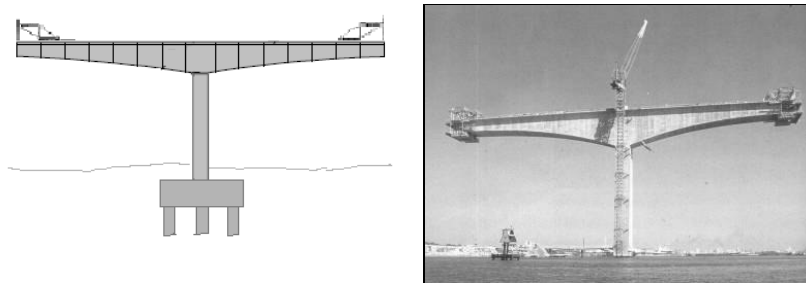


Fig. 2.27 – Construção por avanços sucessivos

A classificação apresentada não é inflexível, podendo usar-se métodos de execução mistos, em que são utilizadas diferentes tecnologias de construção na mesma obra.

2.1.5. “Ciclo de vida”: concepção, construção, exploração e demolição

As Obras de Arte bem como todas as obras de engenharia devem, durante um período de vida previamente estabelecido, garantir as condições de estabilidade e durabilidade. Para se garantir estas condições é fundamental que em todas as fases do processo, desde a concepção até à utilização da estrutura, se tenha presente a qualidade e a necessidade de se obter uma estrutura com bom desempenho.

Podem-se distinguir quatro fases fundamentais do ciclo de vida de uma estrutura: concepção, construção, exploração e demolição.

É durante a fase de concepção que se concebe a estrutura de acordo com as exigências do dono de obra e se definem os materiais a aplicar e suas características.

Os regulamentos em vigor dão especial atenção às questões relacionadas com os aspectos estruturais, abordando o conceito de durabilidade implicitamente, isto é os efeitos de degradação e deterioração das estruturas são considerados indirectamente, através da

especificação do recobrimento mínimo, da razão a/c máxima, da quantidade mínima de cimento, teor de ar e tipo de cimento, etc.

Esta forma da regulamentação abordar este tema, influência de algum modo a maneira como os engenheiros e projectistas encaram as exigências de durabilidade ao nível da concepção.

O dono de obra também assume um papel importante sobre esta matéria, pois a ele deverá ser atribuída a responsabilidade de definir a vida útil espectável da obra de arte.

No sentido de se prolongar a vida útil de uma Obra de Arte e de se prevenir o aparecimento de patologias na estrutura e nos equipamentos nela instalado, será necessário durante a fase de concepção e projecto ter em consideração diferentes factores, tais como: a natureza e qualidade dos materiais a aplicar; a definição dos mecanismos de degradação e dos modelos de simulação; as disposições construtivas; as condições ambientais; prever a realização de inspecções e acções de manutenção e conservação, apresentar especificações técnicas adequadas no sentido de se garantir qualidade na execução.

Perante o exposto poder-se-á dizer que a qualidade de um projecto é fundamental para se conseguir que a estrutura apresente um bom desempenho ao longo da sua vida útil, pois é nesta etapa que se consegue obter um incremento de durabilidade da obra a um custo bastante inferior, contudo não é suficiente, dado ainda depender da qualidade da construção.

Para se garantir a qualidade durante a fase de construção, dever-se-á respeitar todas as disposições de projecto, usar materiais de qualidade e construir segundo as boas normas de construção. Neste processo a fiscalização também assume um papel importante, no controlo de toda a execução da obra, alertando para problemas que possam surgir e no esclarecimento das dúvidas que possam ocorrer na interpretação do projecto (Costa 2003).

A necessidade de se realizarem grandes volumes de construção em prazos relativamente curtos, através do recurso a mão-de-obra não especializada, é umas das principais causas da falta de qualidade das obras.

Durante a fase de exploração deverão ser mantidas as condições de serviço da estrada, para tal é essencial recorrer à utilização de um sistema de gestão de Obras de Arte, que permita implementar a realização de inspecções periódicas e acções de manutenção e conservação da estrutura e do seu equipamento.

Pode-se então afirmar que para se garantir a durabilidade “ As estruturas de betão armado, devem ser projectadas e construídas e utilizadas, de tal maneira que, debaixo da influência do

meio previsto, mantenha as suas condições de segurança, serviço e aparência aceitáveis durante um período de tempo explícito ou implícito, sem requerer custos anormalmente altos de manutenção e reparação.” (Model Code C.E.B 90).

Quando as estruturas deixam de desempenhar as funções para as quais foram projectadas deve-se proceder ao seu desmonte ou demolição. Esta fase requer que se tenha em consideração todos os procedimentos e meios necessários à sua realização e os devidos cuidados na gestão dos resíduos de construção que daí advenham.

2.2. Sistemas de gestão de Obras de Arte

Actualmente, o uso eficaz dos fundos públicos destinados à manutenção do bom estado das pontes implica o recurso à utilização de sistemas de gestão de Obras de Arte.

É particularmente importante investir esses fundos em actividades de manutenção, conservação e reabilitação de Obras de Arte no sentido de garantir um bom comportamento da estrutura das pontes e de todos os seus componentes.

Estes sistemas (semi-) inteligentes, não são mais do que uma base de dados, composta por dados relativos ao inventário das Obras de Arte e pelos resultados das inspecções, que permitem organizar convenientemente a informação contida e fazer uma triagem das medidas a adoptar.

O sistema de gestão de obras de arte deverá identificar as principais deficiências actuais e futuras das Obras de Arte e deverá permitir estimar o custo a despender em manutenção, conservação e reabilitação no ano seguinte (ver Fig. 2.28).

Estes sistemas representam um papel importante na tomada de decisões e conseqüentemente contribuem para uma melhor gestão das Obras de Arte.

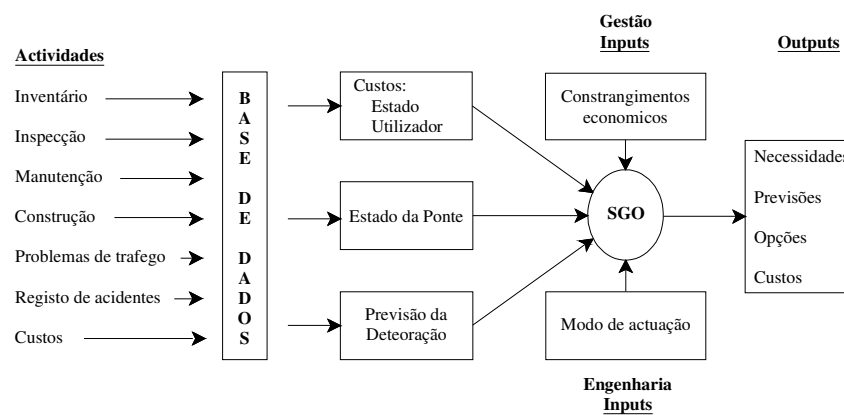


Fig. 2.28 – Esquema de um Sistema de Gestão de Obras de Arte (BMS 2002).

2.2.1. Sistemas de gestão de Obras de Arte adoptados noutros países

Os primeiros “Sistemas de Gestão de Obras de Arte” surgiram na década de 70 nos Estados Unidos e consistiam essencialmente numa base de dados nacional, designada por National Bridge Inventory (NBI). Desde então, com a evolução das tecnologias de informação, têm vindo a ser desenvolvidos e implementados em vários países do mundo diversos programas de Gestão, que apesar de apresentarem objectivos comuns, são bastante diferentes, apresentando variados formatos e graus de desenvolvimento.

O principal objectivo dos Sistemas de Gestão consiste na optimização da manutenção das pontes, no sentido de se preservar o parque de obras de Arte, minimizando os custos ao longo do tempo de vida útil das estruturas, simultaneamente assegurando a segurança dos utilizadores e garantindo níveis suficientes de qualidade e serviço.

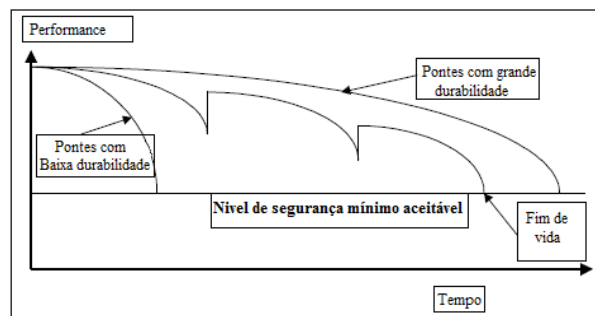


Fig. 2.29 – Desempenho de uma Ponte em função do tempo. (os aumentos de desempenho, “traços” verticais, correspondem a acções de manutenção) (Brime 2002).

A figura anterior (Fig. 2.29) permite evidenciar a importância da avaliação da segurança de uma estrutura ao longo da sua vida útil, tendo em consideração que com o tempo o seu desempenho vai diminuindo.

A forma convexa da curva deve-se ao processo de deterioração ao qual a estrutura vai estando submetida devido às acções actuantes. Realça-se a diferença entre o desempenho obtido pelas pontes projectadas e construídas tendo por base a durabilidade, que teoricamente não precisariam de ser alvo de manutenção e/ou conservação, face às estruturas que não tiveram este factor em consideração. As Obras de Arte que durante a sua vida útil são submetidas a reparações ou reforços vêm o seu tempo de vida e nível de segurança serem aumentados, até um determinado ponto, ponto este em que se atinge o fim de vida da estrutura, por não ser mais possível obter o estado inicial das tensões da estrutura (Brime 2002).

O objectivo de se utilizar um sistema de gestão de Obras de Arte consiste em implementar uma estratégia eficaz de manutenção, procurando deste modo aumentar a vida útil da estrutura e dos seus componentes, sem incorrer a grandes custos de manutenção.

Apresenta-se na Tabela 2.7 alguns dados globais de sistemas de gestão de Obras de Arte referentes a alguns países Europeus, que procuram evidenciar a relação entre o custo anual investido na manutenção de obras de arte e o valor que seria necessário investir para se proceder à sua substituição.

Tabela 2.7 – Relação entre o custo de manutenção anual das Obras de Arte o valor da sua substituição (Brime 2002) e (Póvoa 2008).

Países	Nº de Obras de Arte	Valor Manutenção Anual (M€)	Valor Substituição (M€)	Rácio VMA/VS (%)
ALEMANHA (Rede Rodoviária Nacional)	34600	318	30000	1,0
BÉLGICA (Estradas de Wallonie)	5000	10	3800	0,3
ESPAÑA (Rede Rodoviária Nacional)	13600	13	4100	0,3
FINLÂNDIA (Rede Rodoviária)	15000	30	2900	1,0
FRANÇA (Rede Rodoviária Nacional)	22000	50	10800	0,5
FRANÇA (Auto-estradas Nacionais)	6000	23	4100	0,6
GRÃ-BRETANHA (Rede Rodoviária Nacional)	9500	225	22500	1,0
IRLANDA (Rede Rodoviária Nacional)	>1800	2.5	450	0,6
NORUEGA (Rede Rodoviária)	17000	37	6000	0,6
SUÉCIA (Rede Rodoviária Nacional)	15000	92	5300	1,7
PORTUGAL (Rede Rodoviária Nacional - EP)	5500	6<M<34	2000	0,3<R<1,7

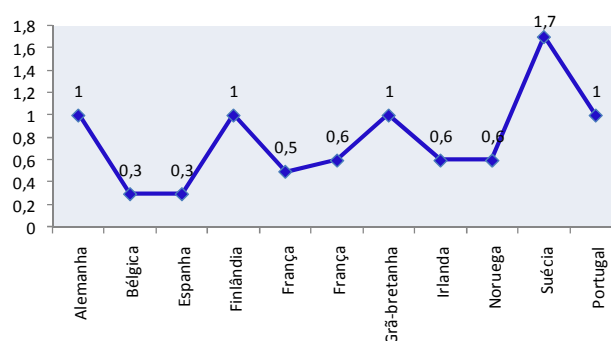


Fig. 2.30 – Rácio entre o valor de manutenção anual de Obras de Arte e o valor da sua substituição (%)

A Fig. 2.30 permite constatar que o país com o maior número de Obras de Arte é a Alemanha e o que investe mais na manutenção é a Suécia. Relativamente a Portugal considerou-se o montante total previsto para 2008 de 20 M€.

Apresenta-se na Tabela 2.8 um resumo das principais potencialidades de alguns sistemas de gestão existentes, de acordo com a bibliografia disponível, salientando-se no entanto que

poderão ser submetidos a melhoramentos. Será de realçar que tendo em consideração que já foram realizados alguns estudos sobre este tema, não se pretende nesta dissertação apresentar em detalhe as características de cada sistema de gestão, a este respeito podem, por exemplo, ser consultadas as referências Brito (1992) e Almeida (2003).

Tabela 2.8 – Principais características dos Sistemas de Gestão de Obras de Arte (Almeida 2003).

	PONTIS (EUA)	BRIDGIT (EUA)	Visual BMS (EUA)	Bridge Views (EUA)	Bridge 1 e 2 (Europa)	GOA (Portugal)	DANBRO (Dinamarca)	J-BMS (Japão)	MOST (Rússia)	KUBA-MS (Suíça)	OBMS (Canadá)	SIHA (Finlândia)	Sistema Alemão	IBMS (Índia)	Sistema Polaco	Sistema Holandês	SIGE (Espanha)	SMIS (Inglaterra)	LAGORA (Frâncês)	SAFEPRO (Suécia)
Inventário																				
Itens segundo NBI	√	√			-	-														
Classificação dano (escala)																				
Aparência dos danos	0 9	0 9				0 5	0 5				1 9									
Vulnerabilidade/urgência correção /estado de afectação	1 5	1 5				0 5			1 5	1 5					0 5					
Menor elemento classificado																				
Obra	-	-			-	-	-	-	-	-	-									
Principais partes da estrutura	√	√			-	-	-	-	-	-	-									
Elementos	√	√			√	√	-		√	-	-					√	√			
Componentes de elementos	-	√				-	√			√	√									
Outras Classificações																				
Importância histórico - cultural	√	√		√	√						√									
Importância de utilização	√	√		√	√	√		√		√	√	√		√			√	√		
Parâmetros calculados																				
REG – Rácio de Eficiência Global	√	√		√		-					√									
IS – Índice de sanidade	√					-			√											
Tipo de Actuação planeada																				
Manutenção	√	√			√	√	√	√	√	√	√	√			√	√	√	√	√	√
Reparação/Reforço/Reabilitação	√	√			√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√	√
Custos/Benefícios																				
Directos	√	√	√		√	√	√		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Indirectos	√	√								√	-		√	√	√				√	
Previsão da deterioração																				
Modelo determinístico										-	√	√	√							
Modelo probabilístico	√		√		√					√		√		√						
Metodologias de gestão																				
Do topo para a base	√	-																		
Da base para o topo	-	√									√	√	√							
Optimização																				
Custos									√		√									
Rácio/custo benefício	√	√			√			√					√	√	√					
Índice de fiabilidade					√					√										
Restante tempo de vida útil								√												
Ajuste orçamental	√	√	√			√	√						√	√	√	√				

2.2.2. Gestão de Obras de Arte – Realidade Portuguesa

Em Portugal, o Sistema de Gestão de Obras de Arte mais utilizado pelas principais entidades responsáveis pela gestão das Obras de Arte (EP - Estradas de Portugal, S.A.; BRISA; REFER, E.P.E.; Câmara Municipal de Lisboa e Viseu; Auto-Estradas do Atlântico; Vialitoral; Viaexpresso; Aenor; LusoScut – Costa de Prata; LusoScut – Beiras Litoral e Alta; Scutvias) é o GOA.

A entidade com mais pontes sob a sua jurisdição é a empresa Estradas de Portugal com cerca de 5400 pontes de diferentes tipologias, materiais e “épocas” diferentes. A empresa BRISA consta com cerca de 1400 Obras de Arte (Santiago 2000) a REFER tem sob a sua administração cerca de 2200 pontes ferroviárias, quase 50% com estrutura metálica (Almeida 2003).

Este sistema tem vindo a ser desenvolvido pela Betar Consultores, desde 1998 e constitui uma ferramenta importante de apoio à gestão do património, permitindo aos Donos de Obra conhecer o estado de conservação e manutenção das obras e tomar decisões relativamente à definição dos investimentos a realizar, priorizando-os de forma criteriosa (Mendonça e Brito 2008).

O modelo de funcionamento da aplicação SGOA contém as seguintes módulos que interagem entre si: Inventário; Inspeção de Rotina; Inspeção Principal; Inspeção Subaquática; Transportes Especiais; Estimativas de Custos; Ajuste Orçamental; Histórico; Consultas, trabalhos de reparação e manutenção, relatórios de inventário e inspeção.

2.2.2.1. Inventário

O Inventário de uma Obra de Arte é o registo, de uma forma sistemática e organizada, das características dessa obra que possam servir de base ou interessar à sua manutenção e conservação (EP 2007). Consiste, essencialmente, na localização, identificação e descrição da Obra de Arte, de acordo com critérios preestabelecidos, de forma a obter uma base documentada que permita, com eficácia, efectuar todos os procedimentos posteriores de Gestão de Obras de Arte.

O Inventário é organizado em três partes - Dados Administrativos, Dados Técnicos e Dados de Constituição. Nos Dados Administrativos regista-se toda a informação disponível que permita localizar e identificar inequivocamente a Obra de Arte. Nos Dados Técnicos são registados os dados relativos à geometria da obra e sua inserção no meio envolvente. Em relação aos Dados de Constituição é feita a divisão da obra em partes elementares (componentes) que se distinguem pela função.

▪ *Tipos de obra de arte*

A Obra de Arte é definida como toda a estrutura com vão superior ou igual a 2,00 m ou com desenvolvimento total superior a 5,00 m e que permite o estabelecimento de uma via de comunicação. A definição do tipo de obra deve ter em conta, não apenas critérios estruturais, mas também a hierarquização das vias intersectadas. Assim, os diversos tipos de obras definem-se do seguinte modo:

Obras de Arte do tipo I



Fig. 2.31 – Passagem Agrícola

A via principal passa sobre a obra de arte e a via intersectada é um caminho rural.



Fig. 2.32 – Passagem Hidráulica

A via principal passa sobre a obra de arte e a via intersectada é um curso de água. Geralmente de um único vão de pequena dimensão (≤ 10 m),

Obras de Arte do tipo II



Fig. 2.33 – Passagem Superior

A via principal (via de maior classe) passa sobre a Obra de Arte.



Fig. 2.34 – Passagem Inferior

A via principal (via de maior classe) passa sobre a Obra de Arte.



Fig. 2.35 – Passagem de Peões

Independente da posição da via principal relativamente à obra, a via intersectada é usada apenas por tráfego pedonal.

Obras de Arte do tipo III

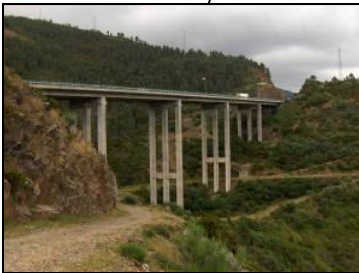


Fig. 2.36 – Viaduto

A via principal passa sobre a obra de arte, podendo existir mais do que uma via intersectada ou apenas um vale.

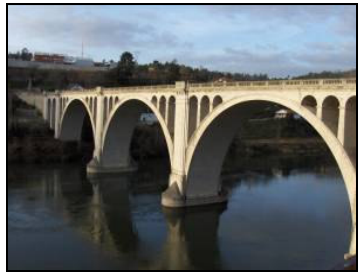


Fig. 2.37 – Ponte

A via principal passa sobre a obra de arte, não existindo via intersectada mas sim um curso de água. Distingue-se da passagem hidráulica, por apresentar um vão total superior a 10 m ou vencer um curso de água de dada importância.



Fig. 2.38 – Túnel













A via principal passa sob a obra de arte, não existindo nenhuma via sobre a Obra de Arte.

▪ Tipos de estrutura

Com o objectivo de melhor caracterizar o funcionamento estrutural da obra a inventariar estas foram classificadas de acordo com um conjunto de esquemas estruturais tipo. Os diferentes tipos de estrutura considerados, representados abaixo, pretendem cobrir a grande maioria das situações encontradas no terreno. Contudo, foram também consideradas as classificações de Solução Mista ou Outra, para as situações mais complexas em termos estruturais, no primeiro caso, ou para a possibilidade da existência de situações imprevistas.

Representam-se, na tabela seguinte, os esquemas estruturais considerados como mais correntes e de definição mais unívoca.

Tabela 2.9 – Tipos de estrutura considerados na classificação das obras de arte

<p>▼ Quadro ▼</p> 	<p>▼ Pórtico ▼</p> 	<p>▼ Tabuleiro Simplesmente Apoiado ▼</p> 
<p>▼ Quadro Prefabricado ▼</p> 	<p>▼ Estrutura Tubular ▼</p> 	<p>▼ Vãos Múltiplos ▼</p> 
<p>▼ Arco Prefabricado ▼</p> 	<p>▼ Arcos Simples ou Múltiplos ▼</p> 	<p>▼ Vigas Gerber</p> 
<p>▼ Alvenaria Alargada ▼</p> 	<p>▼ Suspensa</p> 	<p>▼ Tirantes</p> 

▪ Constituição das Obras de Arte

Os dados de constituição de cada Obra de arte, parte fundamental do Inventário, são constituídos por um máximo de 15 componentes que pretendem descrever e quantificar os materiais/equipamentos utilizados nas diversas partes da Obra de Arte.

Os elementos considerados para cada um dos 15 componentes são referenciados na tabela que se segue.

Tabela 2.10 – Listagem de Componentes das Obras de Arte e respectivos elementos

Muros	Muros Fundação de Muros	Guarda Corpos	Guarda Corpos Acrotério
Taludes	Revestimento de Superfície do Talude Talude	Revestimento de Via	Revestimento de Via
Encontros	Encontro E1 / Encontro E2 Fundação dos Encontros Protecção à fundação dos Encontros	Drenagem	Drenagem
Aparelhos de Apoio	Aparelhos de Apoio nos encontros E1 e E2 e nos apoios intermédios	Juntas de Dilatação	Juntas de Dilatação nos Encontros Juntas de Dilatação na Obra
Apoios Intermédios	Apoios Intermédios Fundação dos Apoios Intermédios Protecção à fundação face à acção hidrodinâmica	Outros Componentes	Concessionários Laje de Transição Iluminação sobre a Obra Iluminação sob a Obra Impermeabilização de Muros Barreiras Acústicas
Tabuleiro	Estruturas de Suporte do Tabuleiro		Escadas Impermeabilização do encontro Pórticos de Sinalização Impermeabilização do Tabuleiro Passadiços Postos de Transformação Elementos Ornamentais
Guarda de Segurança	Guarda de Segurança Lateral e Central Guarda Rodas Lateral e Central		
Passeios	Revestimento de Passeio Enchimento de passeio		
Cornijas	Cornijas		

2.2.2.2. Tipos de inspecção e periodicidade

Quando se realizam inspecções e se analisam as patologias presentes numa determinada Obra de Arte, deve-se ter em mente algumas definições básicas para o seu perfeito entendimento:

- durabilidade - aptidão de uma estrutura para desempenhar as funções para que havia sido concebida durante o período de vida previsto, sem que para tal seja necessário depender custos de manutenção e reparação imprevistos;
- vida útil - período de tempo em que as propriedades de um material permanecem acima das condições mínimas de segurança e utilização (desempenho);
- manutenção - acções destinadas a manter o material em condições de uso.
- Desempenho - comportamento em serviço de cada produto, ao longo da vida útil, e a sua medida relativa espelhará, sempre, o resultado do trabalho desenvolvido nas etapas de projecto, construção e manutenção.

Ao longo da vida útil de uma Obra de Arte devem ser realizados diferentes tipos de inspecções que podem ser divididas em quatro tipos: Inspeção de Rotina, Inspeção Principal, Inspeção Especial e Inspeção Subaquática.

As inspecções devem ser realizadas periodicamente por técnicos competentes e experientes de forma a garantir uma elevada qualidade das avaliações realizadas. Esses profissionais devem visitar o local e observar meticulosamente a obra, primeiro visualmente e depois, caso se verifique necessário, com recurso a outros meios de apoio que permitam fazer um correcto diagnóstico do estado da estrutura.

As inspecções devem ser convenientemente preparadas antes da ida para o campo, tendo por base os elementos do projecto, o historial da obra e os dados das inspecções anteriores. É nesta fase (pré-inspecção) que se planeia e se definem as estratégias de inspecção, tendo em consideração a sua localização e condicionalismos envolventes à Obra de Arte que possam impedir a acessibilidade a todos os componentes. A inspecção, in loco, deve processar-se de uma forma sistematizada, contemplando toda a estrutura e dando particular enfoque aos elementos críticos e às zonas já anteriormente danificadas.

▪ *Inspecções de Rotina*

As Inspecções de Rotina têm uma periodicidade anual e tem como finalidade avaliar o Estado de Manutenção das obras de arte, o qual se traduz num bom (B) ou mau (M) desempenho. Esta inspecção permite a detecção de patologias, a especificação de trabalhos de manutenção, a definição de custos de manutenção para o ano seguinte em função dos trabalhos propostos, a obtenção de mapas de quantidade correspondentes aos trabalhos propostos, para lançamento de empreitadas de manutenção.

As Inspecções de Rotina distinguem-se das Inspecções Principais por não ser feita a avaliação das anomalias mais graves cuja rectificação terá de passar pela execução de trabalhos de reparação ou pela elaboração de projectos de reabilitação. Assim, o inspector indicará a necessidade de realizar uma inspecção principal complementar nos casos em que tenham sido detectadas anomalias que, pela sua complexidade e natureza, necessitem de uma avaliação mais aprofundada. (ex. Fissuras em elementos estruturais, rotação de pilares, assentamentos de fundações, etc) (EP 2006).

▪ *Inspecções Principais*

As Inspecções Principais são realizadas em ciclos de 5 anos, tendo em vista a verificação do estado de conservação estrutural e a necessidades de eventuais intervenções.

Uma inspecção principal consiste na observação e registo das condições de funcionamento de uma Obra de Arte. Neste registo ficam identificadas as anomalias mais graves que

comprometem o bom desempenho dos diversos componentes, quer a nível de durabilidade quer ao nível da segurança (EP 2006).

Esta inspecção visa avaliar o estado de manutenção/conservação da obra de arte no geral e de cada um dos seus componentes em particular, assim será necessário atribuir uma classificação por componente, do Estado de Manutenção (Bom (B) ou Mau (M)) e do Estado de Conservação (0 a 5). Considerando que a escala varia entre 0 (melhor pontuação) e 5 (pior pontuação) (ver Tabela 2.11). A avaliação do estado de conservação pretende traduzir o estado de deterioração, desgaste, má execução, má concepção, danificação, dos componentes da Obra de Arte.

Tabela 2.11 – Classificação do estado de degradação da estrutura (EP 2006)

EC 0	Estado de Conservação muito bom. Não é necessário efectuar qualquer reparação.
EC 1	Estado de Conservação bom. Não é necessário efectuar qualquer reparação.
EC 2	Estado de Conservação razoável. Podem ser especificadas reparações não prioritárias.
EC 3	Estado de Conservação deficiente. São especificadas reparações a médio prazo (3-5 anos).
EC 4	Estado de Conservação muito deficiente. São especificadas reparações a curto prazo (1-2 anos). (Poderão ser implementados condicionamentos à circulação rodoviária, através de restrições de carga, de velocidade ou do modo de circulação.)
EC 5	Estado de Conservação mau, podendo estar em causa a sua segurança estrutural. (Deverá de imediato ser promovida intervenção de reparação, complementada com medidas restritivas da circulação rodoviária, em termos de carga, velocidade ou modo de circulação. Em caso limite, a circulação rodoviária pode ser interdita.)

As inspecções principais consistem na definição de todos os trabalhos de reabilitação/reforço necessários realizar de forma a suprimir todas as anomalias graves detectadas que poderão comprometer o bom desempenho dos diversos componentes da obra de arte quer a nível de durabilidade quer a nível de segurança. Destas inspecções pode resultar a necessidade de se elaborar um projecto de reabilitação da Obra de Arte.

A qualificação de um dano ou anomalia é feita pelo inspector tendo em conta a sua localização, a importância do componente na estrutura, a importância da obra, a evolução prevista da anomalia e a possibilidade ou não de esta introduzir perturbações no tráfego, etc. Caso exista alguma incerteza em relação à causa, extensão ou gravidade da anomalia deve-se solicitar a realização de uma inspecção especial, por forma a efectuar análises técnicas específicas que permitam avaliar com segurança o real estado do componente e propor o trabalho mais aconselhável para a sua correcção.



Fig. 2.39 – Inspeções principais realizadas com recurso a plataforma

▪ *Inspeções Especiais*

Estas inspeções surgem geralmente após a realização de uma inspeção principal e não têm uma periodicidade definida, realizando-se sempre se considere necessário identificar e analisar com algum detalhe alguma deficiência encontrada, de forma a garantir a segurança e/ou durabilidade da estrutura.

Esta inspeção recorre normalmente à realização de ensaios que permitam identificar o grau de deterioração dos materiais, identificar a sua causa, avaliar o impacto que a anomalia tem, em termos de resistência e de desempenho de determinados componentes, prever a sua evolução, etc.

No âmbito duma inspeção especial poderão ser realizados, entre outros, os seguintes trabalhos: ensaios de carga; recolha de amostras para realização de ensaios químicos e físicos sobre os materiais; medição geométrica de deformações e oscilações; avaliação da camada de recobrimento e do grau de corrosão das armaduras; trabalhos de monitorização (nivelamento, medição de tensões em tirantes e cabos).

▪ *Inspeções Subaquáticas*

Nas Obras de Arte em que existam elementos submersos deverão ser realizadas periodicamente inspeções subaquáticas, com o objectivo de verificar se há alguma zona crítica na estrutura ou na zona envolvente, cuja rotura possa implicar o colapso parcial ou total da Obra de Arte.

Estas inspeções implicam o recurso a técnicas de sondagem subaquática ou a pessoal especializado em mergulho. Devido às características de natureza pluridisciplinar, envolvendo a análise estrutural, hidráulica, geotécnica e geológica, devem ser planeadas, programadas, supervisionadas e interpretadas por Engenheiros com experiência e competência comprovadas

no domínio das obras de arte e estruturas especiais. Recomenda-se não dissociar a inspecção das fundações submersas do resto da ponte, já que os danos na estrutura são por vezes imputáveis a anomalias na sua fundação.

2.3. Técnicas de inspecção e diagnóstico

A realização do diagnóstico de uma obra de arte pretende avaliar o estado de conservação em que se encontra a estrutura e os seus componentes. Para tal, recorre-se à realização de inspecções visuais e à realização de ensaios, que permitem identificar a natureza e extensão de cada uma das anomalias detectadas e o cenário de evolução previsto para cada anomalia.

2.3.1. Análise visual

A observação directa da Obra de Arte corresponde à primeira etapa necessária para o diagnóstico do estado de uma estrutura, permitindo identificar as degradações e danos na estrutura e determinar se os fenómenos estão ou não estabilizados. Esta é uma fase essencial, que tem como finalidade fornecer um entendimento inicial da estrutura e indicar uma metodologia apropriada às investigações subsequentes.

Antes de se iniciar a inspecção deve ser verificada a acessibilidade a todos os componentes, no sentido de se assegurar que a obra será inspeccionada na sua totalidade. Durante a sua deslocação ao local, o inspector deve munir-se de alguns equipamentos:

- equipamentos ligeiros de limpeza e remoção de material, tais como escova, ponteiro e martelo;
- equipamentos auxiliares de visão tais como binóculos, lente e lanterna;
- equipamentos de medição simples, tais como termómetro, fita métrica e distanciómetro laser;
- equipamentos de registo, tais como fichas de avaliação e máquinas fotográficas;
- equipamentos de segurança, tais como caixa de primeiros socorros, arnês, capacete e escada;
- equipamento auxiliar, tais como comparadores de fendas, marcadores e réguas para escala.

Para além desses pequenos equipamentos, na inspecção de obras de arte como as pontes, projectadas para vencer barreiras naturais ou construídas, é também muitas vezes necessária a utilização de dispositivos de especiais de acesso a determinadas zonas da obra como barcos e plataformas elevatórias (Fig. 2.40).



Fig. 2.40 – Equipamento de inspeção de pontes (EP 2006)

A inspeção visual, apesar de enorme importância, é insuficiente para obter informação sobre o estado dos materiais e sobre aspectos invisíveis das estruturas. O controlo visual não permite avaliar a evolução das patologias em profundidade, correspondendo sempre a uma análise qualitativa, em que o julgamento da gravidade das anomalias é empírico e os critérios de análise variam de acordo com o inspector.

Desta forma, é essencial recorrer a meios complementares de diagnóstico, baseados na realização de ensaios, que permitem obter uma ampla informação adicional para caracterização dos materiais e do comportamento das estruturas e equipamentos.

2.3.2. Realização de ensaios

A realização de ensaios permite avaliar, com menor subjectividade e maior precisão, o estado de deterioração da Obra de Arte e de cada um dos seus componentes, possibilitando deste modo a avaliação da segurança estrutural da mesma.

Os ensaios tentam normalmente identificar as características mecânicas (resistência, deformabilidade, etc.), físicas (porosidade, etc.) e químicas (composição, etc.) dos materiais, as tensões e deformações da estrutura, a presença de descontinuidades na estrutura, etc.

Não se pretendendo descrever exaustivamente os ensaios existentes, apenas serão apresentados quadros resumo com alguns métodos de ensaio e a sua aplicabilidade, tendo em consideração as suas condições de utilização segundo as suas características técnicas.

As tabelas que se seguem constam da tese de Doutoramento de D. Andrey efectuada em 1987 e são aplicadas especialmente a estruturas de betão armado. Este autor, divide os métodos de ensaio em 6 grupos principais: métodos visuais, métodos físico-químicos, métodos electrofísicos, métodos dinâmicos e métodos geométricos.

Tabela 2.12 – Métodos de Controlo do Estado de Conservação de uma Obra de Arte (Andrey 1987)

		Métodos Mecânicos										Métodos Físico-químicos			Métodos Electro-físicos				Métodos Dinâmicos			Métodos Geométricos						
		Análise visual	Impulsos mecânicos	Esclerómetro	Penetração	Arrancamento	Carotagem	Decapagem	Absorção	Indicador	Análise Química	Análise microscópica	Potencial de sonda	Termografia	Indução magnética	Ultra-sónicos	Radar	Radiografia	Extensómetro mecânico	Extensómetro eléctrico	Dinamómetro	Deslocamento forçado	Medidas geométricas	Nivelamento	Medidas Vibratórias			
ESTADO DOS MATERIAIS	ESTADO DO BETÃO	Resistência		•	•	•	•																					
		Homogeneidade		•	•																							
		Carbonatação									•	•	•															
		Cloretos									•	•																
		Permeabilidade																										
		Composição										•	•															
		Fissuração	•	•																								
	ESTADO DO AÇO	Pintura	•				•																					
		Corrosão	•																									
		Fissuração	•																									
	ESTADO DAS ARMADURAS	Espessura de recobrimento																										
		Afastamento das armaduras																										
		Corrosão																										
		Injecção das bainhas pré-esforço	•																									
		Rotura																										
	ESTADO DA OBRA	ASPECTO GERAL	Presença de zonas desagregadas	•	•																							
			Qualidade da superfície	•	•	•																						
			Humidade	•																								
		DEFORMAÇÕES/ DESLOCAMENTOS	Flecha	•																								
			Deformações locais	•																								
Deslocamentos relativos																												
ESTADO DA FISSURAÇÃO		Localização das fissuras	•																									
		Abertura das fissuras																										
ESTADO DA CORROSÃO		Detecção da corrosão	•																									
		Amplitude da corrosão																										
ESTADO DE TENSÃO		Tensão do betão																										
		Tensão do aço																										
		Tensão do pré-esforço																										

COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA		Métodos																								
		Métodos Mecânicos					Métodos Físico-químicos				Métodos Electro-físicos				Métodos Dinâmicos		Métodos Geométricos									
		Análise visual	Impulsos mecânicos	Esclerómetro	Penetração	Arrancamento	Carotagem	Decapagem	Absorção	Indicador	Análise Química	Análise microscópica	Potencial de sonda	Termografia	Indução magnética	Ultra-sónicos	Radar	Radiografia	Extensómetro mecânico	Extensómetro eléctrico	Dinamómetro	Deslocamento forçado	Medidas geométricas	Nivelamento	Medidas Vibratórias	
ESTADO DOS EQUIPAMENTOS	Aparelhos de apoio	•																		•	•					
	Juntas do pavimento	•																								
	Evacuação das águas	•											•													
	Impermeabilização da superfície da estrada	•									•	•			•	•										
	ESTADO DAS INFRAESTRUTURAS	Estado dos materiais	•	•	•					•	•		•		•											
		Movimento das fundações																						•	•	
		Sistemas de drenagem	•								•															
	EVOLUÇÃO DAS DEFORMAÇÕES	Flecha do tabuleiro	•																•	•					•	
		Deslocamentos sobre o apoio	•																						•	
		Inclinação transversal e longitudinal do tabuleiro																							•	•
		Alongamentos relativos																	•	•						
	EVOLUÇÃO DOS ESFORÇOS	Força do pré-esforço																		•	•	•				•
Reacções nos apoios																				•	•					
Esforços interiores																		•	•							
RESPOSTA ESTÁTICA	Solicitações																				•					
	Medida das deformações																						•	•		
	Medidas operacionais																									
RESPOSTA DINÂMICA	Geração das vibrações																								•	
	Medida das vibrações																							•	•	
	Medidas operacionais																									

Os ensaios devem ser sempre realizados por pessoal qualificado, capaz de avaliar correctamente a fiabilidade dos ensaios, e as implicações dos resultados devem ser cuidadosamente analisadas.

Apresenta-se no quadro que se segue os domínios de aplicação de cada um dos métodos de ensaio, segundo os seguintes critérios:

1. Número de domínios de investigação que se podem aplicar;
2. Impacto sobre os materiais, isto é, se o método é ou não destrutivo;
3. Condições de realização, isto é, se o controlo poderá ser realizado in situ, ou terá que ser realizado em laboratório;
4. Interpretação dos resultados, com julgamentos rápidos, ou se será necessário recorrer a interpretações complementares complexas;
5. Quantidade de material necessária;
6. Tipo de material, no sentido de se identificar se é um material corrente ou se é necessário recorrer a tecnologias sofisticadas;
7. Necessidade de uma fonte de energia (electricidade, água, etc.);
8. Tipo de formação do técnico que irá realizar os ensaios, formação genérica ou específica
9. Rapidez de execução dos ensaios
10. Custo de utilização

Salienta-se que tendo em consideração a data de publicação da dissertação, poderão existir ensaios que actualmente são pouco utilizados e a análise de custos poderá não corresponder à realidade actual.

Tabela 2.13 – Domínios de aplicação dos diferentes métodos de ensaio (Andrey 1987)

	Análise Visual	Métodos Mecânicos					Métodos Físico-químicos				Métodos Electro-físicos				Métodos Dinâmicos		Métodos Geométricos							
		Impulsos mecânicos	Esclerómetro	Penetração	Arrancamento	Carotagem	Decapagem	Absorção	Indicador	Análise Química	Análise microscópica	Potencial de sonda	Termografia	Indução magnética	Ultra-sónicos	Radar	Radiografia	Extensómetro mecânico	Extensómetro eléctrico	Dinamómetro	Deslocamento forçado	Medidas geométricas	Nivelamento	Medidas Vibratórias
1 Número de domínios observados																								
	Mais de 10	•																						
	6 a 10					•				•		•	•			•	•					•		
	3 a 5		•	•			•	•			•				•			•	•	•			•	•
	1 a 2			•	•				•			•												
2 Ensaio destrutivo																								
	Não	•	•	•				•				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	Ligeiramente			•	•				•	•	•	•												
	Fortemente					•	•																	
3 Realização das medições																								
	In situ	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	No laboratório					•			•	•														
4 Interpretação dos resultados																								
	Imediata	•	•	•			•	•																
	Exige estudo detalhado			•	•	•		•			•	•	•	•		•	•	•	•			•		
	Complexa								•	•					•					•		•	•	•
5 Quantidade de material a ensaiar																								
	Nenhuma	•																						
	Reduzida		•	•	•	•		•	•		•		•	•		•	•	•			•	•		
	Significativa					•	•		•	•		•	•		•				•					•
6 Tipo de Material a ensaiar																								
	Corrente	•	•	•	•	•	•	•	•								•			•	•	•		
	Especial								•	•	•	•	•	•	•	•		•	•					•
7 Necessidade de fonte de energia "in situ"																								
	Sem	•	•	•	•	•		•	•	•		•	•			•		•	•	•	•	•		
	Com					•	•			•		•			•	•		•						•
8 Formação do pessoal que realizará o ensaio																								
	Genérica	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•				•		•			•	•		
	Especializada								•	•		•		•	•	•		•		•				•
9 Rapidez de execução do ensaio																								
	Rápida	•	•																					•
	Média		•	•	•			•		•		•		•		•	•	•			•	•		•
	Lenta					•	•	•		•		•		•		•				•				
10 Custo de realização																								
	Baixo	•	•	•	•			•	•							•								
	Médio				•	•	•		•		•		•	•			•	•	•	•	•	•	•	•
	Elevado								•		•				•	•								

A identificação dos danos que afectam especificamente as estruturas em alvenaria de pedra, também podem ser identificados através da realização de ensaios não destrutivos ou destrutivos ou pouco intrusivos.

Na tabela que se segue pretende-se apresentar algumas técnicas de ensaios aplicáveis a este tipo de estruturas.

Tabela 2.14 – Campos de aplicação dos principais métodos actualmente disponíveis para a avaliação e inspecção de pontes de alvenaria em arco (Rodrigues 2008)

Ensaio	Aplicabilidade
Ensaio não destrutivo	
Impacto-Eco	Determinação da espessura das paredes Localização de vazios Localização das áreas deterioradas Quantificação de fissuras e fendas
Termografia	Localização de vazios e outras irregularidades na região superficial Localização de argamassa deteriorada Investigação da estrutura de alvenaria Detecção de humidade na região superficial
Ultra-sónicos	Determinação da espessura das paredes Localização de vazios Caracterização de fendas e fissuras Correlação entre a velocidade de propagação e a força de compressão
Impulsos mecânicos	Avaliação da morfologia das alvenarias Detecção de defeitos e/ou vazios na estrutura e de padrões de fissuras e anomalias
Radar	Detecção de defeitos e heterogeneidades na estrutura Determinação da espessura das paredes apenas acessíveis de um dos lados Determinação da estrutura interna de elementos complexos Determinação de padrões de distribuição de humidade
Ensaio de karsten	Avaliação da porosidade superficial de alvenarias
Perfis micro-sísmicos	Avaliação da velocidade de propagação ao longo de perfis na superfície de estruturas de alvenaria
Ensaio destrutivo ou pouco intrusivo	
Macacos planos	Avaliação do estado de tensão de estruturas de alvenaria Avaliação das características mecânicas de estruturas de alvenaria
Arrancamento com hélice	Determinação da resistência de argamassas de assentamento ou de refechamento de juntas
Extracção de carotes	Execução de ensaios laboratoriais de caracterização mecânica das alvenarias (rotura à compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, etc)

Salienta-se que devem ser preferidos ensaios não-destrutivos àqueles que envolvem quaisquer alterações na estrutura. Se os ensaios não-destrutivos forem insuficientes, é necessário avaliar o benefício a obter com a realização de aberturas de sondagem e com pequenas intervenções na estrutura, tomando em consideração a perda de material com valor cultural (análise custo-benefício) (ICOMUS 2004).

2.4. Monitorização

A monitorização permite avaliar a durabilidade e integridade estrutural das Obras de Arte, com a finalidade de conhecer o estado da obra e detectar as eventuais anomalias em tempo útil, por forma a intervir atempadamente, evitando situações que possam comprometer a sua segurança.

A monitorização consiste essencialmente na obtenção de um registo contínuo de um conjunto de grandezas que permita estudar e analisar o comportamento da estrutura durante as fases de construção e de exploração. Estes sistemas incluem frequentemente sistemas de alerta de detecção e prevenção de eventuais situações de acidente.

A monitorização do comportamento estrutural concretiza-se em obra com a instalação dos sensores e do sistema de aquisição processamento e transmissão de informação (Fig. 2.41).

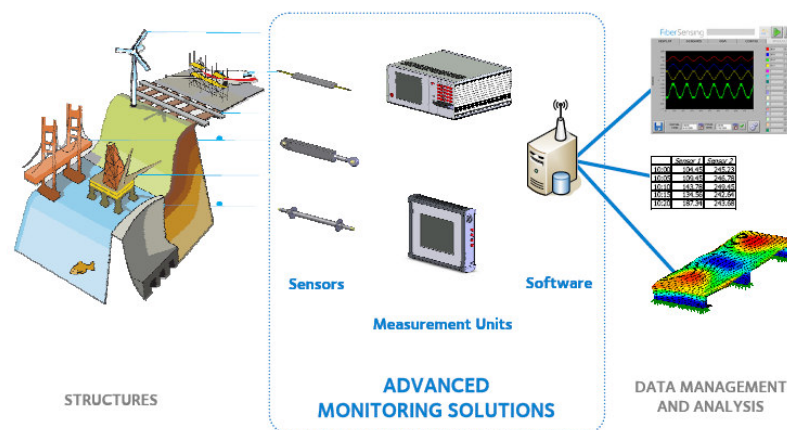


Fig. 2.41 – Processo de Monitorização (FiberSensing)

A avaliação do comportamento de uma estrutura, recorrendo à técnica da monitorização, deverá ser feita ao longo de toda a sua vida útil, desde a fase de concepção, ou de projecto, até à fase final de exploração, passando pela sua construção (Tabela 2.15).

Tabela 2.15 – Fases de intervenção da avaliação do estado de uma estrutura (Oliveira e Lourenço 2003)

Tempo	Âmbito
1. Antes da Intervenção	Investigação preliminar e levantamento
a) Antes da Modelação	Avaliação da geometria da estrutura e fundações Estimativa das propriedades mecânicas dos materiais constituintes
b) Durante a modelação	Validação do modelo numérico
2. Durante a intervenção	Garantia de qualidade
3. Após a intervenção	Avaliação dos defeitos de intervenção Monitorização da estrutura

A observação de uma estrutura engloba, na fase de concepção da obra, a caracterização das acções, das propriedades físicas dos materiais e dos métodos de colocação em obra; na fase de construção, o controlo dos materiais e a medição de deformações, tensões, etc.; no final da construção e antes da sua entrada em serviço, os ensaios de carga.

A fase de exploração corresponde à vida útil da estrutura após a execução, em que se procede à sua utilização de acordo com o previsto no projecto. Esta fase deve ter como finalidade não só a observação do comportamento da superestrutura mas também de todos os dispositivos e órgãos secundários que esta contém e que asseguram o funcionamento da estrutura em serviço.

Um sistema de monitorização deverá incluir a instrumentação das secções e elementos mais significativos da estrutura, englobando o controlo efectivo da obra ao longo do tempo.

A incorporação de sensores nas estruturas permite detectar, instantaneamente qualquer problema de mau funcionamento e acompanhar a evolução de: deslocamentos no betão e armaduras; temperatura e humidade em vários pontos da estrutura; profundidade de carbonatação; potencial eléctrico das armaduras, resistividade e grau de humidade do betão; difusividade do cloro; absorção capilar; porosidade e permeabilidade.

O recurso à monitorização permite evitar ter que despender recursos na detecção dos motivos que originaram um determinado problema, quando o mesmo já se manifestou através de uma patologia que terá de ser reparada. Convém ter presente que em geral, a manifestação de um mau funcionamento torna-se visível vários anos após se terem desencadeado os mecanismos que o produziram.

A escolha dos instrumentos de medida, do equipamento de aquisição, das secções da estrutura a instrumentar e a localização dos sensores em cada secção são opções de grande importância e que têm de ser estabelecidas numa primeira fase dos trabalhos, aquando da definição do sistema de monitorização.

Estes sistemas de medição assentam frequentemente na utilização de sensores eléctricos (extensómetros de resistência, LVDT, corda vibrante, piezoeléctricos, termopares, etc.) correntemente utilizados na medição de grandezas como deformação, deslocamento, inclinação, temperatura e outros parâmetros considerados relevantes para a estrutura em análise.

