

Maria Morais

Pontes em Arco de Alvenaria - Estudo de um Caso Prático

IPV - ESTGV | 2012



Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

Maria José da Cruz Morais

Pontes em Arco de Alvenaria - Estudo de um Caso Prático

Setembro de 2012

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

Maria José da Cruz Morais

Pontes em Arco de Alvenaria - Estudo de um Caso Prático

Tese de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor Gilberto Antunes Ferreira Rouxinol
Engenheiro Paulo Jorge Ribeiro Pimenta



Setembro de 2012

À minha família, ao meu namorado e aos meus amigos.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

RESUMO

As pontes em arco de alvenaria muito utilizadas no passado para vencer vales são hoje descuradas face às novas tecnologias, nomeadamente, o betão armado pré-esforçado e o aço, que permitem vencer vãos cada vez maiores. Porém, muitas das pontes em arco de alvenaria, por um lado continuam em pleno serviço e, por outro, adquiriram importância patrimonial.

Pretende-se assim com este trabalho estudar as pontes em arco de alvenaria, designadamente, o comportamento estrutural, identificar os danos normalmente presentes neste tipo de estruturas e através de um modelo matemático, o método dos elementos discretos misto, 2D, determinar a causa de alguns dos danos visíveis e respetiva capacidade de carga. Para o estudo é considerada uma ponte em arco de alvenaria: a Ponte Românica de Mondim da Beira existente no Município de Tarouca.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ABSTRACT

The masonry arch bridges widely used in the past to cross the valleys are today neglected with regard to the new technologies, including the prestressed concrete and steel, which allow the increasing spans. However, many of masonry arch bridges continue in full service and, on the other hand, they gained patrimonial importance.

The aim of this work is the study of masonry arch bridges, namely, the structural behavior, identify the damage normally present in this kind of structures and using a mathematical model, the mixed discrete elements method (2D), determine the cause of some visible damage and its bearing capacity. For the study it is considered a masonry arch bridge: the Mondim da Beira Romanesque Bridge existing in the city of Tarouca.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

RÉSUMÉ

Les ponts en arc en maçonnerie, beaucoup utilisés dans le passé pour franchir les vallées, sont aujourd'hui négligés par rapport aux nouvelles technologies, en particulier le béton précontraint et l'acier, qui permettent des portées plus grandes. Cependant, une grande partie des ponts en arc en maçonnerie continues en service, et d'autre part, ont acquis une importance patrimoniale.

On prétend ainsi avec ce travail étudier les ponts en arc en maçonnerie, notamment leur comportement structurel, identifier les dommages normalement présents dans ces structures et, à travers d'un modèle mathématique, la méthode des éléments discrets mixte, 2D, déterminer la cause des dommages visibles et respective capacité de charge. Pour cette étude on a considéré un pont en arc en maçonnerie: Pont Mondim da Beira romane existant dans la ville de Tarouca.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

PALAVRAS CHAVE

Alvenaria, pontes em arco de alvenaria de pedra

Danos não estruturais, danos estruturais

Manutenção, reabilitação, reforço

Inspeção visual, diagnóstico

Método dos Elementos Discretos

Geração de malhas

Colapso estrutural

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

KEY WORDS

Masonry, stone masonry arch bridges
Non-structural damage, structural damage
Maintenance, rehabilitation, structural reinforcement
Visual inspection, diagnosis
Discrete element method
Mesh generation
Structural collapse

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

MOTS CLÉS

Maçonnerie, ponts en arc en maçonnerie de pierre
Dommages non structurels, dommages structurels
Entretien, réhabilitation, renforcement de la structure
Inspection visuelle, diagnostic
Méthode des Éléments Discrets
Génération de maille
Effondrement de la structure

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

AGRADECIMENTOS

Quero expressar o meu reconhecimento e os meus sinceros agradecimentos a todos os que estiveram ao meu lado, direta e indiretamente, durante a realização deste trabalho, à sua amizade, confiança, disponibilidade e apoio, pois sem eles a concretização deste trabalho não teria sido possível, em especial:

O meu orientador, Gilberto Rouxinol, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), do Instituto Politécnico de Viseu (IPV), pela sua orientação, transmissão de conhecimentos, disponibilidade, paciência e apoio;

A Câmara Municipal de Tarouca, nomeadamente, o presidente da Câmara, Mário Caetano Ferreira, pela possibilidade do protocolo realizado, o meu monitor, Paulo Pimenta, por todo o apoio e disponibilidade, o topógrafo Carlos Barros e o desenhador Paulo Trindade pelo trabalho de topografia e desenho da Ponte Românica de Mondim da Beira;

O presidente, Paulo Mendes, da ESTGV, do IPV, pela sua disponibilidade;

O professor, José Padrão, da ESTGV, do IPV, pela informação prestada relativamente à reabilitação e intervenção em pontes em arco de alvenaria;

A bibliotecária, Rita Meneses, da ESTGV, do IPV, pela sua disponibilidade, informação prestada e apoio sobre Referências Bibliográficas;

O NCREP - Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património, nomeadamente, os professores, Raimundo Delgado e António Arede, pela disponibilidade e possibilidade de acesso à entidade, e Esmeralda Paupério pela sua disponibilidade, apoio, transmissão de conhecimentos e informação disponibilizada relativamente à inspeção, diagnóstico e intervenção em pontes em arco de alvenaria;

A OZ - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda., nomeadamente, o diretor técnico, Carlos Mesquita, pela sua disponibilidade e informação disponibilizada relativamente à inspeção, diagnóstico e intervenção em pontes em arco de alvenaria;

O LNEC, nomeadamente, os investigadores, Arlindo Gonçalves e Silvino Pompeu Santos, pela disponibilidade e o investigador, José Antero Senra Vieira de Lemos, pela disponibilidade e informação disponibilizada relativamente às propriedades mecânicas da alvenaria e ao Método dos Elementos Discretos;

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

A REFER, nomeadamente, Hugo de Vasconcelos Corrêa Patrício, Ana Isabel Silva e Susana Maria da Costa Abrantes pela disponibilidade e informação disponibilizada relativamente à inspeção, diagnóstico e intervenção em pontes em arco de alvenaria;

O IHRU IP, o IGESPAR IP e o Instituto de Meteorologia de Portugal IP, pela informação disponibilizada relativamente à Ponte Românica de Mondim da Beira;

O professor, Romeu Vicente, da Universidade de Aveiro, pela disponibilidade de apoio e pela informação fornecida relativamente aos seus trabalhos desenvolvidos;

O professor, Paulo Manuel Mendes Pinheiro Providência e Costa, da Universidade de Coimbra, pela disponibilidade de apoio e informação disponibilizada relativamente às propriedades mecânicas da alvenaria;

O professor, Paulo Lourenço, da Universidade do Minho, pela disponibilidade e informação disponibilizada relativamente às propriedades mecânicas da alvenaria;

A professora, Cristina Margarida Rodrigues Costa, do Instituto Politécnico de Tomar, pela informação fornecida relativamente aos seus trabalhos desenvolvidos;

O professor, Arlindo Begonha, da Universidade do Porto, pela informação disponibilizada relativamente ao reconhecimento de danos e formas de intervenção;

O professor, António Baptista, da ESTGV, do IPV, pelo incentivo;

Finalmente a minha família, o meu namorado e os meus amigos pela sua presença, paciência, compreensão e apoio.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
RÉSUMÉ.....	vii
PALAVRAS CHAVE	ix
KEY WORDS	xi
MOTS CLÉS	xiii
AGRADECIMENTOS	xv
ÍNDICE GERAL	xvii
ÍNDICE REMISSIVO DE AUTORES	xxi
ÍNDICE DE FIGURAS	xxiii
ÍNDICE DE QUADROS	xxix
ABREVIATURAS E SIGLAS	xxxiii
NOTAÇÃO.....	xxxv
1. Introdução.....	1
1.1 Importância do tema do trabalho	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Estruturação do trabalho	2
2. As pontes em arco de alvenaria de pedra	5
2.1 Constituição das pontes em arco de alvenaria de pedra.....	6
2.1.1 Elementos constituintes	6
2.1.2 Materiais constituintes.....	14
2.2 Sistema estrutural das pontes em arco de alvenaria de pedra consoante as Épocas de Construção.....	15
2.3 Evolução dos conhecimentos sobre o comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra.....	17
2.3.1 Métodos de análise tradicional	18
2.3.2 Análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF)	31
2.3.3 Análise numérica pelo Método dos Elementos Discretos (MED).....	32

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

2.3.4	Análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos Discretos.....	33
2.4	Considerações finais.....	33
3.	Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra.....	35
3.1	Entidades públicas e privadas envolvidas no estudo de pontes em arco de alvenaria de pedra.....	36
3.2	Danos em pontes em arco de alvenaria de pedra.....	38
3.2.1	Fatores desencadeadores de danos.....	38
3.2.2	Tipos de danos.....	39
3.3	Intervenção em pontes em arco de alvenaria de pedra.....	56
3.3.1	Operações de manutenção.....	57
3.3.2	Operações de reabilitação/reforço.....	60
3.4	Considerações finais.....	65
4.	Método dos Elementos Discretos.....	67
4.1	Representação dos elementos discretos.....	68
4.2	Restrições de movimento.....	69
4.3	Interação entre elementos discretos.....	69
4.3.1	Representação dos contactos.....	69
4.3.2	Arredondamento dos vértices.....	70
4.3.3	Comprimento de influência do contacto.....	71
4.3.4	Tipos de contacto.....	71
4.3.5	Tolerâncias de sobreposição e de separação.....	72
4.3.6	Deteção e atualização de contactos.....	72
4.3.7	Modelo constitutivo dos contactos.....	73
4.4	Carregamento (ação permanente e sobrecarga).....	74
4.5	Amortecimento.....	74
4.6	Integração das equações de movimento e passo de tempo.....	75
4.6.1	Lei de movimento e lei de conservação do momento angular.....	75
4.6.2	Forças não equilibradas.....	76
4.6.3	Lei força deslocamento.....	76
4.6.4	Passo de tempo.....	77
4.7	Comportamento mecânico dos materiais.....	77
4.7.1	Caracterização da alvenaria.....	78

4.7.2	Caracterização do material de enchimento	81
4.8	Considerações finais	81
5.	Relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira	83
5.1	Descrição da Ponte Românica de Mondim da Beira	84
5.2	Intervenções e alterações na Ponte Românica de Mondim da Beira	87
5.3	Levantamento geométrico da Ponte Românica de Mondim da Beira.....	89
5.4	Danos observados na Ponte Românica de Mondim da Beira	89
5.5	Diagnóstico e proposta de intervenção na Ponte Românica de Mondim da Beira	93
5.6	Considerações finais	95
6.	Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira.....	97
6.1	Descrição da Ponte Românica de Mondim da Beira	98
6.2	Considerações gerais.....	99
6.2.1	Caracterização mecânica dos materiais	99
6.2.2	Considerações sobre o LFE-MEDM	99
6.2.3	Carga permanente e sobrecarga.....	100
6.2.4	Geração de malhas.....	101
6.3	Análise numérica do Caso I – levantamento geométrico	103
6.3.1	Modelo 0 – arco isolado	103
6.3.2	Modelo 1 – arco isolado com simulação do material de enchimento.....	103
6.3.3	Modelo 2 – arco com muro de tímpano.....	103
6.4	Análise numérica do Caso II – geração automática.....	104
6.4.1	Modelo 0 – arco isolado	104
6.4.2	Modelo 1 – arco isolado com simulação do material de enchimento.....	105
6.4.3	Modelo 2 – arco com muro de tímpano.....	105
6.5	Análise dos resultados	106
6.6	Considerações finais	107
7.	Conclusões.....	109
7.1	Considerações finais sobre o trabalho desenvolvido	109
7.2	Desenvolvimentos futuros	112
7.3	Autoavaliação	113
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – Método MEXE.....	1

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

APÊNDICE B - Relações empíricas de natureza geométrica.....	1
APÊNDICE C – Proposta de Ficha de inspeção visual	1
APÊNDICE D – Proposta de ficha de inspeção visual preenchida para a Ponte Românica de Mondim da Beira	1
APÊNDICE E – Anexo I do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira	1
APÊNDICE F – Anexo II do relatório de inspeção e reabilitação da Ponte Românica de Mondim da Beira	1
APÊNDICE G – Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira.....	1
ANEXO A – Protocolo de colaboração	1
ANEXO B – Fórmulas empíricas	1
ANEXO C – Informação sobre a ponte românica Mondim da Beira	1

ÍNDICE REMISSIVO DE AUTORES

Abrantes.....	xvi	Delgado	xv
Abreu	59	EC1	36
Alberti.....	18, 19, 20	EC6	36
Alfaiate	79	Engel	17
Almeida	31, 79	EP.....	36, 37
Alves, A.....	22, 61	e-PORTFOLIO	54
Alves, E.	22	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu	xv, 1, 4, 109, 1
Arede	xv	ESTGV.....	xv, xvi, 1, 36
Baptista.....	xvi	Fabri	18, 19
Barlow	18, 27	Faculdade de Engenharia do Porto	36
Barros	xv, 1, 89	Ferreira.....	xv, 1
Bartuschka	43, 44	Filemio	1, 2
Begonha.....	xvi, 36, 53, 79	Foce.....	28
Bélidor	18, 21	Fuller	18, 27
Belytschko	69	Gago.....	20, 23, 25, 28, 31, 79
BETAR.....	36, 37, 1	Gambarotta.....	18, 31, 1
Blondel	18, 19, 20	Gautier.....	18, 21, 24
Boistard.....	18, 25	Gerstner.....	18, 26
Boscovich	18, 22	GOA	37
Bresse	18, 25	Gonçalves.....	xv
Breymann	18, 27	Gregory	18, 19
Brito.....	1	Guedes.....	31, 32
Câmara Municipal de Tarouca.....	xv, 1, 4, 83, 85, 86, 88, 89, 90, 95, 101, 109, 111, 114, 7, 1	Hart	32
Carasco	23	Heyman	18, 20, 23, 25, 29, 30, 31
Caso de estudo do troço do Aqueduto dos Pegões.....	1	Hooke.....	18, 19, 20
Castigliano.....	18, 28, 29	Horta	23
CMT	1	Huerta.....	19, 20, 22, 25, 26, 27
Código da Estrada.....	88	ICOMOS	36, 37, 38, 56, 63, 93
Corradi.....	4, 18, 31, 1, 2, 3	IGESPAR.....	xvi, 37, 84, 85, 86, 87, 90, 98, 3, 1
Costa, A.	31, 32, 36	IHRU	xvi, 4, 37, 83, 90, 93, 1
Costa, C.....	xvi, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 31, 36, 41, 42, 45, 51, 61, 77, 79, 80, 99, 1	Inglis	18, 29
Costa, P.....	8, 12, 15, 17, 19, 20, 25, 26, 31, 79, 1	Instituto de Meteorologia de Portugal.....	xvi, 84
Costa, V.	5, 36, 41, 61	Instituto Politécnico de Tomar.....	xvi
Coulomb	18, 24, 25, 26, 71, 73, 82	IPV	xv, xvi
Couplet	18, 21, 22, 24, 29	IQOA.....	36, 41, 43, 44, 45, 46
Cruz	57	ISO	37
Cundall	32, 75	Itasca	72, 75, 80
Da Vinci.....	18, 19, 20	Jacquier	18, 22
Danysy.....	18, 22	Kooharian.....	18, 29
DEC	36	L'association ASCO TP.....	15
		La Hire	18, 20, 22
		La Seur	18, 22

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Lagomarsino.....	18, 31, 1	Rankine.....	18, 28
Lança.....	17, 23, 26, 27, 29, 30, 77, 1	REFER.....	xvi, 36, 37
Lemos.....	xv, 69, 72, 77	Richter.....	19
LNEC.....	xv, xxxiv, 37, 77	Roca.....	5, 22, 79
Lourençoxvi, 5, 11, 12, 13, 22, 30, 31, 32, 35, 36, 42, 77, 79, 97		Rocha, M.....	79
Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias.....	1	Rocha, N.....	67, 98, 108
Martins, D.....	113	Rodrigues.....	36, 61
Martins, J.....	36, 41, 47, 51	Romeu Vicente.....	xvi
Mascheroni.....	18, 24, 25	Rondelet.....	18, 25
Méry.....	18, 26, 27	Rouxinolxv, 1, 5, 6, 11, 17, 20, 21, 23, 27, 30, 32, 33, 67, 69, 71, 72, 74, 75, 77, 79, 80, 97, 98, 99, 100, 108	
Mesquita.....	xv	Salvadori.....	17
Morais, A.....	32	Santos.....	36
Morais, M.....	97, 1	Sawko.....	31
Morgado.....	67, 98	Sejourné.....	18, 28
Moseley.....	18, 26	Senra.....	xv
Muralha.....	79, 80	Silva, A.....	xvi, 1
Navier.....	18, 26	Silva, B.....	31, 32
NC.....	1	Silva, V.....	1
NCREP.....	xv, 8, 9, 36, 37, 41, 1	Sîncreian.....	72, 79
Nunes.....	11, 17, 19, 20, 21, 22, 25, 28	SIPA.....	4, 84, 85, 86, 87, 3, 1
OIAV.....	18, 28	Sowden.....	41, 47, 51
Oliveira.....	5, 11, 12, 13, 35, 36, 79, 97	SusseKind.....	17
OZ.....	xv, 36, 1	Teles.....	79
Padrão.....	36	Tomazevic.....	42
Page.....	79, 80	Towler.....	31
PATORREB.....	1	Trindade.....	xv, 1, 89
Patrício.....	xvi, 35, 36, 37	Underwood.....	74
Paupério.....	xv, 36	Universidade da Madeira.....	1
Perronet.....	12, 18, 24	Universidade de Aveiro.....	xvi
Petrinic.....	69	Universidade de Coimbra.....	xvi, 77
Pimenta.....	xv, 1, 97	Universidade do Minho.....	xvi, 77
Pippard.....	18, 29	Universidade do Porto.....	xvi
Poleni.....	18, 23, 25	Venturoli.....	18, 24
Pompeu.....	xv	Vicente.....	36, 1
Poncelet.....	18, 26, 27	Vieira.....	21, 67, 70, 80, 98, 99
Proske e Gelder5, 15, 17, 19, 20, 28, 32, 36, 43, 44, 61, 1, 2, 3		Villarceau.....	18, 27, 29
Providência.....	xvi, 77	Voiron.....	28
		Winkler.....	18, 27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Representação esquemática de uma PAAP (Ponte Românica de Mondim da Beira): (a) alçado montante e (b) corte AA'	6
Figura 2-2: Esquema de transmissão de cargas gravíticas: (a) na direção longitudinal e (b) na direção transversal, adaptado de (Costa, C., 2009).....	7
Figura 2-3: Exemplos de tabuleiros de PAAP constituído por: (a) placas de unidades de alvenaria dispostas de forma regular; (b) placas de unidades de alvenaria dispostas de forma irregular; (c) camada de betuminoso. Extraída de (Portugal, NCREP); (d) um lajedo em material pétreo. Extraída de (Costa, P., 2007).....	8
Figura 2-4: Enchimento visível na ponte de: (a) D. Zameiro. Extraída de (NCREP, Relatório de Inspeção à Ponte D. Zameiro, 2007); (b) Tanaro (Itália). Extraída de (Costa, C., 2009).....	9
Figura 2-5: Configuração da degradação das cargas aplicadas de acordo com a variação da altura do enchimento nas secções (i), (ii) e (iii), adaptado de (Costa, C., 2009).....	9
Figura 2-6: Pormenor de olhais: (a) sobre os pilares na ponte de Vila Formosa. Extraída de (Portugal, Alentejo); (b) sobre os arcos na ponte de Remondes. Extraída de (Portugal, trasosmontesnet); e (c) sobre encontros na ponte de Estorãos. Extraída de (Flickr). (d) Exemplo de aligeiramento dos muros de tímpano na ponte de Drizes. Extraída de (Portugal, Retratos e Recantos).....	9
Figura 2-7: (a) Esquema estrutural do funcionamento em arco. Extraída de (Lourenço e Oliveira, 2003); Notação num arco: (b) esquema e (c) linha dos centros e linha de impulso. Extraída de (Rouxinol, 1999)	11
Figura 2-8: Sistema estrutural de arcos em PAAP, adaptado de (Nunes, 2009).....	11
Figura 2-9: (a) Ponte velha sobre o rio Tua com diferentes tipos de arcos. Extraída de (Portugal, São Pedro Velho) e (b) ponte de Pouves com arcos adintelados. Extraída de (Geocaching)	11
Figura 2-10: (a) Ponte ferroviária de Gaia com unidades de alvenaria de maiores dimensões nos arcos. Extraída de (Costa, C., 2009) e (b) Ponte romana de Algozo com material pétreo diferente nos arcos. Extraída de (Portugal, guidacidade)	12
Figura 2-11: Dois exemplos de cimbres: (a) esquema. Extraída de (Perronet, 1987 cit. por Costa, P. 2007) e (b) construção da Ponte de Vila Fria. Extraída de (Costa, P. 2007).....	12
Figura 2-12: Exemplos de talha-mares e talhantes: (a) Ponte Românica de Mondim da Beira; (b) ponte da Barca. Extraída de (Portugal, Igogo); (c) ponte de Izeda. Extraídas de (Flickr e Portugal Trás-os-Montes, mar de pedra); (d) ponte Velha de Tomar, extraída de (Geocaching); (e) ponte da Portela. Extraídas de (Portugal, Olhares e Portugal, Igogo); (f) ponte das Caldas da Felgueira; (g) ponte do Prado. Extraída de (Portugal, Jornal o templário).....	13
Figura 2-13: Esquematisação do funcionamento dos talha-mares e talhantes nas PAAP.....	13
Figura 2-14: Exemplos de PAAP: (a) Ladeira ponte romana. Extraída de (panorâmico); (b) ponte medieval de Izeda. Extraída de (Portugal, Trás-os-Montes, mar de pedra); (c) ponte de Soure. Extraída de (Portugal, Olhares); (d) ponte romana da Cava Velha. Extraída de (Wikipedia); (e) ponte medieval	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

de Ponte da Barca. Extraída de (Portugal, Igogo); (f) ponte Duarte Pacheco. Extraída de (Portugal, Igogo)	15
Figura 2-15: (a) Desenho com as regras empíricas para as dimensões das pontes segundo Alberti. Adaptado de (Proske e Gelder, 2009); Estudo do comportamento dos arcos por Da Vinci: (b) propostas de formas de medição de impulso; (c) ensaios em arcos. Adaptado de (Huerta, 1996) e (d) Inversa da corrente suspensa de Hooke. Adaptado de (Heyman, 1995 cit. por Costa, P. 2007).....	20
Figura 2-16: Regra de Blondel. Extraída de (Rouxinol, 1999).....	20
Figura 2-17: (a) Mecanismo tipo cunha deslizante proposto por de La Hire. Adaptado de (Nunes, 2009) e (b) Ensaios de Danysy. Adaptado de (Huerta, 1996)	22
Figura 2-18: (a) Catenária invertida; (b) polígono de forças com V_A e V_B conhecido e diminuição de H para H' ; (c) polígono funicular forças com V_A e V_B conhecido e diminuição de H para H' ; (d) construção de dois triângulos de forças; (e) polígono de forças com V_A e V_B desconhecido e (f) polígono funicular com V_A e V_B desconhecido. Extraídas de (Rouxinol, 1999).....	23
Figura 2-19: (a) Verificação da estabilidade da cúpula da basílica de São Pedro por Poleni. Extraída de (Heyman, 1972 cit. Nunes 2009) e (b) Mecanismos limite considerados por Coulomb. Adaptado de (Gago, 2004 cit. por Costa, P. 2007)	25
Figura 2-20: (a) Mecanismos considerados por Mascheroni para o dimensionamento da espessura dos pilares. Adaptado de (Gago 2004 cit. por Costa, P. 2007) e (b) Resultado de um ensaio experimental de Boistard. Adaptado de (Huerta, 1996)	25
Figura 2-21: (a) Exemplificação do método gráfico de Méry e (b) Linha de impulso correspondente ao impulso horizontal mínimo. Linha de impulso a azul. Adaptado de (Costa, P. 2007)	26
Figura 2-22: (a) Equivalência da corda suspensa invertida e (b) modelo de Barlow. Linha de impulso a azul. Extraídas de (Rouxinol, 1999)	27
Figura 2-23: Ensaios à rotura de arco em alvenaria. Extraídas de (Voiron, 1895 cit. por Foce 2002 cit. por Nunes 2009)	28
Figura 2-24: Arco semicircular sujeito ao peso próprio, com a linha de impulso a azul: (a) estável; (b) limite inferior; (c) espessura mínima e (d) limite superior. Extraídas de (Rouxinol, 1999).....	30
Figura 2-25: (a) Definição das variáveis do método de Heyman para arcos de alvenaria (com a linha de impulso a azul) e (b) relação (2-3). Adaptadas de (Heyman, 1995 cit. por Costa, P. 2007)	31
Figura 2-26: Estratégia de modelação para estruturas de alvenaria pelo método dos elementos finitos: (a) modelo de micro-modelação detalhada; (b) modelo de micro-modelação simplificada e (c) modelo de macro modelação. Adaptadas de (Lourenço, 1998).....	32
Figura 4-1: Restrições de movimento para EDP e EDC: (a) nenhuma; (b) horizontal; (c) vertical; (d) rotação e (e) todos. Adaptado de (Rouxinol, 2007).....	69
Figura 4-2: Caracterização do arredondamento: (a) do vértice V de um EDP; (b) de um EDC. Aplicação de uma sobrecarga de compressão $Q1$ e de tração $Q2$ num: (c) EDP e (d) EDC. Adaptadas de (Rouxinol, 2007).....	74
Figura 5-1: Localização da ponte em estudo (a) em Portugal Continental. Extraída de (Wikipédia) e (b) na Freguesia de Mondim da Beira. Extraída de (GoogleMapas).....	85

Figura 5-2: Fotografia da Ponte Românica de Mondim da Beira: (a) fotografia aérea. Extraída de (Portugal, Município de Tarouca) e (b) alçado montante. Fornecida pela Câmara Municipal de Tarouca.....	85
Figura 6-1: Ponte Românica de Mondim da Beira: (a) alçado jusante e (b) corte AA'	98
Figura 6-2: Peso próprio do material de enchimento do modelo 1: a linha azul para o Caso I e a linha vermelha tracejada para o Caso II	100
Figura 6-3: Diferença na altura indicada a vermelho (em metros) do arco entre os dois Casos: Caso I a preto e Caso II a azul.....	101
Figura 6-4: Malha de EDP e representação do peso próprio: (a), (c) e (f) Caso I; (b), (d) e (f) Caso II	102
Figura 6-5: Localização de alguns dos contactos entre EDP: (a) Caso I e (b) Caso II.....	104
Figura 6-6: Relação carga-deslocamento para os dois Casos para os modelos 1 e 2: a azul e a verde os modelos 1 e 2 do Caso I e a vermelho e a preto os modelos 1 e 2 do Caso II	107
Figura A-1: (a) Ábaco para determinar a carga provisória. (b) Variáveis para o método MEXE.....	1
Figura B-1: Variáveis para as fórmulas empíricas. Adaptado de (Costa, P., 2007).....	1
Figura E-1: Ponte Românica de Mondim da Beira: (a) planta; (b) alçado jusante; (c) corte transversal AA' segundo o A1 e (d) corte transversal BB' segundo o A2	2
Figura E-2: Alçado da ponte, onde são visíveis as obras da praia fluvial: (a) montante e (b) jusante. (c) Curso de água a montante	3
Figura E-3: A1 com visualização das aberturas e saliências para colocação do cimbre, da tubagem metálica e do candeeiro no alçado: (a) montante e (b) jusante. A2 com visualização das aberturas e saliências para colocação do cimbre no alçado: (c) montante e (d) jusante. (e) Sigla visível na ligação MT/A2 no alçado jusante (marcada com um retângulo)	3
Figura E-4: Intradorso do A1 do lado: (a) NE, onde é visível a continuidade de construção com o T até uma dada altura e (b) SO, sendo visível o moinho, o muro com continuidade de construção com o EC1 no alçado montante e o muro sem continuidade no alçado jusante. São ainda visíveis aberturas e saliências para colocação do cimbre e são visíveis a conduta e o candeeiro. Intradorso do A2 do lado: (c) NE, onde é visível parte do edifício de apoio à praia fluvial e os caminhos construídos e (d) SO, onde é visível a continuidade de construção com o T até uma certa altura e os caminhos construídos .	4
Figura E-5: Intradorso dos arcos, com visualização da aduela de contrafecho saliente em relação às restantes aduelas: (a) A1 , podendo-se observar a inexistência do recobrimento sobre o A1 , bem como a existência de vegetação e (b) A2	4
Figura E-6: Aduelas do A1 (marcadas com um retângulo a vermelho) desde a aduela de fecho até à secção do rim, destacando a maior dimensão da aduela de fecho, no alçado: (a) montante e (b) jusante, sendo visíveis ferros.....	4
Figura E-7: Ferros colocados no alçado jusante, lado NE (marcados com elipses a vermelho): (a) nas aduelas visíveis do A1 e numa UA das G e (b) nas UA das G junto ao acesso da ponte, lado NE.....	5

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Figura E-8: **EC1**, sendo visíveis árvores, os muros confinantes e o moinho, no alçado: (a) montante, lado SO; (b) jusante, lado SO, onde são visíveis os caminhos e escadas talhadas no afloramento rochoso. **EC2**, sendo visíveis árvores e parte dos caminhos construídos, no alçado: (c) montante, lado NE e (d) jusante, lado NE, sendo visível a construção de apoio à praia fluvial. (e) **P** no alçado jusante, sendo visível uma árvore junto a este. (f) Muros confinantes em ambos os alçados do **EC1**, lado SO, sendo visíveis árvores, o moinho no alçado montante, a conduta metálica no intradorso do **A1**, a escada metálica no alçado jusante e o afloramento rochoso..... 6

Figura E-9: Pormenor da ligação muro confinante/**EC**, sendo visíveis árvores e líquenes na ponte e muros: (a) **EC1**, no alçado montante, lado SO; (b) **EC1**, no alçado jusante, lado SO, sendo visível um candeeiro e (c) **EC2**, no alçado montante, lado NE 6

Figura E-10: Parte inferior do **EC1** saliente em relação à parte superior (marcada pelo retângulo a vermelho), lado SO, no alçado: (a) montante, sendo visível parte do afloramento rochoso onde o **EC1** assenta e (b) jusante, sendo visíveis árvores e um candeeiro. (c) Última fiada do **MT** saliente em relação às **G** no alçado jusante, (esta saliência também existe no alçado montante) 6

Figura E-11: Afloramento rochoso de fundação da ponte parcialmente encoberto: (a) sob o **EC1**, lado SO, sendo visíveis os muros confinantes, a conduta metálica e o candeeiro (ambos no intradorso do **A1**); (b) sob o **P**, sendo visíveis os caminhos e escadas construídos; (c) sob o **P** e sob o **EC2**, no alçado jusante, lado NE, sendo visíveis os caminhos construídos 7

Figura E-12: **T**, sendo visível vegetação no seu capeamento e parte dos caminhos construídos: (a) no alçado montante; (b) visto de cima e (c) capeamento, sendo visíveis musgos e líquenes..... 7

Figura E-13: Acesso ao **TB** da ponte no lado, sendo visíveis construções junto à ponte: (a) NE e (b) SO..... 7

Figura E-14: **TB** e **G**, aquando da primeira inspeção, onde as setas indicam a elevada degradação deste, visto do lado: (a) NE, sendo visível a zona mais alta do **TB** sobre o **A1** e (b) SO, onde é visível a zona que serve de estacionamento no alçado montante e o acesso à praia fluvial junto ao edifício no alçado jusante 8

Figura E-15: **TB** e **G**, aquando da segunda inspeção: (a) e (b) visto do lado NE, sendo visíveis as aduelas de fecho em ambos os alçados; (c) e (d) visto do lado SO, onde se pode observar a forma do **EC1** sob o **TB** e as aduelas de fecho em ambos os alçados (marcado com o retângulo a vermelho) 8

Figura E-16: Sinal vertical de trânsito proibido a automóveis de mercadorias no acesso ao **TB**: (a) NE, sendo visível uma árvore e um poste de eletricidade no passeio junto à ponte na zona utilizada como estacionamento e (b) SO, sendo visível que a ponte também é utilizada por peões. Elemento de ligação entre as **UA** das **G**, sendo visíveis líquenes: (c) e (d). (e) Juntas preenchidas com argamassa de cimento entre 4 **UA** das **G**, onde já não existe o elemento de ligação entre as **UA** da fiada superior e também são visíveis líquenes 9

Figura F-1: Esquema da ponte com a localização dos danos D1.1 a vermelho no alçado jusante 2

Figura F-2: D1.1 (marcado com o círculo a vermelho), através do destacamento de uma **UA** na fiada ao lado da secção de fecho localizada aproximadamente a meio da largura do **A1**: (a) e (b) 2

Figura F-3: Esquema da ponte com a localização dos danos D2.1a a verde e D2.4 a vermelho no alçado jusante 4

Figura F-4: (a) D2.1a (marcado com o retângulo a vermelho e em pormenor) no intradorso do A1 . D2.4 no A1 visto do alçado: (b) montante e (c) jusante.....	4
Figura F-5: Esquema da ponte com a localização dos danos (a) D7.1 a vermelho no alçado montante e (b) D7.3 a azul na planta	9
Figura F-6: UA desviada na G observada pelo: (a) lado SO e (b) alçado montante. (c) UA na G (sobre o A1) sem elemento de ligação, no alçado montante	9
Figura F-7: Faixa reparada no TB no alçado montante observada: (a) do lado NE e (b) junto ao lado SO.....	10
Figura F-8: Esquema da ponte com a localização dos danos D8.1 a verde, D8.2 a azul, D8.3 a cinzento e D8.4 a vermelho no alçado: (a) montante, (b) jusante e (c) corte	12
Figura F-9: D8.1 e D8.3 no alçado montante no: (a) EC1 , no MT , nas G e nos muros confinantes; (b) intradorso do A1 e (c) extradorso do A1 , no MT , no T e nas G	12
Figura F-10: D8.1 no T no: (a) capeamento e (b) no lado SO. (c) D8.2 no T no lado NE	13
Figura F-11: D8.1 e D8.3 no alçado jusante: (a) entre o extradorso do A2 e o MT e nas G , (b) entre os extradorsos dos dois arcos e (c) na ligação MT/ A1	13
Figura F-12: Alçado jusante: (a) D8.1, D8.3 e D8.4 no EC1 ; (b) D8.1 e D8.2 entre o MT e a primeira fiada das G ; (c) D8.4 nas juntas e UA no EC1 . (d) D8.1 e D8.3 no T no lado NE.....	13
Figura F-13: (a) D8.1 entre o TB e as G ; (b) D8.2 nas juntas das G e (c) D8.3 nas G	13
Figura F-14: Existência de lixo nas: (a) juntas das G ; (b) e (c) aberturas para colocação do cimbre no intradorso do A2	14
Figura F-15: Esquema da ponte com a localização dos danos D9.1 e D9.2 a vermelho.....	16
Figura F-16: D9.1e D9.2 no intradorso do A1 , com grande concentração nas juntas onde se encontra a vegetação (D8.1): (a) e (b). (c) D9.2 no intradorso do A1 . (d) D9.1 e D9.2 no intradorso do A2 . D9.1 no afloramento rochoso sob: (e) EC1 , lado SO e (f) P , lado SO	16
Figura F-17: Esquema da ponte com a localização dos danos D10.1 e D10.2 a cinzento e D10.3 a vermelho no alçado: (a) montante e (b) jusante	19
Figura F-18: D10.1 e D10.2 no alçado montante no: (a) e (b) MT/A1 e (c) MT/A2	19
Figura F-19: D10.1 e D10.2 no alçado jusante no: (a) e (b) MT/A2 , com visualização da leitada de argamassa de cal esmagada, e (c) muro MT/A1	19
Figura F-20: D10.1 e D10.2 no: (a) e (b) intradorso do A1 e (c) EC2	20
Figura F-21: D10.2 (fendilhação) no A2 no: (a) intradorso (marcado pelo retângulo a vermelho e em pormenor), com visualização da leitada de argamassa de cal esmagada, (b) extradorso e (c) intradorso	20
Figura F-22: (a) D10.2 (fendilhação) no EC2 . D10.1 no T : (b) no vértice e (c) no lado SO	20
Figura F-23: D10.2 nas G vista do: (a) alçado montante, (b) e (c) TB . (d) Juntas das G preenchidas com argamassa de cimento.....	21
Figura F-24: D10.3 no alçado montante no: (a) MT e no EC1 e (b) no recobrimento do A2 e no seu extradorso.....	21