▪ *Monitorização de Deformação*

Todas as estruturas sofrem deformações quando submetidas a uma determinada acção, estes valores podem ser estimados, como o recuso a métodos de cálculo, todavia, podem ser

monitorizados de modo determinar a deformação real da estrutura ao longo do seu tempo de vida, para tal recorre-se ao uso de extensómetros.

Excessivas deformações, ou deformações inesperadas em determinados locais, podem ser um sinal de deterioração ou mudanças estruturais, que podem originar a sua reabilitação.

Na figura que se segue estão apresentadas duas possibilidades de fixação dos sensores de deformação do betão: fixados com arames ou varetas às armaduras longitudinais e fixado às armaduras transversais.



Fig. 2.42 – Extensómetros para medir deformações em armaduras (Carvalho e Gonçalves 2001)



Fig. 2.43 – Extensómetros para medir deformações no betão (Carvalho e Gonçalves 2001)



Fig. 2.44 – Exemplo da aplicação de sensores de deformação embebidos em betão (FiberSensing)

▪ Monitorização de Deslocamento

A medição dos deslocamentos de pontos seleccionados da estrutura constitui uma informação elementar para a observação do seu comportamento e constitui um processo corrente de controlar a execução da obra. A execução de grandes obras é feita com frequência com recurso a técnicas topográficas, embora outras técnicas, com base em raios laser, estejam também desenvolvidas (Félix 2002).

A medição de deslocamentos é realizada por uma variedade de aparelhos, transdutores de deslocamentos, também designados por deflectómetros, que utilizam no seu funcionamento e ampliação sistemas mecânicos, ópticos, hidráulicos, eléctricos, etc.

Outras quantidades, tais como forças, pressões, etc, são também frequentemente medidas (indirectamente) através da medição de deslocamentos.

A escolha do transdutor depende da grandeza e do tipo de deslocamento (linear ou angular) a medir, da precisão exigida, do tipo de observação (duração, condições do meio ambiente, etc), da geometria da estrutura em análise, etc.

Neste contexto, apresentam-se alguns instrumentos mais utilizados na medição dos deslocamentos, na área das estruturas de engenharia civil: blocos padrão, para medir comprimentos; fios de invar, para medir assentamentos de apoio; transdutores de deslocamentos - LVDTs; alongómetros analógicos ou digitais, para medir aberturas de fendas, clinómetros, para medir inclinações, etc.

De entre estes, os instrumentos eléctricos, como LVDTs, são os que têm uma maior aplicação na monitorização das estruturas.

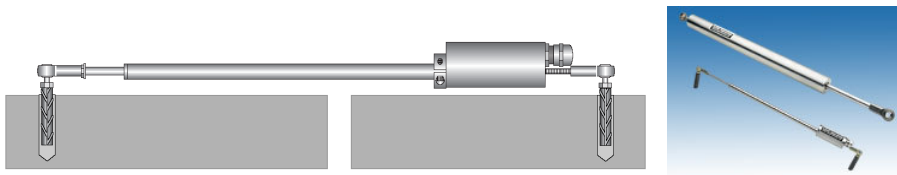


Fig. 2.45 – Modo de Aplicação de um Medidor de juntas (Fibersensing)

- *Monitorização de forças*

A determinação da magnitude e configuração das cargas aplicadas à estrutura apresenta um grande interesse a nível estrutural, isto porque, não só possibilita efectuar uma comparação entre as cargas espectáveis e as realmente instaladas, como também permite ter conhecimento da distribuição das cargas variáveis suportadas pela estrutura.

A medição das forças é realizada por transdutores de força, através da detecção das deformações a que eles estão submetidos, por acção daquelas.

Os transdutores de força podem ser classificados, de acordo com o tipo de sensor de deslocamento que utilizam, em: transdutores mecânicos, transdutores eléctricos, transdutores piezo-eléctricos.

- *Monitorização da corrosão*

A incorporação de um sistema de monitorização da corrosão, tem como finalidade não só aferir o estado da estrutura em termos de corrosão, mas também permite a determinação das causas e do mecanismo do processo de degradação, permitindo, evidentemente, um controlo mais eficaz do mesmo.

Nas estruturas de betão armado, o sistema de monitorização da corrosão, pode ser incorporado na camada de recobrimento das armaduras permitindo avaliar, em tempo real: o estado “corrosivo” das armaduras; a agressividade do betão em relação ao aço das armaduras; e a velocidade de penetração dos agentes agressores para o interior do betão.



Fig. 2.46 – Monicorr

▪ Monitorização da Temperatura

Temperatura é o grau de aquecimento ou arrefecimento de um corpo ou substância, indicado ou referido a uma determinada escala. A medição da temperatura é muito importante, não só porque esta altera as características de medição dos instrumentos, mas essencialmente porque quer a temperatura, quer a humidade, condicionam muito o estado de deformação das secções.

Os métodos térmicos podem ser utilizados numa variedade de aplicações, incluindo a medição da temperatura para monitorização das condições ambientais e para avaliar/prever a resistência do betão durante a cura, avaliação da deterioração, detecção de humidade e definição da constituição interna de elementos estruturais.

Existem actualmente uma grande variedade de instrumentos destinados à medição da temperatura, cada um dos quais apresentando características que os tornam particularmente indicados para determinadas aplicações específicas. De entre estas características salienta-se a gama de medição e a linearidade. Dos diversos sensores de temperatura, salientam-se os três mais usados na monitorização de estruturas: termopares; RTD – detector de temperatura resistivo e termistores.



Fig. 2.47 – Aplicação de um sensor de temperatura (FiberSensing)

▪ Monitorização da pressão

O valor da pressão tem interesse ser determinado em estruturas enterradas, em que a interacção do maciço envolvente com a estrutura constitui um aspecto essencial.

O instrumento especialmente dedicado à medição das pressões no interior de um maciço, ou na interface de um maciço com a estrutura, é designado por sensor ou célula de pressão.

No caso da estrutura de suporte ou de contenção ser de betão, as células de pressão podem ser encastrados na própria estrutura durante a fase de betonagem. Existem também modelos para aplicação à face da estrutura que vai estar em contacto com o maciço, indicados, por exemplo, para utilizar em estruturas de betão após a betonagem ou em estruturas constituídas por outros materiais, como o aço ou a madeira (Félix 2002)

A medição de grandezas nas fundações, como deslocamentos, deformações ou pressões pode revelar-se de grande importância, e nem sempre é tida em conta. Sempre que possível, a instalação e a medição das grandezas seleccionadas deve ter início com a construção, podendo servir como teste de carga à fundação.



Fig. 2.48 – Aplicação de Células de Pressão (FiberSensing)

▪ *Monitorização da Aceleração*

As estruturas estão submetidas a cargas que por sua vez causam acelerações nos elementos estruturais ($F=ma$). Consequentemente, a aceleração do solo provocada pelas acções do sismo, resultam em acções dinâmicas sobre os elementos estruturais.

Apesar de as estruturas estarem dimensionadas para fazer face às acções sísmicas, a introdução de sistemas de monitorização na estrutura, pode ser usada para determinar exactamente como é que a estrutura responde perante as acelerações. As acelerações são usualmente medidas através de sensores chamados acelerómetros (Fig. 2.49).



Fig. 2.49 – Acelerómetro (FiberSensing)

▪ *Sensores de Bragg em fibra óptica*

A aplicação dos sensores de fibra óptica à monitorização das estruturas de engenharia civil tem experimentado nos últimos anos um grande desenvolvimento.

O advento dos sensores de fibra óptica, e em particular dos sensores de Bragg, com características muito particulares de funcionamento, justificam uma referência especial na dissertação. Estes sensores têm sido aplicados com sucesso na monitorização de diversas estruturas, nomeadamente pontes e barragens, permitindo obter informação essencial acerca do seu comportamento ao longo do tempo.

Os sensores com base na fibra óptica possuem enormes vantagens sobre outros tipos convencionais de sensores, como por exemplo: o não serem interferidos electromagneticamente, o seu baixo peso, flexibilidade para se adaptarem a geometrias difíceis, a pouca atenuação por unidade de comprimento, alta sensibilidade e pouco ruído. Todas estas propriedades das fibras ópticas tornam-nas muito adequadas para distintas aplicações estruturais (Cruz 2001).

Os sensores de fibra óptica têm contribuído para um significativo avanço em diversas áreas da engenharia (ver Fig. 2.50). Com uma fonte de luz e um único sistema de leitura é possível medir-se uma variedade de sinais multiplexados relacionados a deformação, vibração, temperatura e pressão ao longo de uma única fibra óptica.



Fig. 2.50 – Aplicação de sensores de fibra óptica em estruturas metálicas (FiberSensing)

Os sensores e sistemas de aquisição deverão estar ligados em rede, pois permitirá controlar o seu funcionamento e testar as funções principais à distância e transferir automaticamente os resultados de medição dos sensores da rede para um computador colocado num posto central.

No caso dos acelerómetros, o facto de estarem conectados em rede, permite sincronizar os sistemas de aquisição de forma a precisar a cinemática dos movimentos durante um sismo

Esta ligação consiste em montar os sistemas de medida em rede (cabo, fibra óptica, rádio) e controlá-los por um computador.

2.5. Sistemas de controlo activo “smart structures”

O conceito de estrutura inteligente pressupõe a existência de sistemas automáticos de monitorização, de estruturas auto-adaptativas e de um sistema inteligente de gestão da estrutura.

O sistema automático de monitorização deverá ser capaz de detectar se ocorreu uma situação de excepção predefinida, por exemplo através do controlo de determinados valores dos efeitos das acções.

Neste contexto entende-se por estruturas auto-adaptativas aquelas que são capazes de alterar as acções a que estão sujeitas, as suas condições de apoio ou mesmo a sua geometria, através de sistemas mais ou menos complexos.

Actualmente este conceito só é aplicado em estruturas especiais, como pontes, edifícios altos, barragens.

Refira-se como exemplo a redução de sobrecarga a que uma laje poderá estar sujeita pode ser conseguida através da interdição dos veículos à mesma, ou retirando determinado elemento causador do excesso de sobrecarga. Isto pode ser conseguido simplesmente pela introdução de um dispositivo luminoso de sinalização. Sistemas mais complexos podem incluir por exemplo a aplicação de cargas ascendentes à estrutura através do tensionamento automático de cabos de pré-esforço especificamente instalados para o efeito (Pacheco 1998).

O evitar da degradação dessas estruturas até níveis insustentáveis poderá passar pelo maior controlo de execução da obra, pelo recurso a materiais mais duráveis e pela implementação de sistemas de monitorização. Recorrendo à tecnologia disponível, é possível monitorizar uma série de parâmetros fundamentais, quer ao nível do comportamento mecânico, quer ao nível da integridade e durabilidade dos materiais. A generalização do uso da monitorização poderá passar pelo recurso a materiais inteligentes. Estes materiais podem ser obtidos a partir de elementos introduzidos na composição de materiais correntes, ou mesmo recorrendo a materiais convencionais, através do estudo de certas características tais como as propriedades eléctricas.

Completa este esquema um sistema inteligente de gestão da estrutura, capaz de interpretar em tempo real a informação transmitida pelo sistema de monitorização e de traduzir em medidas correctivas sobre a estrutura.

CAPÍTULO 3

MECANISMOS DETERIORAÇÃO E PRINCIPAIS ANOMALIAS DAS OBRAS DE ARTE

Todas as obras de engenharia civil, das quais se salienta as Obras de Arte, no decurso da sua vida útil, vão interagindo com o meio ambiente e vão sendo submetidas a diferentes solicitações, sofrendo inevitavelmente degradação com o tempo.

Actualmente, poder-se-á dizer que é muito difícil ter-se conhecimento de maneira clara e uniformizada do número de patologias que afectam as Obras de Arte. Nesse sentido a realização de inspecções periódicas, permite a detecção atempada das anomalias e a verificação do bom funcionamento da estrutura e seus equipamentos.

Geralmente a maioria das patologias manifestam-se externamente, permitindo identificar a sua natureza, origem e avaliar os fenómenos envolvidos que possam evitar a sua evolução. Dependendo da importância e função do componente em que se manifestam, as patologias poderão ser estruturais ou não estruturais. Os danos mais importantes, que correspondem geralmente a um estado mais avançado de degradação dos materiais, deverão ser identificados pois correspondem a situações que podem comprometer a curto ou médio prazo a segurança estrutural da Obra de Arte e ou do tráfego.

Quando se pretende avaliar o comportamento estrutural das Obras de Arte, deve-se ter em consideração, não só o comportamento global da super estrutura, para averiguar se ocorreram deformações excessivas, deslocamentos relativos de elementos estruturais, ocorrência de infraescavação e erosão das fundações, etc., como também o estado em que se encontram todos

os seus componentes (tabuleiro, encontros, apoios intermédios, cornijas, guarda corpos, aparelhos de apoio, juntas de dilatação, pavimento, órgãos de drenagem, taludes, passeios, muros).

Tendo presente que as anomalias dos componentes das Obras de Arte variam em função do componente em causa, da sua função e do tipo de material (betão, alvenaria de pedra, aço, asfalto, etc), serão analisadas separadamente neste capítulo.

As anomalias manifestam-se de forma diferente nas estruturas em função da causa que lhes deu origem. Para se evitar uma evolução precoce das patologias e uma maior degradação das Obras de Arte, é fundamental avaliar as causas que lhe deram origem.

As patologias que se podem observar nas estruturas são originadas por diferentes factores, como:

- à falta de pormenorização dos projectos
- à má execução durante a construção
- aos seus materiais constituintes
- à concepção estrutural da Obra de Arte
- às modificações das condições de exploração e ao aumento das cargas rodoviárias
- às agressões exteriores ligadas à presença e à circulação de água
- aos acidentes (ex choque de veículos ou barcos; sismos)

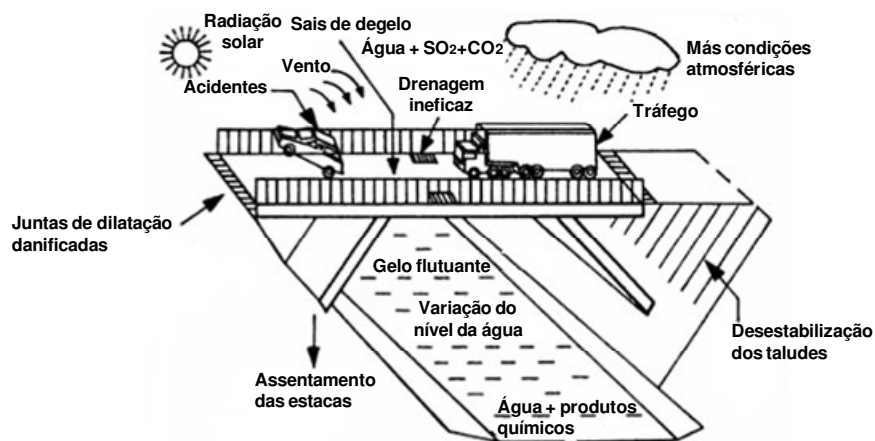


Fig. 3.1 – Factores que actuam numa ponte durante a sua vida útil (Radomski 2002)

É portanto muito importante identificar as anomalias, conhecer as causas, prever a sua evolução, conhecer os tipos e métodos de reparação e estimar os custos.

A classificação das patologias por famílias nem sempre é uma tarefa fácil, pode ser realizada tendo em consideração os tipos de obras e as partes das obras, tendo em consideração o principal material constituinte, a partir do tipo de manifestação, a partir das causas, etc. Todos estes tipos de classificações não são de todo independentes, estando relacionados entre si.

Com este capítulo pretende-se descrever os danos mais frequentes nas pontes rodoviárias de betão armado, alvenaria de pedra e estrutura metálica e seus principais componentes.

3.1. Estruturas em betão armado

O betão é um dos materiais de construção mais utilizado em todo o mundo, no entanto verifica-se que apresenta uma degradação precoce comparativamente a outros materiais naturais.

Apesar de antigamente se pensar que o betão armado duraria indefinidamente e que as armaduras se encontravam suficientemente protegidas pela camada de betão de recobrimento, com o passar dos anos tem-se vindo a verificar que as estruturas de betão armado se degradam com o tempo.

O betão é um material constituído pela mistura devidamente proporcionada de agregados (em geral brita ou godo e areia), com um ligante hidráulico, água e eventualmente adjuvantes e adições.

A estrutura interna do betão vai evoluindo ao longo do tempo, interagindo com o ambiente em que está inserido. Assim, para que apresente um bom comportamento ao longo da sua vida útil, deverá ter uma estrutura interna cujas propriedades satisfaçam os requisitos pretendidos, isto é, deverá ser capaz de resistir às acções de projecto (permanentes, sobrecargas, acidentais) e condições ambientais, sem apresentar deformações excessivas, desgaste ou rotura.

Poder-se-á então dizer que o betão é um material compósito cujas propriedades depende da qualidade dos constituintes, da qualidade de mão-de-obra que o produz e coloca e das condições ambientais a que está exposto durante a sua vida útil (Coutinho 2002).

Antes de se avaliar as patologias de uma Obra de Arte em betão armado, deve-se procurar enquadrá-la no período em que foi projectada e construída, isto porque as anomalias observadas poderão estar directamente ligadas às regras de cálculo e as disposições construtivas utilizadas na altura. Deste modo, deverão ser analisados os documentos em vigor naquela época (cursos de betão armado, regulamentos de cálculo e circulares sobre os betões e armaduras, etc), para se evitar cometer erros grosseiros.

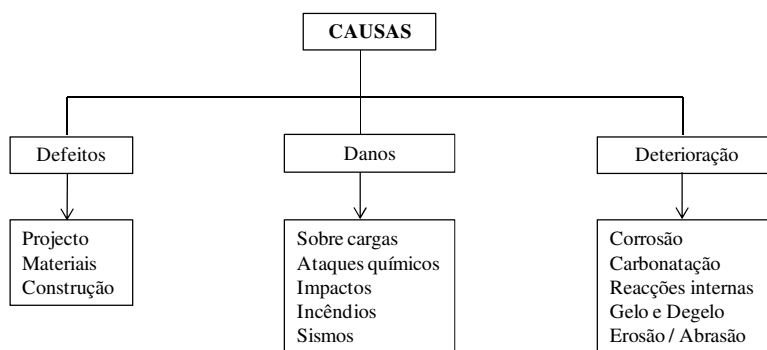


Fig. 3.2 – Factores que podem dar origem ao aparecimento de patologias

3.1.1. Mecanismos de deterioração do betão

Os mecanismos de degradação do betão, estão não só relacionados com as propriedades dos seus materiais constituintes como também pelas agressões exteriores às quais as estruturas das obras de arte estão submetidas. As agressões exteriores podem ter duas origens essenciais: erros humanos (tráfego, vandalismo, acidentes, etc.) ou acções naturais (origem biológica, física, química, etc.). Apresenta-se uma breve descrição das acções naturais e dos problemas que podem causar às estruturas de betão armado.

▪ *Origem biológica*

Os microrganismos podem contribuir para a degradação do betão através da acidificação da água. Este tipo de reacção pode ocorrer em estruturas em contacto com águas poluídas ou devida à actividade metabólica de diversas espécies de algas ou fungos que tendem a oxidar o enxofre originando a erosão da pasta de cimento e conseqüentemente a corrosão das armaduras.

▪ *Origem física e mecânica*

As alterações físicas devem-se às sobrecargas e solicitações excessivas, devido ao choque térmico, à fricção e à retracção.

• *Tensões térmicas*

A temperatura pode ser considerada como uma das acções agressivas associadas ao meio ambiente. A sua variação provoca aumentos e diminuições de volume do betão, sendo muitas vezes responsável pelo destacamento da superfície da camada de revestimento do betão.

• *Ciclos de gelo e degelo*

Estes mecanismos observam-se em estruturas submetidas a ciclos de temperaturas que provoquem a congelação e descongelação da água. Quando a água congela o seu volume

aumenta provocando tensões, fissuras e desagregações. Em função da classe de exposição ambiental, consegue-se minimizar este fenómeno através da introdução de ar no betão. Estes fenómenos ocorrem principalmente nas superfícies horizontais que estão expostas à água, ou em superfícies verticais que estão nas linhas de água em elementos submersos.

- *Acção do fogo*

As patologias originadas pelos incêndios nas Obras de Arte são raras, mas quando ocorrem, provocam alguns danos nos materiais estruturais e seus elementos. O betão quando submetido às elevadas temperaturas, perde humidade, sobre a forma de vapor de água, provocando rebentamentos de pequenas partes de betão e induzindo a ocorrência de micro-fissuração, descasques e escamação. As elevadas mudanças de volume nos elementos submetidos à fonte de calor, podem originar a ocorrência de fenómenos de distorção, encurvamento e fendilhação.



Fig. 3.3 – Patologia originada pela acção do fogo

- *Origem química*

As alterações químicas devem-se essencialmente aos ácidos (minerais ou orgânicos), às bases e as soluções salinas. Quando estas soluções contactam com a superfície do betão, são absorvidas, originando reacções internas que conduzem à formação de novos compostos químicos, responsáveis pela deterioração e desagregação do betão.

- *Carbonatação*

A carbonatação do betão é uma reacção que ocorre entre os gases ácidos da atmosfera e os produtos da hidratação do cimento, na presença de humidade ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$). O seu desenvolvimento depende do teor de humidade da estrutura, da humidade relativa ambiental, da concentração de CO_2 no ar, do tipo de cimento e da razão água /ligante do betão. Este fenómeno, corresponde à transformação da portlandite em calcite, sendo acompanhada de uma reduzida variação do volume e de uma diminuição do PH do betão, que passa de valores da ordem dos 12,5 a cerca de 9. Esta diminuição da alcalinidade origina o desaparecimento da protecção que o betão exercia em torno das armaduras,

ficando desprotegidas dos fenómenos de oxidação. Em betões de boa qualidade o processo de carbonatação é lento, correspondendo a cerca de 1mm por ano (Beleza 1996).

- *Ataque pela água doce e meios ácidos*

A água doce decompõe os compostos de cimento através da dissolução do hidróxido de cálcio e com alguma dimensão os compostos de alumina. A contínua dissolução pode originar um resíduo amorfo de sílica hidratada, óxido de ferro e alumina. Esta forma de ataque é geralmente lenta, a não ser que a água possa passar continuamente através da massa de betão (Beleza 1996).

A água pura pode ter um PH mais ácido devido à presença de poluentes industriais, de dióxido de carbono ou ácidos orgânicos ou inorgânicos, tornando-se mais agressiva. As águas ácidas podem contribuir para a eliminação dos produtos hidratados por lixiviação devido à acidez da água; para a formação de compostos expansivos do betão devido à reacção dos iões sulfatos com os compostos do cimento; e para a despassivação das armaduras e início da sua corrosão devido à infiltração dos iões cloreto e da carbonatação do cimento pelo dióxido de carbono dissolvido.

- *Acção dos cloretos*

A presença de cloretos no betão em quantidades substanciais é muito prejudicial, pois é responsável pela sua deterioração rápida, destruindo a película de passivação das armaduras, podendo dar origem a fenómenos de corrosão das armaduras.

Os cloretos que são encontrados no betão advêm normalmente da água do mar, de alguns aceleradores de presa ou ambientes que contenham cloro (piscinas).

- *Ataque pela água do mar*

O ambiente marítimo é um meio muito agressivo para o betão, mesmo quando a estrutura não está submetida à acção das ondas e quando a água do mar é considerada pouco agressiva. A deterioração do betão em tal ambiente deve-se as reacções químicas que ocorrem entre a pasta do cimento e os sulfatos, os cloretos e os sais de magnésio e pode dar origem a uma diminuição de resistência do betão e à corrosão das armaduras.

- *Reacções expansivas internas*

- *Reacção álcalis-sílica*

A reacção álcalis-sílica é uma reacção química interna do betão que se dá entre os álcalis do cimento ou dos agregados e a sílica de certos agregados reactivos. A deterioração do betão provocada por esta reacção deve-se à influência em simultâneo de diferentes

factores, tais como, a presença de sílica reactiva nos agregados, a um teor elevado de alcalis na solução intersticial do betão e à existência de um ambiente húmido. As zonas mais sensíveis das estruturas são as zonas em contacto com a água, expostas às intempéries ou com deficiente drenagem ou não estanques.

Esta reacção pode originar expansões internas do betão e fendilhação, podendo levar à destruição completa da estrutura. Além do mais, a expansão provocada pelo gel resultante da reacção álcalis-sílica dificilmente pode ser interrompida.

As estruturas que são afectadas por este tipo de reacção interna exibem sinais evidentes de degradação, apresentando uma espécie de mapa de fendilhações à superfície.



Fig. 3.4 – Patologia originada pela reacção álcalis-sílica: a) pilar de betão armado (Silva 2996); b) encontro de uma Passagem Superior (Brouxel 2009).

Para não se confundir a fissuração causada pela reacção álcalis-sílica com as originadas pela retracção ou pelos ciclos de gelo degelo, é absolutamente necessário efectuar um diagnóstico com recurso a estudos microscópicos.

- Reacção sulfática interna

A reacção sulfática é uma reacção química interna do betão causada pela acção dos sulfatos provenientes do meio exterior ou dos agregados com presença de cal e os aluminatos da pasta de cimento. Como produto desta reacção resulta a formação de taumasite e etringite ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) que provoca a expansão do betão. Esta variação de volume, expande, pressiona e rompe a matriz de cimento originando o aparecimento de fendas, a desintegração à superfície e por sua vez a deterioração da massa de betão (ver Fig. 3.5 e Fig. 3.6).



Fig. 3.5 – Patologia originada pela reacção sulfática (Brouxel 2009).

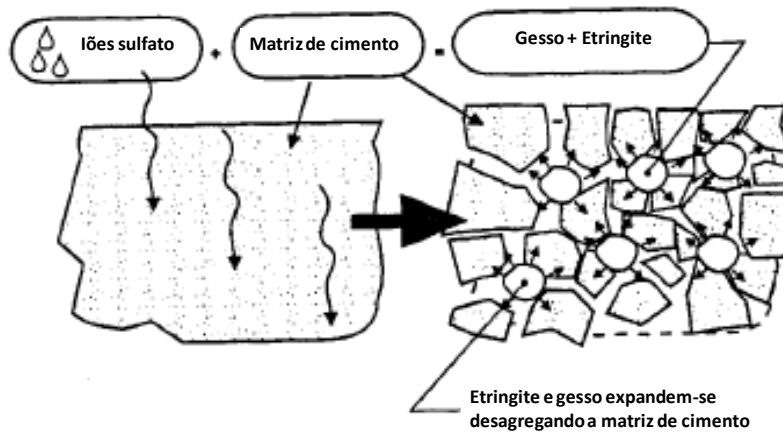


Fig. 3.6 – Reacção entre o betão e os iões sulfato (Beleza 1996)

Os sulfatos podem ser encontrados nos solos, na água do mar, em águas subterrâneas e em solos e em águas com adubos e defensivos agrícolas.

A figura seguinte pretende resumir os fenómenos de degradação do betão.

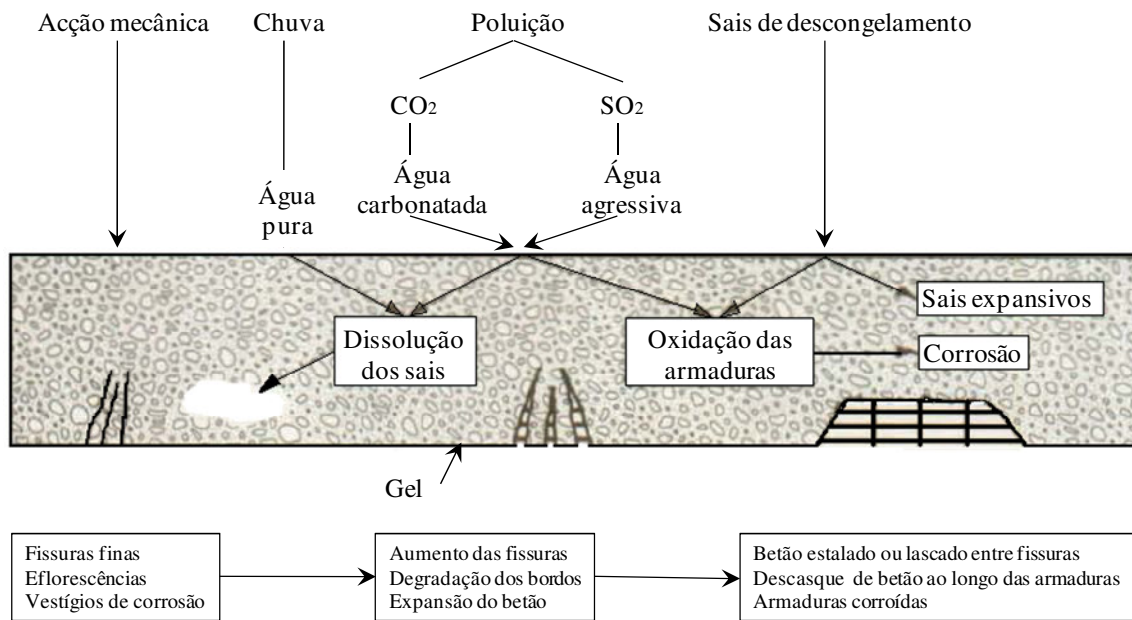


Fig. 3.7 – Processo de degradação do betão (Andrey 1987)

Apresenta-se em anexo um quadro resumo dos mecanismos de deterioração do betão elaborado por Coutinho em 2002.

3.1.2. Mecanismos de corrosão do aço

Um dos principais problemas das estruturas de betão armado são causados pela corrosão das armaduras. Nestas estruturas as armaduras estão protegidas pela alcalinidade do cimento (PH

12 a 13) encontrando-se num meio básico. Quando o PH baixa para valores inferiores a 9, em presença de uma atmosfera húmida contaminada por gases ácidos e fuligem, o meio fica favorável para a ocorrência da corrosão. É de salientar que quando o PH é muito elevado, pode ocorrer corrosão básica

O mecanismo de corrosão do aço no betão, denominado despassivação do aço, é electroquímico, pelo que as reacções corrosivas ocorrem na presença de água ou ambientes húmidos (HR>60%).

Os dois mecanismos responsáveis pela perda da película passivadora do aço são a carbonatação e a penetração de cloretos do ambiente.

Nas estruturas de betão armado, a corrosão aparece sob a forma de picaduras na superfície das armaduras. Como a transformação do aço metálico em produtos de corrosão é em geral acompanhada por um aumento de volume, a expansão da corrosão, é responsável pelo descasque do betão de recobrimento e pelo aparecimento de fissuras, acelerando deste modo o fenómeno de deterioração.

Os tipos de corrosão de armaduras são classificados em função da extensão da área atacada, como se pode observar na figura que se segue, os mais frequentes são do tipo generalizada e localizada, por picaduras e por fissuras.

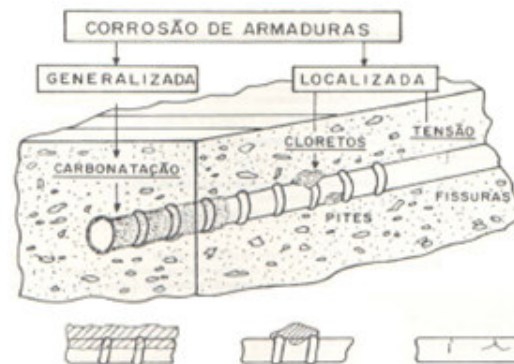


Fig. 3.8 – Tipos de corrosão de armaduras e factores que os originam (Laner 2001)

Em estruturas de betão armado, a corrosão localizada sobre tensão é rara, sendo mais frequente em estruturas de betão pré-esforçado. Este tipo de corrosão origina o aparecimento de fissuras nas armaduras, que ao se desenvolverem, podem originar uma rotura frágil das armaduras, sem se observar perda de secção.

Para se evitar a corrosão das armaduras é fundamental que as estruturas apresentem um bom recobrimento, de forma a protegerem os aços dos mecanismos de deterioração.

3.1.3. Factores que podem dar origem ao aparecimento de anomalias

Nem sempre há apenas uma origem específica responsável pelo aparecimento de patologias, manifestando-se a maioria das vezes como uma combinação de diferentes factores. A acção desses factores normalmente é o ponto de partida para a deterioração do betão.

3.1.3.1. Patologias causadas por problemas na concepção / projecto

Na fase de projecto, a qualidade depende do cumprimento das especificações impostas pela regulamentação em vigor, pela utilização de um modelo de cálculo adequado e pela correcta pormenorização de todos os elementos estruturais.

Muitos pormenores do projecto de execução, embora em conformidade com as especificações técnicas, muitas vezes não funcionam bem em obra. Há determinados pormenores construtivos, especificados ou não no projecto, que acabam por conduzir ao aparecimento de anomalias.

O tipo de patologias que advém deste tipo de deficiência pode apenas manifestar-se após algum tempo. As deficiências de projecto podem então ser devidas aos seguintes factores:

- *Concepção estrutural inadequada*

O sistema estrutural adoptado pode ser responsável pela deterioração precoce da obra. Esta situação pode acontecer não só pela inadaptação da estrutura ao sítio onde está inserida, como é o caso de uma estrutura hiperestática submetida a movimentos dos apoios ou do terreno, ou devido às condições de utilização desajustadas ao tipo e robustez de estrutura, estando a estrutura submetida a acções exteriores superiores às quais está dimensionada. A forma dos elementos estruturais, se apresenta cantos salientes ou secções muito esbeltas e a ausência de impermeabilização ou má concepção da drenagem, podem também propiciar o aparecimento precoce de patologias.

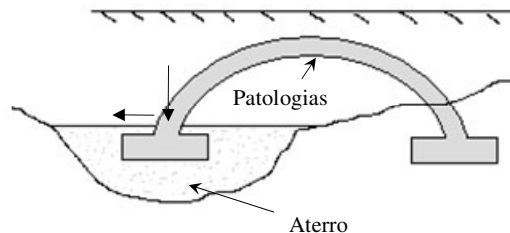


Fig. 3.9 – Exemplo de uma inadaptação da estrutura ao sítio onde está inserida: sapata sobre aterro

- *Erros de projecto*

Os erros derivados de problemas do cálculo das estruturas podem ser devidos em diferentes causas:

- *especificação inadequada dos materiais (aço e betão);*

A capacidade dos materiais para resistir às acções agressivas externas (químicas e físicas), sem se deteriorarem depende essencialmente da sua qualidade. A consideração incorrecta das propriedades dos materiais pode igualmente conduzir ao aparecimento de anomalias. Para se evitar que tal aconteça, o projectista deverá avaliar correctamente as condições a que a estrutura irá estar submetida.

- *deficiente avaliação da agressividade das condições de exposição;*

O projecto deverá contemplar a agressividade das condições de exposição a que a obra irá estar exposta, tendo em consideração as características particulares do ambiente onde irá estar inserida.

- *cargas subestimadas;*

Uma estrutura está subestimada quando não é capaz de suportar, sem se danificar, as solicitações que resultam das acções que lhe são aplicadas. O subdimensionamento pode resultar de subestimação das cargas de exploração ou das cargas permanentes, mas o erro mais frequente resulta da subavaliação ou omissão das acções térmicas. Os efeitos da acção do vento, nem sempre são correctamente tomados em consideração nas estruturas flexíveis (ponte de cabos, suspensas e de tirantes).

- *erros na modelação;*

Com o aumento crescente do uso de ferramentas de cálculo automático aliado ao contínuo desenvolvimento da teoria das estruturas e do cálculo estrutural, os elementos estruturais são cada vez mais esbeltos, estando por isso mais sujeitos à acção dos agentes agressivos e consecutivamente menos resistentes ao processo de degradação. Os programas de cálculo automático apesar de serem uma ferramenta eficaz na análise de estruturas, podem conduzir a problemas de mau funcionamento global da Obra de Arte, caso a modelação estrutural esteja incorrecta ou demasiado simplificada. Deste modo, a escolha do modelo estrutural de estruturas mais ou menos complexas deverá ser muito rigoroso e ter em consideração as tolerâncias de execução e uma correcta transmissão dos esforços tendo em consideração as acções a que a estrutura está submetida.

- *falta de verificação de todas as condições impostas pela regulamentação;*

Não consideração dos efeitos diferidos (fluência e relaxação) e da encurvadura no cálculo de elementos verticais. Deficiente controlo da deformação, da fendilhação e das deformações impostas (retracção, temperatura), etc.

▪ *Disposições construtivas inadaptadas*

Correspondem às regras não respeitadas na fase de projecto de execução, a referir:

- *deficiente pormenorização das armaduras;*

O cumprimento das disposições gerais impostas pelos regulamentos relativas a armaduras, no que diz respeito ao seu agrupamento; distância mínima entre armaduras ou bainhas para permitir realizar uma betonagem em boas condições; recobrimento mínimo de modo a garantir não só a necessária protecção contra a corrosão mas também a eficiente transmissão das forças entre as armaduras e o betão; curvatura máxima entre armaduras de modo a não afectar a sua resistência e sem provocar o esmagamento ou fendimento do betão por efeito da pressão que exerce na zona da curva; aderência das armaduras ao betão (amarrações e emendas) de modo a garantir o funcionamento conjunto dos dois materiais; e amarrações e emendas de armaduras ordinárias.

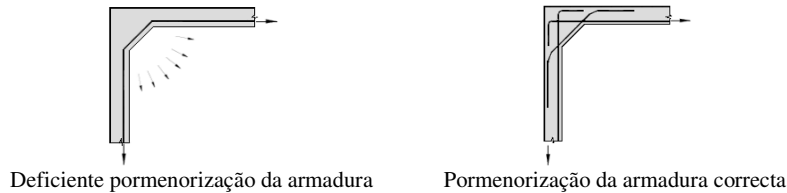


Fig. 3.10 – Exemplos de deficiente pormenorização de armaduras

- *armadura passiva insuficiente;*

Para se garantir a eficiência do comportamento estrutural de um elemento é essencial que para além das armaduras principais que garantem a absorção e transmissão dos esforços, se disponha também de armaduras secundárias que limitem o alargamento da fendilhação localizada e assegurem a ligação entre as partes dos elementos que tenham tendência para se destacarem, caso de variação brusca de geometria das peças e actuação de forças em zonas restritas dos elementos estruturais. Como exemplo, pode-se referir o caso das consolas curtas (cachorros) e das vigas parede (Fig. 3.11), em que o método das bielas e tirantes apenas permitem calcular a armadura principal, que deve ser complementada as armaduras secundárias nestes elementos são indispensáveis.

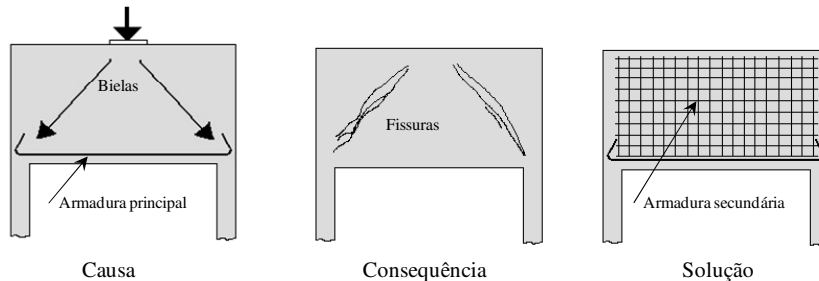


Fig. 3.11 – Exemplos de insuficiente armadura secundária viga parede

- *especificação deficiente dos recobrimentos das armaduras;*

Nos regulamentos antigos de betão armado, o recobrimento das armaduras secundárias não estava definido. Os elementos que contenham um recobrimento insuficiente e que estejam expostos a ambientes agressivos estão mais vulneráveis à sua degradação precoce.

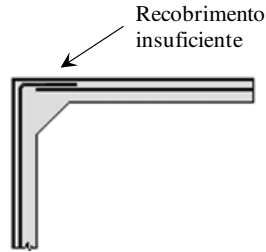


Fig. 3.12 – Aparecimento de fissuras devido ao reduzido recobrimento na zona de sobreposição de armaduras

- *Impossibilidade de execução correcta*

Durante a execução da empreitada torna-se muitas vezes necessário efectuar modificações ao projecto, no entanto em alguns casos, essas alterações são efectuadas em obra sem consulta prévia do projectista, podendo muitas vezes resultar no aparecimento inesperado de anomalias, nem sempre detectado durante a execução da obra. A aparição de patologias que possam ter este tipo de origem, pode ser facilmente evitado se forem efectuadas todas as modificações necessárias através da consulta do gabinete de projectos responsável pela sua concepção.

- *Não consideração das tolerâncias de execução*

Nem sempre as hipóteses consideradas durante o cálculo estrutural são totalmente possíveis de ser executadas na realidade. Como exemplo pode-se referir o caso de uma fundação constituída por uma única fiada de estacas, suportando o fuste do pilar recebendo as cargas transmitidas pelo tabuleiro, através de uma única linha de aparelhos de apoio. Todas as cargas se encontram teoricamente no plano vertical passando pelo eixo das estacas, no entanto a existência de tolerâncias de execução sobre cada uma das partes da estrutura pode provocar momentos flectores adicionais que muitas vezes são omitidos.

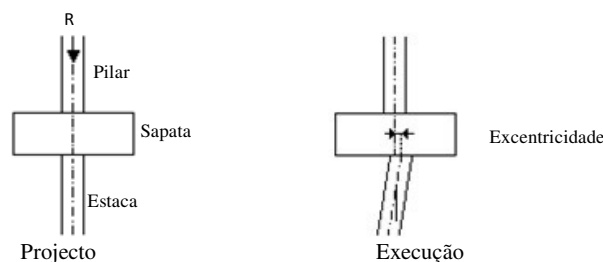


Fig. 3.13 – Exemplo das diferenças entre as hipóteses de cálculo e a realidade de construção: pilar sobre uma única fiada de estacas

- *Não consideração da necessidade realização de inspecções periódicas e de se realizarem trabalhos de manutenção e conservação*

O projecto de execução de uma Obra de Arte além de ter em consideração todos os aspectos relacionados com a concepção da obra e o seu processo construtivo, deverá também fazer referência à sua manutenção e conservação periódica, a realizar durante a fase de serviço. São vários os exemplos de Obras de Arte em serviço em que é muito difícil, em alguns casos impossível de inspecionar convenientemente a estrutura. Refere-se alguns exemplos: impossibilidade de visitar vigas-caixão ou fustes de pilares de secção oca, por não apresentarem nenhuma abertura; inacessibilidade aos aparelhos de apoio e juntas de dilatação; impossibilidade de se colocar macacos hidráulicos para efectuar o levantamento do tabuleiro; sumidouros ou sarjetas contendo vários cotovelos sem possibilidade de serem visitáveis para se efectuar correctamente a sua limpeza, etc..

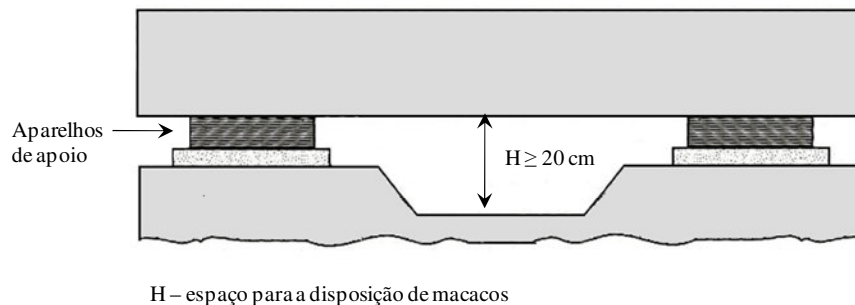


Fig. 3.14 – Disposição construtiva a implementar para possibilitar a colocação de macacos para efectuar o levantamento do tabuleiro

O conhecimento das patologias que advém de problemas na fase de concepção, permite que em projectos futuros se tenha em consideração determinados aspectos, que a longo prazo podem contribuir para o aumento da durabilidade das Obras de Arte e igualmente para melhorar e facilitar a sua manutenção periódica. Deste modo, o projectista assume um papel fundamental no sentido de se evitar o aparecimento de determinadas patologias e na garantia de uma estrutura com uma maior vida útil.

3.1.3.2. Patologias causadas por defeitos de construção

A fase de execução da empreitada é muitas vezes responsável pelo aparecimento de diferentes mecanismos de deterioração das Obras de Arte, podendo-se dever ao emprego de materiais inadequados e de má qualidade, a uma deficiente execução, má interpretação dos projectos, falta de qualidade técnica, bem como à inexistência de fiscalização ou má representação das suas funções.

O deficiente controlo da qualidade durante a realização da obra é a origem mais comum para o aparecimento de patologias ditas de execução. Este tipo de patologias pode-se manifestar durante a construção ou durante a fase de exploração da obra.

As principais causas de deficiências de execução são brevemente apresentadas:

▪ *Aplicação de materiais de má qualidade ou inadequados à sua função*

A deficiente qualidade dos materiais pode resultar da sua natureza, nomeadamente do incumprimento das características especificadas no projecto e da utilização de materiais fabricados para outro tipo de fim; de uma fabricação incorrecta, através da utilização de constituintes não previstos, de acordo com a conveniência da entidade executante, pode-se referir como exemplo a adição de água no betão, durante o seu transporte da central até ao local da obra e de adjuvantes numa dosagem incorrecta; e de uma má conservação dos materiais no estaleiro de obra.

• *Defeitos derivados da qualidade do betão*

A qualidade do betão depende da qualidade dos materiais constituintes, mas essencialmente da sua composição, colocação, compactação e cura. A ausência de provas de estudo da composição do betão, aliado ao seu deficiente fabrico, através da alteração da dosagem dos componentes previstos e da utilização de materiais inadequados, tais como cimento poluído devido ao transporte, agregados reactivos, água contaminada, etc, pode ser responsável pelo seu mau comportamento e pelo desenvolvimento de mecanismos de deterioração.

• *Defeitos derivados da qualidade do aço*

Os defeitos podem ser devido à alteração dos elementos constituintes, à má conservação dos aços em obra, derivada por exemplo do contacto com o solo, podendo dar origem à oxidação das armaduras e ao desrespeito dos raios de curvatura impostos pela regulamentação durante a sua dobragem.