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Figura G-1: Mecanismo de colapso – Caso I, Modelo 0: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m.....	1
Figura G-2: Mecanismo de colapso – Caso I, Modelo 1: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m.....	1
Figura G-3: Mecanismo de colapso – Caso I, Modelo 2: (a) $K_n = 1$ e (b) 10 GPa/m.....	2
Figura G-4: Mecanismo de colapso – Caso II, Modelo 0: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m	2
Figura G-5: Mecanismo de colapso – Caso II, Modelo 1: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m	3
Figura G-6: Mecanismo de colapso – Caso II, Modelo 2: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m	3
Figura G-7: Relação carga-deslocamento – Caso I e II, Modelo 0.....	4
Figura G-8: Relação carga-deslocamento – Caso I e II, Modelo 1.....	4
Figura G-9: Relação carga-deslocamento – Caso I e II, Modelo 2.....	4
Figura CC-1: (a) Planta geral da Ponte Românica de Mondim da Beira. Alçado montante: (b) e (e). Alçado jusante: (c), (d) e (f). (g) Acesso SO à ponte. Extraídas de (Portugal, SIPA).....	1

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Constituição das PAAP de acordo com a Figura 2-1.....	7
Quadro 2-2: Tipologia de alvenarias em PAAP.....	14
Quadro 2-3: Características das PAAP consoante a Época de Construção: (1) Época Romana; (2) Época Medieval e (3) Época Moderna, onde as letras de (i) a (vii) se referem aos mesmos aspetos ...	16
Quadro 2-4: Autores de maior importância no desenvolvimento dos métodos de análise tradicional de PAAP.....	18
Quadro 3-1: Classificação de diferentes tipos de ações sobre estruturas	38
Quadro 3-2: Classificação de danos estruturais e não estruturais em PAAP: localização do dano (i) generalizada ou (ii) localizada, por ação (a) biológica, (b) meteorológica, (c) físico-química, (d) erosiva, (e) mecânica ou (f) sísmica.....	40
Quadro 3-3: Esquemas e imagens dos danos estruturais em PAAP. Imagens extraídas de (IQA, 1996; Sowden, 1990 cit. por Martins, J. 2004; NCREP, Relatório de Inspeção à Ponte D. Zameiro, 2002; NCREP, Relatório de Inspeção à Ponte de Cepeda, 2007; Costa, C., 2009; Costa, V., 2009)	41
Quadro 3-4: Modos de fendilhação da alvenaria no plano e modos de rotura da alvenaria para fora do plano. Imagens extraídas de (Lourenço,1996 e Tomazevic, 1999 cit. por Costa, C. 2009).....	42
Quadro 3-5: Esquemas de alguns casos de separação de unidades de alvenaria, onde as setas indicam o sentido do deslocamento. Imagens extraídas de (IQA, 1996).....	43
Quadro 3-6: Esquemas de fendilhação longitudinal no arco. Imagens extraídas de (IQA, 1996).....	44
Quadro 3-7: Esquemas de fendilhação transversal no arco. Imagens extraídas de (IQA, 1996).....	45
Quadro 3-8: Esquemas de deformação e fendilhação nos muros de tímpano. Imagens extraídas de (IQA, 1996).....	46
Quadro 3-9: Esquemas de danos nos apoios e algumas causas. Imagens extraídas de (Sowden, 1990 cit. por Martins, J. 2004)	47
Quadro 3-10: Exemplos de danos não estruturais em PAAP	50
Quadro 3-11: Exemplos de danos D8.3 em alvenarias de granito	51
Quadro 3-12: Consequências dos danos D8.1 e D8.3 em alvenarias e em afloramentos rochosos de granito	52
Quadro 3-13: Exemplos de danos D10.2 em alvenarias de granito	54
Quadro 3-14: Fases do diagnóstico de intervenção em PAAP.....	56
Quadro 3-15: Técnicas de manutenção em PAAP, podendo ser (i) corrente; (ii) preventiva e (iii) especializada	57
Quadro 3-16: Técnicas de reabilitação/reforço de PAAP, podendo ser de (i) consolidação da alvenaria, (ii) reforço	61

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro 3-17: Algumas técnicas de reabilitação/reforço. Algumas figuras extraídas de (Alves, A., 2009; Costa, C., 2009; Costa, V., 2009; Proske e Gelder, 2009 e Rodrigues, 2011)	61
Quadro 3-18: Danos e possíveis técnicas de intervenção por manutenção (i) corrente; (ii) preventiva e (iii) especializada e Técnicas de reabilitação/reforço por (I) consolidação da alvenaria e (II) reforço. 64	
Quadro 4-1: Valores da resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de unidades de alvenaria. Adaptado de (Rouxinol, 2007).....	79
Quadro 4-2: Valores de rigidezes em juntas de alvenaria e enchimento. Adaptado de (Rouxinol, 2007) e Costa, C., 2002a)	80
Quadro 5-1: As principais dimensões da ponte	86
Quadro 5-2: Danos observados na Ponte Românica de Mondim da Beira e respetivas secções do Anexo II do relatório a consultar	90
Quadro 6-1: Dimensões principais do arco maior e relações geométricas	99
Quadro 6-2: Propriedades mecânicas da Ponte Românica de Mondim da Beira	99
Quadro 6-3: Valores da capacidade de carga da ponte (kN/m) – modelo 3D	107
Quadro B-1: Relações empíricas de natureza geométrica	1
Quadro C-1: Proposta de ficha de inspeção visual de PAAP elaborada.....	2
Quadro D-1: Notação a seguir para os elementos da Ponte Românica de Mondim da Beira.....	1
Quadro D-2: Proposta de ficha de inspeção visual preenchida da Ponte Românica de Mondim da Beira	2
Quadro E-1: Anexo I do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira 2	
Quadro F-1: Secção 1 do Anexo II.....	2
Quadro F-2: Secção 2 do Anexo II.....	4
Quadro F-3: Secção 3 do Anexo II.....	7
Quadro F-4: Secção 4 do Anexo II.....	9
Quadro F-5: Secção 5 do Anexo II.....	12
Quadro F-6: Secção 6 do Anexo II.....	16
Quadro F-7: Secção 7 do Anexo II.....	19
Quadro G-1: Valor da capacidade de carga – Caso I e II, Modelo 0.....	5
Quadro G-2: Valor da capacidade de carga – Caso I e II, Modelo 1.....	5
Quadro G-3: Valor da capacidade de carga – Caso I e II, Modelo 2.....	5

Quadro BB-1: Tipos de colapso. Extraído de (Corradi and Filemio, 2004 cit. por Proske e Gelder 2009) 1

Quadro BB-2: Fórmulas empíricas para obtenção da espessura de arcos. Extraído de (Corradi and Filemio, 2004 e Corradi, 1998 cit. por Proske e Gelder 2009) 2

Quadro BB-3: Fórmulas para determinação da largura dos pilares. Extraído de (Corradi, 1998 cit. por Proske e Gelder 2009) 3

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ABREVIATURAS E SIGLAS

A1	Arco de maior dimensão
A2	Arco de menor dimensão
ASCII	Código padrão americano para permuta de informações
ASCO TP	Association pour la Connaissance des Travaux Publics
BETAR	Betar Estudos e Projetos de Estabilidade, Lda.
CF	Contra F echo
CMT	Câmara M unicipal de T arouca
D	D ano
D	A duela
DEC	D epartamento de E ngenharia C ivil
DXF	Formato de comunicação ASCII ou binário para migração entre diferentes sistemas
E	E nchimento
EC	Eurocódigo
EC1	Eurocódigo 1 (EN 1991): Ações em Estruturas
EC1	E ncontro do arco de maior dimensão
EC2	E ncontro do arco de menor dimensão
EC6	Eurocódigo 6 (EN 1996): Projeto de Estruturas de Alvenaria
EDC	E lemento D iscreto C ircular
EDP	E lemento D iscreto P oligonal
EN	N orma E uropeia
EP	E stradas de P ortugal, S.A.
ESTGV	E scola S uperior de T ecnologia e G estão de V iseu
F	F echo
FEUP	F aculdade de E ngenharia do P orto
G	G uardas
GOA	S istema de G estão de O bras de A rte
ICOMOS	I nternational C ouncil on M onuments and S ites
IGESPAR	I nstituto de G estão do P atrimónio A rquitetónico e A rqueológico
IHRU	I nstituto da H abituação e da R eabilitação U rbana, I P
IPA	I nventário P ortuguês A rquitetónico
IPP	I móvel de I nteresse P úblico
IPV	I nstituto P olitécnico de V iseu
IQOA	I mage de la Q ualité des O uvrages d'Art
ISO	O rganização I nternacional de N ormalização
JP	J untas p reenchidas
JPE	J untas entre Unidades de Alvenaria e E nchimento

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

JSP	Juntas Sem Preenchimento
LFE	LNEC-FCTUC-ESTV
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MC	Manutenção Corrente
ME	Manutenção Especializada
MED	Método dos Elementos Discreto
MEDM	Método dos Elementos Discretos Mistos
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEXE	Military Engineering Experimental Establishment
MP	Manutenção Preventiva
MT	Muro de Tímpano
NC	Nova Conservação
NCREP	Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património
NE	Nordeste
NO	Noroeste
OZ	OZ - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda.
P	Pilar
PAAP	Ponte em Arco de Alvenaria de Pedra
RC	Reabilitação/reforço por Consolidação da alvenaria
RCR	Reabilitação/reforço por Consolidação da alvenaria/Reforço
REFER	Rede Ferroviária Nacional
S	Saimel
SE	Sudeste
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIPA	Sistema de Informação para o Património Arquitetónico
SO	Sudoeste
T	Talha-mar
TB	Tabuleiro
UA	Unidades de Alvenaria
ZEP	Zonas Especiais de Proteção
ZP	Zona de Proteção

NOTAÇÃO

a) Maiúsculas latinas

A	Área
C	Contacto
E	Módulo de elasticidade
G	Módulo de distorção
F	Força
G	Ação permanente
I_p	Momento polar de inércia
L	Comprimento, vão do arco
L_c	Comprimento de influência do contacto
M	Momento total de um elemento discreto
Q	Sobrecarga
R	Raio do arco de arredondamento

b) Minúsculas latinas

a_f	Flecha do arco
a_{fq}	Flecha a um quarto do vão do arco
b	Espessura
c	Coesão, constante de proporcionalidade
d	Distância, Recobrimento
d_r	Distância de arredondamento para EDP
$d_{r,K}$	Distância de arredondamento para o EDP K
$d_{\text{gap},C}$	Tolerância de separação do contacto C
$d_{\text{over},C}$	Tolerância de sobreposição do contacto C
e	Espessura
f_b	Resistência à compressão da unidade de alvenaria
f_{bt}	Resistência à tração da unidade de alvenaria
K_n	Rigidez normal do contacto pontual
K_s	Rigidez tangencial do contacto pontual
m	Massa efetiva, massa
n	Versor normal
r_e	Raio do extradorso do arco
r_i	Raio do intradorso do arco
t	Versor tangencial
t, n	Relativo aos eixos t e n
u	Deslocamento
\ddot{u}	Aceleração

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

x Coordenada retangular cartesiana

c) Minúsculas gregas

α Ângulo, constante de amortecimento

η Fator de redução

$\ddot{\theta}$ Aceleração angular

ν Coeficiente de Poisson

ρ Massa volúmica

γ Peso volúmico

φ Fator de segurança para o passo de tempo

ϕ Ângulo de atrito interno

X_{tol} Fator de tolerância para a separação

X_d Fator usado na decisão sobre a ativação da rotina de deteção de contactos

ω Frequência angular própria

d) Índices inferiores gerais

C Contacto

CM Centro de massa

D Amortecimento

GDL Grau de liberdade

V Vértice

VT Vértice teórico

b Unidade de alvenaria

cr Critico

$elas$ Elástico

fix Fixo

gap Separação

i,j,k Índices variáveis

max Máximo

min Mínimo

n Relativo à direção normal

$over$ Sobreposição

s Relativo à direção tangencial

t Tração

ν Viscoso

e) Símbolos

Δx Incremento da variável x

1. Introdução

O presente trabalho realizado no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Projeto/Estágio do Curso de Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação é de natureza Projeto.

Para a realização do Projeto foi elaborado um Protocolo entre a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) representada pelo seu presidente, José Alberto da Costa Ferreira e a Câmara Municipal de Tarouca (CMT) representada pelo seu presidente, Mário Caetano Ferreira, ver Anexo A.

Foram designados pela ESTGV o orientador Gilberto Antunes Ferreira Rouxinol e pela CMT o monitor Paulo Jorge Ribeiro Pimenta. Para a elaboração do Projeto houve necessidade de recorrer aos serviços da CMT. Para tal, o monitor designou os técnicos Paulo Trindade, o desenhador, e Carlos Barros, o topógrafo. O plano de trabalhos encontra-se no Anexo A.

1.1 Importância do tema do trabalho

As pontes em arco de alvenaria de pedra muito utilizadas no passado para vencer rios e vales têm sido descuradas face às novas tecnologias, nomeadamente, o betão armado pré-esforçado e o aço, que permitem vencer vãos cada vez maiores. Porém muitas das pontes em arco de alvenaria de pedra, por um lado, continuam em pleno serviço e, por outro lado, adquiriram importância patrimonial, havendo um interesse cada vez maior na manutenção e na reabilitação/reforço destas construções.

Os materiais constituintes das pontes em arco de alvenaria de pedra com o passar dos anos começam a sofrer degradação. Esta degradação natural associada a um incorreto ou

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

inexistente plano de manutenção e a um aumento do tráfego rodoviário/ferroviário, para o qual não foram construídas, acentua a degradação, podendo conduzir a deformações estruturais e por vezes ao seu colapso.

Torna-se de elevada importância a inspeção e a avaliação destas estruturas a fim de determinar os danos e a sua capacidade de carga para posteriormente se proceder às melhores formas de intervenção de modo a proteger e manter “viva” esta fração do Património Arquitetónico e Cultural.

1.2 Objetivos do trabalho

Pretende-se com este trabalho apresentar um estudo sobre pontes em arco de alvenaria de pedra com posterior aplicação à Ponte Românica de Mondim da Beira existente no Município de Tarouca. Para o efeito, e de um modo genérico, numa primeira fase é apresentado: (1) o comportamento estrutural das pontes em arco de alvenaria, nomeadamente do arco; (2) os danos mais usuais e os modos mais usuais de intervenção e (3) os principais fundamentos do método dos elementos discretos. Numa segunda fase, para a ponte em estudo, é realizado: (5) o diagnóstico e (6) a análise estrutural. Antes do diagnóstico é desenvolvida uma proposta de ficha de inspeção visual para pontes em arco de alvenaria de pedra. O diagnóstico consiste na elaboração do relatório de inspeção e diagnóstico da ponte em estudo. Através de um programa computacional, baseado no método dos elementos discretos misto 2D, é avaliada de uma forma qualitativa a capacidade de carga da ponte em estudo.

Pretende-se apresentar o estudo realizado com uma estruturação que permita uma consulta acessível, motivadora e que contribua para futuros trabalhos a realizar.

1.3 Estruturação do trabalho

Para além deste capítulo introdutório o trabalho desenvolve-se em mais seis capítulos, e dada a extensão de informação, em mais sete Apêndices e três Anexos, que se descrevem sucintamente a seguir.

No capítulo 2 é abordado o comportamento estrutural das pontes em arco de alvenaria de pedra. É apresentada a sua constituição e o seu sistema estrutural consoante as Épocas de Construção. Posteriormente é referida a evolução dos conhecimentos sobre o seu comportamento estrutural, nomeadamente dos arcos, e o comportamento mecânico dos seus materiais. Finalmente são apresentadas as considerações finais.

No capítulo 3 são abordados os danos mais usuais em pontes em arco de alvenaria de pedra. São referidos os principais aspetos a ter em consideração na intervenção deste tipo de estruturas. Posteriormente são apresentados os danos mais observados, referindo: (1) os seus fatores desencadeadores; (2) os tipos de danos (não estruturais e estruturais), com abordagem sucinta da sua forma de manifestação, das principais causas e das principais consequências e (3) as possíveis e mais usuais formas de intervenção (manutenção e reabilitação/reforço). O capítulo termina com as considerações finais.

No capítulo 4 são abordadas as principais considerações sobre o Método dos Elementos Discretos, nomeadamente do programa adotado, método dos elementos discretos misto plano, LFE-MDEM. São referidos de forma sucinta: (1) os elementos discretos que compõem a malha representativa das estruturas e as restrições ao movimento destes elementos; (2) a interação entre os elementos discretos; (3) as principais considerações relativamente às ações permanentes e sobrecargas; (4) os tipos de amortecimento; (5) as equações de movimento, a sua integração e o passo de tempo de cálculo e (6) o comportamento mecânico dos materiais, sendo caracterizadas as unidades de alvenaria, as juntas e o material de enchimento. Finalmente são apresentadas as considerações finais.

No capítulo 5 é apresentado o relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira. Com base na informação dos capítulos 2 e 3 é elaborada uma proposta de ficha de inspeção visual para pontes em arco de alvenaria de pedra. Com base no preenchimento da ficha de inspeção visual, complementada por um levantamento fotográfico, e com base no levantamento topográfico é elaborado um relatório de inspeção e diagnóstico. Dada a extensão do relatório, os Anexos I e II podem ser consultados nos Apêndices E e F, respetivamente. O capítulo termina com as considerações finais.

No capítulo 6 é apresentada a análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira. É apresentada: (1) uma breve descrição da ponte em estudo; (2) as considerações gerais, sendo abordada a caracterização mecânica dos materiais, considerações sobre o programa adotado, as cargas a que se encontra sujeita durante a análise e a obtenção das malhas de elementos discretos; (3) a análise numérica da ponte, nomeadamente do arco maior para dois Casos de geração de malha de elementos discretos (por levantamento geométrico e por geração automática). Para cada Caso são apresentados três modelos: (a) arco isolado, (b) arco com simulação do material de enchimento por cargas verticais ao longo do extradorso do arco e (c) arco com muro de tímpano. Para cada um dos modelos são analisadas três gamas de valores de rigidez normal para os contactos. (4) Posteriormente são analisados os resultados obtidos, sendo apresentadas as vantagens de cada um dos dois Casos de geração de malha. Finalmente são referidas as considerações finais.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões, onde são referidas as considerações finais gerais, os possíveis desenvolvimentos futuros e uma autoavaliação do trabalho desenvolvido.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

No Apêndice A são referidos os principais conceitos sobre o método MEXE (Military Engineering Experimental Establishment) para ajudar a compreender o capítulo 2.

No Apêndice B são expostas algumas fórmulas empíricas complementares ao capítulo 2.

No Apêndice C é apresentada uma proposta de ficha de inspeção visual elaborada com base na informação constante nos capítulos 2 e 3. São ainda apresentadas algumas considerações, bem como as dificuldades sentidas na sua realização.

No Apêndice D é apresentada a proposta de ficha de inspeção visual preenchida para a Ponte Românica de Mondim da Beira.