▪ *Execução incorrecta dos materiais*

As patologias com origem na execução dos materiais são dos erros mais frequentes, podendo dever-se à má interpretação dos desenhos de execução, à sua execução por pessoal inexperiente e ao ineficaz controlo de qualidade pela fiscalização. As causas mais comuns do desrespeito pelos procedimentos de execução de um elemento em betão armado são:

- má implantação da obra;
- deficiente processo construtivo;

- secção inadequada dos materiais, não respeitando as dimensões previstas no projecto;
- deficiente posicionamento das armaduras;
- inadequada vibração do betão;

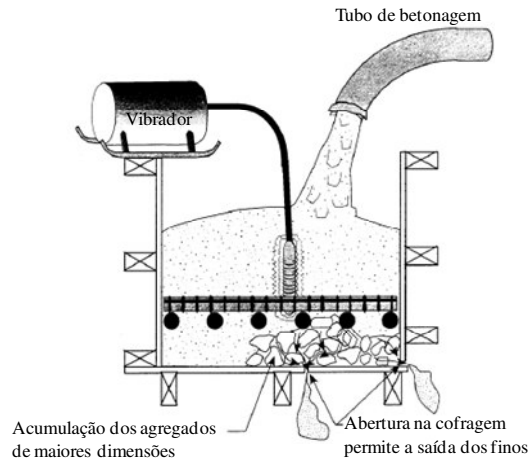


Fig. 3.15 – Acumulação de agregados de grandes dimensões devido a uma má vibração do betão e ao uso de cofragens mal colmatadas (Peter, 1994)

- compactação / cura deficiente do betão;
- recobrimentos insuficiente das armaduras, ausência de calços ou má escolha dos mesmos;
- utilização de uma cofragem deficiente, demasiado flexível que se deforma com o peso do betão fresco. Podem também se dever à utilização de cavaletes mal dimensionados ou mal fundados;

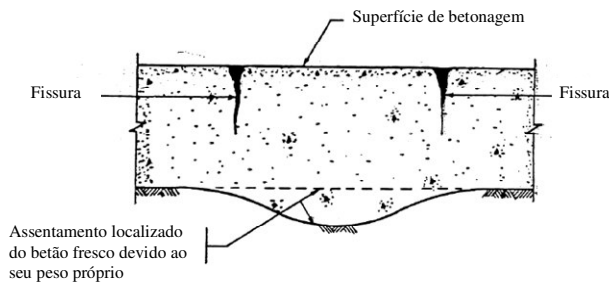


Fig. 3.16 – Fissuração devido à cedência do solo (Castro e Martins, 2006)

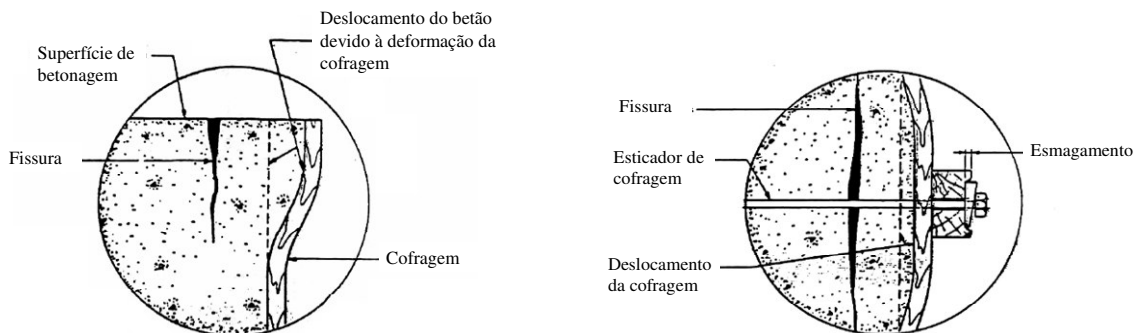


Fig. 3.17 – Deslocamento de cofragens (Castro e Martins, 2006)

- remoção prematura do escoramento da cofragem, dando origem à formação de chochos (ninho de vazios), deformações dos elementos estruturais e ao aparecimento de fissuras;

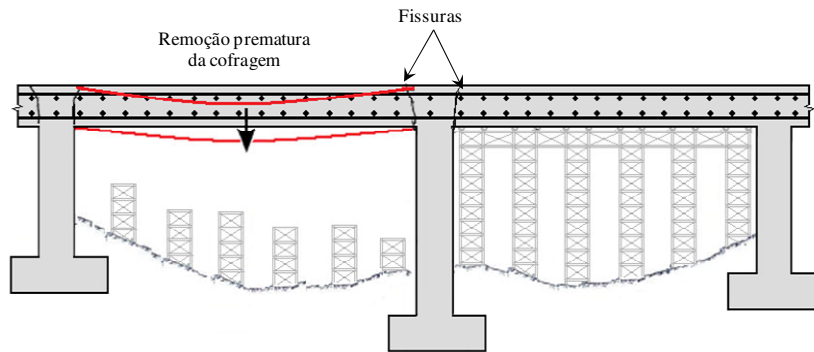


Fig. 3.18 – Remoção prematura da cofragem

- não cumprimento dos prazos de endurecimento do betão;
- juntas de betonagem abertas, permitindo a entrada de água;
- pré-esforço inadequado e má execução das injeções;
- fabrico ou montagem incorrecta das juntas de dilatação e aparelhos de apoio, etc;

A improvisação em obra, sem reflexão prévia, pode originar a ocorrência de acidentes e o aparecimento de patologias. Deste modo, no sentido de se evitar o aparecimento precoce de anomalias, deve-se durante a construção procurar cumprir rigorosamente o projecto de execução, quando tal não for possível, devido erros, omissões ou à ocorrência de situações não previstas, é sempre recomendada a consulta prévia do projectista.

Tabela 3.1 – Patologias provenientes de defeitos de construção (Tridon 2009)

ORIGEM	CONSEQUÊNCIAS	PATOLOGIAS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cofragem não estanque 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perda de calda ▪ Segregação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ninho de inertes ▪ Penetração de água
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cofragem flexível, com deformações de flexão 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perda de resistência da obra concluída 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fissuração
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Remoção prematura da cofragem 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deformação da estrutura 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fissuração
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Armaduras mal colocadas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recobrimento insuficiente ▪ Perda de resistência 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Início da corrosão ▪ Fissuração e descasque do betão ▪ Carbonatação
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Má disposição das armaduras 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impulsos no vazio 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fissuração
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inadequada vibração do betão 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Segregação ▪ Concentração de água ▪ Sedimentação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perda de resistência ▪ Ninho de inertes ▪ Descasque ▪ Retracção ▪ Fissuração do betão fresco
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Má cura 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secagem rápida 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fissuração
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mau betão ▪ Má execução de obra ▪ Ausência de estanqueidade ▪ Recobrimento insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Penetração de agentes agressivos, migrando através da água e do ar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rotura da passivação das armaduras ($PH < 9$) ▪ Início da corrosão

3.1.3.3. Patologias associadas às modificações das condições de exploração e ao aumento das cargas rodoviárias

Os motivos que estão na origem da alteração das condições de exploração de uma Obra de Arte com o eventual aumento das cargas rodoviárias são diversos, podendo dever-se à mudança de uma plataforma rodoviária de uma via em cada sentido para duas, através da eliminação ou redução da dimensão dos passeios; renovação da camada de desgaste sem previamente fresar; circulação dos equipamentos de obra, sem precauções particulares; alterações nos leitos dos rios; à evolução natural do tráfego rodoviário, entre outros.

A evolução do tráfego rodoviário é originada pelo aumento do volume total de tráfego, que provoca a passagem mais frequente de cargas pesadas e o acréscimo do peso dos veículos pesados. O aumento crescente das cargas rodoviárias para os quais a estrutura não está dimensionada amplia o risco de fadiga.

3.1.3.4. Patologias causadas por acções exteriores e acidentais

As acções acidentais podem ser de origem natural ou não. As acções exteriores naturais podem ser devidas à ocorrência de sismos, cheias, ventos fortes, variações térmicas, movimento das fundações, etc. As acções exteriores de origem humana podem ser devidas a colisão de veículos ou barcos sobre elementos estruturais, explosões, incêndios, acto de vandalismo, queda de objectos forçados, etc. . No entanto há acções acidentais, que podem ser previamente previstas e tidas em consideração na fase de concepção, como é o caso do dimensionamento para fazer face à acção sísmica e do vento, da colisão de um veículo ou de uma embarcação sobre os pilares e/ou o tabuleiro.

3.1.3.5. Patologias associadas à falta de manutenção e conservação

É na fase de exploração que o aparecimento de danos nas Obras de Arte se torna mais evidente. A ausência de manutenção e conservação é uma das principais causas do aparecimento e desenvolvimento das anomalias nas estruturas em geral. A obstrução dos órgãos de drenagem, a acumulação de vegetação e detritos, a falta de reparação superficial do betão devido a causas diversas, a falta de aperto das fixações das juntas de dilatação, entre outras situações, quando resolvidas, evitam a evolução das anomalias e o agravamento do seu estado.

3.1.4. Manifestação das anomalias e principais causas

Como é do conhecimento geral, a durabilidade do betão não é a espectável, o aparecimento de anomalias é quase inevitável, manifestando-se de formas distintas dependendo da origem e

elemento em que se manifestam. Muitas das patologias devem-se essencialmente à ausência de manutenção das obras, correspondendo normalmente às anomalias de índole não estrutural, mas também podem ser resultantes de um mau comportamento da estrutura ou dos materiais constituintes.

Como a identificação e recuperação das patologias depende do conhecimento da sua natureza, origem e evolução, serão apresentadas as principais patologias observadas nas estruturas de betão armado e as suas principais causas.

O quadro e figuras que se seguem pretendem descrever e resumir as principais patologias presentes nas Obras de Arte em betão armado, especificando as que têm influência com o seu comportamento estrutural.

Tabela 3.2 – Classificação das principais anomalias existentes nas Obras de Arte de betão armado, elementos em betão.

	TIPO	Patologia
ANOMALIA DE NÃO ESTRUTURAL	1	Vegetação / poluição biológica
	2	Defeitos na aparência: Escorrimentos, humidade, manchas, chochos (bolhas), exsudação e eflorescências
	3	Existência de pregos, varões de aço e restos de cofragem
ANOMALIA DE ÍNDOLE ESTRUTURAL	4	Delaminação / Descasque / desprendimento do betão: Armadura à vista, corrosão das armaduras, varão com diminuição de secção, varão cortado
	5	Fissuração do betão: Fenda longitudinal, transversal, diagonal, sob/sobre varão, fendilhação em “pele de crocodilo”
	6	Deterioração do betão: deterioração química; esmagamento; escamação, desgaste, desintegração; juntas de betonagem mal seladas; existência de vazios, zona porosa, ninho de inertes (Chochos)

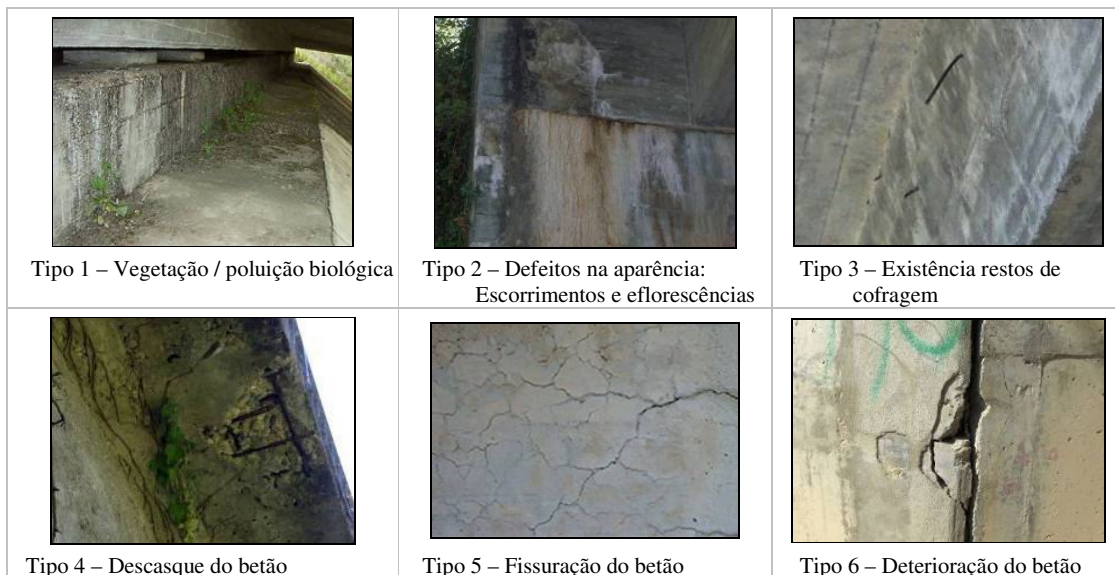


Fig. 3.19 – Exemplos de patologias em Obras de Arte de betão armado.

3.1.4.1. Anomalias não estruturais

As patologias não estruturais manifestam-se através da degradação da aparência da estrutura e correspondem a situações que quando rapidamente resolvidas, permitem melhorar significativamente o estado de funcionamento dos vários componentes da Obra de Arte.

Apesar de a curto prazo não colocarem em risco a segurança estrutural, caso não sejam realizados trabalhos de manutenção periódicos, este tipo de danos pode evoluir e contribuir para a deterioração precoce das estruturas. Este tipo de anomalias manifesta-se pela existência de:

- *Vegetação ou poluição biológica*

O crescimento de vegetação indesejável, pode não só dificultar ou impossibilitar o acesso à Obra de Arte, como também danificar elementos de construção, se a vegetação for de grande porte. A acumulação de detritos ou sujidade pode impossibilitar o movimento natural das estruturas e a presença de poluição biológica pode provocar o ataque químico dos paramentos das pontes.

- *Escorrimentos*

A inexistente ou incorrecta execução da impermeabilização dos elementos de betão e/ou dos órgãos de drenagem, podem levar à ocorrência de infiltrações e escorrências bem como ao aparecimento de humidades. A percolação de água no interior do betão pode originar o aparecimento de eflorescências, que não são mais do que depósitos de sais cristalinos (carbonado de cálcio) que se depositam nas superfícies do betão, apresentando-se sob a forma de manchas geralmente esbranquiçadas ou estalactites.

As patologias derivadas da deficiente drenagem e da inexistência de impermeabilização, podem despoletar rapidamente o desenvolvimento de mecanismos de deterioração dos elementos afectados.

- *Existência de restos de cofragem*

A existência de restos de cofragem, pode ser responsável pela deterioração precoce do betão, caso, por exemplo, existam pregos ou varões de esticadores de cofragem incorporados nos elementos de betão por retirar, que apresentem corrosão e que estejam em contacto com armaduras.

Tabela 3.3 – Classificação de patologias não estruturais e principais causas

ILUSTRAÇÃO	PATOLOGIA	CAUSA	
TIPO 1 - Vegetação / poluição biológica			
	Vegetação	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de água • Inexistência ou obstrução dos órgãos de drenagem 	
	Poluição biológica	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de animais • Falta de limpeza 	
TIPO 2 – Defeitos na aparência: Escorrimentos, Manchas, chochos, humidade e eflorações			
	Escorrências, humidade	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de órgãos de drenagem 	
	Manchas	<ul style="list-style-type: none"> • Segregação • Revibração 	
	Chochos, bolhas	<ul style="list-style-type: none"> • Defeitos no betão • Inadaptação da cofragem • Vibração insuficiente • Negligência durante a execução da obra 	
	Exsudação	<ul style="list-style-type: none"> • O excesso de água provoca um aumento do volume dos grãos finos durante a betonagem e vibração • Remoção prematura da cofragem 	
	Eflorações	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de água 	
TIPO 3 - Existência de pregos, varões de aço e restos de cofragem			
	Existência de pregos, varões de aço, restos de cofragem	<ul style="list-style-type: none"> • Defeito de construção 	

3.1.4.2. Anomalias de índole estrutural

A identificação das patologias estruturais deverá ser cuidada, criteriosa e detalhada, procurando descrever a anomalia, evidenciando a sua forma, localização, extensão, natureza, origem e influência no comportamento global da estrutura.

Apresenta-se de seguida algumas das deficiências estruturais que por vezes se desenvolvem nas estruturas de betão armado e pré-esforçado.

- *Delaminação ou descasque do betão*

A ocorrência de delaminação ou descasque de betão corresponde a um fragmento que se solta da massa do betão e pode ser originada por acções físicas causadas por forças exteriores (choque de um veículo, deformação de uma parte da obra) ou por acções químicas (devido à expansão da corrosão das armaduras, gel).

A ocorrência desta anomalia ocorre geralmente sobre as arestas e cantos ou ao longo do traçado das armaduras e pode ter diferentes graus de desenvolvimento, dependendo se apenas corresponde a uma delaminação superficial, a um descasque do recobrimento de betão colocando a armadura à vista ou a um descasque de betão ultrapassando a espessura de recobrimento e apresentando já corrosão das armaduras com eventual diminuição de secção.

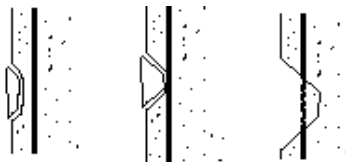


Fig. 3.20 – Evolução do descasque de betão

As principais consequências do aparecimento desta patologia são a diminuição de secção resistente dos elementos e o facto de colocar à vista as armaduras, contribuindo para a sua degradação precoce.

- *Fissuração*

Nas estruturas de betão armado as fissuras não são consideradas como anomalia se forem finas, bem distribuídas (em geral $W \leq 0,3$ a $0,4$ mm) e se a quantidade não evoluir. A evolução da fissuração, em número, abertura e largura, permite que se presuma que a estrutura apresenta problemas de comportamento estrutural.


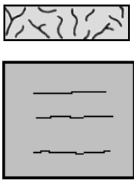


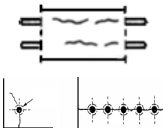
A presença de fissuras de determinada dimensão permite a penetração de agentes agressivos que pode originar a corrosão das armaduras. A ocorrência fendas ou de fissuras importantes ($W \geq 1$ cm), em geral é acompanhada de deformações visíveis e é um sinal de plastificação das

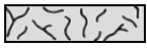
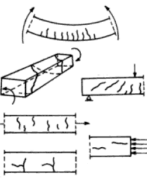
armaduras, de rotura de aderência, de corrosão avançada, etc. que pode implicar a restrição de cargas e de velocidade ou até mesmo em casos mais graves o encerramento do tráfego.

Deste modo é então fundamental efectuar medições periódicas das fissuras no sentido de se averiguar se a patologia evoluiu, para tal deverá ser realizado o levantamento da abertura em 3 pontos (início, fim, meio) e registado se a fissura se encontra seca ou húmida. A forma mais simples e mais económica para monitorizar fendas consiste na colocação de testemunhos ou fissurómetros.

A Tabela 3.4 pretende-se apresentar uma breve descrição dos diferentes tipos de fendilhação.

Tabela 3.4 – Manifestação patológica e causas do aparecimento de fissuras nas estruturas de betão (adaptado de Radomski 2002 e Laner 2001)

Tipo fissura Ilustração	Manifestação patológica	Principais causas	Período de formação	Comentários e abertura de fendas	Medidas preventivas e correctivas
 Assentamento plástico	Fissuras ao longo da zona reforçada com armaduras Manifestam-se em zonas onde há alterações da secção do elemento (lajes variáveis, tipo pilares, secções espessas)	Assentamento plástico Exsudação excessiva Secagem rápida	Poucas horas após a betonagem (10 minutos a 3 horas)	As fissuras podem apresentar aberturas maiores que 1 mm ($W > 1\text{mm}$)	Revibração ou redução da exsudação
 Retracção plástica	Padrão de fissuras em rede ou fissuras compridas na superfície de elementos submetidos a condições de secagem rápidas (lajes e pavimentos)	Retracção plástica Secagem rápida prematura ou armadura próxima da superfície Exsudação lenta	Poucas horas após a betonagem (30 minutos a 6 horas)	As fissuras podem apresentar aberturas de 2 a 4 mm ($w = 2a4\text{mm}$)	Melhorar a cura inicial
 Contração térmica precoce	Fissuras longas nas juntas de betonagem de muros. Outro tipo de fissuras dependendo da natureza dos apoios	Contração térmica prematura Calor excessivo Gradiente térmico excessivo Arrefecimento rápido	Primeiros dias após betonagem (1 dia a 2 ou 3 semanas)	Pode ser controlada pelo reforço de armaduras ($W < 0,4\text{mm}$), através da limitação de abertura de fendas ou pelo controlo da variação da temperatura	Reduzir calor ou isolar
 Retracção	Semelhante às fendas flexão ou de tracção	Retracção Juntas ineficazes Retracção excessiva Cura ineficiente	Algumas semanas ou alguns meses depois da construção	Geralmente com uma abertura de fendas pequena, se o elemento estiver bem armado ($w < 0,4\text{mm}$)	Reduzir a água melhorar a cura
 Corrosão da armadura	Fissuras ao longo das armaduras, provocando delaminação de betão Na presença de água podem ser visíveis manchas de ferrugem na superfície de betão	Corrosão das armaduras Reduzido recobrimento Betão de baixa qualidade	Vários meses ou anos após a construção	Inicialmente as fissuras apresentam uma pequena abertura ($w < 0,2\text{mm}$) aumentando com o tempo	Eliminar causas que dão origem (meios húmidos, etc.)

Tipo fissura Ilustração	Manifestação patológica	Principais causas	Período de formação	Comentários e abertura de fendas	Medidas preventivas e correctivas
 Reacção alcalis- agregado	Ocorre geralmente em locais húmidos, e manifesta-se sob a forma de uma fendilhação em rede	Reacção alcalis agregado Agregados reactivos e cimento com alto teor de álcalis	Vários anos após a construção (mais de 5 anos)	As fissuras podem ter aberturas superiores a 1 mm ($W > 1\text{mm}$)	Evitar determinado tipo de agregados
 Cargas durante a utilização	Apresenta diferentes configurações dependendo do tipo de estrutura em causa e das cargas aplicadas	Cargas aplicadas Dimensionamento mal efectuado	Depende do uso da estrutura	Em geral são de pequena dimensão ($W < 0,2\text{ mm}$) se o dimensionamento estrutural for correcto. O aparecimento de fissuras de maior dimensão é um indicador de má concepção.	Consideração correcta das cargas aplicadas às estruturas durante o seu cálculo estrutural

As fendilhações devidas às cargas aplicadas resultam de solicitações superiores aos esforços previstos em projecto e manifestam-se de forma diferente dependendo do tipo de esforços que se desenvolvem nas secções. As principais causas resultam da ausência de armadura para fazer face a uma determinada solicitação ou ao posicionamento incorrecto ou quantidade insuficiente de armaduras.

A figura que se segue pretende ilustrar os principais tipos de fendas que se pode observar nas Obras de Arte devido à aplicação de cargas.

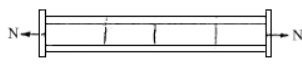
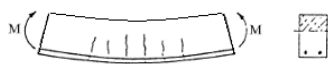

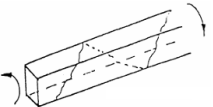
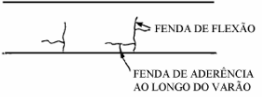
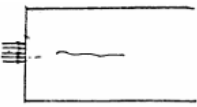
 <i>Fendas de tracção</i> Atravessam em geral toda a secção	 <i>Fendas de flexão</i> Fendas que se desenvolvem do bordo mais fraccionado para a linha neutra	 <i>Fendas de corte</i> Fendas que se desenvolvem obliquamente ao eixo da viga
 <i>Fendas de torção</i> Inclinadas em relação ao eixo da viga e que se desenvolvem em hélice	 <i>Fendas de aderência</i> Fendas que se desenvolvem ao longo das armaduras, partindo frequentemente da fenda de flexão.	 <i>Fendas por cargas concentradas</i> Fendas que se desenvolvem na direcção da carga aplicada

Fig. 3.21 – Tipos de fendas que podem aparecer devido à aplicação de cargas

Na Tabela 3.5 pretende-se apresentar as principais fissuras que podem ser observadas nos diferentes tipos de estruturas de betão armado especificando as suas causas.

Tabela 3.5 – Principais causas de fissuras em Obras de Arte em betão armado: Quadros e pórticos e pontes com tabuleiro em laje maciça (IQOA 1996)

Quadros e pórticos	
	<ul style="list-style-type: none"> A – Fissuras de retracção devido à diferença de idades dos betões da sapata e da parede B – Assentamento da zona central da Obra de Arte C – Fissuras devidas à flexão excessiva do encontro por ausência de drenagem D – Fissuras devido à retracção e / ou a uma flexão excessiva na zona de encastramento E – Fissuras que aparecem especialmente nos pórticos de grande largura e ocorrem devido ao assentamentos / deslocamentos das extremidades da laje F – Fissuras devido à flexão longitudinal da laje G – Fissuras devido aos esforços de flexão transversal da laje excessivos H – Fissuras devido à retracção geradas durante a betonagem
Pontes com tabuleiro em laje maciça	
	<ul style="list-style-type: none"> A – Falta de resistência à flexão longitudinal B – Falta de resistência à flexão transversal C – Retracção longitudinal do betão originada pelas cofragens D – Retracção transversal do betão originada pelas cofragens E – Retracção longitudinal do betão originada pelas cofragens F – Retracção transversal do betão executado em 2ª fase G – Insuficiente armadura para fazer face aos esforços de flexão nos cantos de menor ângulo dos tabuleiros em viés H – Aparecem nas pontes em viés e correspondem a falta de resistência à flexão transversal (gradiente térmico) I – Retracção originada pelas cofragens, falta de resistência à flexão transversal (gradiente térmico) ou assentamento local do escoramento J – Falta de resistência à flexão longitudinal da laje sobre os apoios ou assentamento do apoio L – Falta de resistência à flexão ou devido à retracção M – Assentamento do apoio N – Se forem em reduzido número devem-se a insuficiente resistência à flexão transversal ou a um assentamento local do escoramento, se forem numerosas devem-se à retracção. O – Insuficiente armadura para fazer face aos esforços que advêm das reacções dos apoios

Tabela 3.6 – Principais causas de fissuras em Obras de Arte em betão armado: Pontes de tabuleiro vigado e Estruturas tubulares em betão fabricado in situ (IQOA 1996)

Pontes com tabuleiro vigado	
	<p>A – Retracção do betão originada pela cofragem</p> <p>B – Retracção diferencial entre os dois betões</p> <p>C – Flexão longitudinal normal ou excessiva</p> <p>D – Insuficiente resistência aos esforços transversos (concentração de esforços sobre a zona dos apoios)</p> <p>E – Insuficiente recobrimento para proteger as armaduras longitudinais</p> <p>F – Não consideração dos esforços que advêm da reacção do apoio, associados à falta de armadura ou a um mau posicionamento dos aparelhos de apoio</p> <p>G – Impulsos exercidos no betão pelos esforços de ancoragem das armaduras longitudinais principais inferiores da viga</p> <p>H – Falta de recobrimento das armaduras transversais</p> <p>I – Falta de recobrimento das armaduras longitudinais originando corrosão. A expansão da corrosão provoca o descasque e destacamento do betão</p> <p>J – Retracção do betão da consola devido à sua execução após a betonagem da viga longitudinal</p> <p>L – Flexão longitudinal</p> <p>M – Defeito originado na construção devido à falta de estanqueidade da cofragem</p> <p>N – Flexão ou esforços locais originados pelo encastramento da carlinga nas longarinas (retracção diferencial)</p> <p>O – falta de recobrimento das armaduras originando corrosão.</p> <p>P – Esforços de flexão transversal</p> <p>Q – Armadura transversal insuficiente e / ou efeitos da retracção diferencial entre a laje e as vigas.</p>
Estruturas tubulares em betão fabricado in situ	
	<p>A – Retracção do betão ou insuficiência de resistência à flexão</p> <p>B – Retracção do betão, insuficiência de resistência à flexão e / ou a um carregamento assimétrico</p> <p>C – Retracção do betão, existência de um ponto duro sobre a laje de fundo e / ou a um levantamento da laje de fundo originado por um problema de fundação ou um sobredimensionamento da laje.</p> <p>D – Retracção do betão devido à sua execução em alturas diferentes</p> <p>E – Retracção do betão ou devido a um assentamento diferencial do solo de fundação</p> <p>F – Devido a impulsos assimétricos do aterro, associados a uma insuficiente resistência à flexão</p> <p>G – Devido a impulsos assimétricos do aterro, associados a um possível subdimensionamento da armadura</p>

▪ *Deformação excessiva*

A existência de deformações excessivas irreversíveis numa ponte são geralmente sinais aparentes de problemas internos na Obra de Arte. As deformações têm repercussões ao nível da geometria do pavimento e podem colocar em perigo a circulação rodoviária, podendo também dar origem ao aparecimento de patologias nos elementos estruturais (apoios, pilares, encontros) e nos equipamentos (juntas de dilatação, órgãos de drenagem, aparelhos de apoio).

As deformações podem-se manifestar pela observação de flechas excessivas, deslocamentos longitudinais ou transversais não previstos, movimentos anormais nos apoios e podem dar origem ao aparecimento de fissuras, solicitações suplementares em certas zonas da estrutura e a vibrações excessivas.

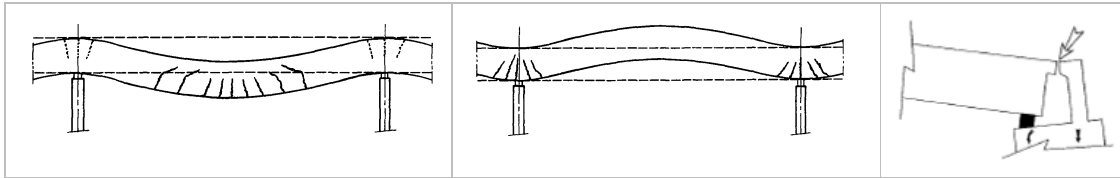


Fig. 3.22 – Exemplos de deformações excessivas









Este tipo de anomalias pode existir desde o início de vida da Obra de Arte, devendo-se a um movimento da cofragem ou a um assentamento do cimbrio apresentando um carácter inestético. Por outro lado, se os defeitos geométricos forem acompanhados de fissuras e se afectarem o tabuleiro, o guarda corpos e as cornijas, é sinal que se está presente de um defeito de resistência ou a assentamentos de apoio e deverão ser tomadas as devidas medidas de precaução.

▪ *Deterioração do betão*

A capacidade resistente do betão pode ser reduzida em consequência da ocorrência de variadas formas de deterioração do betão (3.1.1) que quando se encontram em fases avançadas podem mesmo conduzir ao colapso.

Esta patologia manifesta-se através do aparecimento de vazios, zona poro, nicho de inertes, escamação, desgaste, desintegração, esmagamento do betão, etc.

Tabela 3.7 – Classificação de anomalias estruturais e principais causas, alguns exemplos

	ILUSTRAÇÃO	PATOLOGIA	CAUSA PROVÁVEL
TIPO 4 - Delaminação / descasque / descolamento do betão: Armadura à vista, corrosão das armaduras, varão com diminuição de secção, varão cortado			
		Delaminação, descasque superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Defeitos de execução: Falta de recobrimento • Incêndio • Gelo degelo
		Delaminação e exposição de armadura	
		Descasque do canto	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão das armaduras • Choque • Defeitos de execução: Falta de recobrimento • carbonatação
		Descasque com exposição de armadura e diminuição de secção do varão	
TIPO 5 – Fissuração do betão: Fenda longitudinal, transversal, diagonal, sob/sobre varão, fendilhação em “pele de crocodilo”			
		Fendas	<ul style="list-style-type: none"> • Ver Tabela 3.4
		Mapa de fissuras	<ul style="list-style-type: none"> • Degradação interna reacção alcalis-silica • Ataque pelos sulfatos
TIPO 6 – Deterioração do betão: deterioração química; esmagamento; escamação, desgaste, desintegração; juntas de betonagem mal seladas; existência de vazios, zona porosa, ninho de inertes (Chochos)			
		Esmagamento do betão	<ul style="list-style-type: none"> • Defeitos de projecto / construção (ausência de aparelhos de apoio)
		Deterioração do betão com exposição das armaduras de pré-esforço	<ul style="list-style-type: none"> • Defeitos de construção • Agentes agressivos

3.2. Estruturas em alvenaria de pedra

As Obras de Arte em alvenaria de pedra ainda hoje desempenham um papel importante nas nossas vias de comunicação, no entanto, estas estruturas foram muitas vezes dimensionadas para cargas rodoviárias muito inferiores às actuais, precisando de ser reforçadas e alargadas.

A sua idade e as forças a que estão submetidas originam o aparecimento de patologias que muitas vezes se manifestam pelo aparecimento de fendilhação entre os elementos de alvenaria, originando a descompressão dos blocos de alvenaria.

As estruturas em alvenaria de pedra não são mais do que obras constituídas por pedras unidas por um ligante (argamassa, gesso, cimento).

3.2.1. Mecanismos de deterioração das alvenarias

A degradação das alvenarias depende essencialmente das propriedades dos materiais constituintes e das acções a que estão submetidas, que por sua vez podem ter origem em fenómenos naturais ou resultantes de intervenções humanas.

Os mecanismos de deterioração, podem ter origem biológica, química ou física e são muitas vezes responsáveis pela alteração da natureza dos materiais e pelo enfraquecimento das estruturas, através da diminuição da sua resistência.

O contacto da alvenaria com a água e a existência de vegetação são factores responsáveis pela presença de microrganismos nas pedras. Este agentes biológicos actuam sobre os materiais alterando a sua natureza.

Os materiais são muitas vezes atacados por agentes químicos, tais como a deposição de poluentes ou migração de águas contaminadas. As propriedades dos materiais também podem mudar naturalmente com o tempo, através da ocorrência de reacções internas espontâneas.

As acções físicas a que as obras em alvenaria estão submetidas, podem ter origem nas variações nos principais agentes climáticos, a água (gelo degelo), o vento (erosão) e a temperatura (expansão e contracção, acção do gelo, fogo, etc). Estes factores provocam acções mecânicas superficiais que são responsáveis pelo desgaste da alvenaria.

3.2.2. Factores que podem dar origem ao aparecimento de anomalias

A origem do aparecimento de patologias nas obras de arte de alvenaria de pedra está normalmente associada a diferentes factores:

▪ *Patologias causadas por problemas na concepção / projecto*

As patologias causadas por problemas na concepção das pontes em alvenaria estão normalmente associados a problemas nas fundações e ao subdimensionamento dos arcos e muros. Podendo também dever-se a problemas relacionados com a má especificação dos materiais a usar (argamassas, etc) e ao deficiente conhecimentos das suas características mecânicas, bem como a problemas relacionados com a análise dos esforços e verificação estrutural.

▪ *Patologias causadas por defeitos de construção*

As patologias que resultam de problemas que ocorrem durante a construção devem-se normalmente à fase de desmonte do cimbre e colocação em carga da obra, podendo ocorrer deformações na estrutura que perduram no tempo.

A má execução das fundações, por não se atingirem os terrenos de fundações previstos no projecto, pode também ser resultado de uma deficiente construção, que pode ser devida à má avaliação das características desses terrenos, por falta de meios ou deficiente tecnologia.

Durante a execução dos arcos, a colocação inadequada do material ligante entre as pedras, ou até mesmo a sua ausência, pode originar o descolamento dos elementos e o aparecimento de danos.

▪ *Patologias associadas às modificações das condições de exploração e ao aumento das cargas rodoviárias*

Muitas das obras de arte em alvenaria de pedra ainda se encontram em serviço e muitas vezes submetidas a cargas muito superiores às que estavam inicialmente dimensionadas. É evidente que as condições de exploração actuais são muito mais agressivas, não só do ponto de vista das sobrecargas rodoviárias (veículo tipo), como também dos efeitos dinâmicos a que estão submetidas, devido ao aumento da velocidade dos veículos que a atravessam.

As modificações das estruturas e das condições de exploração deste tipo de Obras de Arte também pode ser responsável pela introdução de esforços para as quais a estrutura não está preparada.

▪ *Patologias causadas por acções exteriores e acidentais*

As acções exteriores a que as obras de arte estão submetidas, são como já foi referido para as obras de arte em betão armado, devidas à ocorrência de fenómenos naturais (sismos, cheias,

ventos fortes, variações térmicas, movimento das fundações, etc.) e a acções exteriores de origem humana (colisão de veículos ou barcos, explosões, incêndios, acto de vandalismo, queda de objectos forçados, etc.). Destas solicitações é de realçar as acções que podem provocar assentamentos do terreno, podendo formar grandes fendas, desaprumos ou até mesmo a instabilidade global da obra.

▪ *Patologias associadas à falta de manutenção e conservação*

A falta de manutenção periódica pode levar ao crescimento de vegetação, que quando em grandes dimensões (raízes), pode originar o afastamento entre pedras e a degradação progressiva das obras de arte.

3.2.3. Manifestação das anomalias e principais causas

A identificação dos danos que afectam as Obras de Arte em alvenaria de pedra e as respectivas causas é objectivo deste subcapítulo, apresentando-se no quadro e figuras que se seguem um resumo das principais patologias presentes neste tipo de obras, especificando as que têm influência com o seu comportamento estrutural.



Fig. 3.23 – Exemplos de patologias em Obras de Arte de alvenaria de pedra (EP 2007)

Tabela 3.8 – Classificação das principais anomalias existentes nas Obras de Arte em alvenaria de pedra (Adaptado de Rodrigues 2008)

	TIPO	Patologia
ANOMALIA DE NÃO ESTRUTURAL	1	Vegetação / poluição biológica
	2	Humidade e eflorescências e presença de água no material de enchimento
	3	Perda de argamassa nas juntas
	4	Degradação do material pétreo
ANOMALIA DE ÍNDOLE ESTRUTURAL	5	Abertura de fendas longitudinais e transversais
	6	Infra-escavação e erosão das fundações
	7	Danos nos tímpanos
	8	Movimento dos apoios
	9	Deslocamento ou destacamento e ruína de elementos

3.2.3.1. Anomalias não estruturais

Correspondem a anomalias que apesar de a curto prazo não colocarem a causa a segurança da obra ou dos seus equipamentos, têm influência na sua utilização e durabilidade (Tabela 3.9).

▪ *Vegetação ou poluição biológica*

A presença de vegetação de pequeno e médio porte, musgos, fungos, líquenes e depósitos de origem biológica é uma constante em quase todas as estruturas. Estes factores aparecem em determinadas condições de humidade e luz e devido à falta de limpeza das obras, contribuindo para a aceleração da degradação da pedra.

A poluição biológica, para além de causar corrosão físico-química, actua ainda como fertilizantes para a vegetação. As raízes de plantas, principalmente plantas de grande porte, podem ainda ser responsáveis por acções mecânicas importantes, causando aberturas de juntas ou até fendas.

▪ *Humidade e presença de água no material de enchimento*

A água é uma das principais causas de degradação das estruturas. A presença de humidade no interior da alvenaria das pontes origina a deterioração das argamassas das juntas e consequentemente a presença de escorrências. Esta patologia manifesta-se em praticamente todos os componentes: arcos, pilares, encontros, muros e quebra-rios.

A humidade no interior da alvenaria pode ser originada por condensação do vapor de água presente no ar, penetração de água da chuva, absorção por capilaridade, evaporação e variações cíclicas do nível da água.

Tabela 3.9 – Principais problemas, ações preventivas, causas, técnicas de manutenção, conservação e reabilitação associadas às patologias não estruturais das Obras de Arte em Alvenaria (Adaptado Rodrigues 2008)

Principais problemas	Ação preventiva	Causa	Técnicas manutenção/conservação/reabilitação
TIPO 1 - Vegetação / poluição biológica			
<ul style="list-style-type: none"> • Degradação da pedra • Abertura forçada das juntas da alvenaria • Abertura de fendas • Ocultação de danos relevantes na estrutura 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza periódica da ponte • Limpeza periódica dos órgãos de drenagem • Colocação de órgãos de drenagem quando não existam 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de água nos seus paramentos e no interior da ponte • Exposição da ponte a condições agrestes de temperatura • Inexistência ou obstrução dos órgãos de drenagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza com jacto de água ou escova de aço tendo o cuidado de não remover ou danificar a argamassa de preenchimento das juntas de alvenaria • Remoção manual ou mecânica de vegetação • Aplicação de herbicida por pulverização sobre as raízes das ervas
TIPO 2 - Humidade e eflorescências e presença de água no material de enchimento			
<ul style="list-style-type: none"> • Aparecimento de vegetação infestante e poluição biológica • Aparecimento de eflorescências e escorrimentos de águas, com formação de estalactites • Desintegração das argamassas das juntas • Lavagem dos finos dando origem a vazios no material de enchimento • Diminuição da capacidade de carga • Aumento do impulso lateral nos tímpanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza periódica da ponte e dos órgãos de drenagem • Impermeabilização do tabuleiro • Colocação de órgãos de drenagem quando não existam 	<ul style="list-style-type: none"> • Penetração das águas das chuvas devido a falta ou a um inefficiente sistema de impermeabilização ou de drenagem do tabuleiro • Condensação do vapor de água da atmosfera e percolação da água existente no material de enchimento • Evaporação por aumento da temperatura e variação do nível da água do solo • Absorção de água por capilaridade devido à porosidade do material pétreo • Falta de limpeza da ponte 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza com jacto de água ou escova de aço tendo o cuidado de não remover ou danificar a argamassa de preenchimento das juntas de alvenaria • Limpeza dos órgãos de drenagem • Preenchimento ou selagem de juntas de alvenaria • Impermeabilização do tabuleiro
TIPO 3 - Perda de argamassa nas juntas			
<ul style="list-style-type: none"> • Problemas no comportamento mecânico da alvenaria da ponte 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção periódica 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de matérias orgânica e vegetação nos paramentos da ponte • Erosão provocada pela água das chuvas e do vento • Circulação da água no material de enchimento • Má qualidade das argamassas usadas no refechamento das juntas • Lavagem de finos no material de enchimento • Ataque químico das argamassas 	<ul style="list-style-type: none"> • Preenchimento ou selagem de juntas de alvenaria • Limpeza periódica da ponte
TIPO 4 – Degradação do material pétreo			
<ul style="list-style-type: none"> • Alteração ou destruição da pedra (ataque químico e físico) • Perda de secção da pedra com redução de resistência 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar a utilização de argamassas cimentícias • Análise da pedra e da argamassa 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições atmosféricas agrestes; • Ataque de agentes biológicos; • Normal utilização da ponte; • Uso de argamassas incompatíveis com o suporte pétreo; • Acção das chuvas e do vento directamente no material; • Acções de gelo/degelo e ataque químico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza periódica da ponte • Refechamento das juntas com argamassa apropriada

A sua presença pode ser evidenciada através da presença de manchas na superfície dos materiais, derivadas da absorção de água ou pela forma de escorrências.

▪ *Eflorescências*

As eflorescências são devidas à migração dos sais solúveis para a superfície dos materiais, onde se dá a evaporação da água de dissolução. Estes sais são responsáveis pela alteração superficial dos materiais devido à pressão de cristalização, à pressão de hidratação e à expansão térmica.

Os sais solúveis estão naturalmente presentes nos materiais das construções ou podem ser introduzidos pela absorção de água do solo ou da atmosfera através da superfície desses mesmos materiais.

▪ *Perda de argamassa nas juntas*

A perda de argamassa nas juntas das alvenarias deve-se às características da própria argamassa (composição, má execução, etc), a condições externas à estrutura, como sejam a erosão causadas pelo vento e pela água (acções de gelo/degelo e secagem/molhagem), presença de raízes de plantas, acção de micro organismos, quer à lavagem devido às infiltrações de água.

A perda de ligação entre os seus elementos constituintes, origina a diminuição da coesão/desagregação dos materiais.

▪ *Degradação do material pétreo*

A degradação dos materiais é normalmente originada por condições externas, que podem ter origem natural (temperatura, vento, chuva, água, etc) ou de natureza humana (uso de argamassas cimentícias, choques, etc).

As perdas de material aceleram a degradação da estrutura das pontes, ficando mais susceptível às acções atmosféricas e à acção das chuvas e do vento. A perda de secção dos elementos estruturais origina a diminuição da sua capacidade resistente, podendo provocar fendilhação, deformações ou até mesmo a sua rotura.

3.2.3.2. *Anomalias de índole estrutural*

A identificação deste tipo de anomalias tem especial relevância na medida em que indiciam um comportamento deficiente da estrutura, que pode vir a ter consequências no seu funcionamento global.

▪ *Abertura de fendas longitudinais e transversais*

A abertura de juntas deve-se normalmente a solicitações superiores às que a ponte tem capacidade de suportar, à ocorrência de assentamentos de apoio e à presença de água no enchimento da ponte.

As aberturas de fendas manifestam-se nos elementos estruturais, nomeadamente nos arcos, pilares e encontros, sob a forma de fendilhações transversais (Fig. 3.24) ou longitudinais (Fig. 3.25).

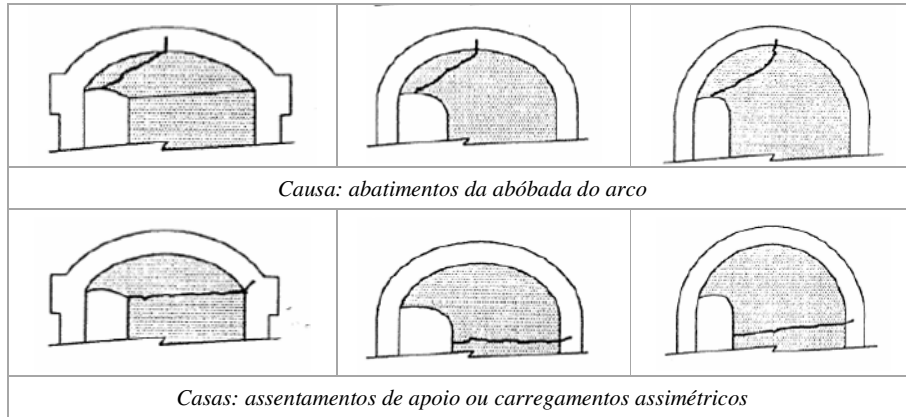


Fig. 3.24 – Tipos de fissuras transversais e possíveis causas (IQOA 1996)

Nas Obras de Arte em alvenaria de pedra as fissuras que aparecem nos arcos estão normalmente relacionadas com problemas nas fundações.

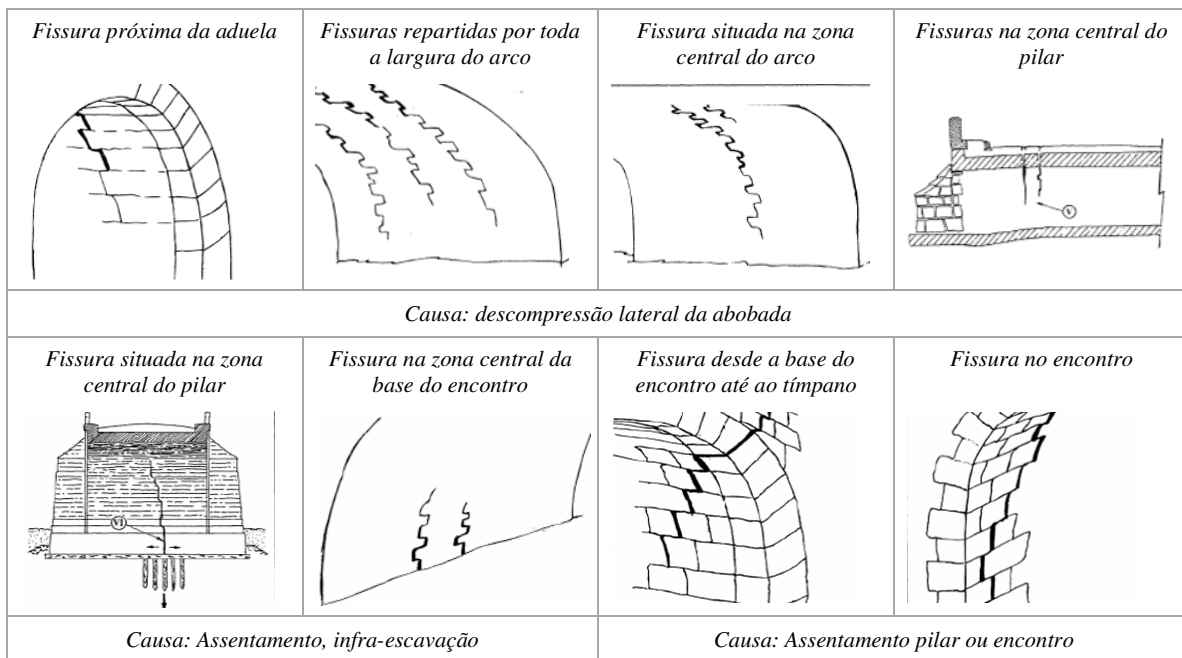


Fig. 3.25 – Tipos de fissuras longitudinais e possíveis causas (IQOA 1996)

Quando detectada esta patologia é importante efectuar a sua caracterização cuidada, de modo a se registar a sua dimensão, comprimento, direcção, localização e se a fissura ou fenda se encontra activa ou estabilizada, isto é, se é recente ou antiga e se há registos de evolução ao longo do tempo.

A existência de vegetação de grande porte entre as pedras das fundações dos pilares, pode também ser responsável pelo afastamento entre pedras e pela abertura de fendas.

▪ *Infra-escavação e erosão das fundações*

Os fenómenos de erosão das fundações e infra-escavação estão normalmente associados a mudanças nas condições de escoamento das linhas de água e ocorrem especialmente nas pontes com fundações superficiais.

O descalçamento das fundações devido às infra-escavações está normalmente associado a situações de cheia, em que a velocidade de escoamento aumenta, criando vórtices em torno dos pilares, originando a escavação da sua base (Oliveira e Lourenço 2003).

Este fenómeno é muitas vezes responsável pela ocorrência de assentamentos de pilares, que por sua vez são observáveis, através do aparecimento de fendilhações nos arcos e pilares, deslocamentos de guarda corpos e lancis, fendilhações nos pavimentos, etc. e em alguns casos pode mesmo originar o colapso das pontes.

A avaliação das condições envolventes das fundações nem sempre é fácil de detectar, mas é fundamental para se garantir a segurança estrutural da obra, deste modo, é recomendável a realização de inspecções subaquáticas periódicas e nos casos que se justifique o respectivo levantamentos batimétrico.

▪ *Danos nos tímpanos*

As principais anomalias que podem afectar os tímpanos são a inclinação, o empolamento, o escorregamento e a fendilhação do arco e o destacamento do tímpano, situações estas ilustradas na figura seguinte.

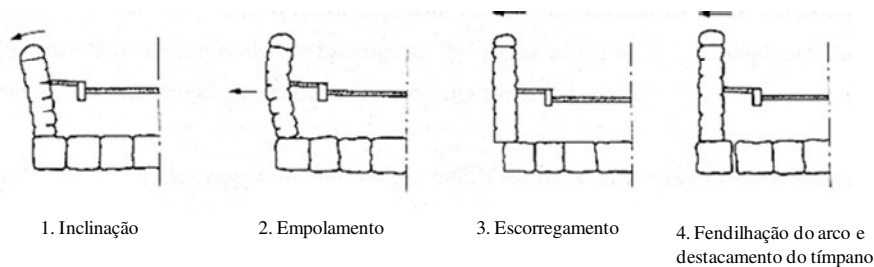


Fig. 3.26 – Danos que afectam os tímpanos (Gilbert 1993; Oliveira e Lourenço 2002)

Este tipo de dano está associado ao deficiente dimensionamento do tímpano para fazer face aos impulsos hidrostáticos a que está submetido, por não apresentar uma boa drenagem superficial do tabuleiro e do enchimento. O uso inadequado de materiais de enchimento, associado ao aumento das cargas rodoviárias a que este tipo de estruturas está submetido contribui para o aparecimento deste tipo de patologias, que em alguns casos pode mesmo levar à ruína da ponte (Oliveira e Lourenço 2003 e Rodrigues 2008).

Nos tímpanos também se pode observar a formação de fissuras, que podem ter localizações e configurações diferentes dependendo da causa que lhe deu origem (Fig. 3.27).

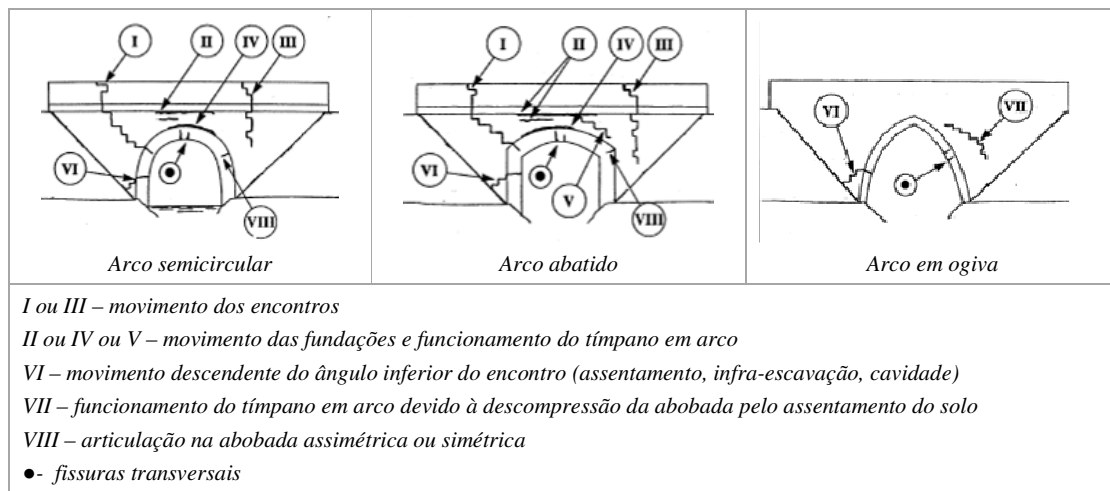


Fig. 3.27 – Tipos de fissuras que podem aparecer nos muros tímpano (IQOA 1996)

▪ *Movimento dos apoios*

O movimento dos apoios pode ser detectado pelo aparecimento de fendilhação no arco ou em casos mais graves pela formação de rótulas plásticas devido à descompressão do arco. Este fenómeno deve-se essencialmente à falta de capacidade de carga dos apoios ou a assentamentos das fundações.

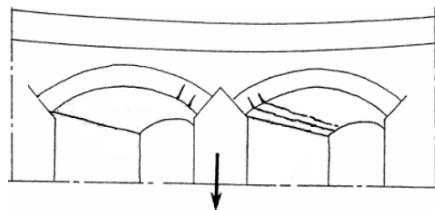


Fig. 3.28 – Tipos de fissuras nos arcos devido ao movimento dos apoios (IQOA 1996)

▪ *Deslocamento ou destacamento de elementos e ruína de elementos*

O comportamento estrutural de uma ponte em arco é condicionado pela baixa resistência da alvenaria à tracção, deste modo, a descompressão do arco pode originar o deslocamento ou destacamento de elementos, podendo mesmo ocorrer a rotura da obra de arte.

Este fenómeno pode ser devido a assentamentos das fundações, à presença de água no material do enchimento que provoca a perda de argamassa nas juntas e ausência de coesão entre as pedras, a carregamentos excessivos, etc.

Neste tipo de estrutura, o aparecimento de fissuras e a ocorrência de deslocamentos verticais, denuncia um comportamento próximo do colapso. Nestas situações as fendas denunciam a localização de rótulas plásticas, zona esta onde geralmente também ocorrem esmagamentos do material (Oliveira e Lourenço 2003). As figuras que se seguem pretendem ilustrar alguns mecanismos de rotura em arcos semicirculares submetidos a carregamentos excessivos e pontuais.

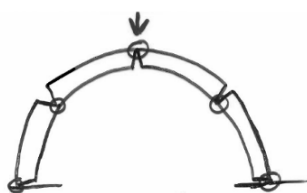


Fig. 3.29 – Mecanismo de rotura devido a uma carga pontual central

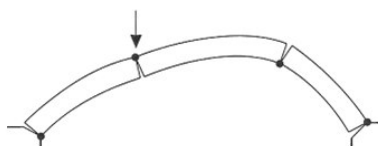


Fig. 3.30 – Mecanismo de rotura devido a uma carga pontual excessiva e assimétrica

A tabela que se segue pretende apresentar um resumo das principais patologias estruturais que afectam as obras em alvenaria de pedra e as causas que lhes deram origem.

Tabela 3.10 – Patologias de índole estrutura das Obras de Arte e respectivas causas




ILUSTRAÇÃO	PATOLOGIA	CAUSA
TIPO 5 - Abertura de fendas longitudinais e transversais		
	Fendilhação longitudinal no arco	<ul style="list-style-type: none"> • Assentamentos diferenciais das fundações; • presença de água na estrutura; • acções gelo/degelo; • impulsos do terreno, • impulsos horizontais devidos ao abatimento de arcos • impulsos transversais devido à presença de água nos solos • acções dinâmicas.
	Fendilhação transversal no arco	
	Fissuração no tímpano	

ILUSTRAÇÃO	PATOLOGIA	CAUSA
TIPO 6 – Infra-escavação e erosão das fundações		
	Erosão das fundações	<ul style="list-style-type: none"> • Alterações no regime de escoamento da linha de água e alterações nos seus leitos • deterioração ou ausência de protecção das fundações • má qualidade dos materiais constituintes das fundações
	Infra-escavação	<ul style="list-style-type: none"> • problemas geológico-geotécnicos dos terrenos de fundação • problemas de ordem geométrica dos pilares e encontros • transporte de detritos quando de cheias nas linhas de água.
TIPO 7 – Danos nos tímpanos		
	Danos nos tímpanos fissuração	<ul style="list-style-type: none"> • assentamentos de fundações • Deficiente drenagem do tabuleiro • presença de água no material de enchimento da ponte • uso inapropriado de certos materiais • incremento das cargas dinâmicas • deficiente dimensionamento dos tímpanos • circulação rodoviária muito próxima dos tímpanos.
TIPO 8 – Movimento dos apoios		
	Movimento de um apoio	<ul style="list-style-type: none"> • Deficiente capacidade resistente dos terrenos de fundação e de certos elementos da estrutura • assentamentos de fundações • alterações das condições do terreno de fundação ou da sua envolvente • acções dinâmicas (sismos, por exemplo) e incremento de carga sobre a ponte.
TIPO 9 – Deslocamento ou destacamento e ruína de elementos		
	Deslocamento de elementos	<ul style="list-style-type: none"> • Movimentos de apoio
	Falta de elementos constituintes	<ul style="list-style-type: none"> • descompressão dos arcos • existência de água no material de enchimento • má execução de certo tipo de intervenções na ponte • falta de manutenção, negligência e abandono das pontes.
	Ruína de elementos	

3.3. Estruturas metálicas

Actualmente as estruturas metálicas têm vindo a tornar-se novamente competitivas relativamente às pontes em betão armado. As pontes construídas em estrutura metálica assumem soluções estruturais muito diferentes, podendo-se encontrar pontes em arco, pontes suspensas, atirantadas, tipo pênsil ou apresentando uma configuração em treliça, constituídas por um sistema reticulado de barras simples ou compostas.

Apesar da tecnologia das pontes ter evoluído de forma eficiente ao longo dos anos, muitas das pontes existentes foram construídas há mais de um século e apresentam diferentes problemas patológicos. Neste contexto pretende-se apresentar de uma maneira geral a evolução das características dos materiais empregues ao longo do tempo e destacar as principais patologias que se pode observar neste tipo de estruturas, com a finalidade de se melhor compreender o seu comportamento e contribuir para a melhoria do seu desempenho.

A história das técnicas de construção das obras realizadas com estruturas metálicas está directamente ligada à evolução dos materiais utilizados e às formas geométricas escolhidas. Os materiais utilizados na construção das estruturas metálicas podem ser classificados em quatro grandes famílias (Sauvage 2003):

- ferro fundido, utilizado nas obras mais antigas, construídas em geral antes de 1860
- ferro pudlado, empregado nas obras construídas entre 1860 e 1900
- aço macio, usado nas obras construídas entre 1900 e 1940
- aço, utilizado nas obras construídas a partir de 1940.

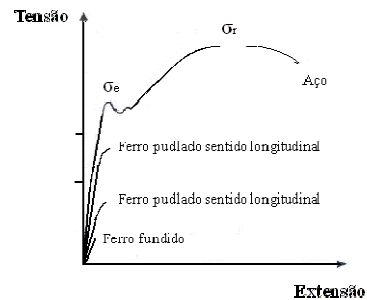


Fig. 3.31 – Gráfico σ/ϵ para os diferentes tipos de materiais

A evolução das características dos materiais utilizados nas estruturas metálica tem permitido obter melhores performances mecânicas e melhores características geométricas.

Tabela 3.11 – Características mecânicas dos materiais

	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	A %
Ferro	~ 180	~ 240	30
Ferro fundido	50-100	100-150	1-8
Ferro pudlado	250-340	320-400	5-30L/0(T)
Aço	235-460	420-710	15-25

No nosso país, os aços mais utilizados são o Fe360, Fe430 e Fe510, apresentando-se na tabela que se segue as resistências de cada um dos aços referidos.

Tabela 3.12 – Valores de cálculo das tensões resistentes

Tipo de aço	Tensões normais $\sigma_{rd} = f_{yd}$ (MPa)	Tensões tangenciais $\tau_{rd} = 1/3^{1/2} f_{yd}$ (MPa)
Fe 360	235	135
Fe 430	275	160
Fe 510	355	205

A ligação entre os diferentes elementos metálicos pode ser rebitada, aparafusada ou soldada. A técnica mais antiga é a utilização de rebites como elementos de ligação, no entanto actualmente só é empregue na reabilitação de estruturas antigas. Hoje em dia, a técnica mais utilizada é a da soldadura, contudo é necessário ter muitos cuidados com as disposições construtivas aplicadas.

A garantia de um bom nível de serviço deste tipo de estruturas ao longo do tempo depende na sua manutenção regular que contemple inspecções, pintura, reparações e o eventual reforço. Para que estas acções de manutenção e conservação sejam eficazes é fundamental que antes da inspecção se efectue uma análise cuidada de toda a documentação existente sobre a obra, que permita obter a informação disponível sobre as características dos materiais, processos construtivos utilizados, intervenções a que foi alvo, etc.

3.3.1. Mecanismos de deterioração das estruturas metálicas

Nas estruturas metálicas os mecanismos responsáveis pela sua deterioração podem dever-se ao ambiente onde estão inseridas (ambientes marítimos, industriais, produtos transportados por comboios, sais, ácidos, etc.), a características intrínsecas ao material ou a factores externos.

A degradação deste tipo de estruturas ocorre especialmente devido à formação de corrosão, por acção de fenómenos de ordem físico-química. O ambiente onde se insere a estrutura determina o ritmo de evolução da corrosão.

A corrosão pode provocar uma substancial redução da capacidade resistente dos elementos estruturais e das ligações e pode ocorrer sob diferentes formas: uniforme ou generalizada, por placas, alveolar, por empolamento, sob tensão, sob fadiga, galvânica, por esfoliação, etc.. O conhecimento do mecanismo de corrosão permite uma melhor identificação das suas causas e conseqüentemente ajuda na definição das medidas adequadas a aplicar na sua protecção.

A deterioração das estruturas metálicas também ocorre devido a fenómenos de fadiga dos materiais. Designa-se por fadiga a degradação progressiva das estruturas submetidas a ciclos sucessivos de carga e descarga, originando fortes variações de tensões, que se traduzem pela ocorrência de problemas nas ligações e pelo aparecimento de fissuras, danificando a estrutura

podendo mesmo originar uma sua ruptura frágil. O ferro fundido e os aços antigos apresentam baixa ductilidade e resistência à fadiga

3.3.2. Factores que podem dar origem ao aparecimento de anomalias

Como já foi referido para as Obras de Arte em betão armado e para as estruturas em alvenaria de pedra há diversos factores comuns a todas as Obras de Arte que são responsáveis pelo aparecimento de patologias independentemente do seu material estrutural. Esses factores são as acções exteriores e acidentais a que todas as obras inevitavelmente estão submetidas, as modificações das condições de exploração e ao aumento das cargas rodoviárias e o aparecimento de anomalias associadas à falta de manutenção e conservação.

Nas estruturas metálicas muitas das patologias que são observadas também poderiam ter sido evitadas na fase de projecto e construção. Para se minimizar a sua degradação precoce é fundamental que o projectista realize um projecto bem detalhado, que tenha em consideração a as fases de fabricação, pré-montagem, transporte e montagem. Um bom projecto pode evitar muitos problemas ligados ao aparecimento de corrosão, devendo contemplar a escolha e o posicionamento dos elementos estruturais de modo a impedir a acumulação de poeira e água e especificar sistemas de protecção do aço adequados tendo em consideração a agressividade do meio em que se insere a Obra de Arte.

Durante a fase de construção, é fundamental assegurar que as ligações entre a estrutura metálica e os restantes materiais a aplicar na obra seja bem executada, realçando-se a importância da ligação com as fundações. A ligação e a montagem dos diferentes elementos da própria estrutura, quer seja rebitada, aparafusada ou soldada, também deve ser cuidadosamente verificada pois permite evitar o aparecimento precoce de anomalias.

3.3.3. Manifestação das anomalias e principais causas

Entendidas as anomalias como evidências associadas às alterações dos materiais e aos múltiplos factores enumerados anteriormente, procurar-se-á apresentar as patologias mais comuns nas estruturas metálicas e as causas que lhes deram origem.

O quadro e figuras que se seguem pretendem descrever e resumir as principais patologias presentes nas estruturas metálicas, especificando as que têm influência com o seu comportamento estrutural.

Tabela 3.13 – Classificação das principais anomalias existentes nas Obras de Arte em estrutura metálica.

	TIPO	Patologia
ANOMALIA NÃO ESTRUTURAL	1	Presença de detritos e poluição biológica
	2	Desconsolidação, degradação, destruição da pintura
ANOMALIA DE INDOLE ESTRUTURAL	3	Corrosão de elementos metálicos e ligações (parafusos, rebites, soldadura)
	4	Desconsolidação das ligações
	5	Fissuração
	6	Deformações

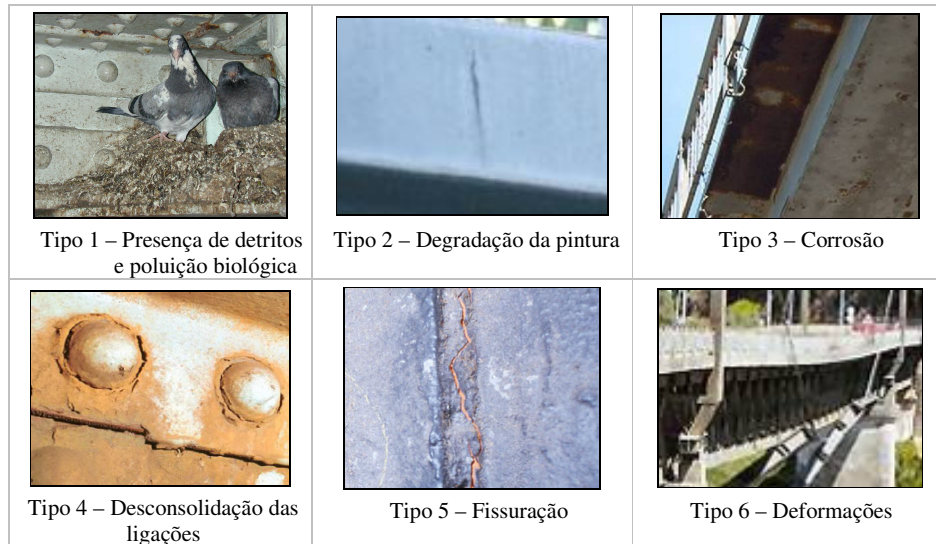


Fig. 3.32 – Exemplos de patologias em Obras de Arte em estrutura metálica.

3.3.3.1. Anomalias não estruturais

As anomalias não estruturais caso evoluam por falta de manutenção periódica, podem dar origem a anomalias estruturais.

- *Presença de detritos e poluição biológica*

A acumulação de excrementos de animais é muitas vezes responsável por acelerar o processo de corrosão das estruturas metálicas.

- *Desconsolidação, degradação, destruição da pintura*

A degradação do revestimento superficial de pintura é o primeiro passo para a entrada de detritos e humidade dando origem à corrosão.

3.3.3.2. Anomalias de índole estrutural

Apresentam-se algumas das principais anomalias estruturais que é possível observar em estruturas metálicas.

▪ Corrosão

A corrosão é o principal factor de degradação das pontes metálicas, que acompanhada de um ambiente propício à oxidação do aço (água e oxigénio do ar) e da falta de pintura, desencadearão um processo de perda de secção resistente, podendo comprometer o comportamento estrutural e funcional da Obra de Arte.

A formação de ferrugem dura enquanto o metal estiver em contacto com o oxigénio do ar e a água e a reacção é mais rápida nos locais onde a ferrugem já está formada. Em presença de condições atmosféricas corrosivas, na presença de produtos transportados pelos comboios, sais, ácidos, ambientes marítimos, o fenómeno de corrosão também é acelerado.

A presença de corrosão é mais comum nos elementos com faces horizontais, onde é favorecida a acumulação de água e detritos e nas superfícies onde os ventos são dominantes ou expostas a atmosferas industriais ou poluídas. Estas zonas da estrutura e as de ligação entre elementos, devem ser correctamente observadas, pois podem dar origem a corrosões localizadas que são as mais perigosas para a estrutura. A corrosão generalizada é o tipo de corrosão mais comum e menos agressivo para a estrutura, por não estar associado à perfuração ou danos estruturais e é essencialmente causada pela ausência de protecção contra o processo de corrosão.

No caso das estruturas metálicas em ferro pudlado é comum observar-se folhagem, originada quer pela formação de óxido de ferro (ferrugem) entre as chapas ligadas, quer pela formação de covas e aberturas, na superfície das chapas (Santos 1996). A tensão causada pela expansão da corrosão faz com que as chapas se abram, podendo provocar o arrancamento das cabeças dos rebites e fissuração das peças de ligação (Fig. 3.33).

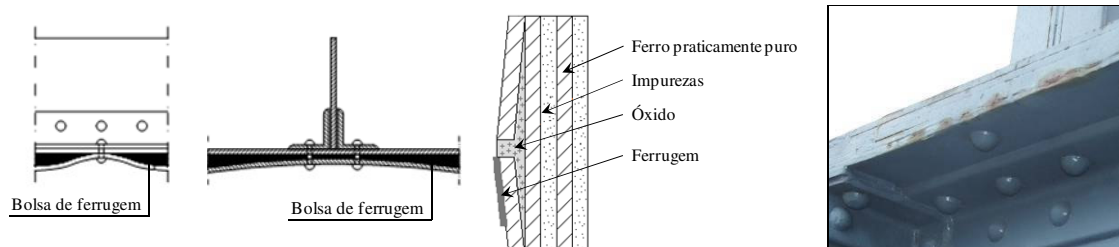


Fig. 3.33 – Patologia específica do ferro pudlado, (folhagem, formação de bolsas de ferrugem entre chapas)

▪ *Desconsolidação das ligações*

Nas estruturas metálicas as ligações entre elementos assumem um papel importante, já que condicionam o comportamento da estrutura.

Nas ligações rebitadas, a desconsolidação ocorre nas ligações mais solicitadas e os rebites são submetidos a esforços importantes de corte, ocorrendo em alguns casos o arranque das cabeças.

A desconsolidação das ligações aparafusadas, pode-se dar por desaperto devido a uma má montagem, rasgamento da chapa de ligação, esmagamento da chapa de ligação, solicitações superiores à capacidade do parafuso.

A desconsolidação dos elementos de ligação é muitas vezes identificada através da rotura do filme de pintura, do aparecimento de ferrugem, movimento do rebite, parafuso ou das peças, rotura, ovalização dos buracos, aparecimento de fissuras.

A desconsolidação das ligações é um fenómeno evolutivo que ocorre devido à fadiga, aos efeitos do choque e aos efeitos dinâmicos.

▪ *Fissuração por fadiga*

O aparecimento de fissuras nas estruturas metálicas nem sempre é fácil de se identificar e em geral é um indicador de um mau funcionamento da obra. A sua detecção implica um exame minucioso a todas as partes da obra, de forma a detectar fissuração na pintura ou um ligeiro aparecimento de ferrugem sobre a pintura.

As fissuras localizam-se em zonas onde há a concentração de tensões, ou seja, zonas onde há variações bruscas de secção, defeitos de soldadura, presença de cargas muito localizadas, efeitos de entalhe (buracos, cortes), deformações devido ao choque, defeitos metalúrgicos.

As fissuras originam-se devido à fadiga, aos efeitos do choque e aos efeitos dinâmicos e a sua propagação pode dar origem ao colapso da estrutura.

▪ *Deformação*

O aço é um material elástico, isto é até um determinado ponto deforma-se e volta à sua posição inicial, a partir desse limite entra em regime plástico, situação em que o elemento permanece deformado, podendo evoluir até à ruptura do elemento estrutural e da própria obra.

Nas estruturas metálicas as deformações manifestam-se sob a forma de alongamentos, fenómenos de encurvadura, bambeamento e enfunamento, dependendo do tipo de esforço a que estão submetidas.

As deformações excessivas podem ser causadas por sobrecargas ou acções térmicas não previstas no projecto, podem também dever-se a uma má concepção da estrutura ou a choques de veículos ou embarcações.

A deformação pode ser global ou localizada, dependendo se afecta localmente apenas uma parte específica da obra ou se corresponde a uma deformação conjunta da estrutura metálica do tabuleiro. As deformações globais são em geral difíceis de se observar e podem ser originadas por deslocamentos dos apoios, sobrecargas permanentes ou de serviço superiores às que a estrutura foi concebida para suportar. As deformações localizadas são geradas por esforços pontuais não previstos sobre partes das vigas metálicas.

3.4. Principais componentes das Obras de Arte

Tendo em consideração que os componentes aparelhos de apoio e juntas de dilatação caso apresentem danos têm influência no comportamento estrutural, serão apresentados num subcapítulo individualizado e é dedicado um outro subcapítulo para os restantes componentes, que, embora não tenham uma função estrutural, são importantes para o desempenho global da Obra de Arte.

3.4.1. Aparelhos de apoio

Os aparelhos de apoio em virtude da sua localização são elementos estruturais difíceis de serem inspeccionados, mas pela função que exercem devem ser mantidos em bom estado de conservação.

As anomalias verificadas nos aparelhos de apoio podem ser classificadas de acordo com o tipo de aparelho de apoio e com os movimentos por ele permitidos. As causas prováveis das anomalias também se podem dividir em vários grupos consoante a sua origem e podem ser devidas a deficiências de fabrico, má colocação, falta de manutenção e/ou conservação, problemas de concepção, causas naturais ou acidentais.

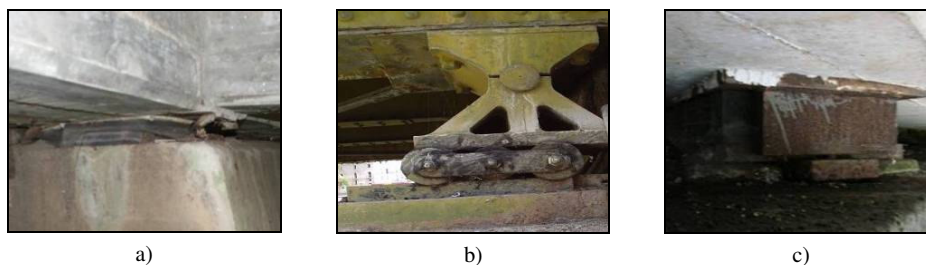


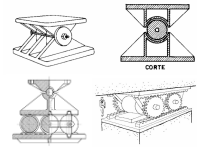

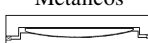


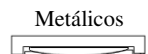
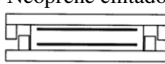
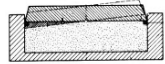


Fig. 3.34 – Exemplos das principais patologias nos aparelhos de apoio: a) Descolagem ou destacamento das camadas neoprene; b) Sair da guia ou tranca do rolete ou rolo; c) Corrosão do metal.

Seguidamente apresentam-se alguns quadros que caracterizam e classificam os vários tipos de anomalias, consoante o tipo de aparelho de apoio.

Tabela 3.14 – Principais anomalias dos aparelhos de apoio e causas prováveis (adaptado de Freire 2008)

TIPO AA	PATOLOGIA	CAUSAS PROVÁVEIS
Articulações de betão 	Esmagamento ou fissuração dos cantos dos AA	Deficiente dimensionamento; deficiência de armaduras; Sobrecargas excessivas; acidentes naturais
	Delaminação de betão	Deficiente dimensionamento; corrosão
Metálicos de pêndulo 	Inclinação excessiva ou deficitária dos pêndulos	Deficiente dimensionamento; Sobrecargas excessivas; Deficiente funcionamento; má colocação
	Inclinação diferenciada dos roletes	Sobrecargas excessivas; Defeito pontual; má colocação; ruptura base
Metálico de rolo ou rolete 	Fissuração ou ruptura do rolete	Deficiente dimensionamento; deficiência do material; acidente ou causa natural; corrosão excessiva; Sobrecargas excessivas
	Ovalização/ deformação do rolete	Deficiente dimensionamento; deficiência do material; acidente ou causa natural; corrosão excessiva; Sobrecargas excessivas
	Sair da guia ou tranca do rolete ou rolo	Deficiente dimensionamento; Deficiente funcionamento; má colocação; acidentes naturais
Painela  Metálicos 	Falta de lubrificação	Deficiente manutenção
	Inversão da colocação do aparelho de apoio	Deficiente dimensionamento; má colocação;
Neoprene cintado  Painela  Metálicos 	Corrosão do metal	Deficiente revestimento protecção; deficiência drenagem; Falta manutenção;
	Destacamento dos ferrolhos ou rebites ou parafusos	Deficiente colocação; deficiência do material; Falta manutenção; Sobrecargas excessivas; corrosão
	Desgaste diferenciado do teflon	Deficiência do material; Sobrecargas excessivas; deficiente funcionamento; deficiente dimensionamento
	Descolagem ou escorregamento das folhas de teflon	Deficiente dimensionamento; deficiência do material; Sobrecargas excessivas; falta lubrificação
Neoprene cintado  Painela 	Descolagem ou destacamento das camadas neoprene	Deficiente dimensionamento; deficiência do material; Sobrecargas excessivas; acidentes naturais
	Esmagamento do neoprene	Deficiente dimensionamento; deficiência do material; Sobrecargas excessivas
	Cisalhamento/distorção excessiva do neoprene	Deficiente dimensionamento; deficiência do material; Sobrecargas excessivas; deficiente funcionamento; acidentes naturais
Chumbo	Esmagamento do chumbo	Deficiente dimensionamento; fluência; Sobrecargas excessivas;

3.4.2. Juntas de dilatação

As juntas de dilatação são o componente que melhor reflecte a degradação das Obras de Arte, apresentando a maioria das vezes um comportamento indesejável durante o seu período de vida útil, sendo por isso conhecidas por serem “o ponto mais fraco das pontes”.

Apesar de estes componentes não apresentarem um comportamento estrutural, as suas patologias originam muitos problemas nas vias, causando um elevado desconforto para os seus utilizadores.

Tabela 3.15 – Classificação das principais anomalias existentes nas juntas de dilatação (Adaptado Lima 2006).

TIPO	Patologia
1	Transição para o pavimento / pavimento
1.A	Deterioração da banda de transição
1.B	Dano em guarda-cantos
1.C	Descolamento na transição
1.D	Existência de material betuminoso do pavimento sobre a junta
1.E	Arrastamento do material betuminoso do pavimento sobre a junta
1.F	Deterioração do pavimento
2	Geometria
2.A	Desnivelamento (acção de choque sob tráfego)
2.B	Irregularidade geométrica na junta / funcionamento da junta no plano do tabuleiro
3	Movimentação
3.A	Movimento da junta impedido
3.B	Junta /espaço da junta excessivamente aberta(o)
3.C	Junta / espaço da junta excessivamente fechada (o)
4	Fixação à estrutura
4.A	Deterioração /ausência da selagem de alvéolos de fixação
4.B	Pernos de fixação altos
4.C	Elementos de fixação soltos ou ausentes
4.D	Deterioração do leito de assentamento / zona de fixação
5	Junta /material da junta
5.A	Deformação da junta /material da junta
5.B	Fissuração /corte da junta / material da junta
5.C	Destaque de material da junta
5.D	Desgaste por abrasão de material da junta
5.E	Oxidação de elementos metálicos
5.F	Dano em elementos sub-superficiais do sistema de junta
5.G	Desagregação entre elementos de junta
5.H	Colapso /ausência de junta ou de módulos / partes significativa de junta
6	Impermeabilidade / drenagem
6.A	Infiltração de águas
6.B	Humidade / água estagnada no pavimento
6.C	Deficiência no sistema de evacuação de águas
7	Conforto de utilização
7.A	Falta de aderência
7.B	Emissão de ruído excessivo

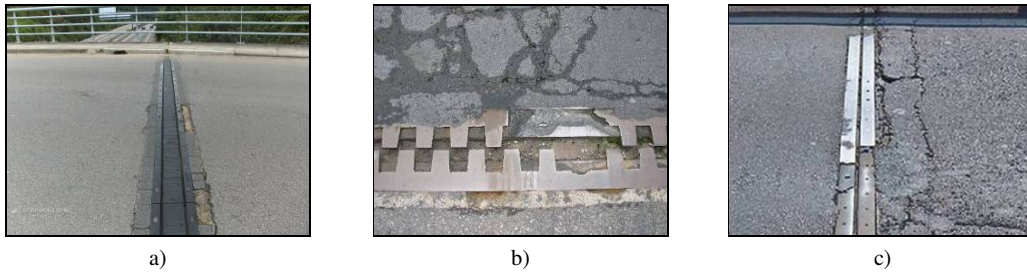


Fig. 3.35 – Exemplos de patologias em junta de dilatação: a) Deterioração da banda de transição; b) Ausência de pares da junta metálica; c) Deterioração do pavimento

Apresenta-se em anexo a classificação das anomalias mais comuns por tipo de junta (Anexo II). As causas prováveis para o aparecimento das patologias em juntas de dilatação podem ser devido a erros de concepção inadequada, problemas no fabrico, má colocação em obra, devido às acções ambientais ou acidentais a que estão submetidas, alterações das condições de serviço previstas, falta de manutenção, etc.

3.4.3. Outros elementos (órgãos de drenagem, guarda corpos, guarda de segurança, revestimento das vias e passeios, taludes, etc

Pretende-se apresentar as principais patologias observadas nos restantes componentes das Obras de Arte:

▪ *Órgãos de drenagem*

A presença da água é dos factores que mais contribui para a degradação das estruturas, neste sentido é fundamental que se incorporem órgãos de drenagem nas Obras de Arte e que se preserve o seu bom funcionamento a longo do tempo, através de acções de manutenção periódicas. As principais patologias que se podem observar neste componente são: dreno obstruído, gárgula obstruída ou não nivelada com o pavimento, caleiras partidas, falta de grelha e tubos de queda não revestidos, obstrução dos tubos de queda com cotovelos, ou em estreitamento de tubagem, etc.

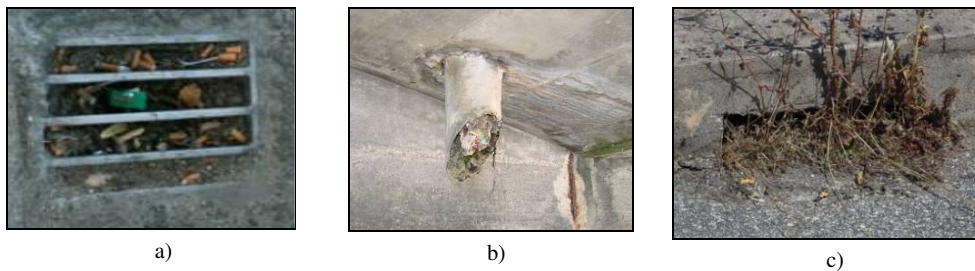


Fig. 3.36 – Exemplos de patologias nos órgãos de drenagem: a) Obstrução da gárgula ou sumidouro; b) Obstrução do tubo de queda; c) Obstrução da sarjeta

▪ *Guarda corpos*

Os guarda-corpos têm a função de protecção do trânsito pedonal e as figuras que se seguem pretendem ilustrar algumas das patologias que é possível observar neste componente, das quais se realça a presença de descasque pontual ou generalizado da pintura de protecção, deformações devidas a embates, má colocação dos elementos do guarda corpos, má fixação das suas bases, danos no betão, desalinhamento dos perfis, etc.

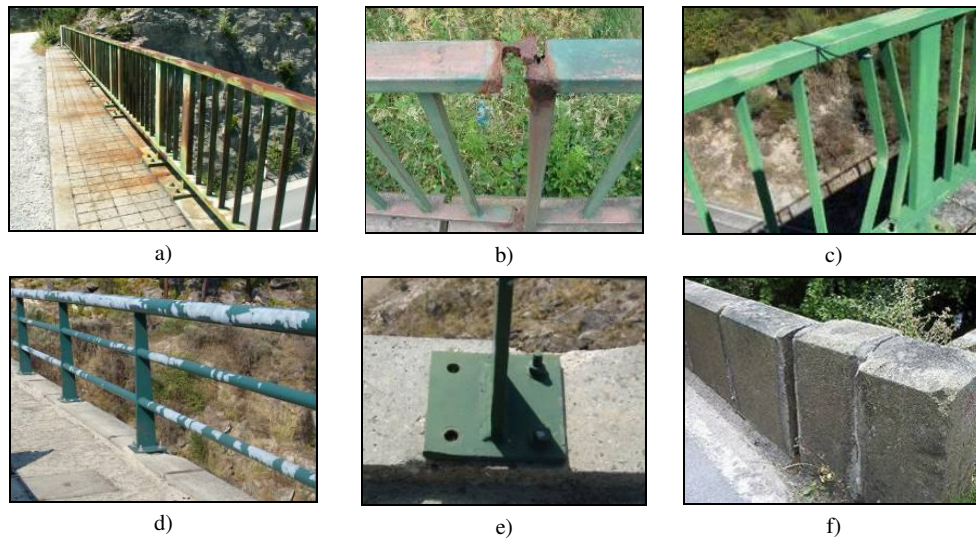


Fig. 3.37 – Exemplos de patologias nos guarda corpos: a) Corrosão dos elementos; b) Perda de secção; c) Elemento danificado; d) Deficiências da pintura; e) Falta de elementos de fixação; f) Deslocamento de pedras.

▪ *Guarda de segurança*

A guarda de segurança é um componente que contribui para a segurança rodoviária cujas principais patologias resultam de falta de manutenção periódica (falta de parafusos, furos ovalizados, parafusos e porcas soltas, corrosão de pernos, parafusos e anilhas, etc) ou de embates e/ou colisões de veículos, podendo observar-se deformações dos perfis do amortecedor, chapas amolgadas, falta de elementos da guarda de segurança, geralmente amortecedores, etc.



Fig. 3.38 – Exemplos de patologias nas guardas de segurança: a) Dano devido a um embate de um veículo; b) Corrosão das chapas de fixação e ausência de elementos de ligação.

▪ *Revestimento de vias*

As principais patologias que se podem observar neste componente são: existência de buraco, fendilhação longitudinal, transversal ou em “pele de crocodilo”, marcas dos pneus dos veículos (rodeiras) e assentamentos, desagregação de material, etc..

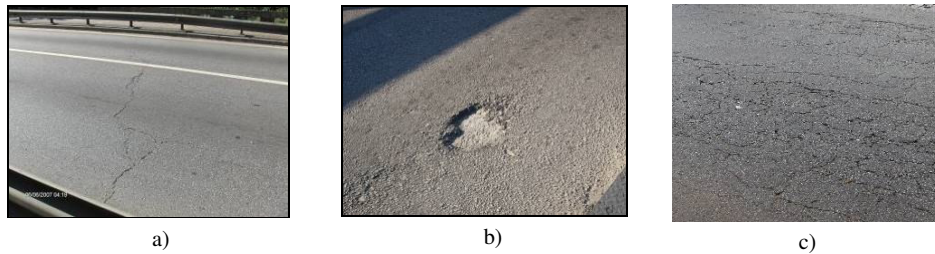


Fig. 3.39 – Exemplos de patologias no revestimento da via: a) Fendas no pavimento; b) Buraco no pavimento; c) Fendilhação em “pele de crocodilo”

▪ *Passeios*

As principais patologias que se podem observar neste componente são: fendilhação da argamassa de revestimento, danos ou falta de elementos pré-fabricados, ausência de chapa de prolongamento da junta no passeio, acumulação de lixos e detritos, etc.

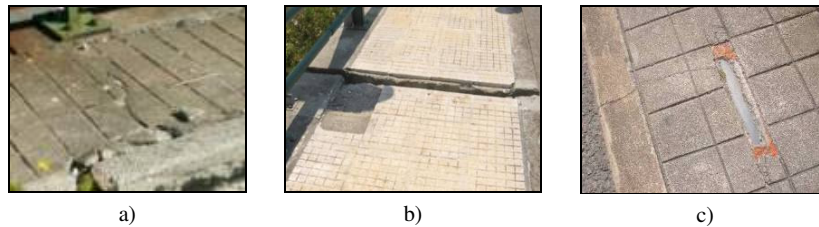


Fig. 3.40 – Exemplos de patologias nos passeios: a) Fendilhação da argamassa de revestimento; b) Falta de elementos e ausência de chapa de prolongamento da junta no passeio; c) Desgaste da argamassa esquarterada

▪ *Taludes*

As principais patologias que se podem observar neste componente são: erosão dos taludes, existência de elementos soltos ou partidos, presença de herbáceas, acumulação de detritos, sinais de fogueiras, existência de infiltrações de água, ravinamento ou colapso do perré, graffiti / sinais de ocupação humana, etc.

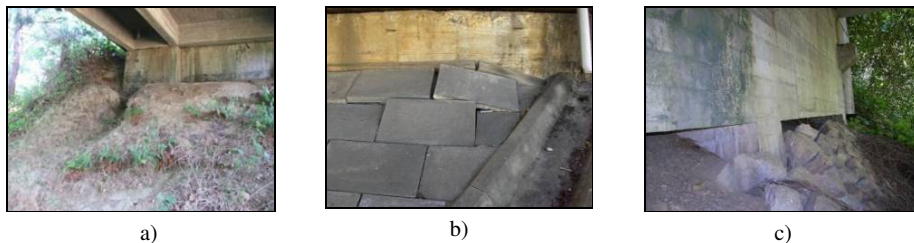


Fig. 3.41 – Exemplos de patologias nos taludes: a) Infiltrações de água; b) Existência de elementos soltos; c) Deslizamento do talude

▪ *Vigas de bordadura*

As cornijas são componentes que além da função estética servem de suporte ao guarda corpos. Estes elementos apresentam diferentes patologias, sendo a mais preocupante a possibilidade de queda de elementos na via inferior. Entre outras pode-se referir a presença de vegetação e/ou detritos, a existência de descasque do betão pontuais originados durante a colocação dos elementos ou devido a choque de veículos, a existência de delaminação por insuficiência de recobrimento com a eventual exposição de armaduras, etc.



Fig. 3.42 – Exemplos de patologias nas cornijas: a) Delaminação pontual do betão originado por um embate /colisão; b) Descasque do betão de recobrimento

Realça-se também a importância de se observar as patologias de todos os componentes ou elementos que contribuem para a segurança da obra de arte e de todos os seus utilizadores, a referir a sinalização, iluminação, infraestruturas, escadas, barreiras acústicas, postos de transformação, pórticos de sinalização, etc.

3.5. Principais causas de dano de pontes rodoviárias originadas pela acção sísmica

Em todo o mundo existem diversas regiões que são submetidas a uma actividade sísmica regular, chegando por vezes a ocorrer violentos sismos. As consequências da acção dos sismos dependem da magnitude da acção e da vulnerabilidade das estruturas afectadas.

Na história há diversos registos de pontes que ficaram gravemente danificadas ou que colapsaram por completo durante um abalo sísmico (ver Fig. 3.43). A análise dos efeitos dos sismos sobre as construções tem permitido reflectir sobre os princípios de concepção e a actualização da regulamentação existente, de modo a se procurar evitar a ocorrência de colapsos catastróficos.

A avaliação da capacidade de uma ponte para resistir às acções dinâmicas provocadas por um sismo é uma preocupação de quem dimensiona estruturas novas, cada vez mais complexas e flexíveis, mas também das entidades responsáveis por garantir a segurança de pontes existentes.

Deste modo, é fundamental analisar os danos sísmicos ocorridos nas pontes, para identificar os esquemas de comportamento deficiente da estrutura e permitir retirar ensinamentos importantes, melhorando a sua segurança face a um tremor de terra.

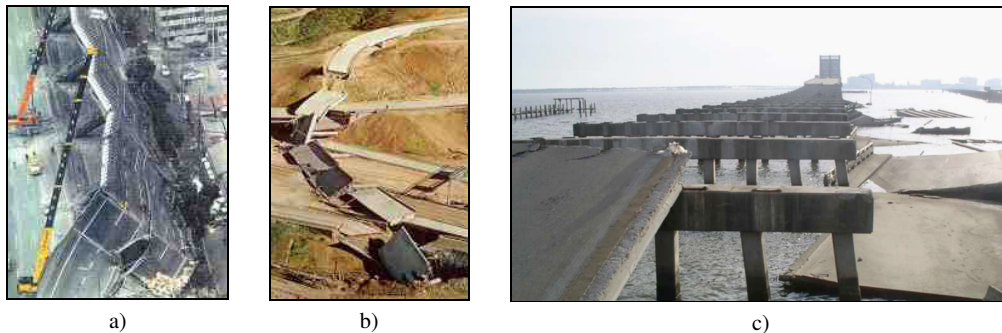


Fig. 3.43 – Exemplos de danos em pontes causados pela acção sísmica: a) Kobe 1995 Japão; b) San Fernando, Califórnia; c) Katrina, USA (Padgett e all 2008).

De uma maneira geral, pode-se dizer que um sismo não é mais do que um deslocamento induzido nas diferentes partes da ponte, provocando uma oscilação nos sentidos horizontal e vertical. A excitação horizontal pode conduzir a solicitações mais fortes, sendo a vulnerabilidade no sentido longitudinal superior à do sentido transversal.

A análise das anomalias em pontes causadas pela acção sísmica pressupõe que seja efectuado o enquadramento da época em que as Obras de Arte foram projectadas e construídas, para se ter noção das técnicas construtivas aplicadas e da regulamentação em vigor.

Os danos mais comuns nas pontes estão relacionados com problemas nas fundações, rotura por corte dos pilares, danos nos aparelhos de apoio e juntas de dilatação, que podem provocar o deslizamento transversal ou longitudinal das vigas e a sua queda.

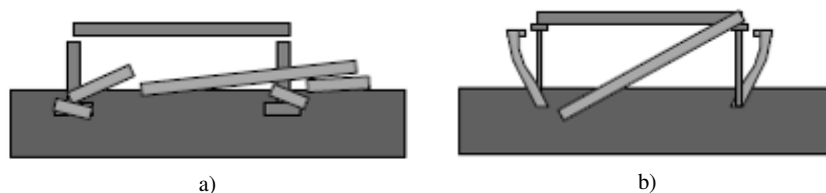


Fig. 3.44 – Esquemas de colapso de pontes: a) originado por problemas nas fundações; b) originado pela rotura por corte dos pilares (Kawashima 2009).

Os colapsos originados por danos nas fundações devem-se normalmente à ocorrência assentamentos de apoio causados pela instabilidade dos solos devido à liquefacção das areias ou dos solos. O fenómeno da liquefacção dos solos traduz-se numa redução da rigidez e da resistência devido à formação de pressões intersticiais durante a ocorrência dos sismos. Para fazer face a este fenómeno devem ser preconizadas fundações indirectas (estacas).

Um outro caso típico de dano é a rotura dos pilares por corte, podendo dar origem ao colapso da ponte, por uma rotura frágil, conforme se ilustra na Fig. 3.45. Tal deve-se à falta de confinamento lateral, causada pela existência de uma reduzida armadura transversal para fazer face aos esforços cíclicos combinados do transversal e esforços normais.



Fig. 3.45– Exemplos de danos em pilares devido à acção sísmica Kobe 1995: a) falta de confinamento lateral; b) dano num pilar curto (Kawashima 2009).

A altura dos pilares intermédios também tem influência no seu comportamento dinâmico, por exemplo quanto maior é a altura dos pilares, menor é o dano, porque os pilares curtos são em geral muito rígidos, apresentando um comportamento desfavorável face às solicitações entre os esforços transversos e os momentos, podendo conduzir a uma rotura frágil por corte (Kawashima 2009).

As pontes em betão com tabuleiro simplesmente apoiado, vigas gerber, juntas de dilatação nos apoios intermédios, apresentam o risco de queda do tabuleiro, devido à reduzida dimensão das mesas de poio.

Nas pontes de elevados comprimentos, constituídas por múltiplos vãos, é importante referir que o projecto deverá ter em consideração o desfaseamento da chegada do sismo, isto é, deverá prever que a propagação da onda sísmica pode atingir as diferentes fundações em tempos diferentes.

Muitas das Obras de Arte existentes não foram dimensionadas para suportar um tremor de terra, sendo caracterizadas, nos critérios actuais, por apresentar uma insuficiente segurança face aos sismos.

A avaliação do risco de uma estrutura existente sofrer danos perante a ocorrência de um sismo deverá contemplar, os seus efeitos potenciais sobre as Obras de Arte em função da sua vulnerabilidade. Em particular deverá ser analisado, o grau de hiperstaticidade da estrutura, a curvatura do viés da obra, comprimento da obra, altura dos pilares e encontros, o número de juntas de dilatação, vulnerabilidade dos aparelhos de apoio, regularidade do sistema de apoio, solo de fundação, risco de liquefacção, ano de construção, etc.

Concretamente, a avaliação de pontes existentes devem ter em consideração a existência de pontos frágeis típicos sobre a óptica sísmica, isto é, se a ponte apresenta grande curvatura ou grande viés, se existem articulações gerber, se os encontros apresentam paredes muito altas, se as mesas dos aparelhos de apoio são muito pequenas (ver Fig. 3.46 a)), se existem juntas sobre pilares intermédios, etc.