O Apêndice E corresponde ao Anexo I do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira apresentado no capítulo 5, onde consta: (1) a localização da ponte; (2) esquemas da ponte e (3) o levantamento fotográfico por elementos constituintes da ponte aquando das inspeções visuais efetuadas.

O Apêndice F corresponde ao Anexo II do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira apresentado no capítulo 5, onde consta: (1) a localização da ponte; (2) os danos observados; (3) esquema da ponte com localização dos danos; (4) descrição dos danos por subtipo; (5) ensaios realizados; (6) possíveis causas dos danos; (7) consequências dos danos; (8) possíveis formas de prevenção dos danos; (9) possíveis formas de intervenção sob os danos e (10) observações. O Anexo II encontra-se subdividido para cada tipo de dano observado na ponte.

No Apêndice G podem ser consultadas as figuras e os quadros complementares ao capítulo 6.

No Anexo A é apresentado o Protocolo de colaboração entre a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu e a Câmara Municipal de Tarouca e o “Anexo D” do Regulamento específico do Mestrado em Construção e Reabilitação (2ª Edição 2010/2012), onde constam as tarefas a realizar no trabalho.

No Anexo B encontram-se algumas fórmulas empíricas segundo Corradi e outros autores, complementares ao capítulo 2.

No Anexo C são apresentadas as imagens da Ponte Românica de Mondim da Beira disponibilizadas no endereço de internet do SIPA (IHRU).

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

As pontes em arco de alvenaria de material pétreo, ou mais comumente conhecidas por pontes em arco de alvenaria de pedra (PAAP) datam de tempos antigos, integrando-se na paisagem, devido à forma geométrica de disposição dos seus elementos constituintes. São exigidas a este tipo de construção funções estéticas e estruturais (Rouxinol, 1999). O tipo de PAAP construída dependia não só dos materiais existentes na zona, mas também das condições topográficas locais, dos custos associados e dos conhecimentos de quem as desenhava e construía (Costa, V., 2009).

Apesar deste tipo de construção ter caído em desuso torna-se um dever perante a História da Humanidade estudar a forma de construção e o comportamento destas PAAP. Assim há um maior interesse por parte da comunidade científica portuguesa e internacional em preservar este tipo de estruturas a fim de permitir que continuem a servir o propósito para o qual foram construídas (Rouxinol, 1999; Costa, V., 2009; Proske e Gelder, 2009). Um dos aspetos fundamentais do estudo das construções históricas está relacionado com a análise e caracterização experimental do comportamento dos materiais e das próprias estruturas. Ao longo da sua vida estas estruturas foram sofrendo alterações devido ao nível de exposição, vulnerabilidade aos efeitos dos agentes do meio ambiente e a usos mais intensificados, tornando-se assim fundamental conhecer o comportamento estrutural destas construções e os danos que podem sofrer (Oliveira, Lourenço e Roca, 2003; Costa, C., 2009; Proske e Gelder, 2009).

Com o presente trabalho pretende-se dar a conhecer, nomeadamente neste capítulo, o comportamento das PAAP. Assim, na secção 2.1 é abordada a constituição das PAAP. São apresentados os seus elementos e materiais constituintes; a função dos elementos; os aspetos mais relevantes da sua construção e as tipologias mais observáveis de materiais.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Posteriormente na secção 2.2 é exposto o sistema estrutural das PAAP consoante a sua Época de Construção. A informação constante nas duas primeiras secções auxilia na criação da proposta de ficha de inspeção visual apresentada no Apêndice C, Quadro C-1, bem como no seu preenchimento, ver Apêndice D, Quadro D-2. Na secção 2.3 é exposta a evolução dos conhecimentos sobre o comportamento estrutural das PAAP; são abordados os métodos de análise tradicional; as análises numéricas pelos métodos dos elementos finitos, elementos discretos e elementos finitos discretos. Por fim, na secção 2.4 são apresentadas as considerações finais.

2.1 Constituição das pontes em arco de alvenaria de pedra

2.1.1 Elementos constituintes

A realização desta secção baseia-se sobretudo nos trabalhos realizados por Rouxinol (1999) e Costa, C. (2009). São apresentados, sempre que possível exemplos de PAAP em Portugal.

As PAAP são constituídas por elementos não estruturais e elementos estruturais, como se pode observar no Quadro 2-1 que agrupa os diferentes elementos constituintes com base na Figura 2-1.

Segundo Costa, C. (2009) os elementos estruturais dividem-se em: elementos principais (corpo principal da estrutura) e elementos secundários. Os elementos principais são constituídos pelas fundações, pilares (ou pegões), encontros, arcos e muros de tímpano (ou paredes de tímpano). Os elementos secundários são os talha-mares e talhantes. Como elementos não estruturais consideram-se: o tabuleiro (ou pavimento) e as guardas (guardas laterais ou guarda corpos).

São descritos a seguir alguns aspetos construtivos e funções dos elementos constituintes, estruturais e não estruturais, do tabuleiro às fundações, sendo necessário analisar previamente o mecanismo de transmissão de cargas.

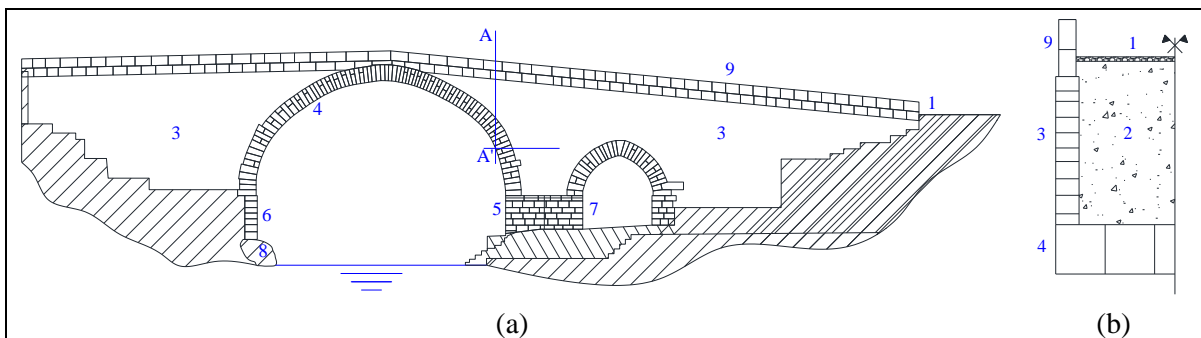


Figura 2-1: Representação esquemática de uma PAAP (Ponte Românica de Mondim da Beira): (a) alçado montante e (b) corte AA'

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

Quadro 2-1: Constituição das PAAP de acordo com a Figura 2-1

Elementos estruturais	Elementos principais	Arcos	(4)
		Muros de tímpano	(3)
		Enchimento	(2)
		Pilares	(5)
		Encontros	(6)
		Fundações	(8)
Elementos secundários	Talha-mar – a montante	(7)	
	Talhantes – a jusante		
Elementos não estruturais	Tabuleiro (sob determinadas condições)	(1)	
	Guardas	(9)	

De acordo com Costa, C. (2009) o mecanismo de transmissão de cargas depende do comportamento a nível das direções longitudinal e transversal da PAAP, como se pode observar na Figura 2-2. Na direção longitudinal o mecanismo de transmissão de cargas é determinado, essencialmente, pelo funcionamento do arco sob ação das cargas que lhe são transmitidas pelo enchimento e pelos muros de tímpano. Na direção transversal o mecanismo de transmissão de cargas é determinado pela interação enchimento/muros de tímpano/arco, e pela ligação muros de tímpano/arco. Na Figura 2-2: P, representa as cargas; H e V, representam as ações transmitidas aos apoios; a, representa a degradação das cargas; b, é o bolbo de pressões sobre o arco; c, é o impulso (passivo) do enchimento sobre o arco e d, é o impulso (ativo) do enchimento sobre os muros de tímpano.

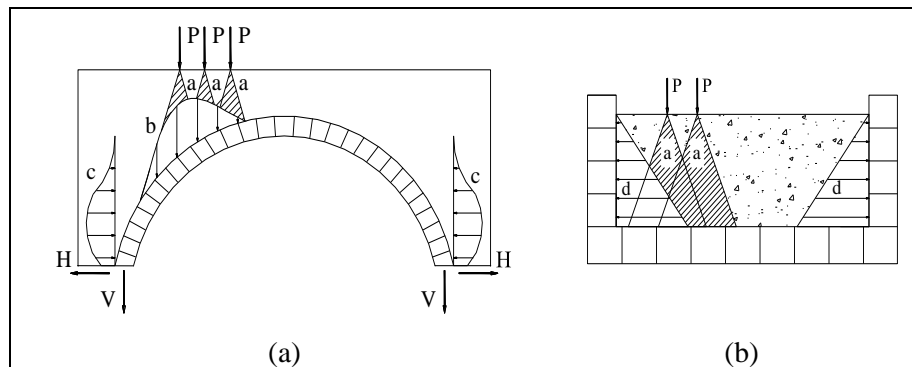


Figura 2-2: Esquema de transmissão de cargas gravíticas: (a) na direção longitudinal e (b) na direção transversal, adaptado de (Costa, C., 2009)

2.1.1.1 Tabuleiro

O tabuleiro é o elemento onde ocorre a circulação de tráfego rodoviário, ferroviário ou pedonal. É constituído por placas de unidades de alvenaria dispostas de forma regular, Figura 2-3 (a) ou irregular, Figura 2-3 (b). Atualmente, devido a intervenções efetuadas, esta camada original já não é visível em algumas PAAP, passando a ser antes observada uma camada de betuminoso, Figura 2-3 (c), ou um lajedo em material pétreo, Figura 2-3 (d). Usualmente o tabuleiro não é considerado um elemento estrutural. Consideração que se pode seguir no caso

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

de PAAP que conservem o seu tabuleiro original, mas que não se pode seguir no caso de PAAP em que tenha sido acrescentada sobre o tabuleiro original uma laje que funcione em simultâneo com este, dado que este novo elemento restringe o movimento dos muros de tímpano para fora do plano (dos muros de tímpano). O tabuleiro apresenta como função (além da circulação rodoviária/ferroviária e pedonal) receber as cargas que nele são aplicadas diretamente e distribuí-las para o enchimento. O tipo de rugosidade do tabuleiro e a sua rigidez podem influenciar o comportamento da PAAP. A rugosidade pode conduzir à amplificação do efeito da ação do tráfego rodoviário, influenciando assim o comportamento dinâmico das PAAP. No que toca à rigidez, a espessura influencia a degradação das cargas pontuais transmitidas ao enchimento, diminuindo a tensão atuante no enchimento.



Figura 2-3: Exemplos de tabuleiros de PAAP constituído por: (a) placas de unidades de alvenaria dispostas de forma regular; (b) placas de unidades de alvenaria dispostas de forma irregular; (c) camada de betuminoso. Extraída de (Portugal, NCREP); (d) um lajedo em material pétreo. Extraída de (Costa, P., 2007)

2.1.1.2 Enchimento

Situado entre os arcos e os muros de tímpano encontra-se o enchimento, ver Figura 2-4. O enchimento apresenta como principal objetivo funcional preencher o espaço entre os arcos e os muros de tímpano e como principal objetivo estrutural a transmissão das cargas do tabuleiro para os arcos e muros de tímpano, ver Figura 2-2. Na direção transversal as ações transmitidas pelo enchimento aos muros de tímpano podem ser quantificadas através da determinação de um impulso ativo (ação destabilizadora). Na direção longitudinal, aquando da ocorrência de deformação dos arcos no sentido de empurrar o enchimento contra os encontros ou parte superior do pilar, são mobilizados sobre os arcos impulsos passivos que têm sobre estes uma ação estabilizadora.

As características do enchimento em conjunto com o confinamento conferido pelos elementos que o suportam (arcos e muros de tímpano) influenciam o comportamento do enchimento na degradação das cargas que lhe são transmitidas. A diminuição de rigidez do enchimento conduz a uma menor degradação das cargas. O confinamento beneficia a degradação das cargas, sendo maior o seu efeito na direção transversal (Costa, C., 2009). A configuração da degradação das cargas é ainda influenciada pela altura do enchimento, ver Figura 2-5.

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

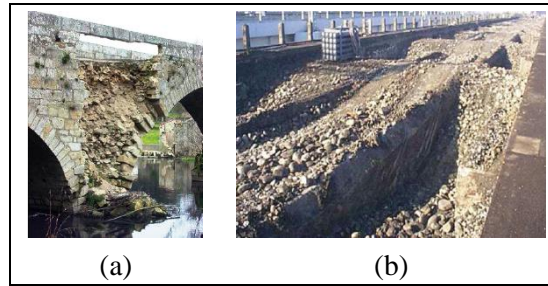


Figura 2-4: Enchimento visível na ponte de: (a) D. Zameiro. Extraída de (NCREP, Relatório de Inspeção à Ponte D. Zameiro, 2007); (b) Tanaro (Itália). Extraída de (Costa, C., 2009)

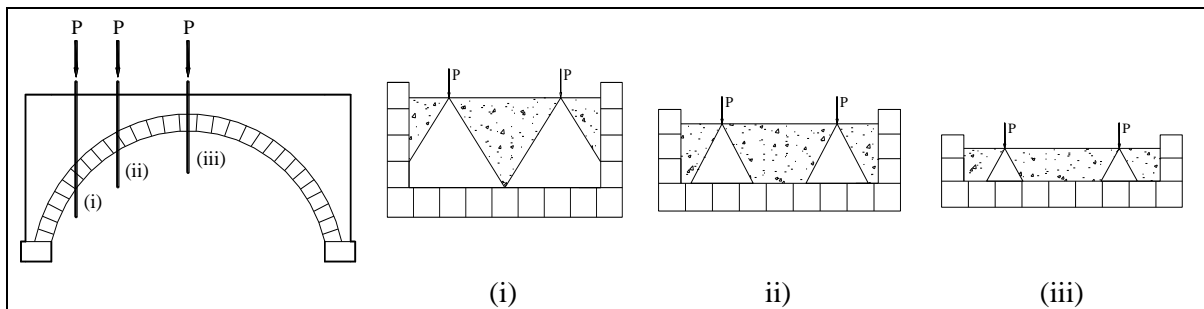


Figura 2-5: Configuração da degradação das cargas aplicadas de acordo com a variação da altura do enchimento nas secções (i), (ii) e (iii), adaptado de (Costa, C., 2009)

2.1.1.3 Muros de tímpano

Os muros de tímpano são paramentos verticais exteriores construídos em alvenaria sobre os arcos e os apoios (pilares e encontros), tendo como função principal resistir ao impulso ativo do enchimento.

O interior dos muros de tímpano pode apresentar-se inclinado ou com degraus de diferentes espessuras, sendo mais espesso junto à base. Muitas vezes também se construíam olhais sobre os pilares, arcos ou sobre os encontros, como se pode observar na Figura 2-6 (a), (b) e (c), de modo a aumentar a secção de vazão em situações de cheia. Podem-se ainda encontrar os muros de tímpano substituídos por arcos secundários, ver Figura 2-6 (d), para aligeirar as cargas transmitidas aos arcos.



Figura 2-6: Pormenor de olhais: (a) sobre os pilares na ponte de Vila Formosa. Extraída de (Portugal, Alentejo); (b) sobre os arcos na ponte de Remondes. Extraída de (Portugal, trasosmontesnet); e (c) sobre encontros na ponte de Estorãos. Extraída de (Flickr). (d) Exemplo de aligeiramento dos muros de tímpano na ponte de Drizes. Extraída de (Portugal, Retratos e Recantos)

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Pode-se observar em algumas PAAP secções de construção diferenciada que poderão ter sido realizadas para reconstrução/remodelação de modo a se adaptarem a novas exigências das vias.

Os muros de tímpano podem ser considerados elementos estruturais de grande rigidez, funcionando como vigas altas laterais. Assim na direção longitudinal a sua elevada rigidez (no plano dos tímpanos) contribui para a estabilização dos arcos restringindo os deslocamentos do extradorso dos arcos na direção dos muros de tímpano, impedindo o desenvolvimento de mecanismos de rótulas (abertura de juntas). Na direção transversal os muros de tímpano resistem ao impulso ativo do enchimento para depois o transmitirem aos arcos. O comportamento da estrutura na direção transversal é largamente condicionado pelo comportamento dos muros de tímpano e pelas propriedades da ligação muros de tímpano/arcos (imbricamento).

2.1.1.4 Arcos

Os arcos materializam os vãos a vencer, tendo como principal função estrutural encaminhar as cargas, o peso do tabuleiro, das guardas, do enchimento e dos muros de tímpano aos apoios (pilares e encontros) e/ou às fundações.

Os arcos são constituídos por aduelas, unidades de alvenaria geralmente cuneiformes, de elevada resistência, que de acordo com a sua posição tomam diferentes designações, ver Figura 2-7 (b): (i) a aduela colocada sobre a imposta corresponde à primeira aduela a ser colocada e que começa a formar a volta do arco, tendo a designação de aduela de saimel, S; (ii) a aduela que se encontra no cume do arco toma a designação de aduela de fecho, F, e corresponde à última aduela a ser colocada; (iii) contíguas à aduela de fecho encontram-se as aduelas de contrafecho, CF; (iv) as restantes aduelas, D. A letra e representa a espessura das aduelas.

A superfície interna dos arcos é denominada de intradorso e a superfície externa dos arcos é denominada de extradorso. Entre a aduela de saimel e os apoios dos arcos encontra-se a imposta. A distância entre o extradorso da aduela de fecho e a cota do tabuleiro é designada por recobrimento (ou coroamento), d . A secção que se encontra a 1/4 do vão do apoio é designada de rim. A altura desde as impostas ao intradorso da aduela de fecho é a flecha do arco, a_f . A altura a 1/4 do vão do apoio é a flecha a 1/4 do vão, $a_{f/4}$. A distância entre os centros das aduelas de saimel corresponde ao vão do arco, L .

O conjunto de todos os pontos que definem o centro de massa de cada aduela é designado de linha dos centros. A linha de impulso é o conjunto de todos os centros de pressões nas juntas correspondentes à resultante das forças que atuam nela, ver Figura 2-7 (c), onde a azul está representada a linha dos centros e a vermelho a linha de impulso.