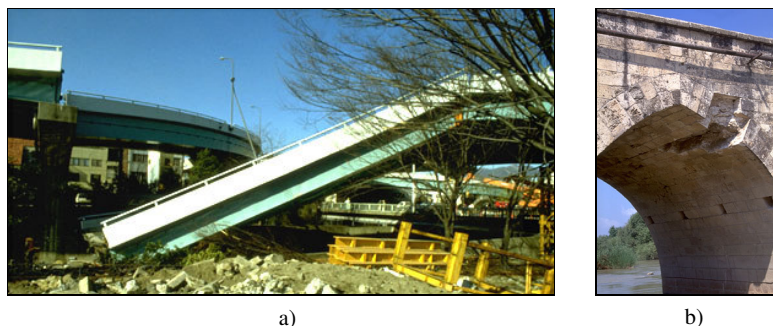


Fig. 3.46 – Danos causados pela acção sísmica: a) queda de um tabuleiro, kobe 1995; b) queda de blocos de pedra numa ponte em alvenaria, Turquia 1998 (Wenk 2005).

A observação dos diferentes colapsos ocorridos em todo o mundo, permite referir que as pontes que são em geral mais seguras do ponto de vista sísmico são as Obras de Arte em pórtico, as estrutura do tipo laje de betão armado ou pré-esforçado de vãos múltiplos (com pouco viés) e as pontes em viga pré-esforçadas por pré ou pós tensão, quando apoiados em apoios de neoprene com grandes mesas de apoio e caso se encontrem contraventadas. Por oposição, os colapsos de pontes foram observados em estruturas pouco hiperestáticas, contendo elementos de baixa ductilidade, resultantes de uma insuficiente quantidade de armadura transversal e/ou um excesso de armadura longitudinal mal distribuídas nas zonas que trabalham fora do domínio elástico (Calgaro e Lacroix 1997).

As pontes em arco em alvenaria de pedra são dotadas de uma grande rigidez longitudinal, e quando são submetidas à acção sísmica, as fundações dos dois hasteais que suportam o arco são solicitadas forma dessincronizada, podendo originar a descompressão do arco e a queda de blocos de pedra (ver Fig. 3.46 b)).

3.6. Principais conclusões

Com este capítulo pretendeu-se apresentar as principais anomalias que se podem observar nas Obras de Arte, e respectivas causas que lhes deram origem, de modo a se proceder a um diagnóstico do estado de conservação da estrutura e estabelecer as acções de prevenção e reabilitação a efectuar.

Importa realçar que uma boa detecção das anomalias implica que durante a inspecção se tenha presente os seguintes objectivos:

- análise completa do estado e do comportamento global da Obra de Arte
- observar e registar as condições de funcionamento de uma Obra de Arte
- registo e detecção das anomalias de todos os componentes das obras de arte, com eventual registo num esquema da obra
- critérios simples e rápidos de classificação das patologias com vista à sua reparação
- sistematização que possa ser aplicada a todos os tipos de obras
- optimização dos meios financeiros

É, portanto, muito importante identificar as anomalias, conhecer as causas, prever a sua evolução, conhecer os tipos e métodos de reparação e estimar os custos.

A abordagem que se apresentou, pretende contribuir para a melhoria das condições de execução, que passam igualmente pela melhoria dos projectos e pormenores construtivos, que muitas vezes são desprezados, apesar de serem fundamentais para a boa execução da obra e garantia de um bom desempenho durante a sua vida útil.

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO, REABILITAÇÃO E REFORÇO DE OBRAS DE ARTE

No capítulo anterior procurou-se efectuar uma abordagem geral dos efeitos que as acções, naturais e de origem humana, representam para a deterioração das estruturas e para o aparecimento de patologias. Pretende-se agora fazer referência a metodologias de avaliação da segurança de estruturas existentes, bem como apresentar algumas técnicas de reparação e reforço aplicadas a Obras de Arte, tendo por objectivo a melhoria da sua funcionalidade, resistência, segurança, e qualidade, no sentido de incrementar a sua durabilidade e desempenho.

Entenda-se por reforço qualquer intervenção estrutural que vise o aumento da resistência rigidez e/ou ductilidade dos seus elementos, por forma a melhorar o seu desempenho em relação ao estado inicial e por reparação todas as acções que tenham como finalidade repor os níveis de desempenho da estrutura inicial.

Quando se efectua um projecto de reabilitação, é fundamental que se conheça bem o funcionamento da estrutura em análise e as características dos materiais, os seus mecanismos de deterioração, os métodos disponíveis de avaliação da segurança, bem como as medidas de protecção e técnicas de reabilitação. É importante ter sempre em consideração a regulamentação em vigor aquando do projecto e construção da Obra de Arte.

Após efectuada a caracterização global do estado da estrutura e na definição de uma intervenção de reparação e/ou reforço, deve-se também ter em consideração os factores económicos e dificuldades técnicas, nomeadamente os custos de realização da obra, a

disponibilidade de mão-de-obra especializada, materiais e equipamento e a eficiência da intervenção. Na avaliação económica deve-se também ponderar a demolição da estrutura existente e construção de nova, considerando obviamente todos os custos e os impactos dos resíduos de demolição.

O investimento na reabilitação de pontes nem sempre é motivado pelo mau estado em que se encontram. A alteração do tipo de utilização da estrutura motiva também, por vezes, o reforço, devido ao aumento do nível de carregamento.

A decisão final sobre a intervenção na estrutura de uma ponte deverá ter em consideração a gravidade das patologias identificadas e se estas se encontram ou não estabilizadas. Esta análise irá condicionar a urgência da reparação e/ou reforço.

Com este capítulo pretende-se fazer referência à regulamentação que tenha em consideração as estruturas existentes, as metodologias de avaliação da segurança estrutural e a possíveis soluções e técnicas de reabilitação e reforço de obras de arte, em betão armado, alvenaria de pedra e estrutura metálica, com referência a alguns casos práticos. As soluções apresentadas apenas ilustram algumas possibilidades de intervenção, não constituindo um estudo exaustivo, realçando-se que cada solução, deverá sempre ser adaptada a cada caso concreto.

4.1. Regulamentação para estruturas existentes

A avaliação do estado de conservação e da segurança de construções antigas constitui um grande desafio para os engenheiros na reabilitação das estruturas em serviço. Tal deve-se, não só à eventual complexidade da geometria, à variabilidade das propriedades dos materiais, às diferentes técnicas de construção, como também à falta de conhecimento acerca do estado do dano provocado por acções que afectaram a construção durante a sua vida e à falta de normas aplicáveis à reabilitação (Lourenço 2005).

A regulamentação portuguesa actual é muito generalista no que diz respeito à manutenção e gestão de estruturas em geral e, em particular das obras de arte, dando maior ênfase à concepção / construção.

Por falta de regulamentação específica relativamente à fase de serviço das estruturas existentes, os projectos de estruturas são desenvolvidos em conformidade com os seguintes regulamentos, normas e especificações: RSA; REBAP; REAE; NP EN 206-1:2007 e Especificações LNEC relativas aos aços E449, E450, E452, E453, E455, E456, E457, E458, E459, E460, que estão direccionados essencialmente para estruturas em betão.

Na regulamentação nacional de definição de acções e de dimensionamento d estruturas listados anteriormente, apenas no art. 176º do Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) é feita uma referência genérica à manutenção e conservação de obras de arte. Este artigo menciona que as estruturas devem ser mantidas em condições que preservem a sua aptidão para o desempenho das funções para que foram concebidas e para tal deverão ser objecto de inspecções regulares e, se necessário, de reparações adequadas. Durante a vida da estrutura devem ser efectuadas inspecções regulares, que para pontes rodoviárias não sujeitas a ambientes particularmente agressivos recomenda-se que seja de 1 a 5 anos (REBAP (2001)).

Brevemente poderão ser cumulativamente utilizados os Eurocódigos estruturais, sempre que os mesmos abordem questões não focadas nos regulamentos nacionais, ou sempre que esses Eurocódigos contenham verificações mais restritivas. No entanto, a aplicação dos Eurocódigos depara ainda com a ausência dos designados NDP (Nationally Determined Parameters, Parâmetros de Determinação Nacional) referentes ao território Português.

A introdução dos Eurocódigos vem preencher várias lacunas ou completos vazios em alguns aspectos, contribuindo conseqüentemente para um significativo incremento na qualidade da construção nacional. Contudo, verifica-se que os Eurocódigos aplicáveis aos diferentes tipos de materiais estruturais, não contemplam ainda a reparação e o reforço de estruturas.

Apenas o Eurocódigo 8 (EC8), dedicado ao dimensionamento sísmico de estruturas, contém na sua Parte 3 disposições específicas para a reparação e reforço sísmico de edifícios, não estando considerado o caso particular das Obras de Arte.

A nível internacional, a maior parte das normas existentes ainda são aplicadas a construções novas, sendo aplicadas por analogia na análise da segurança e reforço das obras existentes. No entanto, há vários autores que se têm dedicado a este tema, existindo já alguns países que desenvolveram directivas regulamentares relacionadas com a durabilidade e reabilitação das estruturas.

Na Suíça, as normas estabelecidas pela SIA já contêm documentos específicos para construções existentes:

- Norma SIA 469 "Conservation des ouvrages" (SIA 1997)
- Directiva SIA 462 "Evaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants" (SIA 1994)
- Recomendações SIA 162/5 "Conservation des structures en béton" (SIA 1997)

Nos EUA existem diversas directivas regulamentares, mas sem carácter obrigatório, que têm em consideração a durabilidade das estruturas. O ACI Manual of Concrete Practice contém

especificações, recomendações e relatórios para estruturas em betão e alvenaria que servem de orientação durante as fases de projecto, construção e manutenção.

O Canadá também tem vindo a desenvolver normas para avaliação da segurança de estruturas existentes. As normas que se referem especificamente às Pontes no Canadá são a CAN/CSA-S6-00, CAN/CSA-S6-06 e CAN/CSA-S6-88 e aplicam-se à concepção, avaliação e reabilitação estrutural de pontes fixas e móveis. Apesar de não conter nenhum limite de vão, esta norma não cobre todos os aspectos relacionados com pontes de grande vão.

A Inglaterra tem já publicadas várias normas e recomendações para inspecção, manutenção, reparação e avaliação de estruturas rodoviárias. Refira-se as normas BA 16/97 e a BD 21/01 que estabelecem princípios gerais e a BD 56/96 que contém informação mais direccionada para pontes metálicas.

A Alemanha também tem dado alguns passos na avaliação da capacidade de carga das pontes existentes, tendo publicado a norma DIN 1076 para regulamentar as técnicas de observação e a inspecção das estruturas rodoviárias, bem como as técnicas para testar a sua estabilidade e segurança de utilização, e também um manual com indicações sobre a forma de registo, processamento e análise de resultados de inspecções: RI-EBW-PRÜF (Almeida 2003).

No Brasil as vistorias devem ser feitas conforme a NBR-9452 da ABNT, que dispõe sobre “Vistorias de Pontes e Viadutos de concreto”.

O Model CODE C.E.B. - F.I.P.90 CEP/FIP (1990) também faz referência, ainda que breve, aos aspectos de durabilidade relacionados com o projecto. Uma informação mais detalhada pode ser encontrada no Boletim de Informação nº 182 do C.E.B. (Costa 2003).

Na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo das directivas regulamentares em vigor em alguns países, descritas anteriormente.

Tabela 4.1 – Normas e directivas regulamentares disponíveis noutros países aplicadas a construções existentes

PAÍSES	NORMA
Suíça	Norma SIA 469 "Conservation des ouvrages" Directiva SIA 462 "Evaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants" Recomendação SIA 162/5 "Conservation des structures en béton"
EUA	ACI
Canadá	CAN/CSA-S6-00 CAN/CSA-S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code CAN/CSA-S6-88
Inglaterra	BA16/97 [Highway Agency 2001a] BD21/01 [Highway Agency 2001b] BD 56/96 [Highway Agency 1996] para pontes metálicas
Alemanha	DIN 1076
Brasil	NBR 9452 : Vistorias de pontes e viadutos concreto

No domínio da análise sísmica de estruturas existentes apresentam-se na Tabela 4.2 algumas normas em vigor noutros países.

Tabela 4.2 – Normas e directivas regulamentares disponíveis noutros países no domínio do dimensionamento sísmico de estruturas

PAÍSES	NORMA
EUA	AASHTO Standard Specification for Highways Bridges
Japão	JSCE Design Specification for Highway Bridges in Japan and Design Earthquake Motions
Nova Zelândia	NZ New Zealand Code
Europa	EC8 Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance (Part2 – Bridges)
França	Guide AFPS92 pour la protection parasismique des ponts
Itália	Ordinanza 3274-Disposizioni relative ai ponti
Espanha	NCSE-02 Norma de Construcción Sismoresistente

Tendo em consideração a crescente importância da reabilitação das construções antigas, considera-se imprescindível a elaboração e implementação de normas ou directivas paralelas ou complementares às de projecto, que sistematizem e englobem a análise e a avaliação da segurança das estruturas existentes.

4.2. Avaliação do desempenho de estruturas existentes

Ao longo da sua vida útil, as Obras de Arte vão sendo submetidas a diferentes mecanismos de deterioração, que por sua vez vão provocando a diminuição da resistência e do desempenho da estrutura em relação ao seu estado inicial. Para evitar um decréscimo acentuado do desempenho estrutural, ou mesmo, o colapso de estruturas, é de crucial importância avaliar se ainda verificam níveis de segurança adequados para fazer face às correntes solicitações.

A necessidade de se efectuar uma avaliação do comportamento estrutural de uma obra existente pode resultar de diferentes motivações. Uma das motivações deve-se, como se referiu anteriormente, a alterações à estrutura inicial da Obra de Arte, por apresentar danos estruturais e degradações dos materiais, que impliquem a realização de uma intervenção. Outra das razões pode resultar da alteração do uso da Obra de Arte, devido por exemplo à necessidade do seu alargamento ou reparação, que poderá implicar a verificação da estrutura. A necessidade de passar pontualmente um transporte especial, com uma carga superior à de projecto, pode igualmente exigir uma avaliação da capacidade da obra para suportar o novo carregamento, sem colocar em causa a sua segurança (Wisniewski 2007).

4.2.1. Metodologias de avaliação da segurança de estruturas existentes

Segundo as recomendações ICOMOS (2004), a conservação de uma estrutura existente deve seguir uma metodologia específica, que consiste essencialmente em adoptar um processo interactivo, entre as etapas de aquisição de dados, comportamento estrutural e diagnóstico e segurança (Lourenço 2005). A metodologia recomendada é apresentada de forma simplificada através do fluxograma da Fig. 4.1.

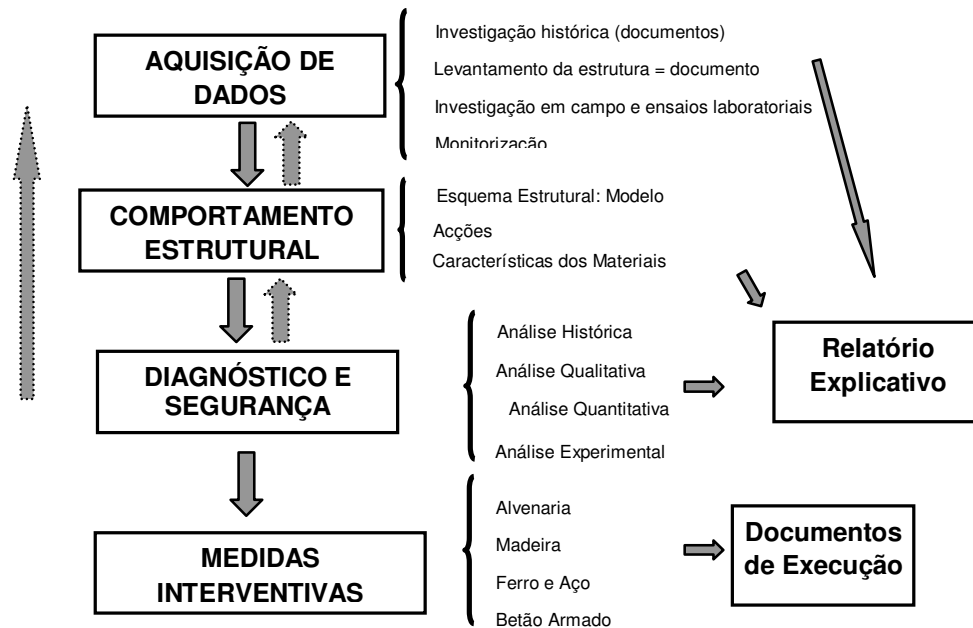


Fig. 4.1 – Fluxograma com a metodologia para intervenções estruturais do ICOMOS 2004 (Lourenço 2005)

As recomendações ICOMOS (2004) propõem uma metodologia para o projectista seguir na avaliação da segurança de estruturas com interesse patrimonial ou histórico, no entanto, podem perfeitamente ser adaptadas para qualquer estrutura existente que apresente sinais de deterioração. Deste modo, é recomendado que a avaliação do desempenho de uma estrutura tenha em consideração as seguintes etapas:

- Avaliação do estado da estrutura
- Avaliação da segurança
- Caracterização do tipo de intervenção
- Projecto de reabilitação

As etapas referidas dependem sempre do estado em que se encontra a estrutura. Se por exemplo, para algumas Obras de Arte, a análise do estado actual da estrutura, baseada na informação existente e na inspecção visual poderão ser suficientes para avaliar a sua segurança,

para outras, pode ser fundamental que se realize uma investigação mais detalhada e uma análise mais sofisticada (análise não linear, análise dinâmica, análise probabilística).

4.2.2. Avaliação do estado actual de estruturas existentes

A avaliação do estado de uma estrutura é a primeira etapa a realizar antes de qualquer intervenção, e é muito importante uma vez que é a base de todo o processo.

Esta fase de aquisição de dados contempla a recolha de informação geral e histórica sobre a Obra de Arte, considerando elementos relativos ao projecto (peças desenhadas e escritas), data de construção e dados importantes sobre a execução da obra (telas finais, livro de obra, etc.), regulamentos em vigor na altura em que foi elaborado o projecto e história da obra, isto é se a obra foi submetida a alguma intervenção (manutenção, alargamento, reabilitação, reforço).

Nos casos mais graves em que uma conservação preventiva não é suficiente (Fig. 4.2), esta etapa deverá também compreender o levantamento geométrico da estrutura actual, a identificação do sistema estrutural da Obra de Arte, a extensão dos danos e a realização de ensaios “in situ”, para avaliar as características dos materiais e o nível de degradação, como referidos por Castro e Martins (2006).

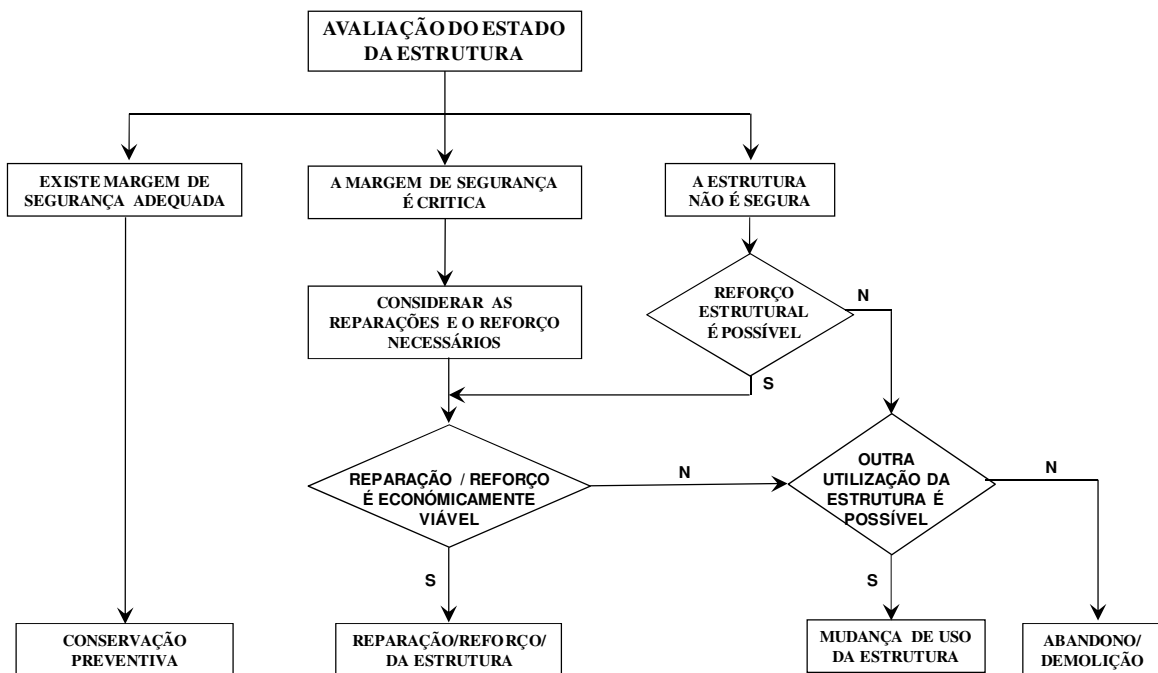


Fig. 4.2 – Estratégias de avaliação do estado de uma estrutura existente (Castro e Martins 2006).

Este procedimento é em muitos casos necessário devido à escassez de elementos de projecto para avaliar a estrutura e até pode ser imprescindível quando o projecto de estruturas não é

facultado. Para além disso, os materiais podem apresentar-se degradados e a estrutura construída pode não corresponder exactamente ao que consta no projecto.

4.2.3. Avaliação da segurança de estruturas existentes

Após a aquisição e tratamento da informação, deverá ser efectuada a avaliação do comportamento estrutural, que consiste em verificar se a estrutura tem capacidade para resistir às acções regulamentares.

A avaliação do comportamento estrutural é uma etapa fundamental em qualquer projecto de reabilitação e/ou reforço e pressupõe que se tenha uma vasta experiência sobre a evolução dos princípios de segurança, regras de cálculo, conhecimento sobre as acções actuantes e as propriedades dos materiais.

Actualmente para se efectuar este estudo recorre-se à modelação da estrutura com recurso a programas de cálculo, com análises mais ou menos complexas. Com base na análise da verificação da segurança efectuada, deverá ser desenvolvido o diagnóstico apropriado e decididas quais as medidas a tomar.

4.2.3.1. Modelos de análise estrutural

A avaliação do comportamento estrutural é actualmente efectuada através da modelação da estrutura com recurso a programas de cálculo automático. Estas ferramentas computacionais permitem estudar estruturas de grande complexidade (por ex. pontes históricas, pontes de grande vão), através da utilização de programas de elementos finitos. A utilização destas ferramentas exige a elaboração de um modelo matemático e a definição dos parâmetros mecânicos para a definição da resposta da estrutura.

Estes modelos estruturais procuram representar o comportamento real da estrutura e incluem a definição das características geométricas do sistema estrutural, das propriedades mecânicas dos materiais e da distribuição das acções na estrutura. Desta forma é possível introduzir os carregamentos na estrutura e obter os esforços, deslocamentos e por consequência as tensões instaladas em cada elemento estrutural. Os resultados obtidos permitem efectuar a sua verificação estrutural face à regulamentação em vigor ou a outros cenários de carga e/ou utilização específicos.

Na fase que antecede a análise de uma estrutura devem-se ter em consideração alguns aspectos relacionados com a metodologia a aplicar. A escolha da forma de análise depende das

particularidades de cada ponte, dos recursos disponíveis para a equipe de avaliação, dos aspectos económicos (custo/benefício) e da importância da obra.

▪ *Análise elástico-linear ou não linear*

Nas análises elásticas admite-se que os materiais possuem um comportamento linear elástico, ou seja, as deformações aumentam proporcionalmente ao aumento da carga, quer em compressão que em tracção, e a remoção de carga conduz à recuperação integral dos deslocamentos e deformações.

Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e tensões, isto é, todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada. No entanto, estas hipóteses nem sempre poderão ser consideradas e em certos casos a análise deverá contemplar a não linearidade do comportamento dos materiais e a não linearidade da geometria.

É de referir que, de facto, a maioria dos materiais apresenta um comportamento não linear, ou seja, à medida que a carga vai aumentando, a resposta se vai alterando. Por este motivo, esta análise não linear é mais laboriosa.

▪ *Análise dinâmica ou estática*

As acções sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devido às forças de inércia e de amortecimento para além das forças elásticas devido à variação das forças no tempo. Contudo em muitas situações é razoável considerar que as acções são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. A simplificação resulta do facto de a análise dinâmica ser mais complexa que a análise estática.

Um dos objectivos da análise dinâmica é determinar as deformações e tensões desenvolvidas numa estrutura que esteja sujeita a uma carga dinâmica qualquer. No entanto, a aplicação mais útil da análise dinâmica consiste em determinar as características de vibração da estrutura e sua resposta, através de uma análise dos modos de vibração e respectivas frequências naturais. Esta análise permite avaliar a importância dos efeitos dinâmicos na estrutura induzidos por diferentes cargas externas dinâmicas proporcionando uma visão completa das características dinâmicas da estrutura.

Importa salientar que a aplicação de cargas dinâmicas repetidas numa ponte flexível pode levar à ocorrência de fenómenos de ressonância, quando a frequência da solicitação ou alguns dos seus harmónicos é próximo de uma das frequências naturais da ponte.

4.2.3.2. Métodos de análise de segurança estrutural

A análise da segurança de estruturas existentes é bastante complexa, devendo uma abordagem correcta contemplar a utilização de métodos de análise que permitam melhor representar o comportamento das estruturas.

Os métodos de análise da segurança estrutural podem ter natureza determinística, ou probabilística.

- *Métodos determinísticos*

As análises determinísticas foram no passado muito utilizadas, pela sua simplicidade e conhecimento na época. Tal deve-se ao facto de estes métodos utilizarem coeficientes de segurança globais para limitar as tensões admissíveis na estrutura. Isto é, eles consistem em assegurar que as tensões máximas (σ) que se desenvolvem nas secções mais desfavoráveis serão inferiores a uma tensão dita admissível (σ_{adm}) que se calcula dividindo a tensão de ruína do material (f_r) por um coeficiente de segurança (k) adaptado ao material e ao tipo de solicitações aplicados ao elemento (ver equação 4.1).

$$\sigma \leq \sigma_{adm} = \frac{f_r}{k} \quad (4.1)$$

Nestes métodos a distribuição dos esforços ao longo da estrutura é avaliada através da teoria da elasticidade linear e as tensões são calculadas de acordo com os métodos clássicos da resistência dos materiais. Através destes coeficientes de segurança, reconhece-se implicitamente, a impossibilidade de prever e conhecer exactamente a resistência e as solicitações reais (Henriques 1998).

Estes métodos apresentam algumas limitações, porque os valores das acções e das resistências dos materiais são considerados fixos e não aleatórios e são utilizados os seus valores máximos, que raramente são atingidos durante a vida útil da estrutura, ficando os elementos estruturais sobredimensionados. Outra desvantagem destes métodos deve-se ao facto de não permitirem verificar a verdadeira margem de segurança do sistema estrutural.

- *Métodos probabilísticos*

A segurança absoluta de uma estrutura é muito difícil de ser garantida devido à incapacidade de prever as condições de carga futura e de conhecer com rigor as propriedades dos materiais, devido ao uso de hipóteses simplificativas para prever o comportamento da estrutura às acções actuantes e às condições ambientais, às limitações dos métodos numéricos usados e a outros

factores humanos. Para fazer face a este problema, houve a necessidade de desenvolver o conceito de segurança sob uma perspectiva probabilística, surgindo o conceito de probabilidade de rotura associado à definição dos níveis de risco identificados com as diferentes situações a evitar.

Actualmente, a verificação da segurança tem em consideração os estados limites a que as estruturas possam estar submetidas, definindo estados limites como situações a evitar. A filosofia de verificação da segurança aos estados limites introduziu novos métodos de cálculo que permitem considerar simplificadamente o comportamento real dos materiais e um tratamento mais adequado do carácter incerto da resposta estrutural e das acções, através da definição dos valores característicos e de cálculo (Henriques 1998).

Os métodos probabilísticos podem ser subdivididos em métodos semi-probabilísticos, probabilísticos simplificados, ou puramente probabilísticos.

A diferença entre os diferentes métodos de análise probabilística depende da forma como as variáveis são consideradas. Na análise probabilística simplificada as variáveis são descritas pela sua média e desvio padrão e a relação e dependência entre elas é traduzida pela matriz de covariância. Numa análise probabilística completa é considerada a distribuição conjunta da probabilidade de todas as variáveis.

Os métodos semi-probabilísticos da avaliação da segurança estrutural baseiam-se em critérios que tenham em consideração a probabilidade de rotura e as variações das variáveis que intervêm na definição de um estado limite, são consideradas de forma simplificada através de coeficientes de segurança (Henriques 1998).

A maioria das normas em vigor, como sejam o Regulamento de Segurança e Acções para edifícios e pontes (RSA 1983) e o Eurocódigo EC1 CEN (2002), estão baseados neste tipo de métodos. As acções e resistências são caracterizadas pelos seus valores médios ou característicos afectados de coeficientes de segurança. A utilização destes métodos torna-se complexa quando se pretende: analisar estruturas com comportamento não-linear; conseguir uma maior margem de segurança; assegurar uma maior vida útil; avaliar a segurança de estruturas existentes (Neves e Cruz 2001).

Pretendeu-se nesta secção fazer apenas uma referência sumária aos métodos de análise da segurança existentes que se baseiam em conceitos probabilísticos, procurando realçar a sua importância na avaliação do comportamento estrutural.

4.2.3.3. Verificação da segurança aos estados limites

Após se ter escolhido um modelo do comportamento estrutural para representar a estrutura e o método de análise mais apropriado, deverá ser efectuada a verificação da segurança face às novas exigências de utilização e ao estado actual da obra.

A verificação da segurança deverá ser realizada relativamente aos estados limites últimos, para assegurar que a ponte tem capacidade para suportar uma acumulação de cargas sem risco de colapso e aos estados limites de utilização, para que a ponte apresente um comportamento satisfatório sobre os efeitos combinados das cargas permanentes, acções rodoviárias, térmicas, etc. A verificação da segurança aos estados limites últimos pode ser expressa da seguinte forma:

$$S_d \leq R_d \quad , \quad (4.2)$$

$$\gamma_F \cdot S_k \leq \frac{R_k}{\gamma_M}$$

em que: S_d corresponde ao valor de cálculo do esforço actuante no elemento estrutural; R_d corresponde ao valor de cálculo do esforço resistente residual do elemento e γ_F γ_M definem os coeficientes parciais de segurança associados às acções e às resistências, respectivamente.

Entende-se por esforço resistente residual, a capacidade do elemento após este ter sido submetido ao historial de cargas ao longo da sua vida útil e considerando os danos nele instalados (Santos 2008).

O recalculo da estrutura deverá ter em consideração que a estrutura pode ter sofrido modificações desde a sua construção, devendo ser novamente avaliadas:

- Características dos materiais;
- Geometria
- Quantificação das acções
- Modelos de análise

Na Tabela 4.3 resumem-se os procedimentos a executar no cálculo dos esforços actuantes para verificação da estrutura aos estados limites últimos.

Após efectuada a análise da segurança estrutural, verifica-se a capacidade resistente dos elementos estruturais e caso necessário realiza-se o redimensionamento das secções e preconiza-se o dimensionamento do seu reforço.

Tabela 4.3 – Sequência de cálculo do valor dos esforços actuantes na verificação de segurança aos E.L.U. em estruturas existentes (Santos 2008)

DADOS		OBTENÇÃO DA INFORMAÇÃO
Materiais	Propriedades Mecânicas	<ul style="list-style-type: none"> • Projecto de estabilidade • Ensaio estruturais in-situ e em laboratório
Estruturas	Disposição estrutural	<ul style="list-style-type: none"> • Projecto de estabilidade • Levantamento estrutural em obra
	Secção transversal dos elementos estruturais	<ul style="list-style-type: none"> • Projecto de estabilidade • Levantamento estrutural em obra
Quantificação das acções		<ul style="list-style-type: none"> • Regulamentos em vigor. Regulamento de Segurança e Acções Para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA, 1983), Eurocódigo 1 (CEN, 2002) • Acções específicas
Coeficientes de majoração de acções		$\gamma_g = \begin{cases} 1,375 \times (\gamma_g - 0,1) \rightarrow \text{Estruturas danificadas } ^1 \\ 1,25 \times (\gamma_g - 0,1) \rightarrow \text{Estruturas sãs} \end{cases}$ $\gamma_q = \begin{cases} 1,65 \times \gamma_q \rightarrow \text{Estruturas danificadas} \\ 1,5 \times \gamma_q \rightarrow \text{Estruturas sãs} \end{cases}$ <p>γ_g = coeficiente de majoração de acções permanentes em estruturas existentes</p> <p>γ_q = coeficiente de majoração de acções variáveis em estruturas existentes</p>
Modelos de análise	Modelo elástico linear	
	Modelo elástico linear com redistribuição de esforços ²	
	Modelo não linear (material e/ou geométrico)	

4.2.4. Caracterização do tipo de intervenção

A decisão de intervir ou não numa determinada Obra de Arte depende de inúmeros factores já anteriormente referidos (Fig. 4.2). Deste modo, referem-se os possíveis tipos de intervenção, sendo que, alguns têm como finalidade repor ou aumentar a capacidade resistente de um elemento estrutural ou de toda a estrutura:

- Não intervir
- Conservação preventiva (reparar em pequena escala)
- Reparar e eventualmente reforçar
- Reforçar
- Limitação do uso – redução das acções sobre a estrutura

¹ No caso de estruturas existentes, a incerteza quanto à importância de uma dada acção na resposta de uma estrutura danificada é maior relativamente a uma estrutura nova, pelo que deverão ser adoptados os coeficientes de segurança propostos no Boletim n.º 162 do CEB (1983)

² Modelo mais adequado tendo em conta a história de tensões e o efeito da fendilhação do betão na distribuição dos esforços

- Mudar de uso da estrutura
- Abandono / demolição

Cada tipo de intervenção deve ser adequada e decorrente dos objectivos de segurança fixados, devendo procurar limitar a intervenção ao seu mínimo, garantindo a segurança e a durabilidade. No caso de construções com valor patrimonial deve-se ter o cuidado das intervenções não alterarem o valor histórico.

4.3. Soluções e técnicas de reabilitação e reforço de estruturas

Após inspeccionada a Obra de Arte e avaliada a natureza e extensão das patologias, acções de manutenção, conservação ou reabilitação e/ou reforço a implementar, dependem do estado em que se encontra a estrutura. Estas acções podem ser imprescindíveis para se manter a Obra de Arte em condições de segurança, serviço e aparência aceitável durante um determinado período de tempo expectável.

A implementação de programas de reabilitação de pontes, quer sejam antigas ou mais recentes, nem sempre é uma tarefa fácil, constituindo muitas vezes um enorme desafio para os técnicos envolvidos. Tal deve-se em muitos casos, ao facto de nas fases de concepção e projecto não se ter em consideração a sua manutenção periódica.

Comparativamente às obras novas, a reabilitação de obras existentes pressupõe um conhecimento rigoroso das técnicas de reparação existentes, dos materiais e dos produtos existentes no mercado, da duração da intervenção e dos resultados que se prevêem obter e obviamente e dos custos globais. Todos estes factores são importantes na prescrição dos métodos de reabilitação estrutural mais adequados.

4.3.1. Reabilitação e reforço estruturas em betão armado

Com as intervenções de reabilitação pretende-se eliminar e corrigir as anomalias existentes nas estruturas melhorando o seu desempenho global. Dependendo da importância das anomalias e das suas causas, bem como do objectivo da intervenção, isto é, se é atribuir à obra o seu desempenho inicial ou aumentar a sua capacidade portante, serão definidas as estratégias de reparação ou reforço, que melhor se adequam a cada caso.

Existem diversas soluções passíveis de serem adoptadas quando se pretende intervir numa Obra de Arte, dependendo da natureza e importância das anomalias, da necessidade ou não de manter a circulação de veículos na Obra de Arte e de factores técnicos e económicos.

Independentemente do método escolhido, sempre que se decide reabilitar uma Obra de Arte, deve-se ter em consideração os seguintes princípios de reparação do betão degradado:

- Análise do problema e definição da estratégia de reparação ou reforço;
- Selecção dos materiais e técnicas de aplicação;
- Preparação da superfície deteriorada;
- Reparação e protecção das armaduras;
- Aderência entre os materiais de reparação e o betão do substrado.

Apresenta-se de seguida as técnicas mais usadas na reabilitação e reforço de estruturas em betão armado.

▪ *Preparação da superfície deteriorada e protecção das armaduras*

A eficácia da intervenção de reparação depende entre outros factores da preparação da superfície degradada e do nível de aderência do novo material ao betão existente.

A preparação da superfície consiste em remover o betão solto ou degradado por meios adequados, tendo em conta o fim em vista, a função do elemento estrutural em causa e o grau de deterioração do betão e das armaduras.

Os meios a utilizar, devem depender da dimensão da superfície a intervir. Assim, para pequenas dimensões e locais de difícil acesso de equipamentos mecânicos deve-se utilizar a escarificação manual. Para grandes superfícies, deverá ser empregue os meios mecânicos de remoção do betão e preparação de superfície: martelo de agulhas, eléctrico ou pneumático, fresagem, jacto de areia, jacto de água, hidro-demolição, bombardeamento de esferas ou jacto de vapor (ver Fig. 4.3 b)).

Segundo o manual de reparação da EP (2006), a integridade do betão remanescente pode ser avaliada com um “pull-off-test”, admitindo-se $1,5 \text{ N/mm}^2$ como valor mínimo de tensão de adesão. Podendo este valor ser melhorado, através da remoção de uma maior quantidade de betão, que deve, no entanto, ser limitada à menor quantidade possível, de modo a não comprometer a integridade estrutural do elemento em causa.

A limpeza da superfície permite remover todas as poeiras, pequenos detritos, gorduras que possam ter remanescido após a remoção do betão, melhorando a rugosidade da superfície de contacto facilitando a aderência. Nos casos mais correntes a limpeza é realizada por lavagem com jacto de água ou areia, ou martelo de agulhas, no entanto a solução a adoptar deverá ser compatível com os produtos de reparação que serão aplicados (Fig. 4.3 c)).

Depois da limpeza, e a não ser nos casos em que se aplique um produto de reparação que exija um suporte seco, é aconselhado humidificar o paramento de betão para facilitar a aplicação dos produtos à base de ligantes hidráulicos. Assim, o grau de saturação da superfície será aquele recomendado pelo fornecedor do produto a aplicar.

A limpeza das armaduras remanescentes deverá ser efectuada por jacto de areia, ou lixamento e escovagem, manual ou mecânica, não sendo recomendável o uso de agentes químicos (conversores de ferrugem), que podem comprometer a adesão dos varões ao betão (Fig. 4.3 c)).

A limpeza irá permitir identificar quais os varões que apresentam uma redução de secção, e dependendo da área afectada, deverá ser definida a metodologia a executar: se é assegurar uma protecção dos aços com produto adequado; reforçar a área em falta de armadura por varões novos; ou substituir a área afectada por varões novos. Em qualquer um dos casos, devem ser garantidas as condições de aderência das extremidades dos varões e os comprimentos de amarração (Fig. 4.3 d)).

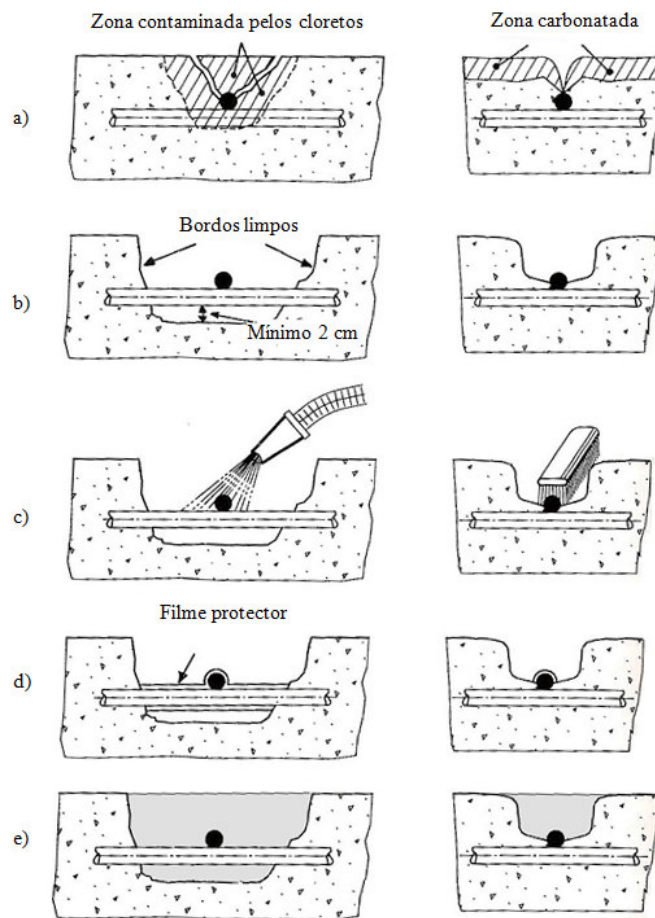


Fig. 4.3 – Diferentes etapas de preparação da superfície de betão degradada: a) zona afectada b) remoção do betão degradado; c) limpeza da superfície; d) protecção dos aços; e) aplicação de novo betão (adaptado de Calgaro e Lacroix 1997)

A reconstrução da superfície deteriorada por uma protecção adequada, deve sempre que possível, ser efectuada com materiais altamente alcalinos, à base de cimentos impermeáveis, com propriedades o mais parecidas possível com as do betão existentes.

O sucesso de qualquer reparação depende da escolha do material a aplicar, mais propriamente de dois factores: diminuição da retracção após colocação e da garantia de boa aderência ao betão existente.

Existe uma grande diversidade de produtos de reparação no mercado, que podem ser classificados em três grandes grupos: produtos à base de ligantes hidráulicos (cimento); produtos à base de resina (ligantes sintéticos); e produtos mistos à base de cimento e de polímeros orgânicos reactivos (Calgaro e Lacroix 1997).

▪ *Reparação e /ou reforço por encamisamento com betão armado (betão moldado “in situ”)*

A reparação local com argamassas apropriadas ou a substituição do betão degradado por outro de melhores características, fazem parte das técnicas mais utilizadas na reparação de estruturas em betão armado.

A reparação ou reforço recorrendo ao encamisamento com betão consiste no aumento da secção transversal através da adição de armadura suplementar e de uma camada de betão que envolve a secção inicial e na qual ficam inseridas as novas armaduras (Gomes e Appleton 1997).

Esta técnica é simples de executar, no entanto apresenta o inconveniente do aumento da dimensão dos elementos reforçados e o tempo de espera necessário para a presa e endurecimento (obtenção da resistência) do betão.



Fig. 4.4 – Reparação do betão e reforço das armaduras (Ponte da Barra, EP 2007)

▪ *Reparação e /ou reforço com betão projectado*

Esta técnica é correntemente utilizada na reparação e reforço de Obras de Arte e não é mais do que um processo mecânico de aplicação de betão sob pressão, por projecção, de uma forma contínua (ver Fig. 4.5).

A utilização de betão projectado, poderá ser utilizada nos casos que se pretende aumentar o recobrimento ou substituir o betão de má qualidade, em especial quando o volume de betão a ser substituído é grande ou é difícil a utilização de cofragem.

As características do betão projectado devem ser no mínimo iguais às existentes no betão sobre o qual será aplicado. Deve ser de base cimentícia, conter agregados dimensão reduzida e possuir uma baixa retracção, sendo preferencialmente aplicado por camadas.

No caso de ser aplicado sobre superfícies extensas, deve ser prevista a colocação de armadura de pele, para evitar o aparecimento de fissuras por retracção, e garantida a cura adequada por meio de repetidas molhagens. Durante a cura do betão aplicado, devem ser colocados plásticos sobre a superfície para minimizar os efeitos nocivos de secagem muito rápida do betão.

O alto grau de compactação e a baixa relação água/cimento asseguram boas características de resistência.

Existem essencialmente duas técnicas de aplicação betão projectado, via seca e via húmida, cuja diferença principal reside na ordem cronológica de execução das operações elementares. Isto é, na via seca, os agregados húmidos e o cimento são misturados e lançados por ar comprimido para a pistola de projecção, onde lhes é adicionada a água sob pressão. Na via húmida, a água, o cimento e os agregados são previamente misturados e transportados por ar comprimido até ao canhão de projecção onde é injectado, onde lhes é adicionado ar comprimido (Santos 2008).

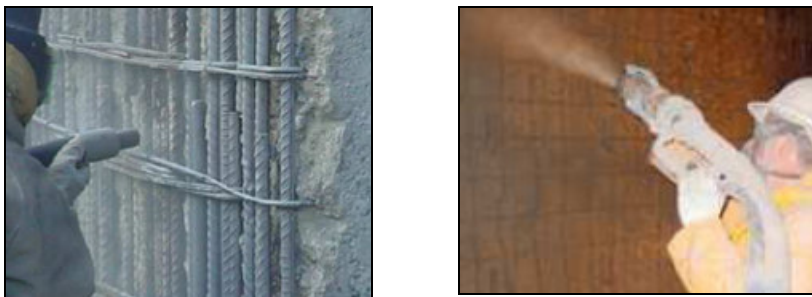


Fig. 4.5 – Pormenor de execução de betão projectado (Rodrigues 2005).

A qualidade de execução é fortemente dependente da qualificação e a experiência dos trabalhadores.

- *Reparação e /ou reforço com resinas epoxy e elementos metálicos*

Uma das técnicas de reparação de estruturas mais utilizada é a injeção de fendas com resinas epoxídicas. Este é o método mais generalizado para selagem de pequenas e médias fendas em estruturas de betão e destina-se a proteger as armaduras das acções ambientais (Fig. 4.6).



Fig. 4.6 – Injecção de fendas com resina epoxy (Rodrigues 2005).



Fig. 4.7 – Pormenor de colocação de buchas e chapas metálicas (Rodrigues 2005).

O reforço da estrutura com chapas de aço coladas ao betão com resina epoxy, adicionando ou não buchas metálicas (Fig. 4.7), é uma técnica que deverá ser realizada por pessoal qualificado e especializado, necessitando de um controle de qualidade e execução dos materiais rigorosa.

Trata-se de uma técnica bastante eficaz na redução da fissuração e da deformação do elemento de betão armado. A sua principal vantagem é o reduzido acréscimo que provoca nas dimensões da secção de betão armado e a rapidez de execução (Rodrigues 2005). Contudo, a resistência do betão nas superfícies de intervenção poderá condicionar a utilização desta técnica. Outro inconveniente da sua aplicação deve-se à facilidade do aço sofrer corrosão, havendo grande probabilidade da zona de colagem se deteriorar.

▪ *Reparação e /ou reforço com polímeros reforçados com fibras*

Os materiais constituintes de um sistema compósito FRP (“Fiber Reinforced Polymer”) são as fibras e as resinas. Na designação genérica de resina inclui-se os primários, os fillers, as resinas de saturação e os adesivos e as pinturas de protecção (Figueiras e Juvantes 2001).

A utilização de materiais compósitos na reabilitação de estruturas é uma técnica que apresenta inúmeras vantagens, nomeadamente a sua elevada resistência, o baixo peso específico, a elevada resistência à corrosão, boa resistência à fadiga, bom amortecimento ao choque e facilidade de aplicação, mas também alguns inconvenientes, como é o seu elevado custo, baixa resistência ao fogo, elevada toxicidade, necessidade de pessoal qualificado e rigoroso controlo de qualidade (Barros 2006).

O encamisamento com compósitos FRP é realizado com tecidos ou mantas flexíveis de fibras de carbono, vidro ou aramídicas impregnadas com resina epoxy e colocadas em torno do elemento a confinar, como se pode observar na Fig. 4.8. Esta técnica é bastante eficaz no reforço de estruturas ao sismo, uma vez que permite aumentar a ductilidade e resistência ao corte dos elementos, sendo particularmente eficaz em pilares de secção circular (Rodrigues 2005).



Fig. 4.8 – Reforço de pilares com CRP

- *Reforço da estrutura pela incorporação de pré-esforço adicional;*

O reforço de uma estrutura existente pela incorporação de pré-esforço adicional, é normalmente colocado pelo exterior, no entanto, também poderá ser introduzido no interior da estrutura.