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

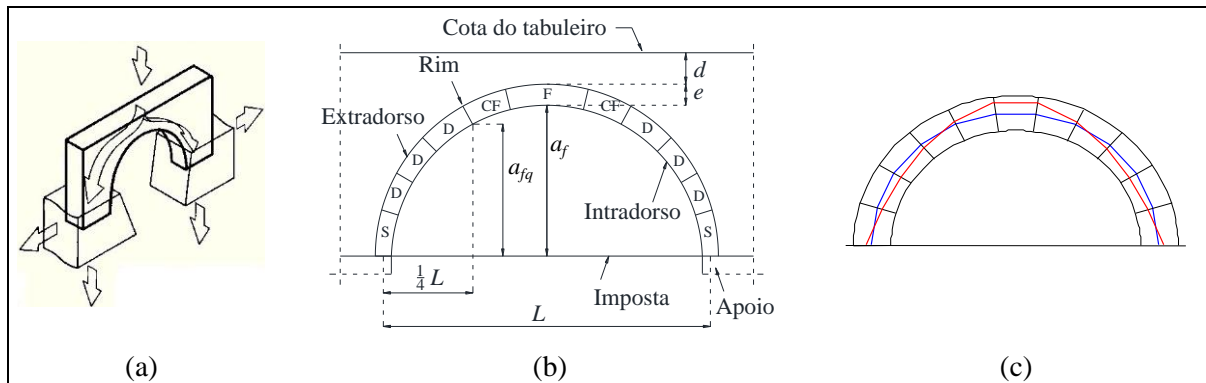


Figura 2-7: (a) Esquema estrutural do funcionamento em arco. Extraída de (Lourenço e Oliveira, 2003); Notação num arco: (b) esquema e (c) linha dos centros e linha de impulso. Extraída de (Rouxinol, 1999)

Os arcos podem apresentar diferentes tipologias, ver Figura 2-8, arco: (a) de volta perfeita (de volta inteira, semi-circular ou segmental); (b) segmentado; (c) parabólico; (d) ogival (gótico ou apontado); (e) elíptico; (f) abatido (ou multi-raio) e (g) adintelado. Na Figura 2-9 é apresentado um exemplo de uma PAAP com diferentes tipos de arcos e um exemplo de uma PAAP com arcos adintelados. As aduelas podem ser constituídas por unidades de alvenaria de material diferente e/ou de maiores dimensões que as utilizadas nos muros de tímpano, ver Figura 2-10.

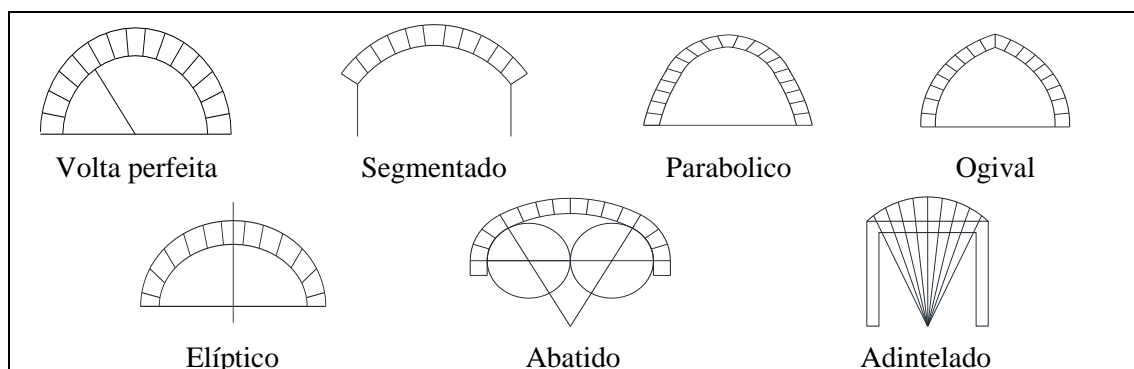


Figura 2-8: Sistema estrutural de arcos em PAAP, adaptado de (Nunes, 2009)

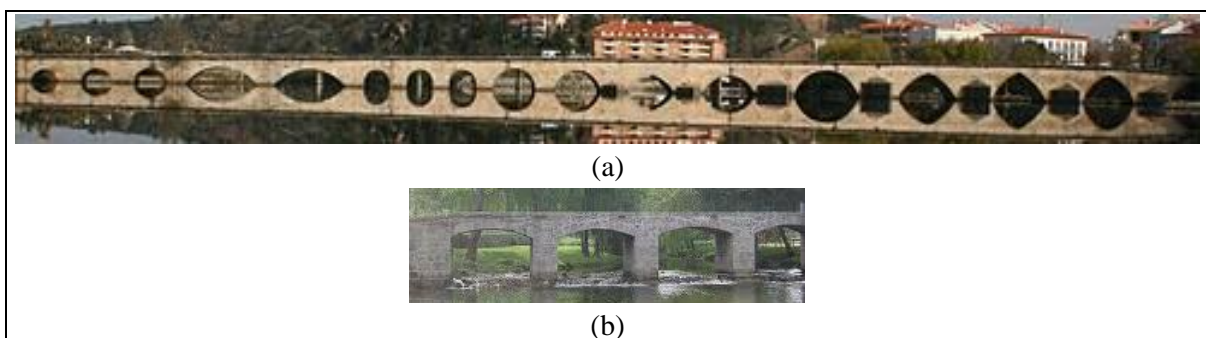


Figura 2-9: (a) Ponte velha sobre o rio Tua com diferentes tipos de arcos. Extraída de (Portugal, São Pedro Velho) e (b) ponte de Pouves com arcos adintelados. Extraída de (Geocaching)

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

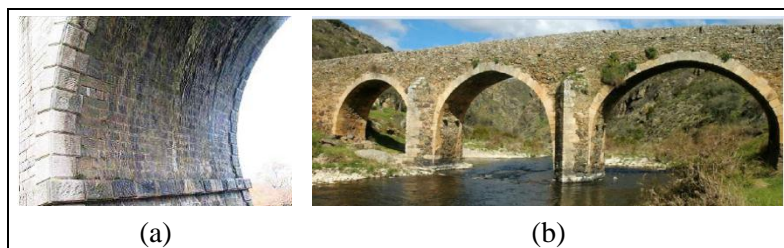


Figura 2-10: (a) Ponte ferroviária de Gaia com unidades de alvenaria de maiores dimensões nos arcos. Extraída de (Costa, C., 2009) e (b) Ponte romana de Algoso com material pétreo diferente nos arcos. Extraída de (Portugal, guidacidade)

Um dos fatores de grande importância na geometria de uma PAAP é o cimbramento, ver Figura 2-11, em que um elemento, designado de cimbra, usualmente em madeira era montado ao longo do vão, sobre o qual era erguido o arco em alvenaria desde os apoios à aduela de fecho. Caso o cimbra não fosse seguro após a colocação da aduela de fecho, o arco solicitaria as fundações podendo causar danos à estrutura.

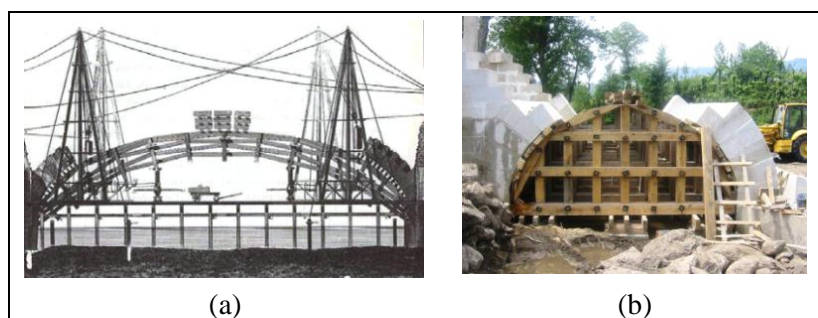


Figura 2-11: Dois exemplos de cimbramentos: (a) esquema. Extraída de (Perronet, 1987 cit. por Costa, P. 2007) e (b) construção da Ponte de Vila Fria. Extraída de (Costa, P. 2007)

2.1.1.5 Pilares e encontros

Os pilares e os encontros constituem os apoios dos arcos, apresentando uma secção geralmente retangular, tendo como função encaminhar as ações que lhes são transmitidas pelos arcos, às fundações, tendo ainda, que resistir às ações que lhes são aplicadas diretamente, como seja o caso do vento e a ação do escoamento do curso de água. Os pilares fundados no leito do curso de água são protegidos por talha-mares e/ou talhantes, que se referem a seguir (secção 2.1.1.6). Segundo Lourenço e Oliveira (2003) os pilares eram constituídos geralmente por uma secção oca em alvenaria e preenchida com cascalho e solo.

2.1.1.6 Talha-mares e talhantes

Os talha-mares e os talhantes eram geralmente, construídos numa fase posterior (aos elementos principais) e de forma desligada do pilar, podendo apresentar capeamento. Nas pontes mais recentes era mais comum a construção destes elementos em continuidade com os pilares, apresentando uma forma arredondada, ver Figura 2-12 (g). Podiam ser construídos em alvenaria ou em alvenaria e material de enchimento, podendo apresentar como formas mais

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

regulares a triangular nos talha-mares e a retangular nos talhantes. Alguns podiam apresentar outras formas, apesar de menos usuais, como talha-mares em forma tronco-cónica e talhantes em forma cilíndrica ou arredondada, ver Figura 2-12.

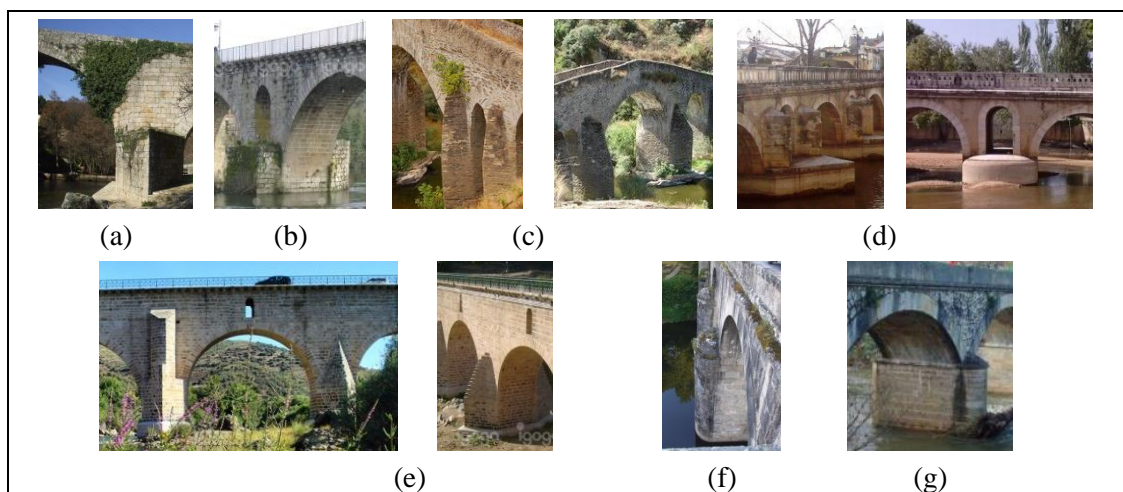


Figura 2-12: Exemplos de talha-mares e talhantes: (a) Ponte Românica de Mondim da Beira; (b) ponte da Barca. Extraída de (Portugal, Igogo); (c) ponte de Izeda. Extraídas de (Flickr e Portugal Trás-os-Montes, mar de pedra); (d) ponte Velha de Tomar, extraída de (Geocaching); (e) ponte da Portela. Extraídas de (Portugal, Olhares e Portugal, Igogo); (f) ponte das Caldas da Felgueira; (g) ponte do Prado. Extraída de (Portugal, Jornal o templário)

Os talha-mares têm a função de encaminhar o escoamento do curso de água, reduzindo assim a pressão sobre os pilares. Os talhantes têm como função a proteção da sucção causada pelos vórtices de água, ver Figura 2-13. Tanto os talha-mares como os talhantes contribuem para o aumento da rigidez na zona dos pilares.

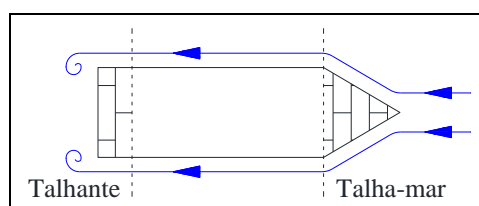


Figura 2-13: Esquematização do funcionamento dos talha-mares e talhantes nas PAAP

2.1.1.7 Fundações

As fundações têm como função mobilizar todas as ações. Eram construídas sobre o leito dos cursos de água a partir de ensecadeiras (Lourenço e Oliveira, 2003), podendo ser: (i) fundações diretas materializadas por: (i.a) sapatas sobre o afloramento rochoso, ver Figura 2-12 (e), ou (i.b) apoios assentes sobre o maciço ou afloramento rochoso, ver Figura 2-12 (a); (ii) fundações indiretas materializadas através de poços e pegões. A sua eficiência é condicionada pelos efeitos do escoamento do curso de água.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

2.1.1.8 Guardas

A função das guardas é a de proteção de segurança contra a queda e embate de veículos e dos peões. Podem ser de alvenaria, ver Figura 2-3, ou metálicas, sendo as primeiras as mais usuais.

2.1.2 Materiais constituintes

Os elementos estruturais das PAAP são compostos por dois conjuntos de materiais associados: (1) alvenaria - unidades de alvenaria (ou blocos de pedra natural) sem preenchimento ou preenchidas com argamassa - e (2) material de enchimento (Costa, C., 2009). As unidades de alvenaria (que constituem os paramentos das PAAP), associadas entre si com interposição de juntas que podem conter ou não argamassa de ligação constituem, no seu conjunto, um elemento anisotrópico e heterogéneo com descontinuidades, formando assim diferentes tipos de aparelhamento. Os tipos de aparelhamento usuais são classificados como regulares ou irregulares, ver Quadro 2-2. Segundo Costa, C. (2009) os arcos e os pilares são constituídos geralmente por aparelhos de unidades de alvenaria regular existindo uma maior dispersão de tipologias nos muros de tímpano. O material de enchimento encontra-se entre a face do extradorso do arco e a face interior dos muros de tímpano, no interior dos pilares e em alguns casos, segundo Costa, C. (2009), no interior dos talha-mares e talhantes. O material de enchimento é constituído por materiais soltos de granulometria extensa, cujos vazios eram preenchidos com material granular, podendo em alguns casos ser constituído por alvenaria.

Quadro 2-2: Tipologia de alvenarias em PAAP

		Face do intradorso do arco		Face exterior do muro de tímpano	
		Com juntas preenchidas	Com juntas sem preenchimento	Com juntas preenchidas	Com juntas sem preenchimento
Tipo de aparelho	Regular				
	Irregular				

2.2 Sistema estrutural das pontes em arco de alvenaria de pedra consoante as Épocas de Construção

O sistema estrutural das PAAP apresenta características diferentes consoante a Época em que as PAAP foram construídas. Existe pouca bibliografia das Épocas anteriores à Época Medieval, existindo várias teorias sobre o modo como surgiu o arco de alvenaria (Proske e Gelder, 2009). No entanto é atribuída à Época Romana a fase de maior impulsionamento da utilização do arco de alvenaria em PAAP. Neste trabalho as Épocas de Construção são divididas em três Épocas: (1) Época Romana, do século III a.C. ao século V; (2) Época Medieval, do século V ao século XV e (3) Época Moderna, do século XVI ao século XVIII. No entanto, refira-se a dificuldade em distinguir as tipologias de PAAP por Épocas, devido à sucessão de técnicas idênticas às usadas durante a Época Romana.

No Quadro 2-3 são apresentadas as principais características que distinguem as Épocas de Construção de acordo com o consultado nos trabalhos de Costa, P. (2007) e de Costa, C. (2009) e na informação constante da L'association ASCO TP - Association pour la Connaissance des Travaux Publics (França, L'association ASCO TP). Na Figura 2-14 são apresentados alguns exemplos de PAAP em Portugal.

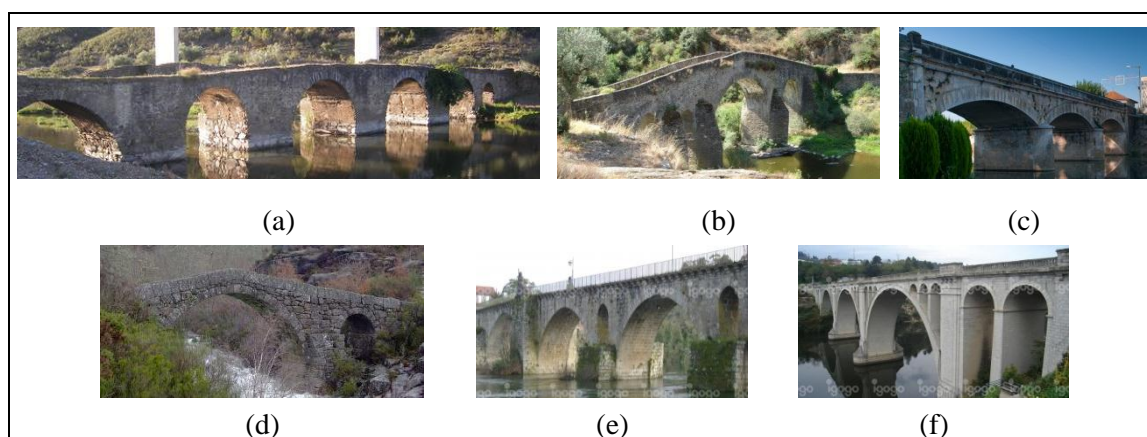


Figura 2-14: Exemplos de PAAP: (a) Ladeira ponte romana. Extraída de (panorâmico); (b) ponte medieval de Izeda. Extraída de (Portugal, Trás-os-Montes, mar de pedra); (c) ponte de Soure. Extraída de (Portugal, Olhares); (d) ponte romana da Cava Velha. Extraída de (Wikipedia); (e) ponte medieval de Ponte da Barca. Extraída de (Portugal, Igoto); (f) ponte Duarte Pacheco. Extraída de (Portugal, Igoto)

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro 2-3: Características das PAAP consoante a Época de Construção: (1) Época Romana; (2) Época Medieval e (3) Época Moderna, onde as letras de (i) a (vii) se referem aos mesmos aspetos

(1)	(i)	PAAP construídas de raiz.
	(ii)	Preocupação pela simetria com arcos geralmente de volta perfeita, iguais entre si. No final da Época, aquando da existência de mais de um arco, o arco central pode apresentar maior flecha e vão que os restantes arcos.
	(iii)	Tabuleiro de perfil horizontal com guardas de material pétreo. Nas PAAP de menores dimensões o perfil pode-se apresentar em cavalete. Largura geralmente não superior a 7, 8 metros.
	(iv)	Pilares com espessuras de aproximadamente de 1/5 a 1/3 do vão dos arcos.
	(v)	Talha-mares triangulares e/ou talhantes circulares (embora raramente existentes).
	(vi)	PAAP, geralmente, com juntas preenchidas.
	(vii)	Superfície das unidades de alvenaria não trabalhada ou trabalhada (no final da Época). Aduelas dos arcos geralmente com uma largura superior à espessura. Possibilidade de existência de saliências e de cavidades no intradorso dos arcos para apoio dos cimbres. Possibilidade de existência de orifícios nas aduelas (por onde estas eram içadas durante o processo construtivo).
(2)	(i)	Na sua maioria correspondem à reconstrução de PAAP em ruína da Época anterior.
	(ii)	Sem preocupação pela simetria, com o arco central a apresentar um vão e flecha de maiores dimensões que os restantes arcos. Arcos geralmente ogivais, podendo também ser de volta perfeita ou arcos abatidos.
	(iii)	Tabuleiro de perfil usualmente não horizontal, podendo existir guardas de material pétreo. Largura do tabuleiro usualmente inferior à da Época anterior, aproximadamente 3 a 4 metros.
	(iv)	Pilares com espessura similar aos da Época anterior.
	(v)	Talha-mares triangulares e talhantes retangulares (ambos de grandes dimensões).
	(vi)	PAAP com juntas sem preenchimento.
	(vii)	Superfície das unidades de alvenaria não trabalhada. Aduelas dos arcos geralmente com uma largura reduzida relativamente à espessura. Possibilidade de existência de siglas ou marcas dos pedreiros.
(3)	(i)	Na sua maioria, construídas de raiz.
	(ii)	Existência de diferentes tipos de construção entre os dois primeiros séculos e surgimento das pontes ferroviárias no último século da Época. Os arcos usualmente são segmentados com vãos maiores e flechas menores que as Épocas anteriores, podendo também ser de volta perfeita em algumas PAAP rodoviárias e nas PAAP ferroviárias.
	(iii)	Tabuleiro de perfil horizontal com guardas de material pétreo ou metálico.
	(iv)	Pilares geralmente com uma menor secção e uma maior altura (relativamente às Épocas anteriores).
	(v)	Talha-mares e talhantes de menores dimensões (relativamente às Épocas anteriores), podendo apresentar continuidade de construção com os pilares.
	(vi)	PAAP com juntas preenchidas.
	(vii)	Superfície das unidades de alvenaria não trabalhada. Possibilidade de existência de pilares e/ou encontros em cantaria simples ou trabalhada, bem como a existência de ornamentos e brasões. Aduelas dos arcos com uma largura reduzida relativamente à espessura.