O pré-esforço exterior apresenta algumas vantagens em termos de execução e instalação dos cabos, relativamente ao interior, no entanto as armaduras não se encontram protegidas contra as agressões, sendo necessário aplicar uma protecção anti-corrosiva, obrigando a um nível de qualidade mais rigoroso. Relativamente ao comportamento mecânico, o pré-esforço exterior, caracteriza-se por apresentar pequenas perdas de tensão por atrito e a possibilidade de se poder facilmente verificar os valores dos esforços de pré-esforço aplicados.

Tendo em consideração a facilidade de execução e a sua eficácia, é uma técnica muito utilizada para reparar e/ou reforçar uma estrutura. Normalmente é aplicada quando se pretende reforçar as obras à flexão, esforço transversal; modificar o esquema estático da estrutura, como é o caso de estruturas de vãos múltiplos simplesmente apoiados em que se pretende suprimir as juntas de dilatação pela execução de uma viga transversal em betão na zona das juntas; resolver deformações excessivas ou fendilhações localizadas devido a cargas; ou quando se pretende aliviar tensões numa determinada zona da estrutura.

Esta solução de reforço deve ter em consideração, o traçado dos cabos, a localização dos dispositivos de ancoragem e dos dispositivos de desvio dos cabos, ligação complementares entre a estrutura e as armaduras. A Fig. 4.9 pretende ilustrar um exemplo de aplicação de pré-esforço exterior num tabuleiro em caixão de betão armado.

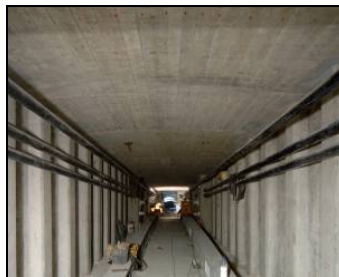


Fig. 4.9 – Colocação de pré-esforço exterior (Ponte da Barra, EP2007).

4.3.2. Reabilitação e reforço de estruturas em alvenaria de pedra

As intervenções no domínio da reabilitação e/ou reforço de Obras de Arte em alvenaria de pedra devem ser realizadas procurando garantir a estabilidade estrutural dos elementos afectados sem descaracterizar a arquitectura da obra. Este cuidado deve ser acrescido no caso de se tratarem de pontes históricas, em que é fundamental preservar o seu valor estético e histórico.

A reabilitação das estruturas em alvenaria deve contemplar a avaliação do seu estado de segurança tendo em vista a eventual adopção de medidas correctivas e preventivas. As soluções escolhidas devem procurar respeitar as técnicas empregues durante a construção original, o que se aplica, sempre que possível, também na escolha dos materiais utilizados.

As técnicas que serão apresentadas representam algumas possibilidades de intervenção, devendo sempre ser adaptadas a cada caso real.

- *Refechamento das juntas da alvenaria*

Esta técnica pretende restaurar as condições de integridade dos elementos, através da substituição das argamassas degradadas nas juntas e/ou colocação da argamassa onde ela não existe. O refechamento de juntas pretende restituir as características mecânicas dos elementos e impedir a entrada da água, que é um dos principais factores de degradação deste tipo de estruturas.

Para a boa execução desta técnica devem ser realizadas as seguintes operações: remoção parcial da argamassa degradada das juntas, lavagem das juntas abertas com água e reposição da argamassa nova nas juntas.

A escolha correcta da argamassa a utilizar é fundamental, sendo recomendável utilizar argamassas pouco retrácteis, de preferência à base de cal hidráulica e areia. As argamassas de cimento devem ser evitadas, porque em geral tornam as juntas extremamente coesas, originando por vezes a fractura das pedras.

- *Atirantamento dos tímpanos e arcos (tirantes, pregagens)*

A melhoria do comportamento transversal entre paramentos pode ser conseguida pelo atirantamento dos arcos ou muros, através da introdução de barras de aço, permitindo controlar os seus movimentos laterais.

Esta solução de reforço é aplicada em pontes que apresentem deslocamentos transversais e/ou deformações e tem como finalidade garantir um confinamento transversal dos elementos

estruturais, melhorando as suas características mecânicas e a sua segurança face à acção sísmica.

O reforço da estrutura consiste em introduzir barras de aço (tirantes transversais) dotadas de dispositivos nas extremidades que permitam a sua amarração nas faces exteriores dos paramentos. Após o posicionamento dos reforços, os furos são selados com caldas de injeção. Para se evitar problemas de corrosão, é usual recorrer-se à utilização de tirantes em aço inoxidável.

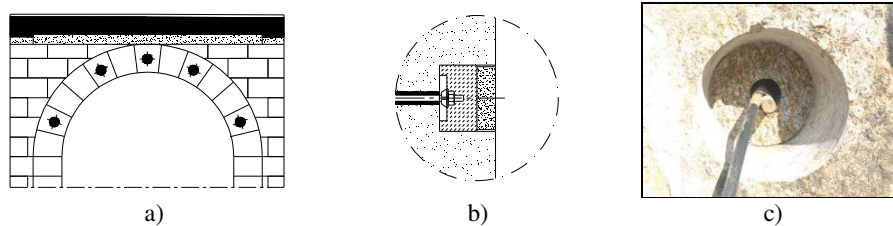


Fig. 4.10 – Reforço do arco com tirantes: a) alçado; b) corte transversal: pormenor do furo; c) exemplo (Ponte Candeeira, EP 2008).

No caso de se utilizarem pregagens com gatos metálicos, os tirantes devem ser posicionados, em furos transversais, com uma das extremidades dobrada sobre ranhura superficial aberta na face da pedra, a dobra da extremidade oposta, de execução mais difícil, é realizada in-situ, com o tirante já posicionado na obra e só após serem seladas as ranhuras (Roque 2002).

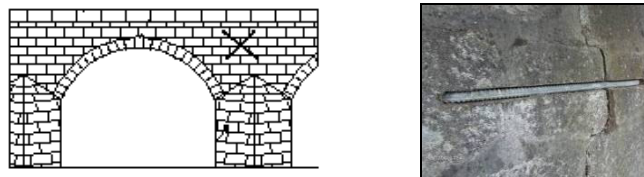


Fig. 4.11 – Reforço do arco com gatos metálicos (Ponte Dom Zameiro, EP 2008).

▪ Injecções

As injecções são uma técnica de melhoramento e consolidação, muitas vezes associada à realização de pregagens ou atirantamentos, mas que também é muito utilizada no preenchimento de vazios no interior da estrutura (ex: cofres) e/ou selagem de fendas existentes.

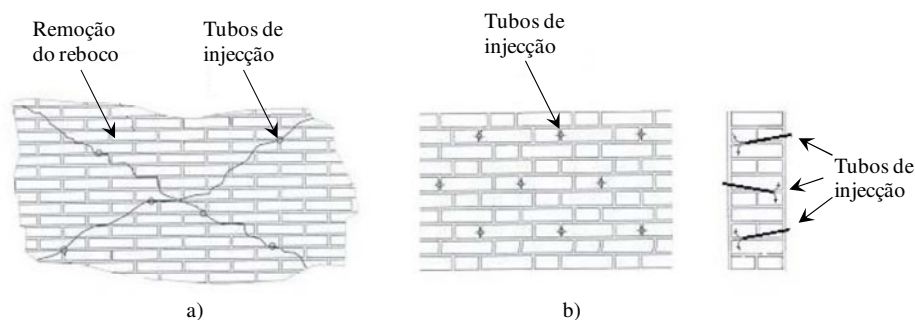


Fig. 4.12 – Injecção de alvenarias: a) selagem de fenda; b) preenchimento de vazios (Roque 2002).

Esta técnica consiste em injectar, através de furos previamente realizados, caldas e destina-se essencialmente, a melhorar as características mecânicas das alvenarias de pedra. As caldas a utilizar deverão ser de composição compatível com os materiais existentes. A definição da composição da calda deverá ter em consideração a sua fluidez e capacidade de penetração, e nem sempre é uma tarefa simples, pois depende de inúmeros parâmetros, tais como a granulometria dos agregados, composição química, porosidade capacidade de absorção dps materiais existentes, percentagem de vazios, dimensão e grau de comunicação entre os vazios, etc.



Fig. 4.13 – Reforço do enchimento do encontro: a) furo: b) execução da injeção por gravidade (Ponte Meinedo, EP 2009)

A execução das injeções pode ser efectuada sob pressão ou por gravidade (Fig. 4.13). A diferença entre as soluções depende, da degradação da alvenaria e da sua capacidade para conter a pressão das injeções e das características da calda a utilizar.

▪ Impermeabilização do tabuleiro

A presença de água é uma das principais causas do aparecimento de patologias nas pontes em alvenaria, devendo sempre que possível ser minimizada a sua presença. Uma das técnicas para evitar a saturação do material de enchimento, consiste na colocação de uma tela de impermeabilização sobre a camada de material de enchimento da ponte, que em conjunto com um sistema adequado de drenagem, permitirá evitar as infiltrações de água.



Fig. 4.14 – Impermeabilização do tabuleiro (Ponte Meinedo, EP 2009)

▪ Colocação de boeiros nos muros para drenagem do material de enchimento

A colocação de boeiros é outra das técnicas que tem como finalidade fazer com que a água existente no material de enchimento escoe para o exterior, permitindo deste modo reduzir os

impulsos horizontais sobre os muros tímpano ou avenida e evitar a degradação dos materiais pela presença prolongada de água.

▪ *Consolidação e reforço das fundações*

Nos trabalhos de reforço de fundações, os materiais e técnicas usualmente empregues são as injeccões, atirantamentos, pregagens, execução de microestacas, construção de uma cortina de estacas em torno do pilar, execução de enrocamento em torno da base do pilar, substituição do solo de fundação por betão, etc..

As técnicas de consolidação ou reforço das fundações permitem dotar as obras de melhores condições de resistência face às acções de abrasão provocadas pelos caudais excessivos em alturas de cheia, eliminar possíveis assentamentos diferenciais de pilares e encontros e proteger as fundações de qualquer fenómeno localizado de infra-escavação. Várias técnicas poderão ser utilizadas, no entanto deverão sempre ter em consideração o valor histórico da obra a reabilitar, de modo a evitar a sua descaracterização estética e patrimonial.

▪ *Desmonte e reconstrução*

Normalmente só se recorre a esta técnica em elementos que sofreram ruína e que é necessário voltar a reconstruí-los, mas também pode ser utilizada para corrigir problemas associados a fendilhações, deformações procurando melhorar a capacidade mecânica das alvenarias.

Quer se trate de uma situação de ruína ou não, durante o seu desmonte deverão ser numeradas as pedras, e quando não é possível recuperar as pedras antigas, devem-se procurar utilizar pedras do mesmo tipo de material, de preferência com a mesma textura e coloração.



Fig. 4.15 – Reconstrução de elementos estruturais: a) numeração e desmonte das pedras; b) reconstrução do muro (Ponte Dom Zameiro, EP 2008)

Todo este procedimento deve ser realizado só depois de a estrutura se encontrar devidamente escorada. A reconstrução deverá ser realizada tendo em consideração a geometria original do elemento estrutural e após a sua numeração. O refechamento das juntas deve ter em consideração a utilização de uma argamassa à base de cal hidráulica, de preferência que tenha a mesma tonalidade da alvenaria de pedra.

4.3.3. Reabilitação e reforço de pontes em estrutura metálica

A intervenção de reabilitação e reforço de uma ponte metálica pode recorrer a soluções muito diversificadas, pretendendo-se apresentar apenas as mais comuns. Uma vez mais se realça a importância de se escolher a solução mais adequada às necessidades e condicionamentos de cada obra.

- *Substituição de elementos danificados*

Esta técnica de reforço consiste na substituição dos elementos que se encontram danificados, podendo-se aumentar a rigidez através da colocação de elementos complementares. Esta solução nem sempre é viável, dada a dificuldade de execução e os custos envolvidos.

Nas estruturas constituídas por elementos treliçados é possível desmontar uma barra (diagonal ou montante) sem colocar em causa a estabilidade da obra, desde que se coloque um dispositivo provisório capaz de equilibrar os esforços instalados no elemento a substituir.

No caso de uma barra traccionada, este dispositivo pode ser facilmente realizado através da colocação de barras de pré-esforço, conforme se pode observar na Fig. 4.16.

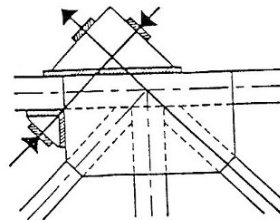


Fig. 4.16 – Esquema da colocação de barras de pré-esforço para equilibrar os esforços no elemento a substituir (Calgaro e Lacroix 1997)

No caso de uma barra comprimida é possível utilizar um dispositivo similar ao utilizado para barras traccionados apesar de ser mais difícil de ancorar as suas extremidades.

- *Reforço com novas chapas ou perfis*

Em algumas situações os reforços poderão ser realizados através do aumento da secção dos elementos danificados, pela adição de perfis comerciais ou chapas.



Fig. 4.17 – Reforço de elementos com chapas, Ponte Metálica de Vila Real sobre o Rio Corgo, (EP 2003).

O aumento das secções poderá introduzir modificações na rigidez da estrutura, que deverão ser tidas em consideração na análise da estrutura.

▪ *Substituição de ligações*

Conforme já foi referido existem diferentes tipos de elementos de ligação entre elementos metálicos, que apresentam um funcionamento completamente distinto. Os rebites funcionam ao corte, os parafusos garantem um funcionamento da ligação por atrito e a soldadura reconstitui a continuidade da matéria.

Na reabilitação de uma Obra de Arte, dado o diferente comportamento dos elementos de ligação, não é recomendável a sua substituição por elementos de ligação diferente. Esta é uma das maiores dificuldades na reabilitação de pontes antigas, cujas ligações são usualmente materializadas por rebites. Por uma questão de homogeneidade, seria desejável substituir as ligações danificadas por rebites. Apesar de não ser a solução mais económica, apresenta algumas vantagens técnicas. A detecção da necessidade de substituir um rebite identifica-se pelo toque ou pelo círculo de ferrugem que se forma em torno da sua cabeça.

As ligações aparafusadas, são em alguns casos, utilizadas para substituir as ligações rebitadas. No entanto, nos casos em que a corrosão entre chapas não é totalmente removida, a ligação que funciona por atrito pode ficar comprometida, resultando num deficiente comportamento da ligação.

A soldadura é em teoria o meio mais flexível e eficaz para reparar ou reforçar uma obra, no entanto a sua utilização apresenta, em certos casos, alguns problemas. Salienta-se que muitas vezes é raro encontrar um aço antigo cuja soldabilidade seja equivalente à dos aços actualmente utilizados, e que em reabilitação, a sua execução deverá ser realizada in situ impedindo que determinadas técnicas sejam aplicadas.

▪ *Reforço com pré-esforço exterior*

A aplicação de pré-esforço exterior é uma técnica muito utilizada no reforço de obras existentes e tem como finalidade aumentar a capacidade portante da estrutura ou diminuindo os esforços em determinados elementos, prolongando o seu tempo de vida da obra

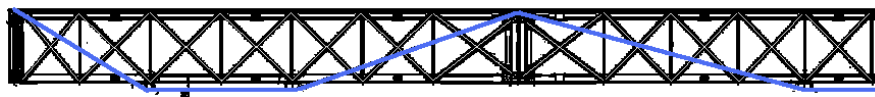


Fig. 4.18 – Exemplo do reforço de um tabuleiro metálico por aplicação de pré-esforço.

Esta técnica consiste na utilização de cabos pré-esforçados, cuja configuração geométrica e posicionamento na estrutura, permite uma significativa melhoria no seu comportamento (ver

exemplo na Fig. 4.18), introduzindo, por exemplo, um diagrama de esforços contrário ao correspondente à actuação das cargas permanentes. Os cabos são normalmente ancorados a maciços localizados nas proximidades dos encontros (ver Fig. 4.19).

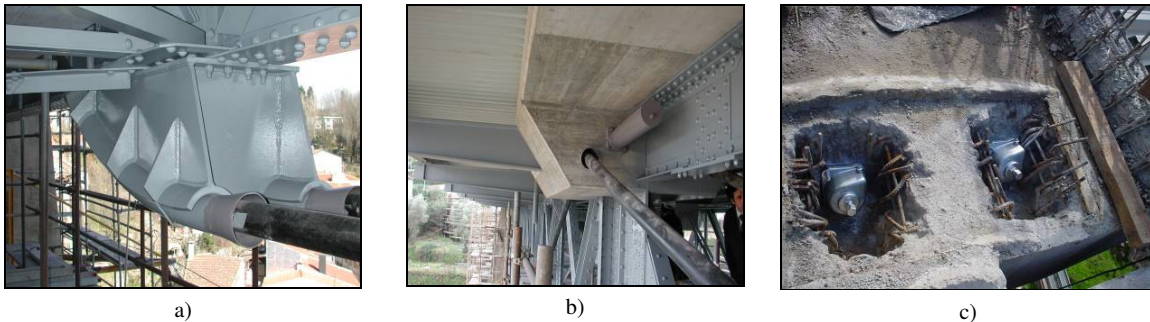


Fig. 4.19 – Exemplo de aplicação de pré-esforço exterior na Ponte sobre o Rio Congo, (EP 2003): a) sela de desvio; b) maciço de amarração, c) ancoragem dos cabos

▪ Protecção superficial

A protecção contra a corrosão do ferro e do aço requer em primeiro lugar a eliminação da ferrugem das superfícies (por jacto de areia, processos químicos, etc.) e, posteriormente, a pintura da superfície com um produto apropriado.

4.4. Soluções e técnicas de reforço sísmico

A imposição da segurança face às acções sísmicas é cada vez mais uma exigência frequente, especialmente quando se realiza a reabilitação de pontes construídas há mais de 30 anos.

Os sismos são um dos desastres naturais que mais impacto têm junto das populações, não só pelos prejuízos humanos e materiais causados mas também pela sua imprevisibilidade (Guerreiro 2003).

Quando uma estrutura não atinge o colapso durante a ocorrência de um sismo, e os ocupantes conseguem evacuar em segurança, poder-se-á dizer que a estrutura desempenhou correctamente as funções básicas, mesmo que ela não volte a ser novamente funcional. Mas, apesar da protecção das vidas humanas ser a um objectivo básico, a minimização dos danos torna-se num requisito importante a ter em consideração no projecto de estruturas face à acção dos sismos.

A acção sísmica é uma acção de difícil previsão, mas que pode ser descrita por meio de dados estatísticos gerados artificialmente ou por registos reais medidos no tempo. A definição da acção sísmica é dependente da zona sísmica, do tipo de solo, e da fonte sismogénica, e pode ser definida através de espectros de resposta, espectros de potência e por acelerogramas artificiais, registados ou gerados artificialmente.

A acção sísmica é definida na Parte 1 do Eurocódigo 8 e complementada, para o caso português pelo documento Nacional de aplicação (DNA) presente Norma Portuguesa NP ENV 1998-1-1 de 2000.

Durante a acção sísmica, boa parte da energia cinética produzida pela vibração do solo é transmitida à estrutura, e deve ser equilibrada ou dissipada para garantir a estabilidade da mesma.

Perante esta realidade, e no sentido de melhorar o comportamento sísmico das estruturas, nos últimos tempos, tem-se vindo a tentar adaptar a capacidade das estruturas para resistir à acção sísmica, através da incorporação de sistemas de protecção sísmica. Estes sistemas têm como principal finalidade garantir um determinado nível de segurança, de modo a evitar catástrofes que possam originar perdas humanas e económicas.

A maioria destes sistemas são utilizados para dissipar a energia sísmica introduzida na estrutura, através da incorporação nos elementos estruturais de mecanismos de dissipação de energia, tais como amortecedores ou até isolamentos de base. Com o auxílio desses dispositivos, os esforços produzidos na estrutura pela combinação das componentes vertical e horizontal dos sismos são distribuídos aos diferentes componentes estruturais, sem causar danos importantes e sem comprometer a estabilidade global.

Os sistemas de protecção sísmica podem ser classificados em quatro grupos:

- Sistemas de protecção passiva;
- Sistemas protecção activa;
- Sistemas protecção híbrida;
- Sistemas protecção semi-activa.

São sistemas de protecção passiva aqueles que não precisam de energia fornecida do exterior, como por exemplo os sistemas de isolamento de base.

Os sistemas de controlo activo são caracterizados por terem a capacidade de reagir, em função de parâmetros registados de respostas da estrutura através da monitorização constante da estrutura, contrariando com dispositivos de actuação o movimento imposto pela acção sísmica.



Fig. 4.20 – Dispositivo passivo de dissipação de energia.

A reacção ao movimento sísmico pode ser concretizada através da acção de actuadores hidráulicos que, em função de deslocamentos medidos, impõem o movimento necessário para anular ou atenuar o efeito do sismo.

O controlo híbrido consiste numa combinação entre o controlo activo e passivo, isto é, um sistema de controlo híbrido compreende, por exemplo, um sistema de controlo activo que actua sobre uma estrutura que possui aparelhos de protecção passiva.

Os dispositivos de controlo semi-activo podem ser designados, de uma forma genérica, por aparelhos passivos controláveis, ou seja, sistemas de protecção passiva cujas características podem ser alteradas durante o decurso da acção sísmica, por forma a melhorar o desempenho da estrutura. A grande vantagem relativamente aos sistemas de controlo activo reside no facto de não necessitarem de uma fonte de energia tão elevada. Estes sistemas podem funcionar, de uma forma geral, com a energia de baterias, o que pode ser bastante vantajoso aquando da ocorrência de um sismo. Como exemplos de sistemas de protecção semi-activa referem-se: aparelho de rigidez variável, dissipadores semi-activos viscosos, dissipadores semiactivos de fluidos controláveis, e dissipadores semi-activos por atrito.

Os sistemas de protecção ou controlo de vibrações englobam vários conceitos materializados em diferentes tipos de dispositivos. As três propriedades básicas de um mecanismo de isolamento são: a flexibilidade horizontal; a dissipação de energia; e, a rigidez suficiente para pequenos deslocamentos.

Tabela 4.4 – Sistemas de protecção sísmica (Filiatrault 2004)

Sistemas convencionais	Sistemas complementares de dissipação de energia		Sistemas de isolamento
	Sistemas passivos	Sistemas semi activos /activos	
Rótulas plásticas de flexão	Metálico	Contraventamento Activo	Isolamento de base
Rótulas plásticas de corte	Fricção	“Tuned Mass”	Elastómero
Contraventamentos metálicos	Visco-elástico	Sistemas de rigidez variável	Borracha
Contraventamentos em betão armado	Viscoso	Sistemas de rigidez com amortecimento variável	Metálicas
	“Tuned Mass”	Piezoeléctrico	Pêndulo de fricção
	“self – Centering”	Reológico	

Um dos métodos de protecção mais eficientes é o isolamento de base, que tem como principio de funcionamento a criação de uma superfície de descontinuidade horizontal, que permite desacoplar o movimento da estrutura das movimentações do solo geradas pela actividade sísmica.

Referem-se os principais tipos de sistemas de isolamento de base:

- Blocos de borracha de alto amortecimento – HDRB
- Blocos de borracha com núcleo de chumbo – LRB
- Sistema pendular com atrito - FPS
- Blocos de apoio de borracha em associação com dissipadores

Actualmente existem vários tipos de sistemas de dissipação de energia, sendo os mais comuns os dissipadores histeréticos e os dissipadores do tipo viscoso. Estes dois tipos de sistemas apresentam uma versatilidade que favorece a sua utilização, sendo fácil a sua introdução no sistema estrutural e permitem uma grande liberdade, por parte do projectista, na definição das suas características.

Apresenta-se de seguida algumas imagens como exemplos de diferentes tipos de dissipadores de energia (ver Fig. 4.21, Fig. 4.22 e Fig. 4.23).

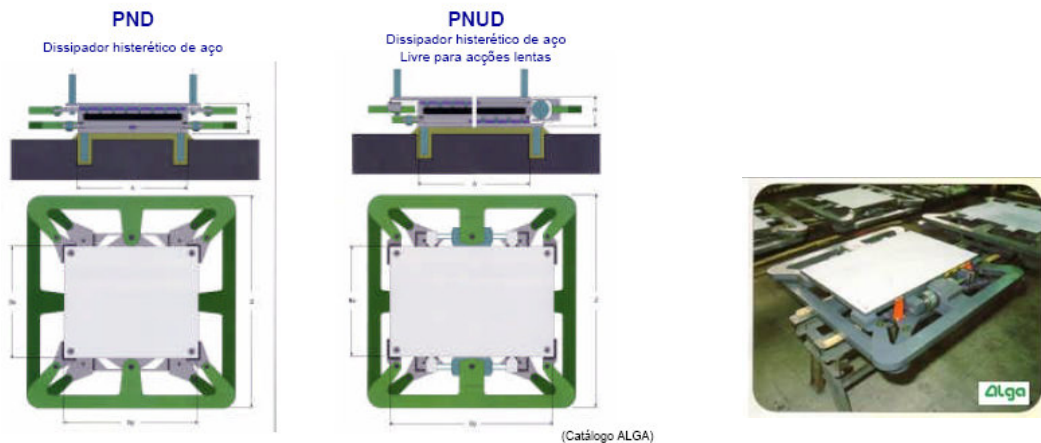


Fig. 4.21 – Dissipadores histeréticos Algasism PND e PNUD (Catálogo Alga)



Fig. 4.22 – Dissipadores Viscosos Algasism FD (Catálogo Alga)



Fig. 4.23 – Dissipadores Viscosos Algasism FD (Catálogo Alga)

Dada a necessidade de acomodar grandes deslocamentos, nas pontes e viadutos, é comum utilizarem-se dissipadores histeréticos.

Como o comportamento e resposta sísmica de estruturas com sistemas de dissipação de energia é muito diferente daquela de estruturas convencionais, os métodos de análise e dimensionamento têm que ser revistos e adaptados a este tipo de solução.

O comportamento eficiente das pontes face à acção sísmica pode também ser conseguido com um adequado sistema resistente, com distribuição apropriada de rigidez e massa e com adequada pormenorização dos seus componentes estruturais e não estruturais. Para tal, o projecto estrutural deverá ser concebido, sempre, tendo o pleno conhecimento do sistema estrutural que vai resistir às acções e as próprias acções que nele actuam.

A utilização de sistemas de dissipação de energia na reabilitação sísmica de pontes é uma alternativa face à concepção original destas estruturas. Um dos principais problemas na utilização de sistemas de dissipação de energia é a maior complexidade da análise dinâmica comparativamente com o que acontece na verificação da segurança de uma ponte com base na capacidade dúctil dos seus pilares. Para este último tipo de análise existe um conjunto de coeficientes de comportamento que permitem estimar o resultado final a partir de uma análise dinâmica linear, enquanto que para avaliar a resposta da ponte com dissipadores é inevitável o recurso a uma análise não linear no domínio do tempo.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE PONTES RODOVIÁRIAS EXISTENTES EM PORTUGAL

Com este capítulo pretende-se efectuar a análise de algumas Obras de Arte existentes na rede rodoviária Portuguesa. O património analisado abrange obras construídas em épocas diferentes, apresentando diversas tipologias, geometrias e materiais e por sua vez dimensionadas segundo critérios e solicitações distintas das exigidas pelos regulamentos actuais. Contempla Obras de Arte que foram alargadas, reabilitadas e algumas reforçadas.

O estudo que se apresenta consiste essencialmente numa análise estatística de um conjunto de cerca de 500 pontes rodoviárias localizadas no Distrito do Porto.

Iniciar-se-á por enquadrar as obras de arte no panorama geral nacional e posteriormente será apresentada a sua classificação atendendo à tipologia, material estrutural principal, ano de construção e aos componentes principais. Procurou-se igualmente apresentar um resumo das principais patologias observadas durante a realização de inspecções visuais às Obras de Arte.

5.1. Caracterização das Obras de Arte

5.1.1. Caracterização do parque de Obras de Arte - Portugal Continental

Portugal apresenta um vasto património de Obras de Arte sob jurisdição de diferentes entidades, muitas das quais, já recorrem a sistemas de gestão de obras de arte, para terem conhecimento do seu património e como auxílio na tomada de decisões relativas a acções de manutenção e conservação.

O estudo que se apresenta diz respeito a todas as Pontes Rodoviárias existentes no território Português, que constam do Sistema de Gestão de Obras de Arte (GOA) da empresa Estradas de Portugal, E.P. – S.A., onde a autora exerce actividade profissional.

O sistema GOA encontra-se em contínua actualização, não só devido à construção e ao alargamento e reabilitação de novas Obras de Arte, como também devido à transferência de vias para as Câmaras Municipais e/ou Concessionárias, pelo que os dados que serão apresentados correspondem ao ano de 2007, ano em que foi efectuada a ultima grande actualização do inventário de Obras de Arte, que permitiu identificar a existência de 5326 Obras de Arte, sob a jurisdição da EP.

A distribuição do número de Obras de Arte sob a jurisdição da EP por Distrito, por tipo de obra, tipo de estrutura e ano de construção será apresentada nos gráficos que se seguem.

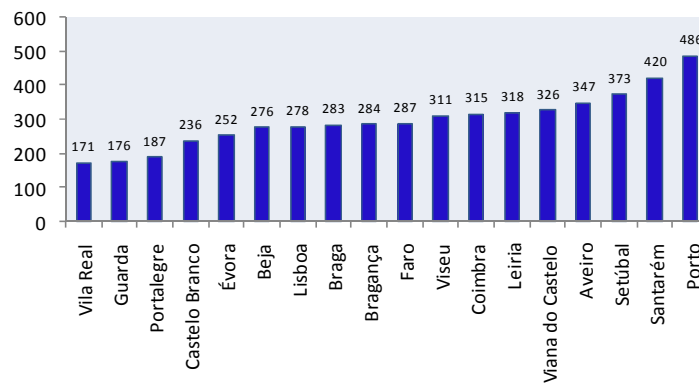


Fig. 5.1 – Número de Obras de Arte por Distrito

Portugal Continental é constituído por 18 Distritos, dos quais o Porto é o que apresenta um maior número de Obras de Arte e por sua vez Vila Real é o que apresenta menos, como se pode observar no gráfico anterior.

Tendo em consideração a definição de tipo de obra apresentada no capítulo 2 (2.2.2.1), apresenta-se no gráfico que se segue as diferentes tipologias existentes e as predominantes no horizonte de obras de arte em estudo.

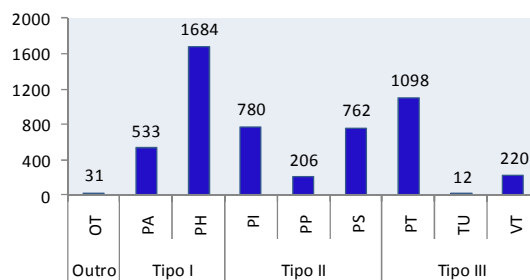


Fig. 5.2 – Número de Obras de Arte por tipo de obra

Através da análise do gráfico da Fig. 5.2 é possível verificar que a maioria das Obras de Arte são do tipo Passagens Hidráulicas e Pontes, sendo os túneis pouco comuns na rede de estradas da EP.

Relativamente ao tipo de estrutura (Tabela 2.9), poder-se-á dizer que a maioria das Obras de Arte são do tipo vãos múltiplos (1665 OA) e Arco (simples ou múltiplo) (1142 OA), sendo muito pouco comuns as estruturas do tipo tirantes e vigas gerber, vide Fig. 5.3.

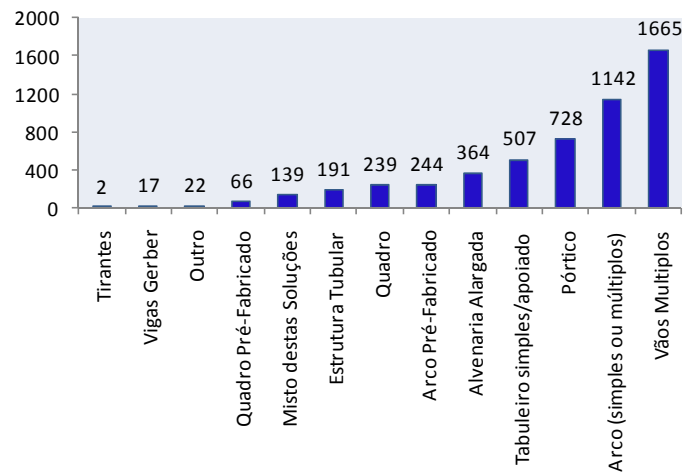


Fig. 5.3 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura

As Obras de Arte do tipo vãos múltiplos predominam nas estruturas das pontes, viadutos, passagens superiores e de peões, por outro lado as estruturas em arco são predominantes das passagens hidráulicas e pontes. A maioria das passagens agrícolas apresentam uma configuração estrutural do tipo pórtico, arco pré-fabricado, estrutura tubular ou quadro (Fig. 5.4, Fig. 5.5 e Fig. 5.6).

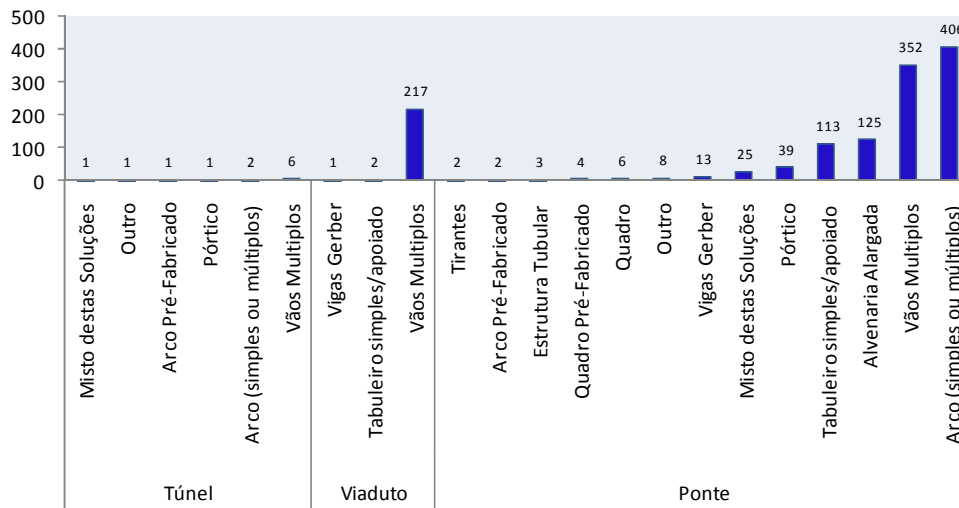


Fig. 5.4 – Número de Obras de Arte do tipo III por tipo de estrutura

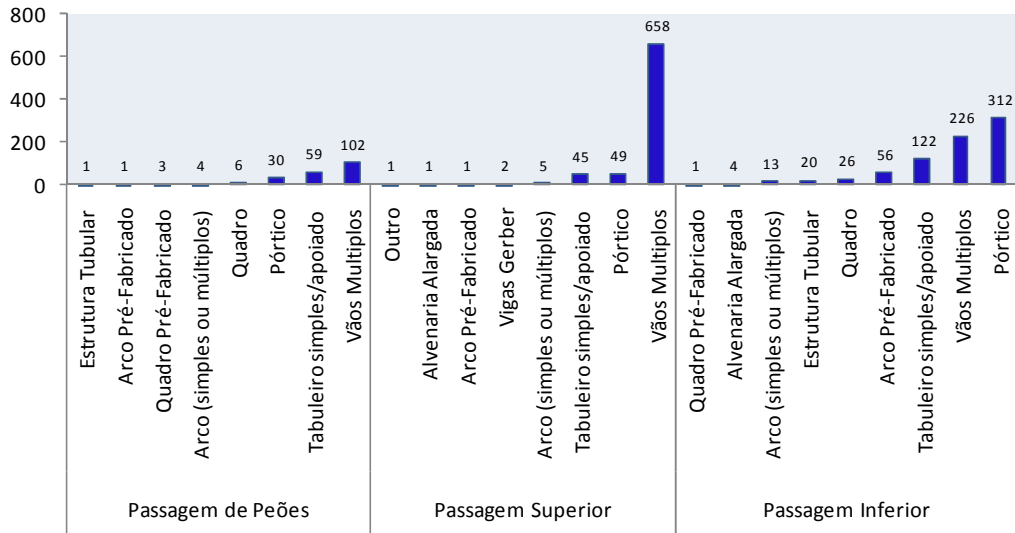


Fig. 5.5 – Número de Obras de Arte do tipo II por tipo de estrutura

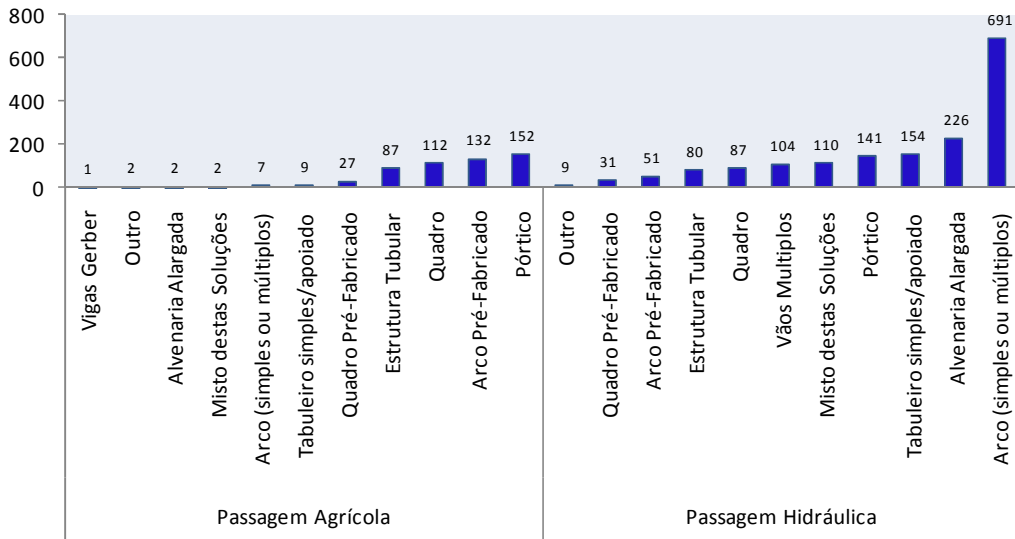


Fig. 5.6 – Número de Obras de Arte do tipo I por tipo de estrutura

Relativamente comprimento da estrutura a maioria das Obras de Arte sob jurisdição da EP (52%) apresentam vãos pequenos compreendidos no intervalo [2;10[m.

Importa referir que segundo o manual de inventário da EP, a definição de comprimento da estrutura para as pontes em alvenaria de pedra é a distância entre faces dos encontros e nos restantes tipos de obra, é o comprimento entre juntas de dilatação, se existirem e no caso de obras monolíticas ou sem junta visível é o comprimento entre as transições da laje para o aterro e em obras com viés desigual o comprimento deverá ser tomado como a média do maior e do menor comprimento.

Tabela 5.1 – Número de Obras de Arte por comprimento

Intervalo de comprimento	Nº de Obras de Arte
[0;2[	33
[2;10[	2606
[10;20[	660
[20;40[	660
[40;60[	501
[60;80[	181
[80;100[	71
>100	328

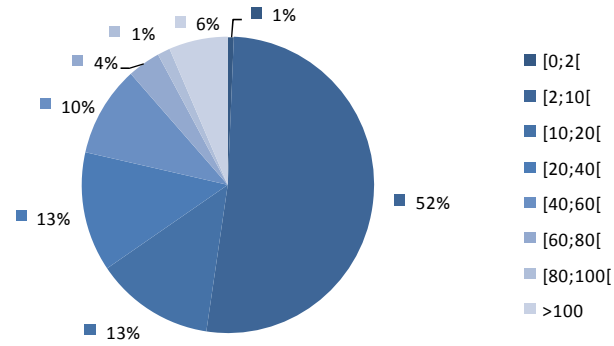


Fig. 5.7 – Percentagem de Obras de Arte por comprimento

A data de construção das Obras de Arte é um indicador geral que poderia ser útil para prever o tipo de anomalias e a necessidades de manutenção das mesmas. Contudo, é uma variável que não é conhecida para uma parte considerável das obras (60%), como se verifica no Gráfico que se segue.

Tabela 5.2 – Número de Obras de arte por ano de construção

Ano Construção	Nº de Obras de Arte
<1850	13
[1850;1900[	118
[1900;1950[	129
[1950;2000[	1262
>2000	589
(em branco)	3215

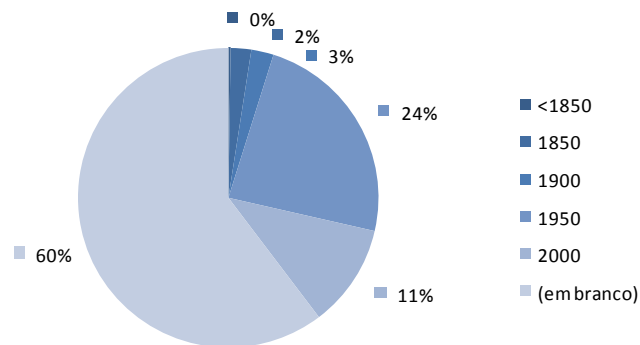


Fig. 5.8 – Percentagem de Obras de arte por ano de construção

A classificação por tipo de material teve em consideração o material do componente tabuleiro. Pelo gráfico que se segue pode-se constatar que a maioria das Obras de Arte são de betão (65%), seguindo-se das estruturas em alvenaria de pedra (28%) e apenas 7% do património da EP corresponde a Obras de Arte em estrutura metálica.

Tabela 5.3 – Número de Obras de Arte por tipo de material

Material	Nº de Obras de Arte
Betão	3462
Alvenaria	1491
Ferro / Aço	373

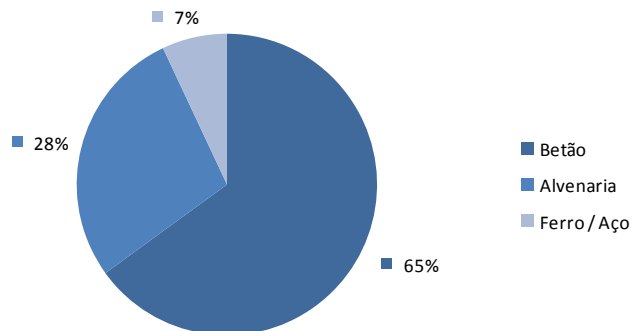


Fig. 5.9 – Percentagem de Obras de Arte por tipo de material

Os dados de constituição de cada Obra de arte, parte fundamental do Inventário, são constituídos por um máximo de 15 componentes que pretendem descrever e quantificar os materiais/equipamentos utilizados nas diversas partes da Obra de Arte (Tabela 2.10).

Tabela 5.4 – Percentagem de Obras de Arte por componente

Componente	Obras de Arte %
Muros	91%
Taludes	89%
Encontros	93%
Aparelhos de apoio	24%
Apoios intermédios	38%
Tabuleiro	100%
Cornijas	51%
Guarda corpos	75%
Guarda de segurança	68%
Passeios	55%
Revestimento de via	100%
Drenagem	53%
Juntas de dilatação	26%
Outros componentes	50%

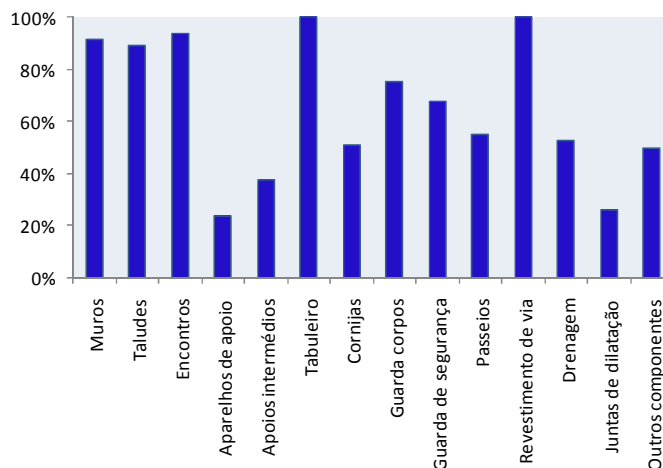


Fig. 5.10 – Percentagem de Obras de Arte por componente

Através da análise da Tabela 5.4 e Fig. 5.10 pode-se verificar que há componentes que são comuns a praticamente todas as obras de arte, tais como o tabuleiro, encontros, revestimento da via, muros e talude e outros componentes, como as juntas de dilatação, aos aparelhos de apoios, que não fazem parte da maioria das obras.

O caso dos apoios intermédios deverá ser visto como apenas exemplificativo pois, obviamente, é dependente do tipo de estrutura em causa.

5.1.2. Caracterização do parque de Obras de Arte - Distrito do Porto

Após ter sido efectuado um enquadramento geral no panorama nacional, será agora caracterizado o parque de obras de arte do Distrito do Porto, que conforme se pôde verificar apresenta 486 Obras de Arte inventariadas.

5.1.2.1. Distribuição geográfica

Administrativamente, o Distrito do Porto é constituído por 19 concelhos, dos quais Vila Nova de Gaia é o que apresenta um maior número de Obras de Arte. Os concelhos de Felgueiras, Santo Tirso e Trofa, por seu lado, são os que apresentam menor número, com apenas 6 Obras

de Arte, cada. Em rigor, é o concelho de Paços de Ferreira aquele que possui menor número de obras cujo dono é o EP – zero.

A distribuição do número de Obras de arte por Concelho é a indicada no gráfico a seguir. As Obras de Arte fazem parte de todos os tipos de rede rodoviária, Auto-estradas, Itinerários Principais, itinerários Complementares, Estradas Nacionais, Estradas Regionais e Estradas Municipais.

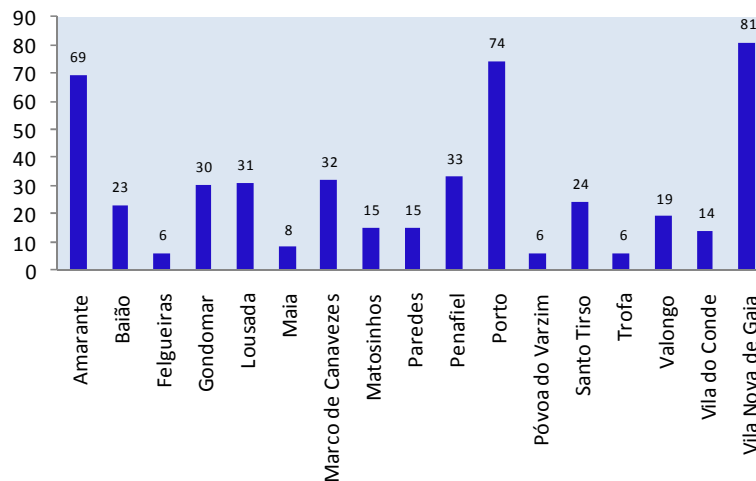


Fig. 5.11 – Número de Obras de Arte por Concelho

5.1.2.2. Tipologias das Obras de Arte

Contrariamente aos dados obtidos a nível nacional, as Obras de Arte mais representativas são as passagens superiores (21%), passagens inferiores (21%), e as passagens hidráulicas (20%). Uma vez mais, os túneis são praticamente inexistentes (1%).

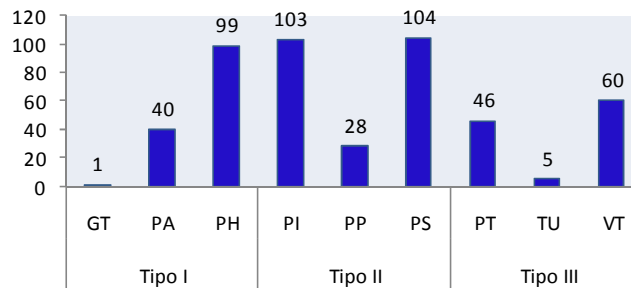


Fig. 5.12 – Número de Obras de Arte por tipo de obra

As estruturas do tipo vãos múltiplos são as predominantes, perfazendo um total de 212 Obras de Arte (44%) (Fig. 5.13), incluindo obras do tipo viadutos, passagens superiores e inferiores. Uma vez mais se verifica que as passagens hidráulicas são maioritariamente obras do tipo arco (33%), ou do tipo alvenaria alargada (25%) (Fig. 5.14). Estas últimas podem também ser estruturas em arco, mas que já foram submetidas a obras de reabilitação ou alargamento.