2.3 Evolução dos conhecimentos sobre o comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra

Apresenta-se nesta secção e de uma forma resumida a evolução dos conhecimentos sobre o comportamento estrutural de PAAP, com base nos trabalhos de Rouxinol (1999); Lança, (2006); Costa, P. (2007); Nunes (2009) e Proske e Gelder (2009). Referem-se apenas os aspetos considerados mais importantes no âmbito deste trabalho.

O comportamento estrutural de uma PAAP pode ser visto segundo a maneira como a estrutura suporta as cargas, i.e., como as cargas transmitidas à PAAP são absorvidas e transmitidas ao terreno. Comparando o caminho das cargas, designado por linha de impulso, ao da corrente de água que procura o caminho mais direto, i.e., o caminho mais natural, aquele será também o mais curto possível, desde o ponto de aplicação da carga até ao terreno (Engel, 1981; Sussekind, 1981; Salvadori, 2006 cit. por Nunes 2009).

As maiores preocupações no dimensionamento destas estruturas estavam relacionadas com os arcos, nomeadamente ao nível da sua geometria para posterior determinação da linha de impulso. Verifica-se que o colapso do arco não ocorre por esmagamento das unidades de alvenaria (uma vez que o valor das tensões normais máximas é geralmente reduzido) nem por deslizamento entre aduelas contíguas, mas sim por falta de equilíbrio, i.e., a linha de impulso deixa de ficar contida na secção transversal do arco.

O dimensionamento de arcos pode ser dividido em dois tipos de análise: (1) tradicional e (2) moderna.

(1) A evolução da análise tradicional pode ser subdividida em quatro grupos:

- (i) Uso de regras empíricas baseadas em proporções geométricas até ao século XVII e melhoradas até ao início do século XX;
- (ii) Uso de algoritmos algébricos e geométricos entre o final do século XVII e a primeira metade do século XIX, baseados no cálculo estático de mecanismos de colapso em arcos;
- (iii) Uso de algoritmos algébricos e gráficos simplificados com base nos métodos anteriores, desenvolvidos no início do século XIX, recorrendo a coeficientes calibrados por investigação experimental;
- (iv) Uso de métodos gráficos baseados na linha de impulso desenvolvidos durante a segunda metade do século XIX.

(2) A análise moderna refere-se à adaptação, no final da primeira metade do século XX, do método gráfico da linha de impulso à análise limite com posterior análise numérica. Esta foi possível devido ao desenvolvimento de meios computacionais: método dos elementos finitos, método dos elementos discretos e método dos elementos finitos discretos.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

De seguida são referidos os trabalhos e estudos considerados mais importantes relacionados com a análise tradicional e posteriormente com a análise moderna.

2.3.1 Métodos de análise tradicional

Os autores a abordar encontram-se referidos no Quadro 2-4, sendo os seus trabalhos e estudos citados a seguir. Foi estabelecida uma data limite para apresentação dos métodos de análise tradicional: 1999 (século XX).

Quadro 2-4: Autores de maior importância no desenvolvimento dos métodos de análise tradicional de PAAP

Autor	Ano	Autor	Ano
L. B. Alberti	1452	C. Navier	1826
L. Da Vinci	1452	F. Gerstner	1831
H. Fabri	1669	J. V. Poncelet	1835
R. Hooke	1675	É. Méry	1840
F. Blondel	1683	H. Moseley	1843
D. Gregory	1697	W. H. Barlow	1846
P. de La Hire	1712	G. Breymann	1849
H. Gautier	1717	A. Yvon Villarceau	1854
B. F. Bélidor	1729	Fuller	1875
P. Couplet de T	1729	Winkler	1879
Danysy	1732	C. Castigliano	1879
F. Jacquier, T. La Seur e R.G. Boscovich	1742	P. Sejourné	1886
G. Poleni	1748	OIAV	1890
J.-R. Perronet	1768	W. Rankine	1898
C. A. de Coulomb	1773	A.J.S. Pippard	1939
Mascheroni	1785	C Inglis	1951
L. C. Boistard	1800	A. Kooharian	1953
J. Rondelet	1802	J. Heyman	1966
Venturoli	1810	M. Corradi	1998
J. A. C. Bresse	1822	Lagomarsino e Gambarotta	1999

Como referido anteriormente existia pouca informação anteriormente à Época Medieval. A partir da Época Medieval apenas existiam tratados que circulavam em meios restritos e de geração em geração. Apesar dos conhecimentos científicos eclodirem nos séculos XVII e XVIII, ainda persistia o método da tentativa e erro baseado em proporções geométricas, sendo acumulados conhecimentos e criadas regras básicas para a verificação no dimensionamento das PAAP que eram transmitidos de pais para filhos.

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

As técnicas foram-se desenvolvendo, tal como o conhecimento empírico, passando-se a construir vãos maiores, deixando-se de construir arcos semicirculares com uma baixa espessura de recobrimento sobre a aduela de fecho do arco nas PAAP Romanas, passando-se a construir arcos mais abatidos, arcos elípticos e em catenária invertida nas PAAP em final da Época Medieval, o que permitiu retirar apoios intermédios (Kurrer, 2008 cit. por Nunes 2009).

L. B. Alberti (1452), criou o primeiro documento com a preocupação de explicar o comportamento estrutural de um arco, Tratado de arquitetura intitulado “De Reaedificatoria”, apresentado ao papa Nicolau V em 1452. O documento realçou a importância da distribuição da massa para a estabilidade de um arco. Estudou as medidas e proporções dos vários elementos das PAAP, como se pode observar pela Figura 2-15 (a), que iriam constituir a doutrina oficial para o desenho de PAAP até meados do século XVIII, apesar de estas já serem consideradas. Propôs uma razão entre a espessura da aduela de fecho e o vão do arco igual 1/10 (Proske e Gelder, 2009).

L. Da Vinci (1452), realizou o primeiro esboço do estudo mecânico dos arcos (Huerta, 2001 cit. por Costa, P. 2007), como se pode observar na Figura 2-15 (b) e Figura 2-15 (c), a fim de adquirir uma maior perceção do comportamento dos arcos. Nos seus desenhos é possível visualizar a identificação dos mecanismos de colapso por formação de rótulas. A sua definição de arco é: “um arco não é outra coisa que uma fortaleza formada por duas fraquezas” (Da Vinci e Richter, 1970 cit. por Nunes 2009).

H. Fabri (1669), apresentou uma razão entre a espessura do arco, e , e o raio do extradorso do arco, r_e , igual a 0,34 e outra razão entre o raio do extradorso do arco, r_e , e o raio do intradorso do arco, r_i , igual a 0,657.

R. Hooke (1675), enunciou o seguinte teorema “Da mesma forma que se suspende um fio flexível, também assim, mas invertido, se sustera um arco rígido”, ver Figura 2-15 (d). Surge assim a primeira noção de catenária invertida, apesar de Hooke não apresentar nenhuma justificação matemática para tal teorema.

F. Blondel (1683), propôs uma regra empírica para o dimensionamento da espessura dos pilares, ver Figura 2-16, que consiste em dividir o perímetro do intradorso do arco AD em três partes iguais, com base nos pontos B e C. Unindo o ponto C com o ponto D (ou B com A), e prolongando este segmento a uma distância igual a CD (ou BA) obtém-se o ponto E. A projeção de DE (ou AE) na horizontal corresponde à espessura mínima dos pilares.

D. Gregory (1697), afirmou que a catenária invertida era a forma correta de um arco de alvenaria de secção constante que suporta somente o seu peso próprio, i.e., quando um arco de alvenaria que não apresente a forma de uma catenária se sustem, é porque no interior da sua

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

espessura está incluída alguma catenária. Desta forma ficou definida a aplicação do teorema do limite inferior da análise plástica a estruturas de alvenaria.

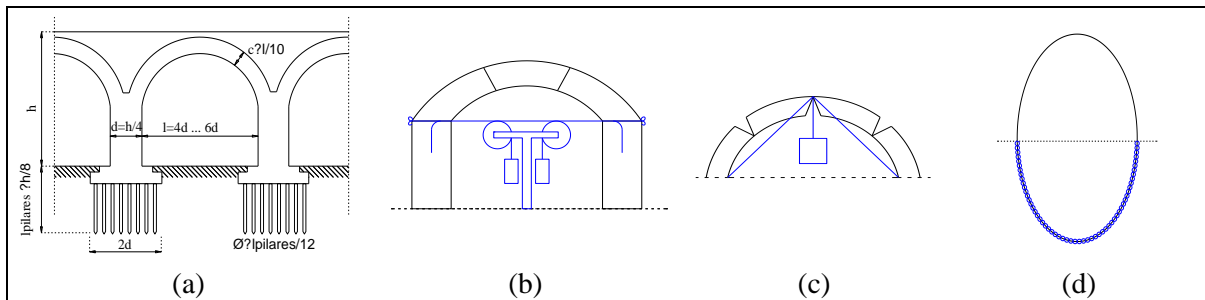


Figura 2-15: (a) Desenho com as regras empíricas para as dimensões das pontes segundo Alberti. Adaptado de (Proske e Gelder, 2009); Estudo do comportamento dos arcos por Da Vinci: (b) propostas de formas de medição de impulso; (c) ensaios em arcos. Adaptado de (Huerta, 1996) e (d) Inversa da corrente suspensa de Hooke. Adaptado de (Heyman, 1995 cit. por Costa, P. 2007)

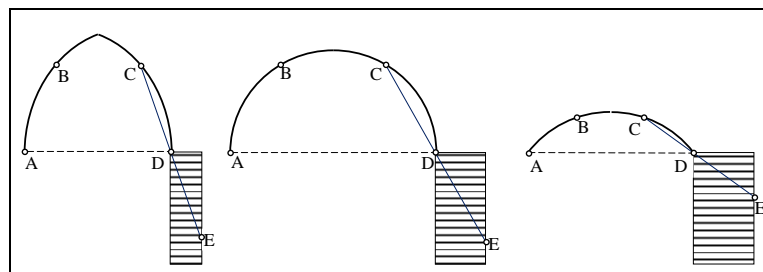


Figura 2-16: Regra de Blondel. Extraída de (Rouxinol, 1999)

P. de La Hire (1712), estudou o comportamento mecânico dos arcos, aplicando pela primeira vez conceitos de estática. Até à data os estudos eram baseados em interpretações intuitivas de observações experimentais (Gago, 2004 cit. por Costa, P. 2007). Apresentou uma memória cujo principal objetivo era o estabelecimento de regras racionais para o dimensionamento dos pilares. Afirmou que “... o mecanismo através do qual o arco poderia colapsar era constituído por cunhas deslizantes, que, por ação do seu peso próprio, fariam deslocar a parte superior do arco ... empurrando os encontros para o exterior ...”. De acordo com Nunes (2009) a teoria das cunhas teve origem na teoria das máquinas simples, segundo a qual todos os mecanismos e engenhos podiam ser reduzidos a um dos cinco seguintes aspetos: (1) roda e eixo; (2) alavanca; (3) roldana; (4) cunha e (5) parafuso. La Hire nos seus estudos desprezou o efeito do atrito entre as aduelas e considerou que as juntas de escorregamento ocorreriam para secções a uma distância que correspondia a aproximadamente meia distância entre os encontros e a aduela de fecho, ficando desta forma o estudo reduzido ao equilíbrio dos três corpos rígidos resultantes, ver Figura 2-17 (a). Apresenta-se a seguir a explicação da forma gráfica desta metodologia, ver Figura 2-18.

No caso dos arcos se encontrarem sujeitos a cargas verticais recorria-se ao método do polígono funicular. Assim substituindo-se o arco por uma corda suspensa pelos apoios A e B, fica-se com a forma de uma catenária sujeita à carga vertical, P_1 , P_2 , e P_3 , ver Figura 2-18 (a).

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

Nos apoios as reações são constituídas por uma componente vertical, V_A e V_B , e uma componente horizontal, H . Para conhecer a inclinação desta catenária recorre-se à construção do polígono de forças que corresponde à sobreposição dos triângulos de força de cada uma das cargas e reações de apoio. Cada linha convergente em O indica a inclinação do respetivo troço, T_1 , T_2 , T_3 e T_4 . Ao se inverter o polígono funicular obtém-se a linha de impulso do arco que leva as cargas aos apoios. Na Figura 2-18 (b) e (c) são apresentados os polígonos de forças e polígono funicular quando é conhecido o valor das reações verticais, V_A e V_B , e se diminuiu o valor da reação horizontal de H para H' passando de um polígono funicular ACDEB (representado a traço cheio) para um polígono funicular mais alto AC'D'E'B (representado a traço incompleto). Uma corda maior equilibra as forças com um impulso horizontal menor, e.g., um arco abatido exerce nos apoios um impulso horizontal maior que um arco perfeito (Vieira, 1997). Apresenta-se ainda na Figura 2-18 (d) um exemplo da construção de dois triângulos de forças. Na Figura 2-18 (e) e (f) são apresentados os polígonos de força e o polígono funicular quando não é conhecido o valor das reações verticais, V_A e V_B . Neste caso o polígono inicia-se no ponto fixo A e termina no ponto F não coincidente com o ponto B. Através da linha AF o polígono é fechado e é feita uma linha paralela a AF passando pelo ponto O no polígono de forças. A interceção desta linha paralela com a linha vertical do polígono de forças define o ponto G. A linha O'G paralela à linha AB interceta no ponto O' a linha OO', designada de linha dos pivôs (Rouxinol, 1999).

H. Gautier (1717), realizou os primeiros ensaios sobre arcos constituídos por aduelas de madeira em modelos físicos reduzidos que iriam aumentar os conhecimentos sobre os mecanismos de colapso (Nunes, 2009). Num tratado de construção de PAAP apresentou regras e proporções da geometria dos arcos, dos encontros e dos pilares (apresentou uma razão entre a espessura do arco e o quadrado do vão, igual a 1/18). Fixou cinco problemas relativos a arcos de alvenaria que requeriam uma resolução: (1) espessura dos encontros; (2) dimensão dos pilares relativamente ao vão; (3) espessura das aduelas junto à aduela de fecho; (4) forma do arco e (5) dimensão dos muros de suporte de terra.

B. F. Bélidor (1729), publicou o primeiro manual de engenharia: “A Ciência dos Engenheiros” e um livro: “Nouveau Cours de Mathématique à l’ Usage de l’ Artillerie et du Genie ou l’on applique les parties les plus utiles de cette Science à la Théorie et à la pratique des diferens sujets qui peuvent avoir rapport à la Guerre”, dedicado exclusivamente à mecânica dos arcos. Baseando-se nos trabalhos de La Hire, afirmou que a secção mais desfavorável de um arco circular se encontra a um ângulo de 45°, medido a partir da horizontal (Rouxinol, 1999).

P. Couplet de T. (1729), apresentou na Académie Royale des Sciences duas memórias onde incluiu estudos sobre o comportamento estrutural de arcos. Na sua primeira memória constavam estudos sobre a linha de impulso baseados na hipótese de atrito nulo entre aduelas. Na sua segunda memória admitiu que o valor de atrito entre as aduelas era suficientemente

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

elevado para impedir o deslizamento. Considerou as unidades de alvenaria sujeitas a níveis de tensões normais suficientemente baixas que permitiam considerar desprezável o perigo de colapso das unidades de alvenaria por compressão e que o valor da resistência à tração era muito baixo. Considerou assim as três premissas que permitiam a aplicação da teoria da análise plástica convencional a estruturas em arco de alvenaria: (1) a alvenaria não resiste a tensões de tração; (2) os níveis gerais de tensões na alvenaria são de tal forma baixos que se considera a resistência à compressão do material pétreo infinita e (3) o deslizamento entre unidades de alvenaria contíguas não ocorre. Para provar a aplicação da teoria da análise plástica convencional apresentou duas abordagens (Alves, E. e Lourenço, 2000; Lourenço, Roca e Alves, A., 2000):

- (1) A Estática (equilíbrio) - existindo uma linha de impulso contida dentro da espessura das aduelas do arco, que se encontra em equilíbrio com o peso próprio e as cargas, o arco não poderá colapsar.
- (2) Cinemática (deformação) - para demonstrar que um arco é instável, é necessário que a linha de impulso passe alternadamente em pontos localizados nas curvas do intradorso e do extradorso, i.e., representa um mecanismo de colapso.

Para determinar a espessura mínima do arco, este é dividido entre si em quatro partes unidas por rótulas encontrando-se duas delas a 45° dos apoios do arco. Escrevendo uma equação de equilíbrio entre as quatro partes e resolvendo-a em relação à razão entre a espessura do arco, e , e o raio do extradorso do arco, r_e , obtém-se o valor de 0,101. Do mesmo modo são determinadas as dimensões dos apoios.