Fig. 5.13 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura

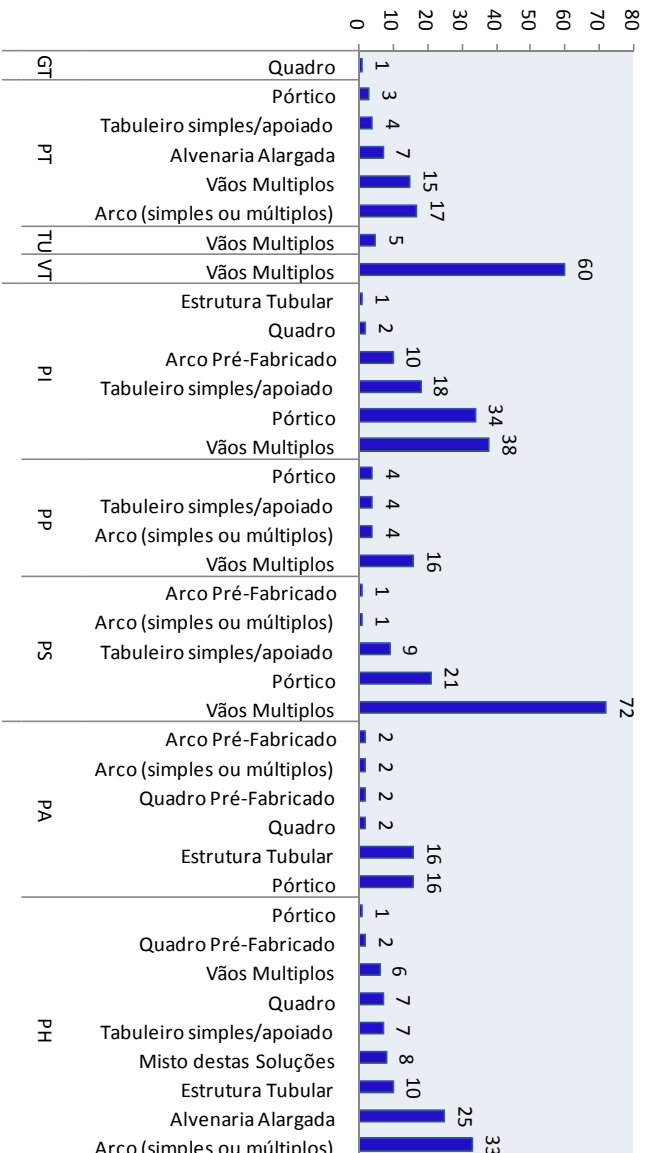


Fig. 5.14 – Número de Obras de Arte do tipo de Obra e estrutura

O gráfico que se segue pretende mostrar o número de obras de arte que existem no Distrito do Porto de acordo com o nº de vãos.

Tabela 5.5 – Número de Obras de Arte segundo o número de vãos

Nº DE VÃOS	Nº DE OBRAS DE ARTE
1 Vão	250
2 Vãos	39
3 Vãos	116
4 Vãos	15
5 Vãos	17
mais de 5 vãos	49

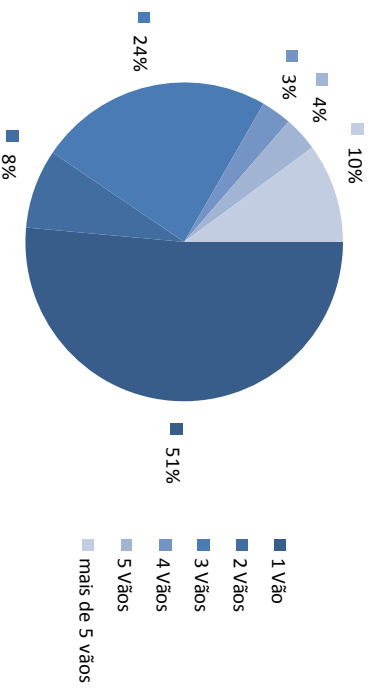


Fig. 5.15 – Percentagem de Obras de Arte segundo o número de vãos

Através da análise do gráfico facilmente se constata que a maioria das obras de arte apenas tem 1 vão (51%), seguindo-se de 24 % de Obras de Arte com 3 vãos.

O gráfico da Fig. 5.16 permite evidenciar o número de vãos predominantes por tipologia de Obra de Arte. Verificando-se que praticamente todas as passagens hidráulicas apresentam apenas 1 vão e igualmente, como seria de esperar todas as passagens agrícolas são de vão único. Consta-se também que os viadutos e as passagens pedonais apresentam maioritariamente mais do que 5 vãos.

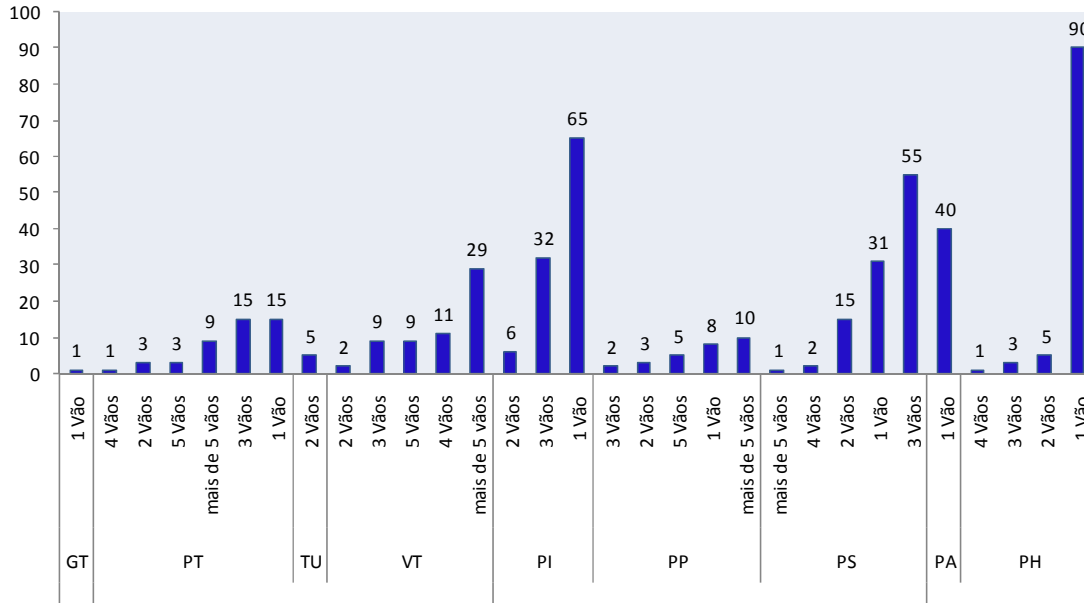


Fig. 5.16 – Número de Obras de arte por tipo de obra e por número de vãos

As estruturas que apresentam mais de 5 vãos são expectavelmente os viadutos, as pontes, as passagens de peões e as passagens superiores.

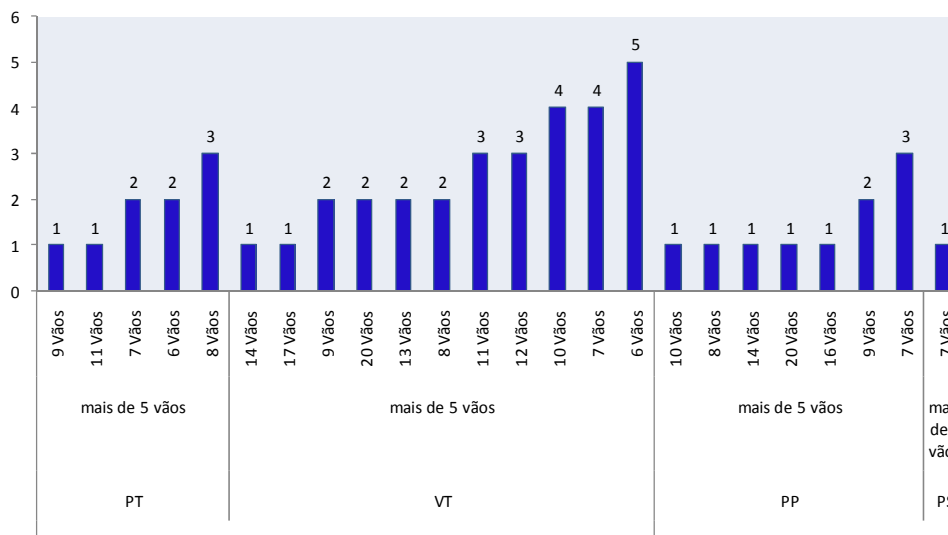


Fig. 5.17 – Número de Obras de arte com mais de 5 vãos por tipo de obra e por n.º de vãos

No que diz respeito ao comprimento, a maioria das Obras de Arte (33%) apresentam vãos compreendidos no intervalo [2;10[m, existindo igualmente cerca de 13 % de obras com comprimentos superiores a 100 m.

Tabela 5.6 – Número de Obras de Arte por comprimento

Intervalo de comprimento	Nº de Obras de Arte
[0;2[	4
[2;10[	160
[10;20[	77
[20;40[	82
[40;60[	63
[60;80[	22
[80;100[	16
>100	62

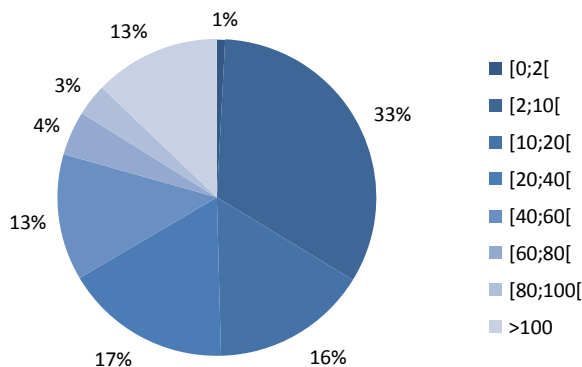


Fig. 5.18 – Percentagem de Obras de Arte por comprimento

A análise de todas as figuras e tabelas apresentadas permite comprovar a enorme heterogeneidade de Obras de Arte que existem neste Distrito.

5.1.2.3. Material estrutural principal

Enquanto a classificação do material estrutural principal da análise efectuada ao parque de obra de arte nacional teve em consideração apenas o material do tabuleiro, neste estudo procurou-se introduzir um bocadinho mais rigor, contemplando igualmente as estruturas mistas.

O gráfico e a tabela que se seguem apresentam o número e percentagem de Obras de Arte por tipo de material.

Tabela 5.7– Número de Obras de Arte, por tipo de material

Material	Nº Obras de Arte
Betão Armado	326
Aço	6
Alvenaria de Pedra	54
Aço - Armaco	27
Misto – Alvenaria de pedra e betão armado	72
Misto – Aço e betão armado	1

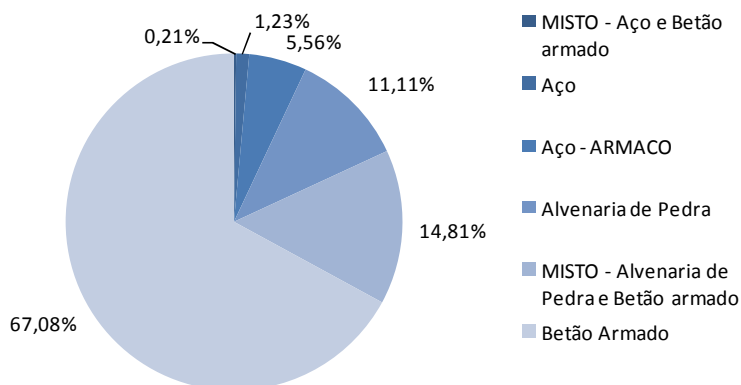


Fig. 5.19 – Percentagem de Obras de Arte, por tipo de material

Conforme se pode constatar a maioria das Obras de Arte são em betão armado (67,08%), seguindo das Obras de Arte em alvenaria de pedra (25,92%). Verifica-se que a maioria das

pontes em alvenaria de pedra (14,81%) já foram submetidas a intervenções de alargamento através da realização de elementos em betão armado.

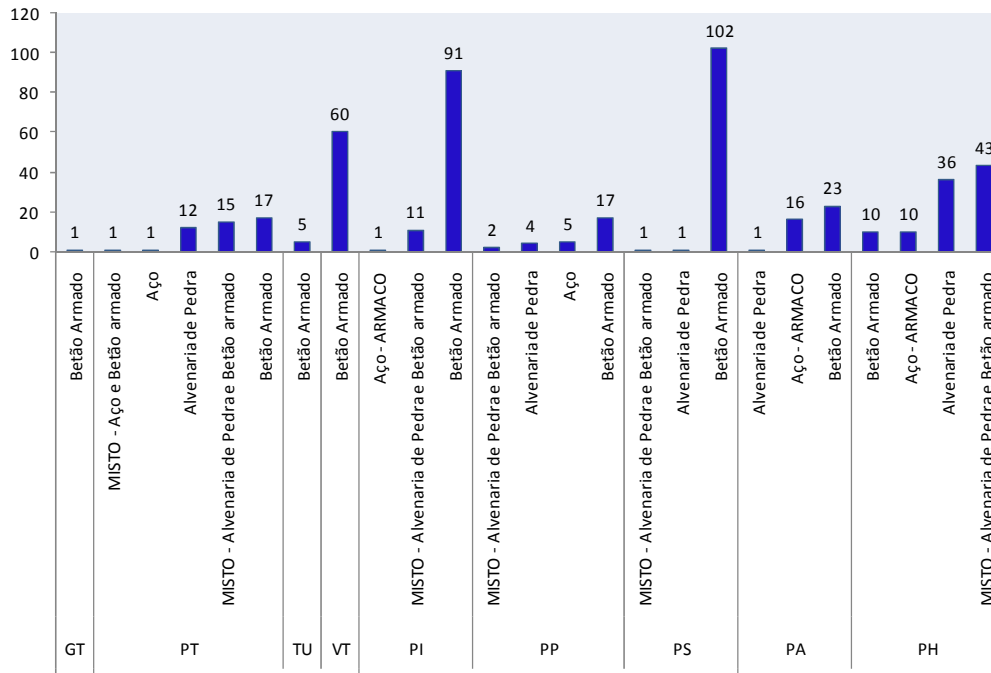


Fig. 5.20 – Número de Obras de Arte do tipo de Obra e material

A Fig. 5.20 permite evidenciar para cada tipo de obra, qual o material constituinte, podendo-se salientar que o betão armado é o material mais comum nas pontes, viadutos, passagens inferiores, superiores, agrícolas e de peões. A maioria das passagens hidráulicas são de alvenaria de pedra, tendo algumas delas sido submetidas a obras de alargamento, sendo por isso constituídas por betão armado e alvenaria de pedra. Apesar de a maioria das passagens agrícolas e passagens hidráulicas serem em betão armado, já exigem muitas com uma estrutura em aço (armaco).

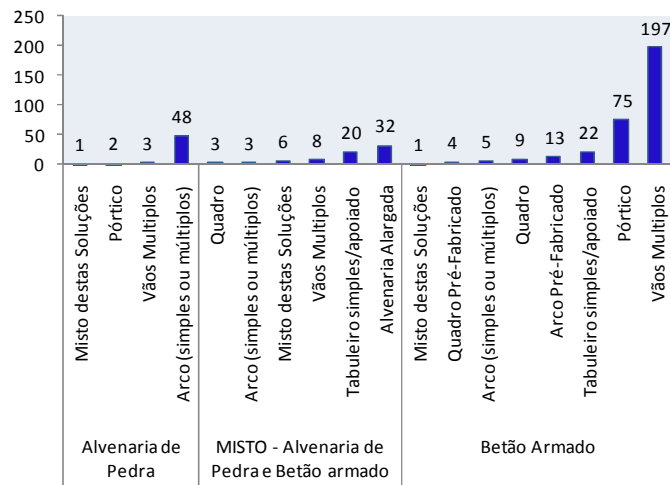


Fig. 5.21 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura e material

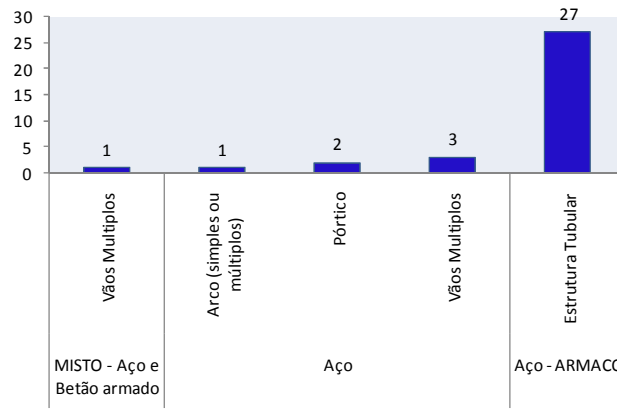


Fig. 5.22 – Número de Obras de Arte por tipo de estrutura e material

Nos gráficos que se seguem (Fig. 5.21 e Fig. 5.22) apresenta-se para cada material os tipos de estrutura que lhe estão associados, verificando-se que a maioria das Obras de Arte em alvenaria de pedra apresentam um esquema estrutural em arco e as Obras de Arte em betão armado são do tipo vãos múltiplos ou pórtico. Relativamente às estruturas constituídas por alvenaria de pedra e betão, a maioria são do tipo alvenaria alargada, sendo normalmente constituídas por um arco em pedra e por um tabuleiro em betão armado ou do tipo tabuleiro simplesmente apoiado, em que normalmente os encontros são em pedra e o tabuleiro é em betão armado.

A estrutura mista em aço e betão armado que consta do inventário corresponde a uma ponte em que o tabuleiro é em betão armado e a estrutura de suporte é constituída por vigas em I em aço. As Obras de Arte do tipo aço são utilizadas em estruturas do tipo tubular (PH e PA) mas pouco comuns horizonte de obras de Arte em análise.

5.1.2.4. Data de construção

Por observação do gráfico que se segue, facilmente se constata que a maioria das obras de arte têm menos de 30 anos (52%), contudo desconhece-se o ano de construção de 35,8 %. A Obra de Arte mais antiga é pertence ao século XXII.

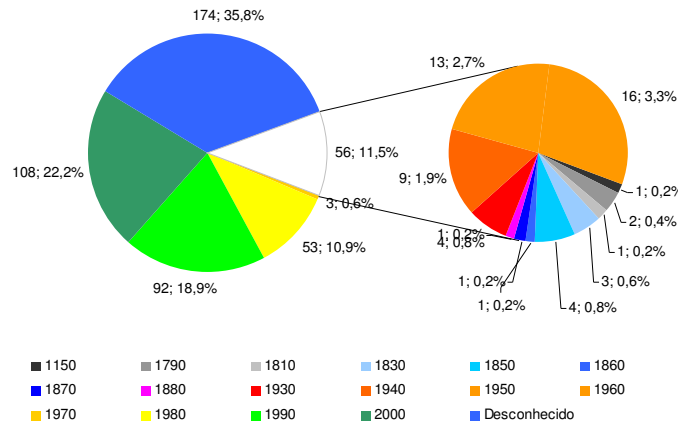


Fig. 5.23 – Número e percentagem de obras de arte, segundo a década de construção

A maior parte das Obras de Arte cujos elementos estruturais são em betão armado foram construídas nos últimos 30 anos (73%), desconhecendo-se o ano de construção de cerca de 22% ver (Fig. 5.24). Relativamente às Obras de Arte em alvenaria de pedra, como seria de esperar desconhece-se o ano de construção de 69% dos casos (Fig. 5.25). A Obra de Arte mais antiga pertence ao século XII e a mais recente foi construída em 1957.

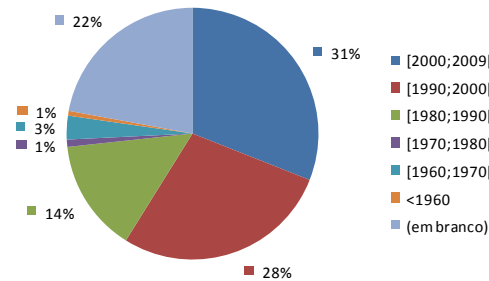


Fig. 5.24 – Percentagem de obras de arte de betão armado segundo ano de construção

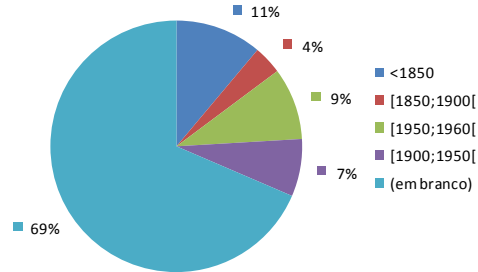


Fig. 5.25 – Percentagem de obras de arte de alvenaria de pedra segundo ano de construção

5.1.2.5. Componentes das Obras de Arte

O gráfico e a tabela que se seguem apresentam o número e percentagem de Obras de Arte por componente.

Tabela 5.8 – Percentagem de Obras de Arte que possuem cada componente

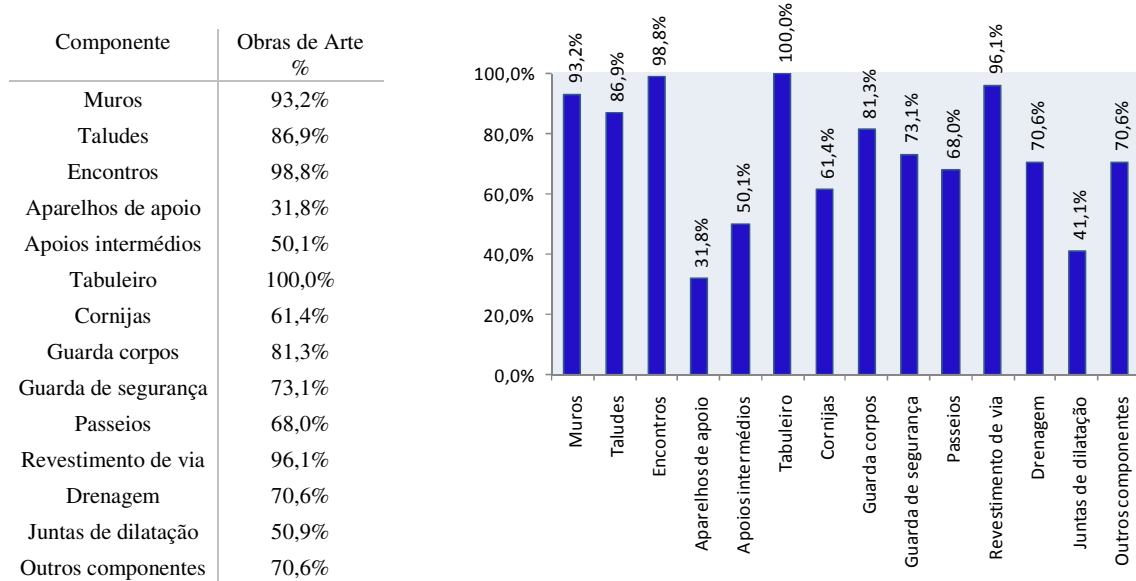


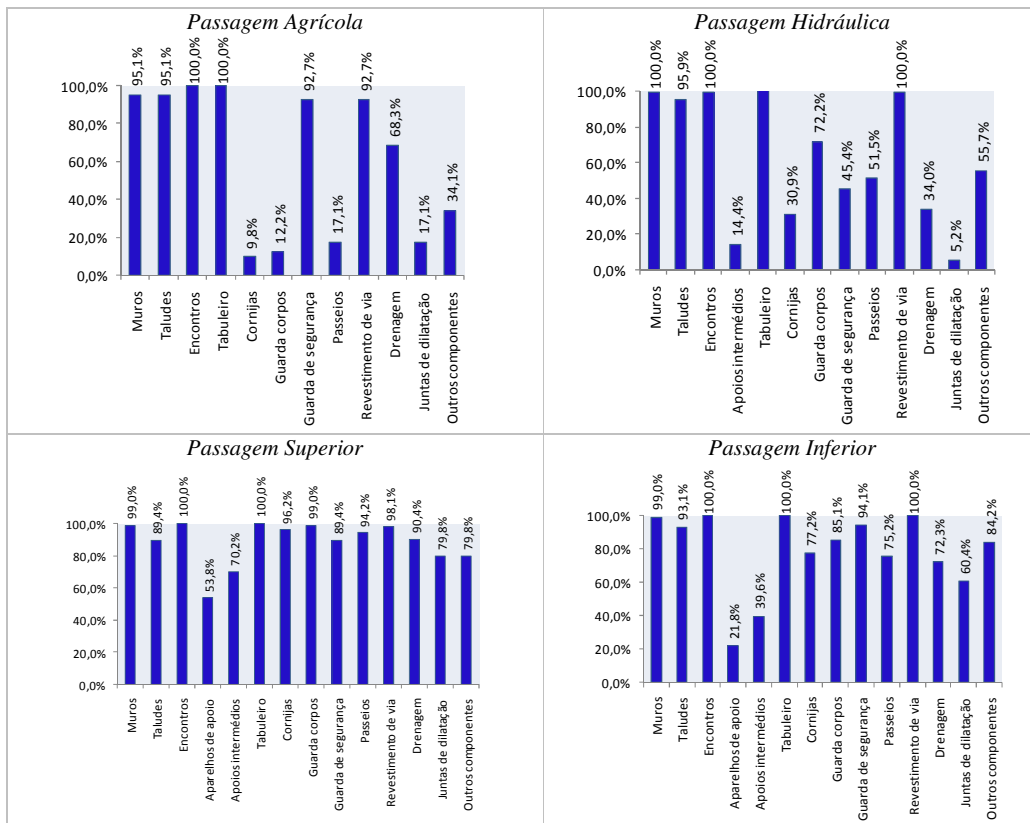
Fig. 5.26 – Percentagem de Obras de Arte por componente

Através da análise dos gráficos seguintes pode-se verificar que existe um conjunto de componentes muito comum, independentemente do tipo de obra, uma vez que constituem, por motivos óbvios, elementos estruturais fundamentais para a própria definição da estrutura como

obra de arte. Inversamente, verifica-se que, no universo de amostragem, as juntas de dilatação, as cornijas e os passeios são componentes que não fazem parte da maioria das obras. É de notar a baixa percentagem de obras que possuem aparelhos de apoio, geralmente existentes apenas em obras mais recentes.

Os gráficos seguintes permitem traçar um “perfil tipo” em termos de componentes para cada tipo de obra, podendo-se salientar a maior complexidade relativa de obras como os Viadutos e as Passagens Superiores e Inferiores e a “simplicidade” das Passagens Agrícolas e Hidráulicas – obras geralmente de menores dimensões.

Os resultados obtidos para as Pontes parecem indicar, essencialmente, a heterogeneidade do conjunto destas obras, fruto dos vãos que têm que vencer: desde a mais simples obra em arco de alvenaria de pedra, à Ponte da Arrábida.



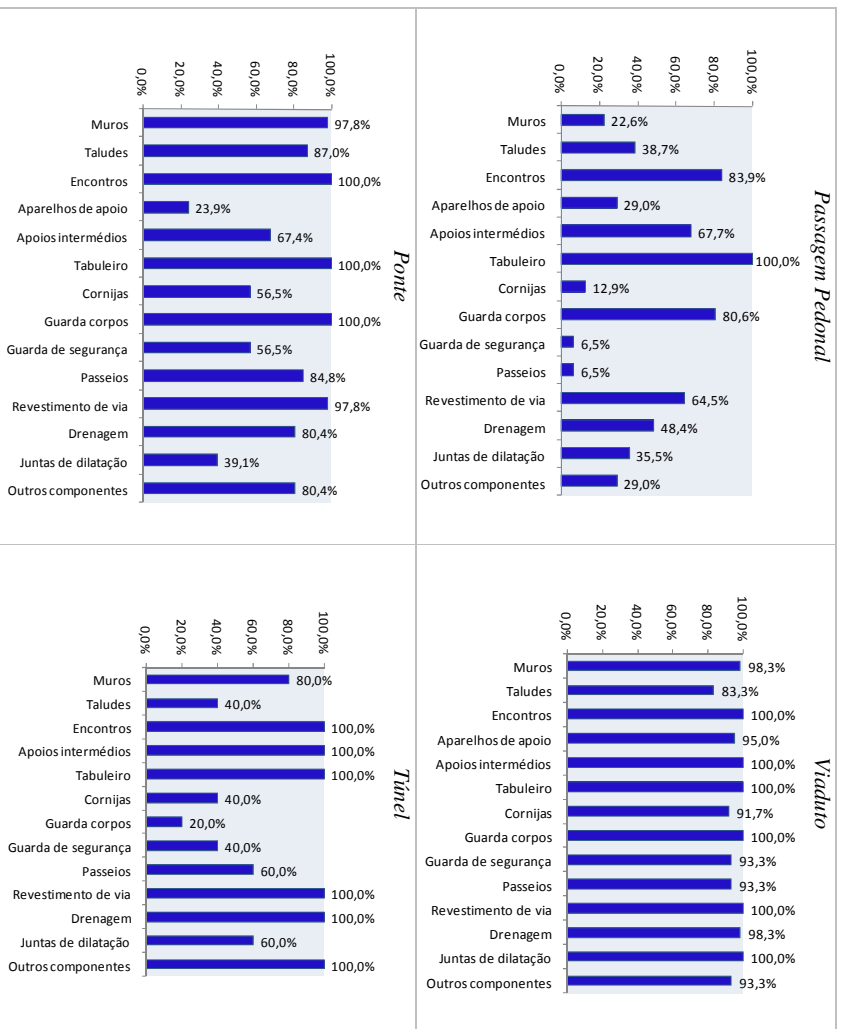


Fig. 5.27 – Percentagem de obras de arte que possuem cada componente, por tipo de obra

▪ *Aparelhos de apoio*

A utilização de aparelhos de apoio nas Obras de Arte tem vindo a ser recentemente aplicada nas estruturas com a finalidade de permitir a restrição de alguns esforços. Este tipo de componentes é utilizado apenas em algumas Obras de Arte, dependendo do tipo de estrutura. Conforme se pode observar no gráfico que se segue (Fig. 5.28), as estruturas de vãos múltiplos e as obras do tipo passagens superiores e viadutos são as predominantes no horizonte de Obras de Arte estudadas.

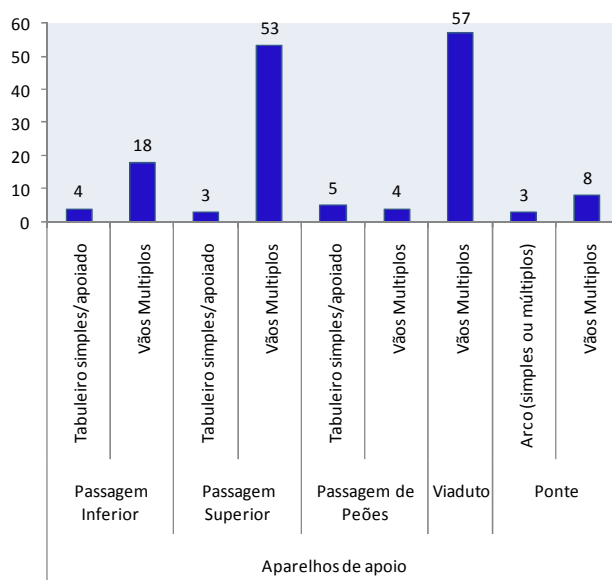


Fig. 5.28 – Número de obras de arte com aparelhos de apoio por tipo de obra e estrutura

Tendo por base a classificação proposta no capítulo 2, pode-se constatar que o tipo de aparelho de apoio mais aplicado é do tipo elastómero ou de neoprene cintado, conforme se pode observar na Tabela 5.9 e Fig. 5.29.

Tabela 5.9 – Numero de Obras de Arte que possuem aparelhos de apoio segundo a sua tipologia e localização

TIPO	Designação	AA Encontro 1	AA Encontro 2	AA Apoios intermédios
Tipo 1	Articulações de betão	3	3	3
Tipo 2	AA metálico de pêndulo ou balanceiro	1	1	
Tipo 3	AA metálicos de calote esférica ou cilíndrica – tipo “Pot-bearing	-	-	1
Tipo 4	AA metálicos de rolo ou rolete	3	3	2
Tipo 5	AA metálicos de contacto linear	15	16	-
Tipo 6	AA elastómeros ou de Neoprene Cintado	106	103	48
Tipo 7	AA elastómeros ou de Neoprene Cintado, deslizante longitudinalmente sobre teflon	40	40	14
Tipo 8	AA com elastómero e aço – tipo panela	17	17	9

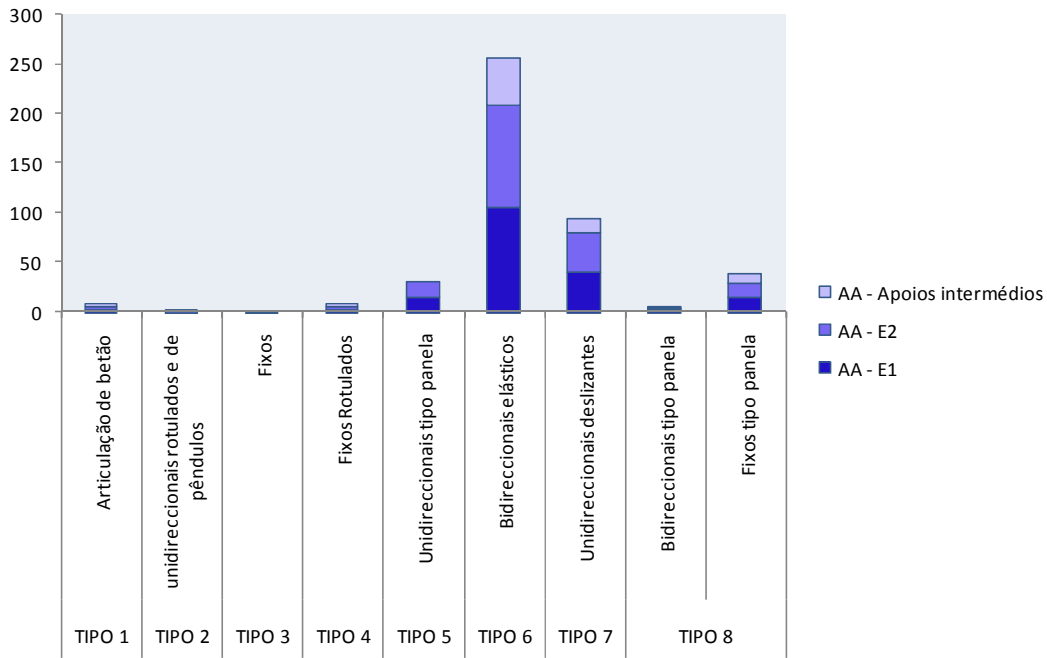


Fig. 5.29 – Número de Obras de Arte que possuem aparelhos de apoio segundo a sua tipologia e localização

▪ *Juntas de dilatação*

As juntas de dilatação têm como função assegurar a existência de movimentos relativos entre a Obra de Arte e os seus acessos. Só recentemente é que se começaram a utilizar estes componentes, isto porque de uma forma geral, antigamente as pontes apresentavam reduzida dimensão, o que originava pequenos movimentos nos seus encontros e apoios.

Das Obras de Arte em análise, pode-se constatar que apenas 40% contêm juntas de dilatação e que as tipologias mais representativas são as passagens superiores e os viadutos.

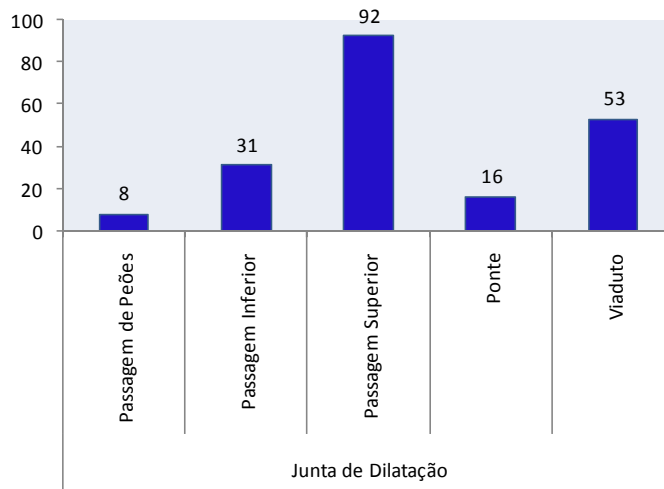


Fig. 5.30 – Número de obras de arte com juntas de dilatação por tipo de obra

A classificação das juntas de dilatação é apresentada na Tabela 5.10 e na Fig. 5.31.

Tabela 5.10 – Número de Obras de Arte que possuem juntas de dilatação segundo a sua tipologia

Tipo	Designação	Abreviatura	Nº Juntas de Dilatação
1	Juntas abertas	JA	17
2	Juntas ocultas sob pavimento contínuo	JOPC	20
3	Juntas de betume modificado	JBM	10
4	Juntas seladas com material elástico	JSME	1
5	Juntas em perfil de elastómero comprimido	JPEC	4
6	Bandas flexíveis de elastómero	BFE	60
7	Placas metálicas deslizantes	PMD	2
8	Juntas de elastómero armado	JEA	79
9	Pentes metálicos em consola	PMC	3
10	Juntas de elastómero armado compostas	JEAC	1
11	Placas metálicas com roletes	PMR	0
12	Juntas de perfis de elastómero múltiplos	JPEM	3

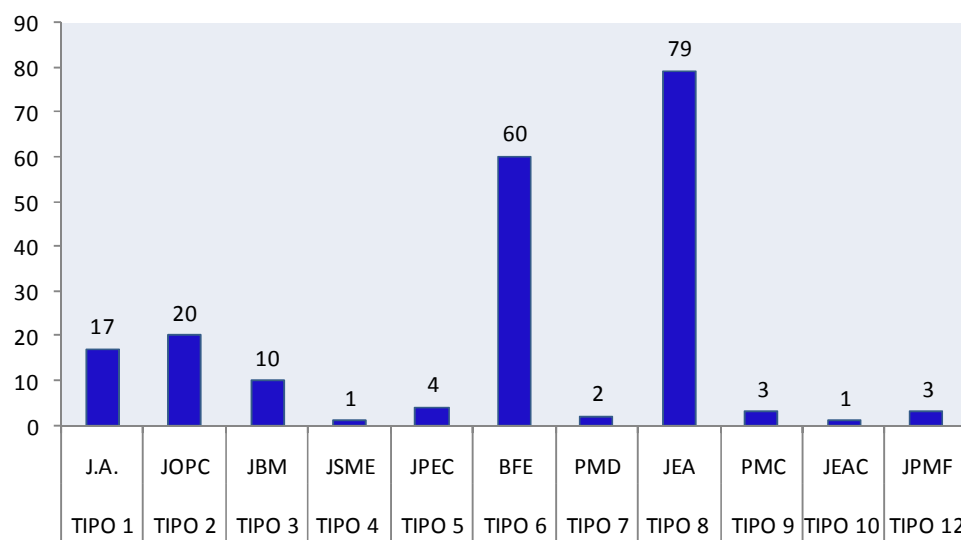


Fig. 5.31 – Número de obras de arte que possuem juntas de dilatação segundo a sua tipologia

A análise do gráfico permite evidenciar que as juntas do tipo banda flexíveis de elastómero (tipo 6) e as juntas de elastómero armado (tipo 8) são as predominantes, verificando-se igualmente que nas obras inspeccionadas não existem juntas do tipo 11- placas metálicas com roletes, caracterizadas por permitirem grandes amplitudes de movimento.

5.2. Principais patologias observadas nas pontes rodoviárias

Tendo em consideração a classificações de anomalia apresentadas no capítulo 3 e a heterogeneidade das pontes rodoviárias existentes, pretende-se com o estudo que se segue apenas analisar as Obras de Arte mais representativas, isto é, as Obras de Arte em betão armado e em alvenaria de pedra.

Para o efeito, irá ser apresentado um resumo das patologias mais comuns observadas durante a realização de inspecções visuais às Obras de Arte. Procurar-se-á apresentar a sua correlação com factores como a idade, tipologia, material, localização, etc.

5.2.1. Estruturas em betão armado

As patologias que se podem observar nas estruturas em betão são originadas por diferentes factores, como a falta de detalhe dos projectos, a má execução durante a construção, o aumento das cargas rodoviárias, os acidentes, etc.. É fundamental avaliar as causas e as consequências que originaram as patologias, no sentido de as reparar a tempo de evitar uma maior degradação.

Apresenta-se no gráfico que se segue a classificação das anomalias presentes nas Obras de Arte em betão armado e a sua percentagem de ocorrência na amostra, tendo em consideração a Tabela 3.2 e Fig. 3.19. do capítulo 3.

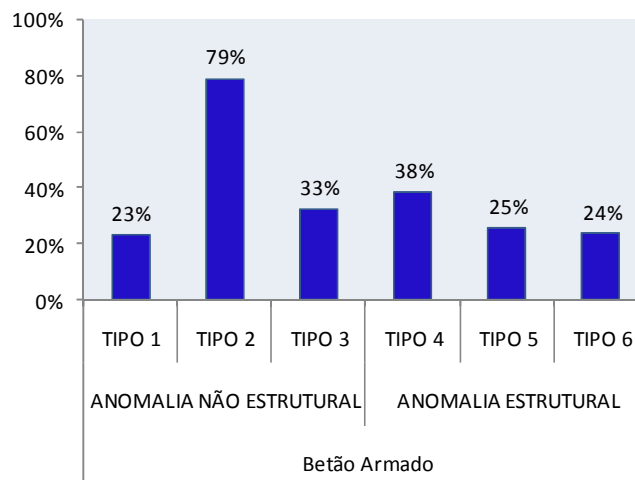


Fig. 5.32 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipo de patologia.

Conforme se pode constatar através da análise da figura anterior, a patologia mais comum nas pontes em betão armado é a presença de escorrências, humidades e eflorescências (79%). Esta anomalia manifesta-se em especial nos encontros e no tabuleiro e deve-se essencialmente à inexistência ou mau funcionamento dos sistemas de drenagem. A delaminação ou desgaste do

betão, com aparecimento ou não de armadura à vista, a fissuração e a deterioração do betão, representam mais do que 24% das patologias estruturais detectadas nas Obras de Arte.

A relação entre as patologias e as diferentes tipologias das obras de arte é apresentada nas figuras que se seguem (Fig. 5.33 e Fig. 5.34).

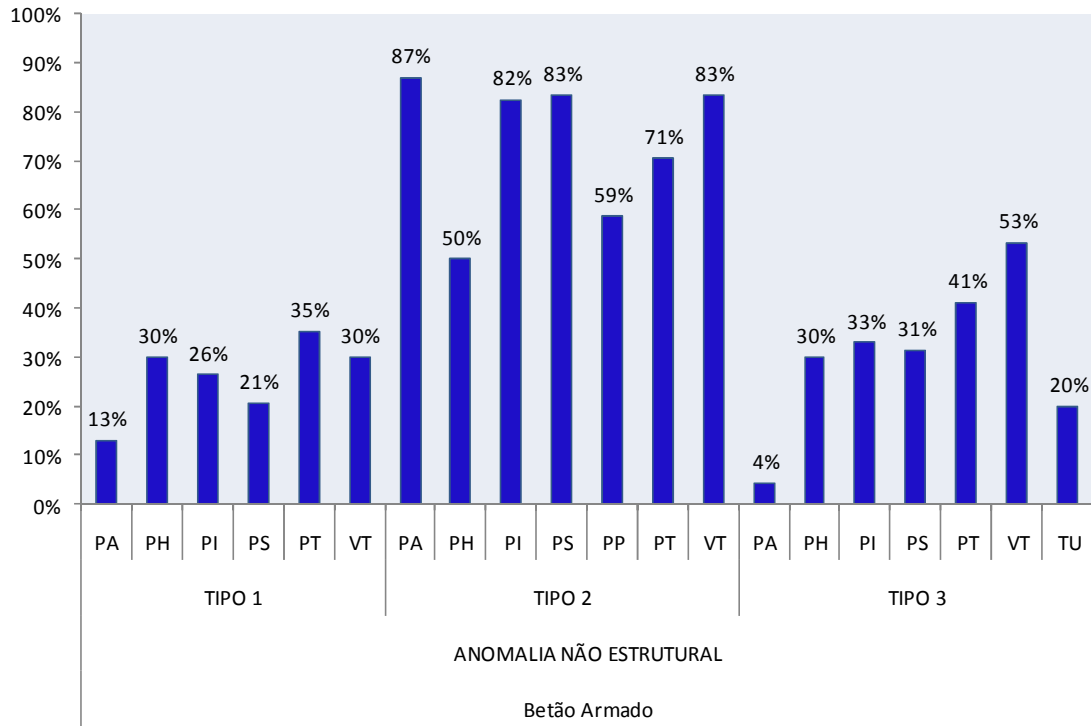


Fig. 5.33 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipologia e tipo de anomalia não estrutural.

Os gráficos pretendem evidenciar a percentagem de obras de arte em betão armado de uma determinada tipologia que apresentam a anomalia do tipo x. Deste modo, o gráfico relativo às anomalias não estruturais (Fig. 5.33), permite constatar que 83% dos viadutos apresentam problemas de escorrências, humidades e eflorescências (Tipo 2), 30% apresentam problemas de vegetação e/ou poluição biológica (Tipo 1) e 53% presença de restos de cofragem (Tipo 3).

Os tipos de obras com mais problemas derivados da ausência ou mau funcionamento da drenagem (tipo 2) são as passagens agrícolas, inferiores, superiores e os viadutos. Esta patologia é predominante nos tipos de estrutura que apresentem juntas de dilatação. A drenagem destes elementos nem sempre é correctamente efectuada, e mesmo quando é, as mangas têm uma durabilidade reduzida e a água tem tendência a escoar-se através da viga estribo. Também é usual observar-se este fenómeno de escorrências nas consolas dos tabuleiros devido à inexistência de pingadeira e tubos de queda.

A patologia do tipo 3 para além do aspecto inestético que confere às estruturas, pode ser o ponto de partida para a ocorrência de outras patologias. Conforme se pode verificar através da Fig. 5.32 ela manifesta-se em cerca de 33 % das obras de arte e poderia ter sido evitada se durante e após a construção se tivesse o devido cuidado de remover todos os restos de cofragem, pregos, varões de aço auxiliares à construção da obra. Estes elementos podem ser responsáveis pelo destacamento do betão e pela corrosão das armaduras.

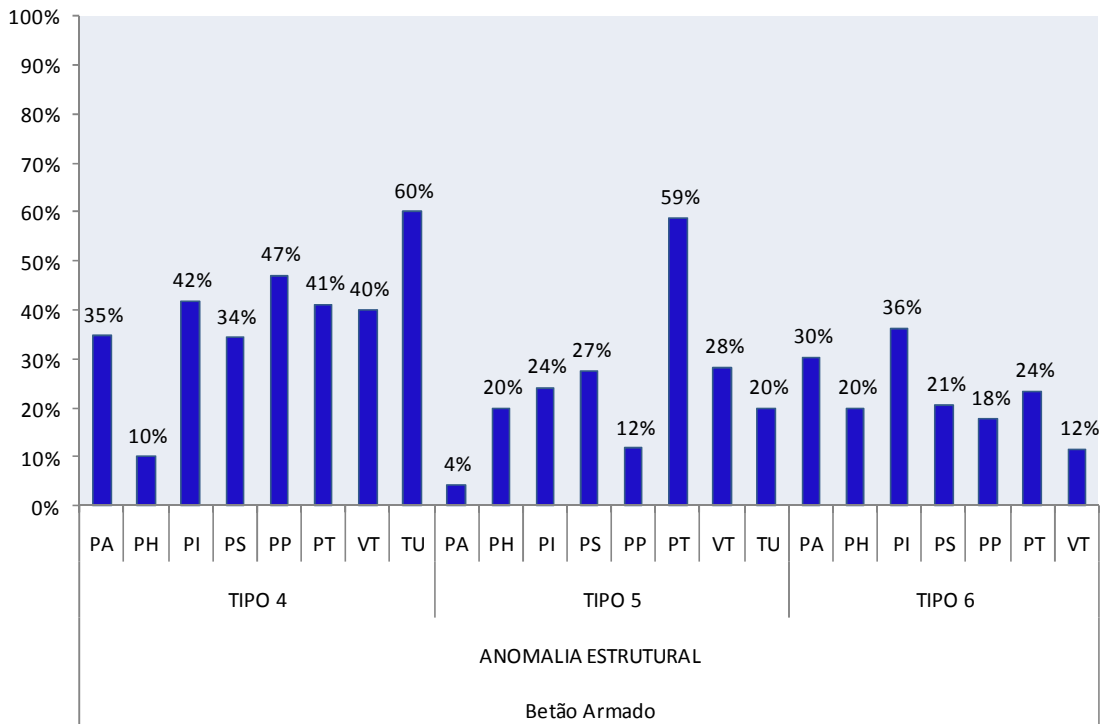


Fig. 5.34 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipologia e tipo anomalia estrutural.