Danysy (1732), realizou vários ensaios em modelos reduzidos, cujos esquemas se exemplificam na Figura 2-17 (b), que lhe permitiram confirmar as hipóteses introduzidas por Couplet.

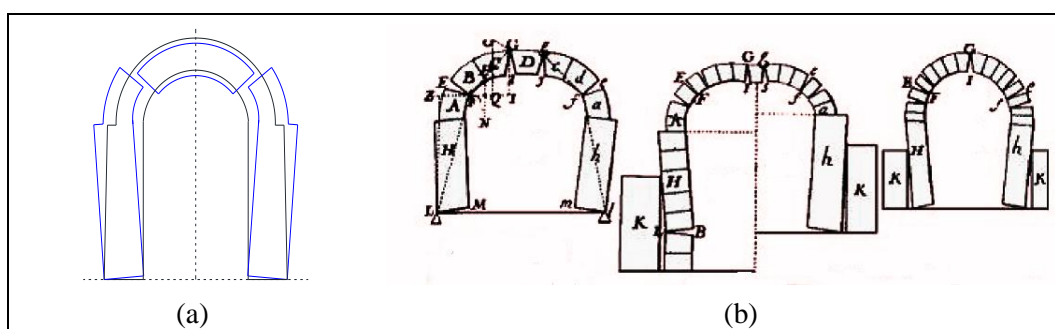


Figura 2-17: (a) Mecanismo tipo cunha deslizante proposto por de La Hire. Adaptado de (Nunes, 2009) e (b) Ensaios de Danysy. Adaptado de (Huerta, 1996)

F. Jacquier, T. La Seur e R. G. Boscovich (1742), elaboraram um estudo sobre a estabilidade da cúpula da Basílica de São Pedro em Roma. Do relatório elaborado constava: a descrição da cúpula; dos seus danos; dados históricos dos danos e das interpretações das causas; elaboração e análise de um modelo e um comentário com as diferentes soluções propostas que incluíam obras de reparação. Esta análise foi, pela primeira vez, realizada com

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

base no princípio dos trabalhos virtuais para encontrar o equilíbrio entre as forças estabilizantes e não estabilizantes, representando assim uma significativa contribuição para o campo da teoria das estruturas.

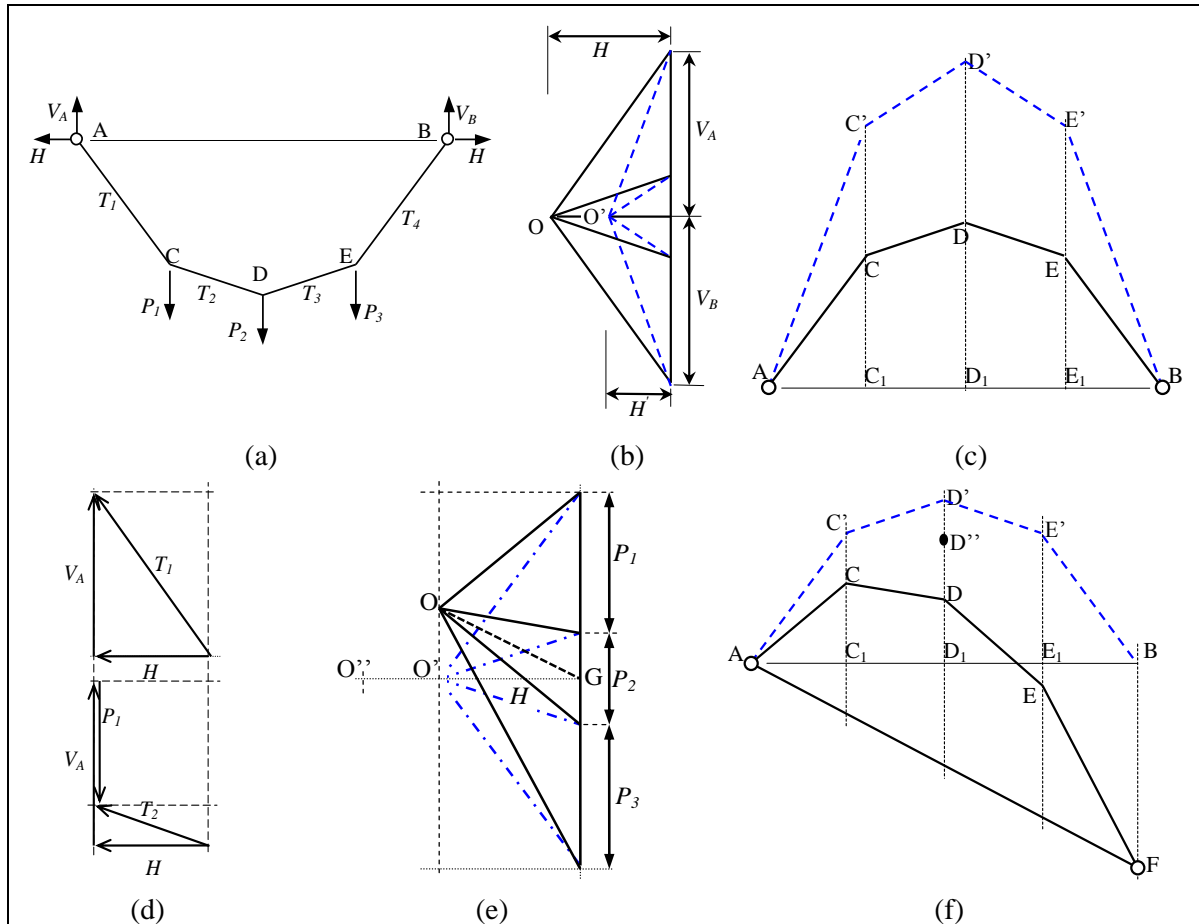


Figura 2-18: (a) Catenária invertida; (b) polígono de forças com V_A e V_B conhecido e diminuição de H para H' ; (c) polígono funicular forças com V_A e V_B conhecido e diminuição de H para H' ; (d) construção de dois triângulos de forças; (e) polígono de forças com V_A e V_B desconhecido e (f) polígono funicular com V_A e V_B desconhecido. Extraídas de (Rouxinol, 1999)

G. Poleni (1748), realizou também um estudo da cúpula da Basílica de São Pedro em Roma que apresentava fendilhação. No estudo dividiu a cúpula em gomos, que analisou separadamente como se se tratassem de arcos de alvenaria, ver Figura 2-19 (a). Suspendeu um conjunto de pesos proporcionais às aduelas constituintes de cada gomo e sobrepôs a geometria real da cúpula à escala apropriada e confirmou que a catenária se encontrava inscrita no interior da cúpula. Aplicou pela primeira vez o conceito da forma da catenária no estudo de uma estrutura real (Horta e Carasco, 2002 cit. por Lança 2006). Deste modo por aplicação do teorema seguro (ou teorema do limite inferior da análise plástica) concluiu que cada um dos gomos quando considerado isoladamente era estável e conseqüentemente também a cúpula na sua totalidade. Foi utilizado o teorema estático (um dos importantes teoremas da teoria da análise limite), que apenas viria a ser enunciado séculos mais tarde por Heyman (Gago, 2004 cit. por Lança 2006). Estabeleceu ainda o valor do impulso horizontal da cúpula. O seu

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

trabalho é considerado como a primeira aplicação da mecânica estrutural para a resolução de um problema real.

J.-R. Perronet (1768), na construção da Ponte de Neuilly (França), reduziu as dimensões dos pilares de 1/5 do vão propostas por Gautier para 1/11 do vão. Para tal, construiu simultaneamente os cinco arcos da ponte tirando assim partido da compensação ao nível de cada pilar dos impulsos horizontais provenientes dos arcos adjacentes. Melhorou ainda as técnicas de descimbramento dos arcos e estabeleceu uma fórmula, ver a expressão (2-1), para a espessura da aduela de fecho que iria reduzir significativamente os valores de Gautier.

$$e = 0,325 + 0,035L \quad (2-1)$$

Onde:

e – Espessura das aduelas do arco;

L – Vão do arco.

C. A. de Coulomb (1773), elaborou uma compilação dos conhecimentos existentes sobre arcos e defendeu que a rugosidade é frequentemente tão elevada nos materiais que se usam na construção dos arcos de alvenaria que as aduelas nunca podem deslizar umas sobre as outras, i.e., o atrito entre aduelas é suficientemente elevado para que o colapso não ocorra por deslizamento, podendo apenas ocorrer o colapso através da formação de um número suficiente de rótulas alternadas entre o intradorso e o extradorso do arco. Propôs uma distância mínima de 5% da espessura da aduela entre o contorno da secção e a linha de impulso numa rótula para que não se verifique esmagamento do material. No caso de surgirem duas rótulas em juntas consecutivas, para efeitos de análise, deve considerar-se apenas uma delas. Utilizando cálculo diferencial corrigiu o ângulo de posição de Couplet ao colocar a rótula no intradorso de 45°, para 31° do apoio, o que iria incrementar ligeiramente o valor mínimo da razão espessura/raio de 0,101 para 0,106. A investigação de Coulomb na estabilidade dos arcos permitiu concluir ser necessário verificar por um lado o escorregamento relativo entre aduelas e por outro a possibilidade de uma rotação relativa entre aduelas. Através de considerações sobre o equilíbrio estático de uma parcela de um arco simétrico, ver Figura 2-19 (b), verificou que se o impulso horizontal, P , for suficientemente baixo, a aduela acima da junta crítica Mm sofre uma rotação em torno do ponto M . Do mesmo modo, se o impulso for suficientemente alto, a aduela acima da junta crítica Mm sofre uma rotação em torno do ponto m . Estabeleceu expressões analíticas que limitavam, superior e inferiormente, o valor do impulso horizontal na aduela de fecho.

Mascheroni (1785) e Venturoli (1810), seguindo a teoria do equilíbrio do arco, estudaram o dimensionamento da espessura dos pilares de um arco, considerando o mecanismo de colapso proposto por Couplet e Coulomb, ver Figura 2-20 (a).

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

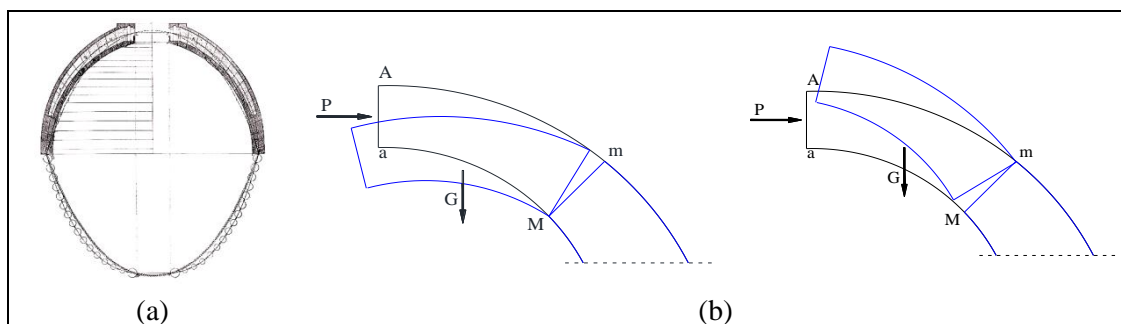


Figura 2-19: (a) Verificação da estabilidade da cúpula da basílica de São Pedro por Poleni. Extraída de (Heyman, 1972 cit. Nunes 2009) e (b) Mecanismos limite considerados por Coulomb. Adaptado de (Gago, 2004 cit. por Costa, P. 2007)

L. C. Boistard (1800), realizou vários ensaios sobre modelos de PAAP, ver Figura 2-20 (b), onde a forma dos arcos era variável, as aduelas encontravam-se ligadas a seco e os arcos apresentavam um vão de 2,4 metros. No seu primeiro ensaio, com uma espessura de 0,102 metros, e uma razão entre a espessura do arco e o raio do intradorso igual a 0,085 (valor da relação inferior ao indicado pelos autores referidos anteriormente), desmoronara-se no momento do descimbramento. O modelo apresentava valores de tensões baixas e os apoios completamente fixos. O principal objetivo dos ensaios era a observação do comportamento real dos arcos, para determinar o impulso horizontal e a força nos cimbres durante o processo construtivo.

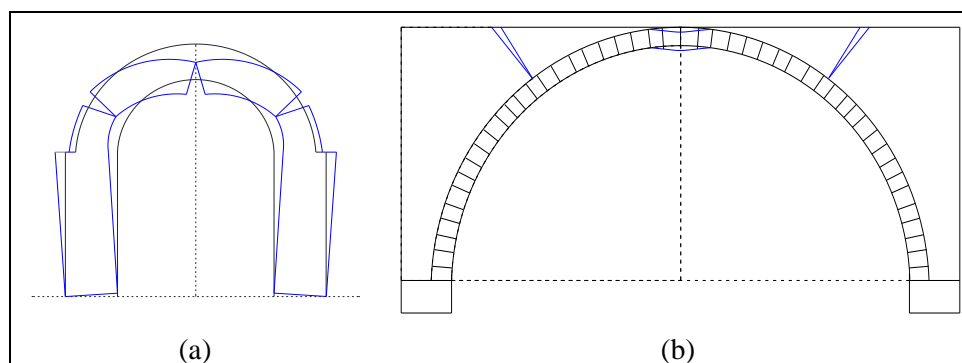


Figura 2-20: (a) Mecanismos considerados por Mascheroni para o dimensionamento da espessura dos pilares. Adaptado de (Gago 2004 cit. por Costa, P. 2007) e (b) Resultado de um ensaio experimental de Boistard. Adaptado de (Huerta, 1996)

J. Rondelet (1802), publicou manuais com tabelas e regras simplificadas baseadas em resultados analíticos e experimentais (Gago, 2004 cit. por Costa, P. 2007).

J. A. C. Bresse (1822), aplicou a teoria das barras curvas, com a qual estabeleceu uma solução completa para arcos elásticos encastrados. Utilizando um raciocínio puramente analítico baseou o seu trabalho na procura da solução para a indeterminação da linha de impulso.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

C. Navier (1826), foi o primeiro autor a introduzir o conceito de núcleo central, resultante da consideração da distribuição de tensões ao longo das secções transversais das aduelas. Propôs a utilização da teoria da elasticidade para o dimensionamento de arcos de alvenaria. A partir dos estudos de Coulomb, propôs uma lei linear de distribuição das tensões ao longo da altura da secção.

F. Gerstner (1831), tendo já presente o conceito de linha de impulso, aplicou-o a arcos sujeitos a diferentes cargas distribuídas, mostrando que o arco é estaticamente indeterminado, i.e., num arco em equilíbrio podem-se determinar várias posições para a linha de impulso.

J. V. Poncelet (1835), foi o primeiro a reconhecer que os métodos gráficos ofereciam uma aproximação mais do que suficiente, já que o esforço necessário para realizar o cálculo analítico era recompensado apenas por um pequeno incremento de precisão. Partindo da teoria de Coulomb mostrou como a posição da secção onde se forma a rótula podia ser determinada graficamente.

E. Méry (1840), desenvolveu um método gráfico, partindo dos trabalhos de Navier e Moseley, admitindo que se formava um mecanismo de três rótulas no arco: uma na aduela de fecho e duas simétricas na secção dos rins. Considerou ainda que a linha de impulso deveria estar contida no terço central da espessura arco (núcleo central de uma secção retangular), sendo coincidente com os seus limites nas secções de pré-colapso, conforme se pode ver na Figura 2-21 (a). Sem demonstrar considerou que a secção de pré-colapso na secção dos rins estaria numa secção que faz com a vertical um ângulo de 60° . Trinta anos mais tarde os seus procedimentos iriam ser simplificados pela aplicação de polígonos funiculares, passando estes a serem incorporados em todos os manuais de estática gráfica (Huerta, 2004 cit. por Lança 2006).

H. Moseley (1843), dedicou o seu trabalho ao estudo matemático da linha de impulso. Para determinar a linha de impulso estabeleceu que esta corresponderia ao impulso horizontal mínimo na aduela de fecho, ver Figura 2-21 (b), suposição não considerada verdadeira atualmente.

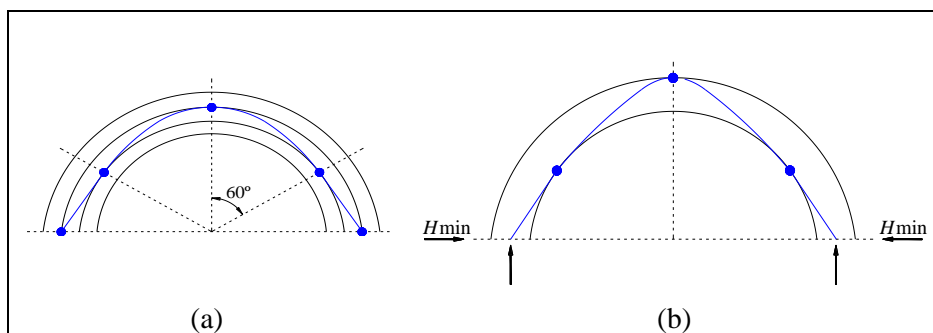


Figura 2-21: (a) Exemplificação do método gráfico de Méry e (b) Linha de impulso correspondente ao impulso horizontal mínimo. Linha de impulso a azul. Adaptado de (Costa, P. 2007)

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

W. H. Barlow (1846), apresentou vários modelos de arcos de alvenaria com o objetivo de obter linhas de impulso. Um dos modelos resultava da equivalência com uma corda invertida, como se pode observar na Figura 2-22 (a). Outro modelo consistiu na construção de um arco de alvenaria de seis aduelas cujas juntas se tratavam de paralelepípedos de madeira, de tal modo que ao retirar três delas em diferentes configurações se obtinham diferentes posições para a linha de impulso, ver Figura 2-22 (b).

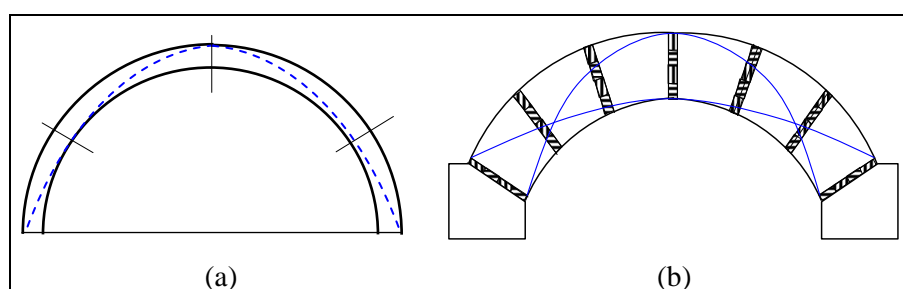


Figura 2-22: (a) Equivalência da corda suspensa invertida e (b) modelo de Barlow. Linha de impulso a azul. Extraídas de (Rouxinol, 1999)

G. Breymann (1849), apresentou um tratado com base nos estudos de Poncelet e Méry, que se tornou uma referência fundamental para a verificação da estabilidade de arcos durante toda a segunda metade do século XIX.