No que diz respeito às anomalias estruturais, a relação entre os tipos de patologia e as diferentes tipologias não é evidente, conforme se pode constatar pelo gráfico anterior. De algum modo este resultado seria espectável, pois mais do que o tipo de obra, as patologias observadas são influenciadas pelo tipo de estrutura, pelas características dos materiais e pelas acções naturais ou externas a que está submetida.

É de referir que, apesar da observação da Fig. 5.3 poder sugerir que o destacamento e delaminação do betão (Tipo 4) é uma patologia que se manifesta especialmente nos túneis (60%) e nas pontes (59%), salienta-se que não é verdade, pois a percentagem está directamente relacionada com o número de túneis e pontes da amostras, que como se pode contactar pela Fig. 5.20 são 5 túneis e 17 pontes.

Procurando tentar evidenciar uma correlação entre as patologias estruturais o tipo de estruturas, foi elaborado o seguinte gráfico, que relaciona a percentagem obras de arte em betão armado por tipo de estrutura e por patologia.

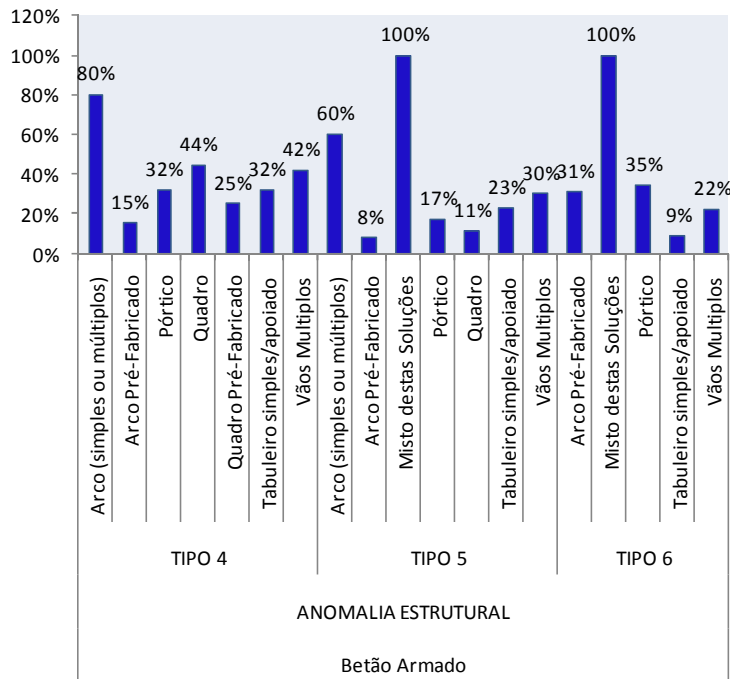


Fig. 5.35 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por tipo de estrutura e anomalia estrutural.

Tendo em consideração a Fig. 5.21, pode-se uma vez mais ignorar os dados correspondentes às estruturas mistas e em arco (simples ou múltiplo), porque as amostras são muito reduzidas. A observação do gráfico evidência que menos de 45% das Obras de Arte têm danos estruturais.

Apresenta-se na figura seguinte a relação entre a década em que foi construída a obra de arte e as anomalias.

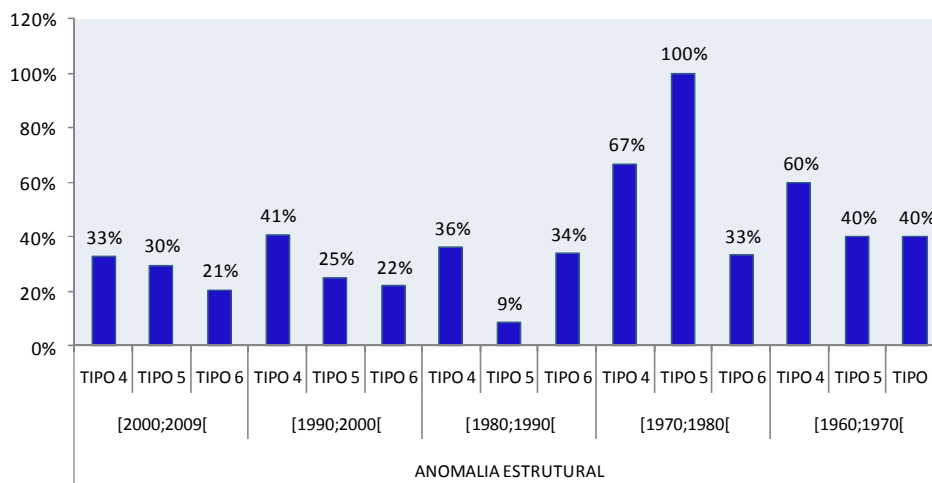


Fig. 5.36 – Percentagem de Obras de Arte em betão armado por ano de construção e anomalia estrutural.

5.2.2. Estruturas em alvenaria de pedra

Apresenta-se no gráfico seguinte a classificação das anomalias presentes nas Obras de Arte em alvenaria de pedra, tendo em consideração a Tabela 3.8 e Fig. 3.23.

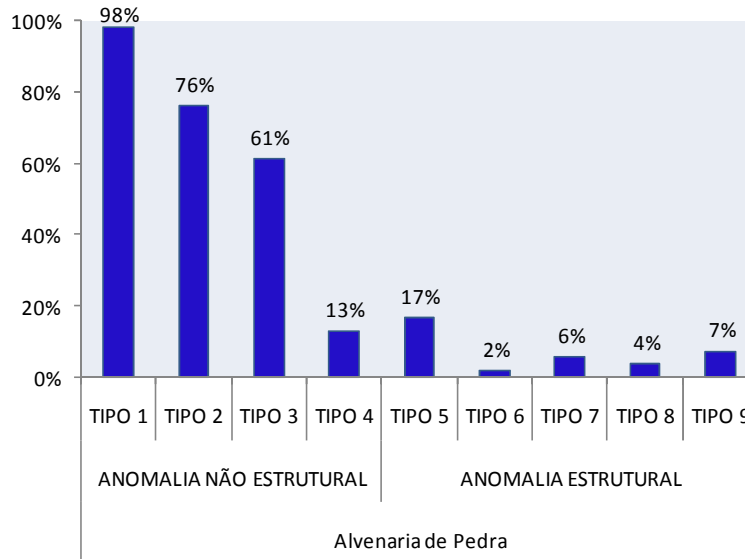


Fig. 5.37 – Percentagem de Obras de Arte em Alvenaria de Pedra por tipo de patologia.

Os resultados das inspeções apresentados na figura anterior permitem averiguar que a maioria das Obras de Arte em alvenaria de pedra apresentam patologias de índole não estrutural. Pode-se igualmente afirmar que a grande maioria apresenta vegetação e poluição biológica, vestígios de humidade e escorrências e perda de argamassa nas juntas entre elementos em alvenaria.

A falta de manutenção periódica e as cargas excessivas a que estas estruturas continuam submetidas originam a presença de anomalias que têm implicações a nível estrutural. Essas anomalias manifestam-se sobre a forma de fendas, destacamento de pedras nos arcos e fenómenos de infra-escavação. Pela observação do gráfico da figura anterior, constata-se que menos de 17% das obras de arte apresentam anomalias de índole estrutural.

Conforme se pode verificar em 5.1.2.3 a maioria das Obras de Arte em alvenaria são do tipo ponte e passagem hidráulica e o sistema estrutural mais comum é a estrutura em arco, e desconhece-se o ano de construção de 69 % dos casos.

Através da análise aos resultados obtidos das inspeções visuais realizadas às Obras de Arte, pode-se verificar que apesar de as Obras de Arte em Alvenaria terem sido construídas há muito mais tempo, estas apresentam-se em melhor estado comparativamente com as estruturas em betão armado.

5.3. Reabilitação e reforço de uma Obras de Arte em alvenaria de pedra

Pretende-se descrever as metodologias e técnicas usadas na recuperação da Ponte Dom Zameiro.

5.3.1. Descrição da Ponte

A Ponte é constituída por uma estrutura em alvenaria de pedra de granito apresentando uma configuração em planta e perfil longitudinal irregular, cujo comprimento total é de cerca de 125 m e a largura média é de 4.30 m.

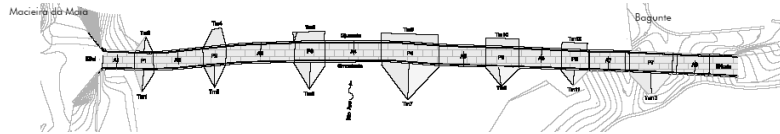


Fig. 5.38 – Planta esquemática da ponte



Fig. 5.39 – Alçado esquemático da Ponte – Lado de montante

A Obra de Arte é constituída por 8 arcos desiguais, sendo todos de volta perfeita, excepto o penúltimo arco visto de montante que é um arco em ogiva (Fig. 5.40). Os arcos apoiam-se em pilares de cantaria dotados de talhamares com configuração triangular a montante e quadrangular a jusante (a maioria). Os guarda-corpos da ponte são em cantaria e o pavimento é ligeiramente rampeado e antes da última intervenção era constituído por um lajeado serrado de granito, mas com a última reabilitação recolocou-se o pavimento original de cubos de granito.

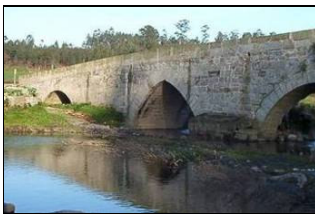


Fig. 5.40 – Vista de jusante da Ponte, arco em ogiva



Fig. 5.41 – Vista montante da Ponte



Fig. 5.42 – Vista sobre a Ponte, lajeado de granito

5.3.2. Enquadramento histórico e intervenções na ponte

A Ponte D. Zameiro é uma ponte românica que foi construída nos séculos XII e XIII e fazia parte do antigo eixo viário que as inquirições de D. Afonso III, de 1258, chamam de “Via Vetera”.

A ponte que actualmente existe é o produto de uma (re)construção da época medieval, com grande probabilidade executada no século XII, uma vez que o testamento de D. Fernando Martins, de 1185, já a refere, e outras indicações da primeira metade do século XIII confirmam a sua existência.

A configuração actual da ponte revela algumas marcas de intervenções passadas, que sugere que determinados componentes estruturais foram construídos em épocas distintas. Refira-se o facto de a ponte apresentar um arco em ogiva quando todos outros são semi-circulares e os talhamares se encontrarem desligados da restante estrutura.

Tendo em consideração a geometria do arco, supõe-se que esta configuração se deve provavelmente a uma eventual reconstrução da ponte durante o período gótico e que os talhamares deverão ter sido construídos em 1960 com a finalidade de se melhorar as condições estruturais da ponte face ao caudal do Rio Ave.

A ponte foi alvo de intervenção nos anos 90, havendo registo de que foram feitas as seguintes obras de conservação: corte de vegetação e consolidação de algumas fendas.

Em Março de 2001 verificou-se o colapso parcial da ponte na sua margem esquerda, mais propriamente no pilar situado entre o 2º e 3º arco e a ruína de parte do 3º arco, tendo sido alvo de uma intervenção durante os anos de 2003 e 2004. Este acidente deveu-se essencialmente a uma combinação de más condições climáticas e aumento do caudal do rio Ave (Fig. 5.43).

Como se pode constatar, esta ponte tem sofrido sucessivas roturas parciais ao longo dos tempos, a última das quais aconteceu em Outubro de 2004 quando fortes chuvadas na bacia do rio Ave provocaram uma cheia repentina, tendo provocado a ruína dos pilares 6º e 7º da margem direita (Fig. 5.44).

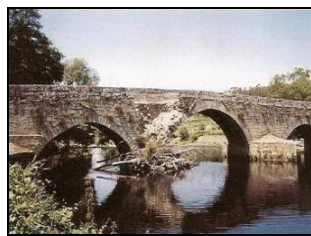


Fig. 5.43 – Estado da ponte após colapso de 2001



Fig. 5.44 – Estado da pontes após colapso de 2004

Este colapso ocorreu enquanto decorriam as obras de construção do açude localizado a jusante da ponte, que implicaram a execução de uma ensecadeira no leito do rio na margem esquerda e a montante da Ponte, obrigando a água a escoar-se pelos arcos mais pequenos junto à margem direita.

A capacidade limitada de escoamento daqueles arcos implicou a subida da cota das águas, as quais passaram a exercer um impulso horizontal importante nos pilares da Ponte e geraram o início de um processo de derrube e de funcionamento em flexão horizontal do troço de Ponte afectado. Flexão que levou à abertura de fendas entre as pedras de alvenaria e ao derrube parcial da Ponte.

Poderão também ter ocorrido problemas de infra-escavação nas fundações dos pilares, motivadas pelo aumento da velocidade do escoamento devido ao excessivo caudal do rio, criando vórtices que originam escavações na base dos pilares.

Na sequência da rotura parcial da ponte foi elaborado um projecto de reparação que teve por base o relatório de inspecção efectuado à estrutura e as inspecções subaquáticas realizadas às fundações dos pilares.

5.3.3. Estado da obra antes da intervenção

As patologias observadas na inspecção visual realizada em 2005 foram semelhantes às identificadas na inspecção de 2002. Apresenta-se de seguida os tipos de anomalias identificados relacionando-os com o elemento estrutural em que foram observadas.



Arco		
		
Vegetação / poluição biológica	Humidade e presença de água no material de enchimento	Perda de argamassa nas juntas
		
Degradação do material pétreo	Abertura de fendas longitudinais	Ruína de elementos
Tímpanos		
		
Vegetação e Abertura de fendas	Abertura de fendas e deslocamento de elementos	Ruína parcial



Fig. 5.45 – Principais patologias da Obra de Arte por elemento estrutural

5.3.4. Metodologias adoptadas na reabilitação da ponte

Os principais trabalhos executados foram os seguintes:

- A. Reconstrução dos elementos estruturais: talha-mares, de arcos, de pilares, de guardas e de paramentos em alvenaria de granito.
- B. Limpeza de eflorescências, de vegetação, de raízes e de colónias biológicas quer na ponte quer no leito do Rio.
- C. Refechamento de juntas. Remoção de argamassas de cimento, limpeza e reposição com nova argamassa nas juntas da alvenaria de granito. Limpeza de resíduos de argamassas de cimento na alvenaria de granito.
- D. Reforço dos arcos com tirantes em aço, de modo a garantir um confinamento transversal dos elementos estruturais.
- E. Consolidação do intradorso dos arcos e fendas.
- F. Enchimento dos cofres através da sobreposição de camadas compactadas utilizando uma mistura de solo-saibro, regados com uma calda do tipo “Albaria Allentamneto”, reposição de membranas de impermeabilização, de infra-estruturas e de pavimento.
- G. Reposição do pavimento em paralelo de granito e execução/reparação de uma drenagem eficaz no Tabuleiro.

As imagens que se seguem pretendem ilustrar alguns dos trabalhos executados durante a empreitada.



Fig. 5.46 – Trabalhos de reabilitação e reforço realizados na Ponte Dom Zameiro.

Tendo em consideração o interesse histórico da Ponte Dom Zameiro, procurou-se durante as intervenções realizadas, garantir a estabilidade estrutural dos elementos afectados sem descaracterizar a arquitectura da obra, tentando deste modo não se alterar o valor estético e histórico da ponte.

5.4. Considerações Finais

Ao longo da realização de inspecções é possível identificar danos comuns a determinadas Obras de Arte, mas se por um lado é simples relaciona-los com o material e tipologia, já não é tão simples correlaciona-los com factores como a idade da obra, que é um dado normalmente desconhecido, nem com as causas que lhes deram origem.

A correlação das patologias com as suas causas é uma tarefa muito difícil. Para ser possível deveria existir uma documentação da história da obra, que permitisse averiguar, se a origem de determinada anomalia resulta da fase de projecto, construção, das acções exteriores, acções naturais, falta de manutenção etc.

O conhecimento da origem dos danos poderia sugerir a sistematização de determinados procedimentos, nas diferentes fases da vida da obra, que permitissem ao nível dos projectos evitar determinadas disposições construtivas, agravar os regulamentos existentes se tal se justificasse, ao nível da construção evitar determinados procedimentos de execução incorrectos, aumentar o controlo de qualidade dos materiais empregues, e na fase de exploração, implementar acções de manutenção e conservação para evitar o agravamento das patologias e consequentemente custos mais elevados.

O recurso a sistemas de gestão de obras de arte deverá ter um papel fundamental não só como base de dados de toda a informação relevante sobre as Obras de Arte, como também no planeamento de todas as intervenções a realizar e na previsão da evolução do estado das Obras de Arte. Deste modo, poderá não só contribuir para o aumento da segurança, como também para o aumento da vida útil das estruturas o que se reflecte numa economia para os donos de obra.

O melhoramento dos Sistemas de gestão de obras de arte, associado à existência de um dossier da obra e do registo detalhado das anomalias, (especificando a sua localização, extensão, desenvolvimento, causas prováveis), permitiria efectuar um estudo detalhado das patologias, que poderia ser útil na sua tipificação, de modo evitar que elas se manifestem nas estruturas novas.

Através da análise dos resultados obtidos das inspecções visuais realizadas às Obras de Arte, pode-se verificar que apesar de as Obras de Arte em alvenaria terem sido construídas há muito mais tempo, estas apresentam-se em melhor estado comparativamente com as estruturas em betão armado. Tal deve-se não só ao facto de a pedra ser mais durável que o betão e o aço, mas também ao facto de nas pontes em pedra os componentes estruturais funcionarem essencialmente à compressão, sendo o nível de tensões em serviço muito mais baixo comparativamente às estruturas de betão e aço.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. Considerações finais

A presente dissertação foi desenvolvida com base na consulta de diversos elementos bibliográficos de referência e pela experiência profissional da autora na área das Obras de Arte.

É universalmente reconhecido que é fundamental que as entidades responsáveis pelas Obras de Arte conheçam o seu património e que o mantenham em bom estado de conservação, de forma a garantir a segurança dos seus utilizadores e assegurando a sua durabilidade, de forma racional e o mais económica possível. Para se garantir estas condições é fundamental que em todas as fases do processo, desde a concepção até à utilização da estrutura, se tenha presente a necessidade de se obter uma estrutura com adequado desempenho durante todo o seu tempo de vida útil.

Evidenciou-se a importância da implementação de Sistemas de Gestão de Obras de Arte, referindo-se que a sua utilização é a melhor forma dos Donos de Obra terem uma visão global dos estados de conservação das suas pontes, planeando atempadamente as intervenções a realizar no seu parque de Obras de Arte.

Para que a sua implementação seja eficaz deve-se também exigir que as inspeções sejam necessariamente realizadas por pessoas com formação específica na área. A sistematização de procedimentos de inspeção e a realização de documentos de referência, nomeadamente

manuais de patologias que incluam a sua descrição, natureza e as suas causas, é essencial para a uniformização de critérios entre os diferentes inspectores.

As inspecções periódicas devem verificar o estado em que se encontram todos os componentes da Obra de Arte incluindo uma avaliação do comportamento global da estrutura.

É fundamental que desde a fase de concepção até à de exploração se tenha presente a necessidade de efectuar a manutenção e conservação das Obras de Arte, por exemplo: garantindo o acesso a todos os componentes (através da instalação de escadas, aberturas para aceder ao interior dos tabuleiros, pilares e encontros de secção vazada), para facilitar as inspecções e a substituição de componentes degradados (prevendo zonas de apoio dos macacos para substituir aparelhos de apoio; através da colocação de guarda corpos e guardas de segurança com bases de buchas em vez de serem encastradas no betão com recurso a buchas, etc.).

Tendo sempre presente o importante papel que as Pontes desempenham nas redes rodoviárias, pretendeu-se com este estudo sublinhar o facto de que uma das principais causas da degradação das Obras de Arte, e de redução da sua vida útil, é a sua deterioração precoce associada à ausência de inspecção, manutenção e conservação destas estruturas.

Procurou-se, de uma maneira geral, discutir a importância da preservação do património Nacional de Obras de Arte, evidenciando que tal só é possível através da realização de acções preventivas ao invés de acções reactivas, que garantidamente não originam a melhor intervenção. Salientando que a manutenção preventiva permite evitar ou reduzir a necessidade de trabalhos de reparação curativa, mais onerosa e tende a aumentar a durabilidade das obras.

Foram apresentadas os diferentes tipos de patologias mais comuns que se podem observar nas pontes rodoviárias, tendo em consideração os diferentes materiais constituintes. Procurou-se apresentar as suas principais causas e efectuar uma abordagem aos procedimentos de avaliação do estado de conservação tendo em vista a reabilitação e reforço.

Tendo em consideração que as estruturas em betão são dominantes no parque de Obras de Arte nacional, e que as técnicas de reabilitação e reforço aplicadas a este tipo de obras estão em constante evolução, procurou-se apenas apresentar as técnicas mais correntes.

Por fim, importa salientar a importância de se desenvolverem estudos que permitam correlacionar as patologias observadas nos diferentes tipos de Obras de Arte, com factores como a idade, material, tipo de estrutura, localização, etc. Considera-se que este tipo de estudos

é fundamental para melhor compreender do comportamento de uma estrutura e se identificarem as anomalias mais comuns associando-as às respectivas causas, para cada tipo de obra. Estes ensinamentos podem ser muito úteis na análise dos danos em futuras inspecções.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Sendo avaliação do desempenho e reabilitação de pontes uma área ainda em desenvolvimento, apresentam-se algumas considerações que permitem evidenciar a grande diversidade de estudos que ainda podem ser desenvolvidos relacionando-os com o tema desta tese.

Relativamente à Gestão de Obras de Arte, salientam-se os aspectos seguintes:

- Desenvolvimento de documentos técnicos normativos:
 - Dicionário de termos técnicos relativos às Obras de Arte;
 - Nomenclatura das Obras de Arte (tipologia de obras de arte e seus componentes, etc);
 - Manual de patologias (para cada tipo de estrutura e diferentes materiais estruturais);
 - Manual de técnicas de inspecção e diagnóstico de estruturas;
 - Documentos técnicos específicos para aparelhos de apoio e juntas de dilatação.
- Desenvolvimento de um Dossier da Obra tipo, contendo toda a informação importante relativa às fases da vida da Obra de Arte: concepção e construção, estado de referência e vida da obra. Desta forma, toda a informação relevante da obra ficaria reunida numa plataforma única, de modo a facilitar o acesso e arquivo de toda a informação relativa aos projectos e execução da obra, inspecção, manutenção e reabilitação.
- Desenvolvimento e optimização de novos sistemas de monitorização de estruturas, recorrendo por exemplo à utilização de materiais inteligentes ou ao desenvolvimento de novos sensores, mais económicos e de fácil aplicação, potenciando a sua aplicação nas obras de forma mais generalizada.

Numa outra linha de desenvolvimentos futuros, no que diz respeito à avaliação da segurança, reabilitação e reforço de estruturas, julga-se ser da maior importância considerar os seguintes aspectos:

- Desenvolvimento e optimização dos procedimentos e técnicas de caracterização dos materiais constituintes das estruturas existentes, no sentido de facilitar a sua aplicação a

qualquer projecto de reabilitação, auxiliando-se na definição da técnica de reabilitação e/ou reforço mais adequada.

- Pela escassa regulamentação, relativa às estruturas existentes, sugere-se que sejam realizados estudos e trabalhos científicos no sentido de se elaborarem documentos normativos de apoio à acção de avaliação da segurança, reabilitação e reforço deste tipo de estruturas tendo em consideração os materiais e soluções estruturais mais comuns.
- Desenvolvimento e optimização de técnicas de reabilitação de estruturas de Obras de Arte em betão armado, alvenaria de pedra e estruturas metálicas, adaptadas e adequadas ao parque nacional.
- Consideração de forma rigorosa a acção sísmica na avaliação da segurança do parque nacional desenvolvendo soluções de reforço.

REFERÊNCIAS

A

ACI Commitee 364 (1999) - *ACI 364.1 R-94 Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation*. American Concrete Institute.

Almeida, J. (2003) – *Gestão de Pontes Rodoviárias: um modelo aplicável em Portugal*, tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Andrey, D. (1987) – *Maintenance des ouvrages d'art: Méthodologie de surveillance*, tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

Appleton, J. ; Gomes, A. (1997) – *Reforço de Estruturas de Betão Armado por adição de armaduras exteriores*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n.º 41.

B

Barros, J. (2006) – *Fiber Reinforced Polumer (FRP) Materials for the Structural Strengthening*. Guimarães, Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho.

Beleza, L (1996) – *A reparação de betões*, tese de mestrado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

BRIME (2002) – *Bridge Management in Europe*, Final Report.

Brito, J. (1992) – *Desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Obras de Arte em Betão*, Tese de Doutoramento, Lisboa.

Brouxel, M. (2009) – *Pathologie des Matériaux*, École Nationale des Ponts et Chaussées, Cycle Inspection des Ouvrages D'Art.

C

Calgaro, J. (2003) – *Project et Construction des Ponts*, Presses de L'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Calgaro, J. ; Lacroix, R. (1997) – *Maintenance et Réparation des Ponts*, Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Carvalho, J.; Gonçalves, L. (2001) – *Monitorização da nova ponte sobre o rio ave na auto-estrada braga-guimarães*; Projecto Individual da Licenciatura em Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Castro, J.; Martins, J. (2006) – *Patologia do Betão Reparação e Reforço de Estruturas*, 1ª edição.

CEB (1983) – *Bulletin d'information n.º 162* – Assessment of concrete structures and design procedures for up-grading (redesign). Prague: Comité Euro-international du beton.

CEN (2002) – *Eurocode 0: Basis of Structural Design*, EN-1990, Brussels.

- CEN (2002) – *Eurocode 1: Actions on Structures*, Part 1.1 Densities, self-weight and imposed loads on buildings, EN 1991-1-1, Brussels.
- CEN (2004) – *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, EN 1992-1-1, Brussels.
- CEN (2004) – *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, EN 1998-1, Brussels.
- CEP/FIP (1990) – *Model Code 1990*, Comité Euro-International du Béton.
- Chopra A. (2001) – *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall International.
- Costa, A. (2003) – *A qualidade na construção, reabilitação e reforço de estruturas*, Actas do 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios pp. 219-237, FEUP.
- Costa, V.; Oliveira, D.; Varum; H. (2009) – *Inspecção, manutenção, conservação e reabilitação, de Obras de Arte*, 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP, Lisboa.
- Coutinho, J. (2002) – *Materiais de Construção*, FEUP.
- Cremona, C. (2002) – *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*, Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Cruz, P. (2001) – *Conservação e Reabilitação de Pontes*, Jornadas de Engenharia Civil.
- Cruz, P. (2002) – *Introdução às técnicas clássicas de Monitorização de Obras de Arte*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

E

- Emmonds, P. H.(1994) – *Concrete repair and maintenance*, R.S. Means Company.
- EP (2006) – *Manual de Inventário*, Estradas de Portugal, S.A.
- EP (2006) – *Manual de Inspecções de Rotina*, Estradas de Portugal, S.A.
- EP (2006) – *Manual de Inspecções Principais*, Estradas de Portugal, S.A.
- EP (2006) – *Manual dos trabalhos de Reparação*, Estradas de Portugal, S.A.
- EP (2007) – *Relatório fotográfico*, Estradas de Portugal, S.A.

F

- Félix, C. (2002) – *Monitorização do Comportamento de Estruturas de Betão*, Instituto Politécnico do Porto.
- Ferreira, L. (2007) – *Obras de Arte de Alvenaria em Portugal Anomalias, Técnicas de Reabilitação e Gestão*, Tese de mestrado Instituto Superior Técnico
- Freire, L. (2008) – *Sistema de inspecção e diagnóstico de aparelhos de apoio em pontes rodoviárias*, tese de mestrado Instituto Superior Técnico.

Filiatrault, A. (2004) – *Supplemental Damping and Seismic Isolation* – Class Notes, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk.

Figueiras, J.; Juvantes, L. (2001) – *Reforço de pontes por colagem de sistemas CFRP, Caso da Ponte de N.S. da Guia*. Seminário Segurança e Reabilitação das Pontes em Portugal.

G

Guerreiro, L. (2003) – *Sistemas de Isolamento Sísmico*, Ciclo de Palestras em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.

H

Henriques, A. (1998) – *Aplicação de Novos conceitos de segurança no dimensionamento do betão estrutural*, Tese de doutoramento pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

I

IABMAS (2006) – Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost, July 16-19, Porto-Portugal.

ICOMOS (2004) – *Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico*. International Council on Monuments and Sites.

IQOA (1996) – IQOA Ponts: Catalogues des désordres des types d'ouvrages et appuis non courants.

K

Kühn, B.; Lukić, M.; Nussbaumer, A.; Günther, H. P.; Helmerich, R.; Herion, S. ; Kolstein, M.H.;Walbridge, S.; Androic, B.; Dijkstra, O.; Bucak, Ö. (2008) – *Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*, JRC European Commission.

L

Laner, F. (2001) – *Manifestações patológicas nos viadutos, pontes e passarelas do município de porto alegre*, Tese de mestrado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Leonhardt, F. (1997) – *Construções de Concreto*.

Lima, A. (2006) – *Juntas de Dilatação em Pontes Rodoviárias, Desenvolvimento de um sistema de gestão*, Tese de mestrado Instituto Superior Técnico.

Lourenço, P. (2005) – *Aplicações das Recomendações ICOMUS sobre Conservação de Estruturas Antigas: do elemento construtivo à estrutura global*, Seminário sobre a Intervenção no Património: Práticas de Conservação e Reabilitação, Porto.

Lourenço, P. (2005) – *Inspecção e Observação de Obras*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

M

Manterola, J.; Cruz, P. (2004) – *Pontes: História e Princípios Gerais*.

Melo, L.; Reis, A (2003) – *Ponte Metálica de Vila Real sobre o Rio Corgo Reabilitação e Reforço*, Congresso de Construção Metálicas e Mista.

Mendonça, T.; Brito, V. (2008) – *Sistema de Gestão de Obras de Arte (GOA)*, 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia 2º Congresso de Engenharia de Moçambique.

N

Neves, L (2005) – *Life-cycle analysis of bridges considering condition, safety and maintenance cost interaction*, Tese de Doutoramento pela Universidade do Minho.

Neves, L.; Cruz (2001) – *Introdução à Análise Probabilística Simplificada da Segurança Estrutural*, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.

O

Oliveira, D.; Lourenço, P. (2003) – *Pontes de Alvenaria. Técnicas de construção e fundações. Técnicas de inspeção e reforço. Casos de Estudo*.

Oliveira, D.; Ramos, L.; Lourenço, P.; Roque, J. (2005) – Structural Monitoring of the Monastery of Jerónimos, International Conference 250th anniversary of the 1755 Lisbon earthquake, Lisbon, Portugal, pp. 466-473.

Oliveira, D.; Lourenço, P. (2006) – *Conservation of ancient constructions and application to a masonry arch bridge*.

P

Pacheco, P. (1998) – *Pré-esforço Orgânico – Um exemplo de sistema efector*, tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Padgett, J.; DesRoches, R.; Nielson, B.; Yashinsky, M.; Kwon, O.; Burdette, N.; Tavera, E. (2008) – *Bridge Damage and Repair Costs from Hurricane Katrina*, Journal of Bridge Engineering.

Pedro, O. (1997) – *Monitoring in Structural engineering*, New Applications of Computer Technologies in International Conference New Technologies in Structural Engineering, Lisboa.

Póvoa, A. (2008) – *Inspecção de Obras de Arte no âmbito do Sistema de Gestão de Conservação*.

K

Kawashima, K. (2009) – *Seismic Response Modification of Urban Infrastructure*, Department of Civil Engineering Tokyo Institute of Technology.

R

Radomski, W. (2002) – *Bridge Rehabilitation* – Ed. Imperial College Press.

Reis, A. (1997) – *Folha da disciplina de Pontes*. Instituto Superior Técnico. DECivil Secção de Estruturas e Construção.

REBAP (2001) – *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*. Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de Julho. Portugal.

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

Rodrigues, N. (2008) – *Reabilitação de Pontes Históricas de Alvenaria*, tese de mestrado Instituto Superior Técnico.

Rodrigues, C. (2005) – *Comportamento às acções cíclicas de pilares de betão armado reforçados com materiais compósitos*, tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Especialidade de Estruturas. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia

S

Santiago, S. (2000) – *Sistemas de Gestão de Obras de Arte: Módulo de Apoio à inspecção*, tese de mestrado, Instituto Superior Técnico.

Santos, N. (1998) – *Conservação e Reabilitação de Pontes Metálicas*, tese de mestrado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Santos, T. (2008) – *Estratégias para reparação e reforço de estruturas em betão*, tese de mestrado Universidade do Minho.

Sauvage, G. (2003) – *Inspection des Ouvrages d'art Métalliques et Mixtes*, SNCF.

Setra (2006) – *Guide méthodologique : Gestion des Ouvrages D'art A l'usage des départements et autres collectivités locales*.

Setra (2007) – *Guide Technique : Appareils d'appui en élastomère fretté Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires*.

SIA (1997) – *Norme SIA 469 : Conservation des Ouvrages*.

SIA (1994) – *Directive SIA 462 : Evaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants*.

SIA (1997) – *Recommandation SIA 162/5 : Conservation des structures en béton*.

Silva, A. (2006) – *Reacções expansivas no betão*, seminário materiais em ambiente marítimo, Funchal 22 e 23 Outubro 2007, LNEC.

Small, E.P.; Cooper, J. (1998) – *Condition of the Nation's highway bridges. A look at the past, present and future* TR news, (194), 3-8.

Srinivasan, A.; Michael McFarland, D. (2001) – *Smart Structures*, Cambridge University Press.

T

Tridon, M. (2009) – *Techniques de construction*, École Nationale des Ponts et Chaussées, Cycle Inspection des Ouvrages D'Art.

W

Wenk, T. (2005) – *Evaluation Parasismique des Ponts-routes Existants*, Office fédéral des routes.

Wisniewski, D. (2007) – *Safety Formats for the Assesment of Concrete Bridges*, Doctoral Thesis, University of Minho.

V

- Vários (2006) – *Bridge Inspection Manual*, Minnesota Department of Transportation
- Vários (2002) – *Bridge Management Systems — the State of the Art*, Austroads, Sydney.
- Vários (2004) – *Manual de inspeção de Pontes Rodoviárias*, Brasil Departamento Nacional de Infra-Estrutura de transportes, Rio de Janeiro.
- Varum, H. (2003) – *Seismic assessment, strengthening and repair of existing building*, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- Varum, H.; Costa, A.; Pinto, A. (2004) – *Uma Metodologia simplificada para a Avaliação de Edifícios Existentes e Dimensionamento do Reforço Ótimo - SISMICA 2004*, Universidade do Minho - Guimarães.
- Varum, H.; Costa, A.; Pinto, A. (2005) – *Reforço Sísmico do Património Edificado em Betão Armado. 2º Seminário "A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação"*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Endereços de Internet

Além da lista de referências citada, apresentam-se alguns endereços de internet relacionados com o assunto estudado na presente dissertação.

Applied Technology Council (Associação de Engenheiros de Estruturas da Califórnia, EUA)

<http://www.atcouncil.org>

BRIDGE Management in Europe

<http://www.trl.co.uk/brime>

DURHAM Geo slope Indicator

<http://www.slopeindicator.com>

FiberSensing - Sistemas avançados de Monitorização

<http://www.fibersensing.com>

FIB – CEB-FIP

<http://fia.epfl.ch>

Gavea Sensors – Measurement Solutions

<http://www.gaveasensors.com>

ICORR- Investigação e consultadoria em corrosão, Lda

<http://www.icorr.pt>

SETRA - Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

<http://www.setra.fr>

SIA - société suisse des ingénieurs et des architectes – Regulamentação Suíça

<http://www.sia.ch>


Kawashima Research Group - Investigação em Engenharia Sísmica

<http://seismic.cv.titech.ac.jp/en/>

ANEXOS

ANEXO 1 – Mecanismos de deterioração do betão (Coutinho 2002)

	PROCESSOS	CAUSA	SOLUÇÃO	NORMALIZAÇÃO
PROCESSOS BIOLÓGICOS	Deterioração do betão por ácidos sulfídrico, húmido e sulfúrico	Em sistemas de esgotos	<ul style="list-style-type: none"> - evitar cavitação - boa ventilação - cimentos aluminosos - permeabilidade suficientemente baixa - protecção adicional 	Se PH < 4 usar cimentos aluminosos que exigem cuidados especiais na utilização e não existem em Portugal Protecção adicional (E378)
	Deterioração do betão por ciclos gelo/degelo	Aumento de volume da água ao congelar Tipo de rede de poros	<ul style="list-style-type: none"> - introdução de ar - permeabilidade suficientemente baixa - verificação da gelividade dos agregados - não usar adições 	4 a 6 % em função de D (NP ENV 206) a/c ≤ 0,5, em função da classe G(E378) segundo ensaio em NP 1278 (E373) Recomenda-se CE I se não houver problemas de gradientes térmicos → retracção térmica (E378)
PROCESSOS FÍSICOS	Deterioração do betão por abrasão	Condições de uso	<ul style="list-style-type: none"> - aumento de recobrimento - permeabilidade suficientemente baixa Adições: cinzas volantes ou sílica de fumo ou... - maior percentagem de grãos 	Textura superficial rugosa Classe de resistência ≥ C30/37 Agregados duros % levada de grossos e granulometria conveniente Duplicação do tempo de cura Abrasão severa: superfície especialmente resistente à abrasão Ensaio em E396 (NP ENV 206)
	Deterioração do betão por cavitação	Condições de uso	<ul style="list-style-type: none"> - maior percentagem de finos - acabamento mecânico 	
	Fissuração por retracção plástica	Evaporação > exsudação deficiente cura e deficiente protecção, colocação e compactação	<ul style="list-style-type: none"> - protecção adequada - colocação e compactação, adequada - Revibração imediata ao aparecimento 	Especial atenção ao vento
PROCESSOS MECÂNICOS	Fissuração por assentamento plástico	Impedimento de assentamento das partículas, pela cofragem ou armaduras	<ul style="list-style-type: none"> - cuidados na colocação compactação cura e protecção - Revibração imediata ao aparecimento 	
	Fissuração por sobrecarga	Deficiente dimensionamento	Projecto cuidado	
	Fissuração por retracção térmica (gradientes térmicos em betão jovem)	Calor de hidratação (grandes massas) Gradiente in/ext >20°C peças em que Sup/vol é muito baixa	<ul style="list-style-type: none"> - escolha do tipo de cimento adequado - arrefecimento 	Não usar CE I Recomenda-se CE II CE III ou CE IV que tem calor de hidratação baixo Arrefecimento dos agregados, da água ou do próprio betão com por. Ex. azonto líquido (E378)
	Fissuração por retracção térmica	Ligação de betão jovem e betão antigo	- cura adequada	
	Fissuração por retracção	secagem	- cura (e protecção) adequada	cura (e protecção) adequada das superfícies expostas de betão fresco ou toda a área de betonagem (E378)

	PROCESSOS	CAUSA	SOLUÇÃO	NORMALIZAÇÃO
PROCESSOS QUÍMICOS	Por ácidos	Destruição da pasta de cimento Processo ± activo dependente do produto de reacção ± passivante	- permeabilidade suficientemente baixa - protecção adicional	Se PH<4 usar c. Alumínio (cuidados especiais e não existem em Portugal) Se 4<PH<0,5 ver Classes EQ1 EQ2 e EQ3 (C_{min} e A/C_{max} recobrimento) (E378)
	Água descarbonante (CO_2) e sais de magnésio (Mg^{2+})			Usar CE IV ou CE III com muita escória ou c. alumínio (cuidados especiais na utilização e não existem em Portugal) Ver Classes EQ1, EQ2 e EA3 (C_{min} e A/C_{max} recobrimento) (E378)
	Sais amoniacais			CE III com muita escória ou c. Aluminoso (cuidados especiais e não existem em Portugal) Ver Classes EQ1, EQ2 e EA3 (C_{min} e A/C_{max} recobrimento) (E378)
	Deterioração do betão por sulfatos (solos ou águas) ataque clássico	Reagem com os aluminatos (cimento e agregados) <i>Reacção expansiva etringite</i>	- cimento pobre em aluminatos - evitar agregados com alumina (fedspatos caulinizados) - protecção adicional, eventualmente	Usar cimentos resistentes aos sulfatos Quadro VI da E378 Ver Classes EQ1, EQ2 e EA3 (C_{min} e A/C_{max} recobrimento) Verificar a resistência do ligante aos sulfatos (E251) Usar agregados resistentes aos sulfatos (ver E373) (Existe um cimento especial SR-MR c/ $C_2A<4\%$) (E378)
	Deterioração do betão por sulfatos (Internos) Formação retardada de etringite (DEF)	Ausência de SO_4^{2+} externos história de cura por calor (ou demasiado calor durante a presa)	- cimento pobre em aluminatos - cuidados com a cura com calor	
	Deterioração do betão por sulfatos com formação de taumasite	Ataque dos SO_4^{2+} ao CSH na presença de iões carbonato, com muita humidade e temperaturas baixas	Propício em fundações com humidade alta e temperaturas muito baixas e SO_4^{2+} - evitar agregados cálcarios evitar ligantes com filer calcário	Não usar cimento de filer calcário ($\leq 20\%$ quando a concentração em sulfatos é superior à classe EQ1 (recomendações da BRE)
	Deterioração do betão por água do mar	Cloretos sulfatos (a acção dos sulfatos é inibida pelos cloretos)	- permeabilidade muito baixa - não usar cimento pobre em aluminatos (diminui resistência a Cl^- (acção preponderante) - para evitar penetração Cl^- se Sado portland, limitar $6\% < AC_3 < 10\%$	Usar cimento CE II, II ou IV nomeadamente CE III com mais de 75 % escórias. Verificar a resistência do ligante aos sulfatos (E251) Usar agregados resistentes aos sulfatos (ver E373) Ver classes EC11e EC12 (C_{min} e AC_{max} e e Recobrimento) (E378)
	Ataque severo (zona de salpicos)		- permeabilidade muito baixa - betão de alta resistência ($f_{ck} \geq 35$ MPa) - com adições: escórias cinzas, etc. (atenção ciclos gelo/degelo) - $A/C < 0,4$ ou menos - aumentar a dosagem cimento - aumentar recobrimento (40 a 75 mm) - protecção adicional	Usar cimento CE II, II ou IV nomeadamente CE III com mais de 75 % escórias. Verificar a resistência do ligante aos sulfatos (E251) Usar agregados resistentes aos sulfatos (ver E373) Ver classes (C_{min} e AC_{max} e e Recobrimento) (E378)
	Deterioração do betão por álcalis (Na,k) podem reagir com	Sflica reactiva 	- não usar agregados com sílica reactiva - limitação dos álcalis do cimento (0,6 %) - limitar se possível acesso de álcalis do exterior (sais desconelantes) - adições de pozolana, sílica de fumo, etc. - baixa permeabilidade (baixo A/C) - protecção adicional	Não usar agregados com sílica reactiva Ver E373 (E415 negativo) Se impossível, limitar os álcalis, expresso em Na_2O , a 0,6% cimento (massa) Usar CE IV (a pozolana fixa os álcalis) ou CE III com muita escória (fixa os álcalis) Limitar o grau de saturação do betão por ex. com membranas impermeáveis (E373, #378 e NP #NV 206) Verificar a reactividade com NP 1381 e E159 (E373, E378 e NP ENV206)
			Carbonatos dos agregados (dolomites)	Não se conhecem casos na Europa

	PROCESSOS	CAUSA	SOLUÇÃO	NORMALIZAÇÃO
PROCESSOS DE DESPASSIVAÇÃO	Carbonatação		- permeabilidade baixa - protecção adicional	Casses EC1 e EC4 (Cmin e ACmax e e Recobrimento onde $A/C \leq 0,6$ Recomenda-se CE I (+ Ca(OH) ₂) Atenção especial no uso de CE IV onde Ca(OH) ₂ é muito baixo (E378)
	Penetração de cloretos		- permeabilidade baixa tipos de cimento com escórias, sílica de fumo, cinzas volantes, pozolanas etc. - protecção adicional	Classes EC13 e EC13 (Cmin e A/Cmax e recobrimento) onde $A/C \leq 0,045$ Recomenda-se CE II, III e IV mas CE III com ameis de 75 € de escórias (CE III pode ter de 36 a 80€ de escórias) (E378)
	Fragilização por hidrogénio			Se sulfuretos betão armado > 0,5% Se sulfuretos betão pré-esforçado > 0,2% Não usar CE III

ANEXO 2 – Classificação das anomalias mais comuns por tipo de junta (Adaptado Lima 2006)

Tipo 1	Juntas abertas - JA	Tipo 8	Juntas de elastómero armado - JEA
1.B	Dano em guarda-cantos	1.A	Deterioração da banda de transição
2.A	Desnivelamento (acção de choque sob tráfego)	1.C	Descolamento na transição
Tipo 2	Juntas ocultas sob pavimento contínuo - JOPC	4.A	Deterioração /ausência da selagem de alvéolos de fixação
1.F	Deterioração do pavimento	4.C	Elementos de fixação soltos ou ausentes
6.A	Infiltração de águas	4.D	Deterioração do leito de assentamento / zona de fixação
Tipo 3	Juntas de betume modificado JBM	5.B	Fissuração /corte da junta / material da junta
1.C	Descolamento na transição	Tipo 9	Pentes metálicos em consola - PMC
1.E	Arrastamento do material betuminoso do pavimento sobre a junta	2.A	Desnivelamento (acção de choque sob tráfego)
5.A	Deformação da junta /material da junta	4.A	Deterioração /ausência da selagem de alvéolos de fixação
5.B	Fissuração /corte da junta / material da junta	5.E	Oxidação de elementos metálicos
5.C	Destaque de material da junta	6.C	Deficiência no sistema de evacuação de águas
6.A	Infiltração de águas	7.A	Falta de aderência
Tipo 4	Juntas seladas com material elástico - JSME	Tipo 10	Juntas de elastómero armado compostas – JEAC
1.B	Dano em guarda-cantos	1.A	Deterioração da banda de transição
1.C	Descolamento na transição	4.A	Deterioração /ausência da selagem de alvéolos de fixação
5.B	Fissuração /corte da junta / material da junta	Tipo 11	Placas metálicas com roletes – PMR
5.C	Destaque de material da junta	5.E	Oxidação de elementos metálicos
6.A	Infiltração de águas	7.A	Falta de aderência
Tipo 5	Juntas em perfil de elastómero comprimido - JPEC	7.B	Emissão de ruído excessivo
1.C	Descolamento na transição	Tipo 12	Juntas de perfis de elastómero múltiplos – JPEM
5.B	Fissuração /corte da junta / material da junta	1.B	Dano em guarda-cantos
Tipo 6	Bandas flexíveis de elastómero - BFE	2.B	Irregularidade geométrica na junta / funcionamento da junta no plano do tabuleiro
1.A	Deterioração da banda de transição	5.A	Deformação da junta /material da junta
1.C	Descolamento na transição	5.C	Destaque de material da junta (desprendimento das membranas sobre-tensionadas de um perfil metálico)
4.A	Deterioração /ausência da selagem de alvéolos de fixação	5.E	Oxidação de elementos metálicos
4.C	Elementos de fixação soltos ou ausentes	5.F	Dano em elementos sub-superficiais do sistema de junta
Tipo 7	Placas metálicas deslizantes - PMD	7.A	Falta de aderência
3.A	Movimento da junta impedido	7.B	Emissão de ruído excessivo
5.E	Oxidação de elementos metálicos		