A. Y. Villarceau (1854), propôs o método inverso para a determinação da espessura de um arco. Para uma dada carga fez coincidir a linha dos centros de pressões com uma das possíveis linhas de impulso. Propôs ainda um parâmetro limitador das tensões de compressão, baseado na altura máxima que uma coluna poderia alcançar sem entrar em colapso devido ao seu peso próprio, na ausência de fenômenos de instabilidade. Referiu que as estruturas de alvenaria estavam normalmente submetidas a tensões muito baixas, quando comparadas com as tensões resistentes do material à compressão. Consequentemente o colapso de um arco seria uma questão de simples equilíbrio que dependeria muito mais da geometria do arco do que da resistência do material.

Fuller (1875), introduziu uma nova técnica para a construção do polígono funicular, para determinar a espessura mínima de um arco sujeito a cargas.

Winkler (1879), após uma revisão de todas as teorias à data verificou que a análise elástica seria a melhor opção. Introduziu o conceito de perturbações que podiam afetar a posição da linha de impulso, como seja o caso de deformações durante a construção e variações de temperatura, podendo estas causar perturbações e originar fendilhação. Para tal sugeriu formas de controlar a posição da linha de impulso durante a construção de arcos (Huerta, 2001 cit. por Lança 2006).

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

C. Castigliano (1879), aplicou o Teorema de Castigliano para uma análise estaticamente indeterminada a arcos. Considerou que a alvenaria não suporta tensões de tração. Estudou a ponte Mosca em Turim (Itália), supondo: (1) numa primeira análise elasticidade perfeita nas juntas; (2) numa segunda análise juntas sem preenchimento de espessura nula e (3) numa terceira e última análise a existência de alguma fendilhação. Obteve valores de impulso horizontal de 3,52 KN, 3,24 KN e 3,33 KN respetivamente. Trata-se de um método iterativo, i.e., quando a linha de impulso sai do terço central a espessura é reduzida na iteração seguinte e conseqüentemente o valor da inércia. Nesta altura, a teoria dos arcos passou a ser encarada como uma extensão da teoria elástica das vigas curvas.

P. Sejourné (1886), com o lançamento da sua memória, “Construction des Ponts du Castelet Lavour et Antoinette”, renovou as técnicas de construção das PAAP. Refira-se o seu projeto para a ponte Adolfo (Luxemburgo). As suas regras passaram a ser seguidas por inúmeros construtores. Sugeriu uma fórmula para a espessura mínima da aduela de fecho, e , dada pela expressão (2-2) (Proske e Gelder, 2009)

$$e = 0,5 + 0,015L \quad (2-2)$$

Onde:

e – Espessura das aduelas do arco;
 L – Vão do arco.

OIAV - Associação Austríaca de Engenheiros e Arquitetos (1890), apesar de a teoria da elasticidade ser aceite, esta associação realizou vários ensaios à escala natural em arcos de alvenaria de pedra, de tijolo e de betão armado e não armado, sem enchimento, ver Figura 2-23.

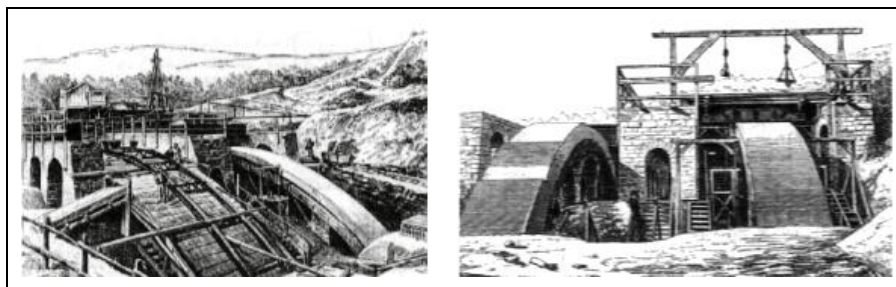


Figura 2-23: Ensaios à rotura de arco em alvenaria. Extraídas de (Voiron, 1895 cit. por Foce 2002 cit. por Nunes 2009)

W. Rankine (1898), salientou a importância do efeito favorável do enchimento no extradorso dos arcos para a estabilidade global. Defendeu que, para poder considerar o efeito favorável do enchimento, o vão efetivo dos arcos deveria corresponder ao vão entre as secções de colapso (Gago, 2004). Só aproximadamente 60 anos mais tarde iriam ser realizados ensaios em arcos com enchimento a fim de confirmarem o seu efeito favorável.

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

A. J. S. Pippard (1939), realizou vários ensaios em modelos de arcos com aduelas de aço e demonstrou que uma pequena deformação os tornava estaticamente determinados. Os resultados obtidos nestes ensaios conduziram a simplificações na análise que seria essencialmente elástica. Posteriormente desenvolveu uma metodologia de análise elástica, baseada nos dois teoremas de Castigliano (Espanha, CivilGeeks), para o estudo de arcos de alvenaria. Fez coincidir a linha dos centros de pressões com a linha de impulso e considerou os apoios rotulados. Depois elaborou tabelas para arcos parabólicos utilizando como variáveis a carga, a espessura das aduelas, o vão e a diferença de cota entre a cota do tabuleiro e a cota da aduela de fecho no extradorso. Pippard foi um dos mentores do método MEXE (Military Engineering Experimental Establishment), para avaliação da capacidade de carga de PAAP, ver Apêndice A, onde se encontra explicado este método.

C. Inglis (1951), aplicou o método inverso de Villarceau, mas analiticamente, e obteve uma diferença de vinte milímetros entre o seu traçado e o de Villarceau. Mostrou assim que os métodos conduziam a resultados semelhantes.

A. Kooharian (1953), demonstrou ser possível aplicar os teoremas da análise limite (análise plástica inicialmente aplicada a estruturas de aço) a estruturas de alvenaria, se fossem aceites as três hipóteses consideradas por Couplet.

J. Heyman (1966), demonstrou, à semelhança de Kooharian ser possível aplicar os teoremas da análise plástica, desenvolvidos originalmente para estruturas porticadas de aço a estruturas de alvenaria, colocando assim a análise de arcos de alvenaria no campo da teoria plástica (Heyman, 1995). Questionou a aplicabilidade da teoria elástica a estruturas de alvenaria, questionando a elasticidade e a lei de deformação do material. Considerou desadequada a procura do estado de equilíbrio real e dirigiu os esforços na obtenção de um estado de equilíbrio, um de entre todos os possíveis, enunciando assim um corolário da análise plástica de estruturas: “Se, numa estrutura, for possível encontrar uma distribuição de esforços internos em equilíbrio com as cargas aplicadas, que não ultrapasse um determinado valor de resistência do material, a estrutura estará segura e não colapsará.” O interesse do corolário é que um projetista necessita apenas de determinar um qualquer estado de equilíbrio e não o correspondente estado real, de entre todos os possíveis. Assim são consideradas duas posições extremas (Heyman, 1995 cit. por Lança 2006), ver Figura 2-24 (a) e Figura 2-24 (b), (1) uma que corresponde ao limite mínimo do impulso horizontal, H_{\min} , e (2) outra que corresponde ao limite máximo do impulso horizontal H_{\max} .

Propôs um fator geométrico de segurança, obtido pela comparação entre a geometria do arco real e a do arco limite para o carregamento mais crítico. Pela Figura 2-24 pode ver-se que à medida que a espessura do arco vai diminuindo apenas uma linha de impulso se poderá encontrar inscrita no interior do arco. A linha de impulso intersecta as curvas do intradorso e extradorso em cinco pontos. O quinto ponto devido à simetria do exemplo aqui apresentado

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

apresenta um equilíbrio instável, ver Figura 2-24 (c). Um coeficiente de segurança que não é comparável com a habitual noção de coeficiente de segurança adotada no dimensionamento corrente pode assim ser definido relacionando a espessura inicial com a espessura final (Lourenço, 2001 cit. por Lança 2006).

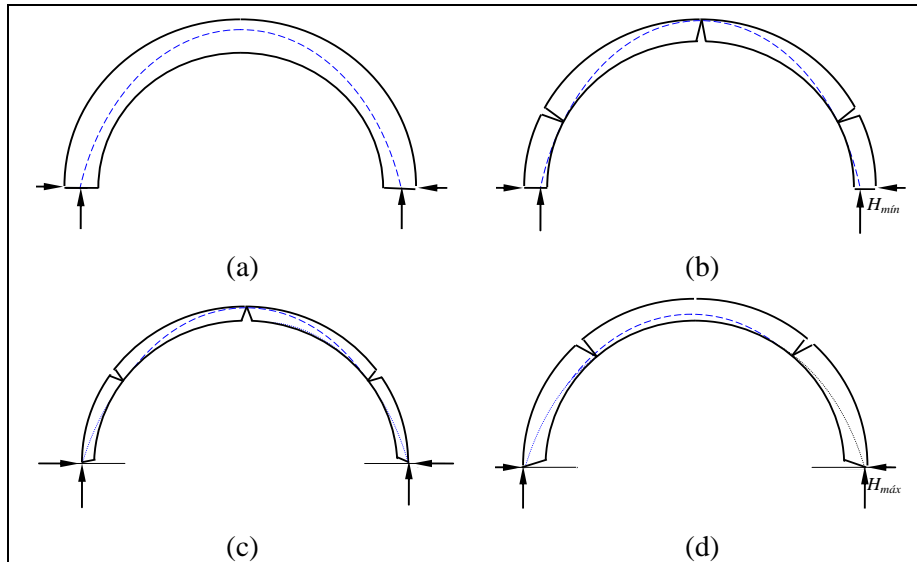


Figura 2-24: Arco semicircular sujeito ao peso próprio, com a linha de impulso a azul: (a) estável; (b) limite inferior; (c) espessura mínima e (d) limite superior. Extraídas de (Rouxinol, 1999)

Colocou ainda em causa as condições de apoio que não podem ser desprezáveis, devido a eventuais movimentos do terreno. Os movimentos dos apoios são um dos responsáveis de fendilhação visível. Sugeri as três hipóteses clássicas na análise de estruturas de alvenaria (Rouxinol, 1999): (1) a alvenaria não resiste a tensões de tração; (2) os níveis gerais de tensões na alvenaria são de tal forma baixos que se considera a resistência à compressão do material pétreo infinita e (3) o deslizamento entre unidades de alvenaria contíguas não ocorre. Tendo em consideração a última hipótese, uma possível rotação entre aduelas poderá resultar num mecanismo de colapso representado por mais de três rótulas alternadas entre o intradorso e extradorso. Assim, para Heyman, reconhecer a estabilidade estrutural de um arco de alvenaria consistia em encontrar a espessura das aduelas que contivesse para um dado carregamento a linha de impulso. Para as variáveis e , r_e , α e β , apresentadas na Figura 2-25 estabelece-se o valor exato do ângulo entre a vertical e a secção onde se situa a rótula intermédia no intradorso. Assumindo que a linha de impulso na zona onde surgem as rótulas deve ser tangencial ao intradorso do arco, determina-se a espessura mínima de um arco através da expressão (2-3) e cuja representação gráfica se apresenta na Figura 2-25.

$$\frac{e}{2} \cong \frac{(\beta - \sin \beta)(1 - \cos \beta)}{\beta(1 + \cos \beta)} \quad (2-3)$$

Onde:

e – Espessura mínima do arco;

β – Ângulo entre a vertical e a secção onde se situa a rótula intermédia no intradorso.

2. As pontes em arco de alvenaria de pedra

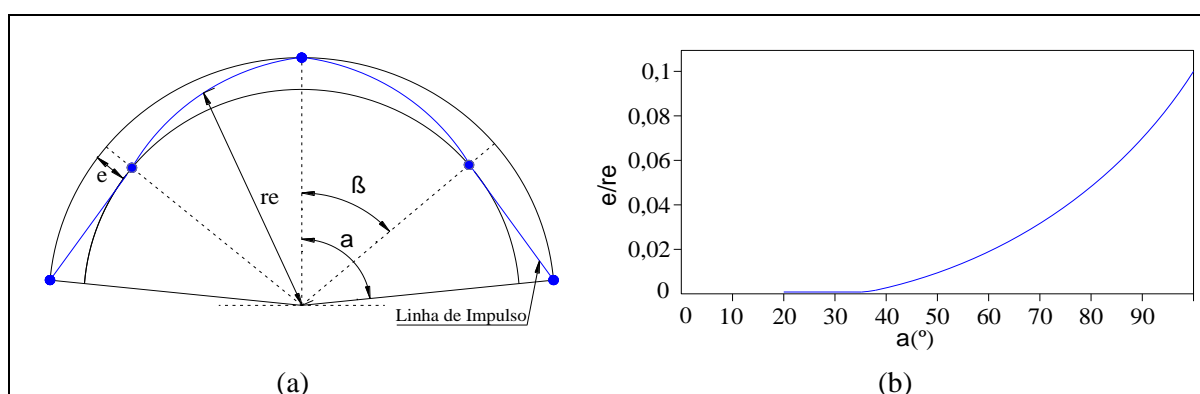


Figura 2-25: (a) Definição das variáveis do método de Heyman para arcos de alvenaria (com a linha de impulso a azul) e (b) relação (2-3). Adaptadas de (Heyman, 1995 cit. por Costa, P. 2007)

M. Corradi (1998), com base em considerações teóricas estabeleceu diversas relações empíricas para vários tipos de colapso de PAAP para relacionar a espessura do arco com o vão. Devido à extensão, as listas com as várias relações empíricas são apresentadas no Anexo B, do Quadro BB-1 ao Quadro BB-3.

Lagomarsino e Gambarotta (1999), realizaram vários estudos de PAAP para a rede rodoviária e ferroviária de Itália. Através destes estudos definiram relações empíricas de natureza geométrica, que se apresentam no Apêndice B, Quadro B-1.

2.3.2 Análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF)

Esta secção baseia-se nos trabalhos de Lourenço (1998); Silva, B., Guedes e Costa, A. (2010); entre outros.

Sawko e Towler (anos 80) desenvolveram os primeiros trabalhos para análise de arcos através do método dos elementos finitos, MEF, recorrendo a um modelo elástico linear para o comportamento das unidades de alvenaria (Gago, 2004 cit. por Costa, P. 2007). Com o aumento das capacidades computacionais, verificou-se uma evolução dos modelos de elementos finitos, permitindo a integração do comportamento não linear das unidades de alvenaria e a simulação das juntas (Almeida, 2000 e Costa, C., 2002 cit. por Costa, P. 2007). A representação das estruturas pode assim ser baseada em dois tipos de modelação da alvenaria: (1) micro modelação e (2) macro modelação. Na primeira a modelação da alvenaria é efetuada através da modelação de elementos individuais, unidades de alvenaria e material de junta, onde a separação entre os elementos individuais é traduzida pelo elemento de interface, de espessura nula, que representa potenciais fendas ou superfícies de escorregamento. Na segunda não é considerada a distinção entre os elementos individuais, sendo as unidades de alvenaria, o material de junta e as superfícies de interface modeladas num meio contínuo homogéneo e anisotrópico. De acordo com o grau de precisão pretendido e aspetos como o tempo e meios de cálculo, entre outros, a micro modelação pode ser: (i) detalhada, onde as

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

unidades de alvenaria e o material de junta são representados por elementos contínuos e as superfícies de interface por elementos de juntas de espessura nula ou (ii) simplificada, onde as unidades de alvenaria são representadas por elementos contínuos e o material de junta e as superfícies de interface são representados por elementos de juntas de espessura nula.

Na Figura 2-26 são apresentados exemplos das modelações referidas anteriormente, onde (I) representa o elemento unidades de alvenaria; (II) o elemento material de junta; (III) o elemento superfície de interface; (IV) as juntas e (V) o elemento compósito. Com base nestes modelos vários autores têm desenvolvido diversos modelos, (Silva, B., Guedes e Costa, A., 2010).

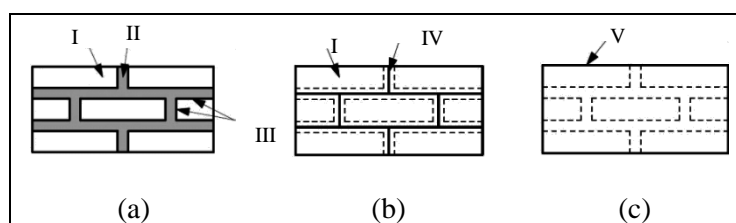


Figura 2-26: Estratégia de modelação para estruturas de alvenaria pelo método dos elementos finitos: (a) modelo de micro-modelação detalhada; (b) modelo de micro-modelação simplificada e (c) modelo de macro modelação. Adaptadas de (Lourenço, 1998)

2.3.3 Análise numérica pelo Método dos Elementos Discretos (MED)

Esta secção baseia-se nos trabalhos de Rouxinol (2007) e Proske e Gelder (2009).

O método dos elementos discretos, MED, foi inicialmente proposto por Cundall (1971a e 1971b) para o estudo de maciços rochosos diaclasados. Os maciços rochosos eram inicialmente representados por um conjunto de elementos discretos poligonais, EDP, rígidos e independentes, contactando entre si através de juntas. Posteriormente, foi introduzida a possibilidade de deformação dos elementos discretos, ED, e mais tarde desenvolvido o método em três dimensões (3D) (Cundall, 1988 cit. por Rouxinol 2007). Ainda com Cundall (1979) surgiram os elementos discretos circulares, EDC e os modelos de EDC para o estudo de solos. O método inicialmente teve aplicação em obras como túneis, taludes e fundações de barragens (Morais, A., 2007), passando posteriormente a ter aplicação em estruturas em alvenaria de edifícios e pontes históricas. Segundo Cundall e Hart (1992 cit. por Rouxinol, 2007) existem diferentes códigos de programação dentro do MED, no entanto não são abordados neste trabalho.

O MED consegue reproduzir deslocamentos e rotações finitas dos ED, incluindo a separação total entre os ED. Os movimentos dos ED são integrados no tempo, sendo o método capaz de reconhecer automaticamente os novos contactos entre os ED à medida que os cálculos decorrem. Os ED podem ser poligonais (EDP) ou circulares (EDC). Os EDP podem ser rígidos ou deformáveis e os EDC são rígidos.

Dentro do MED Rouxinol (2007) desenvolveu um programa de elementos discretos rígidos misto plano, Método dos Elementos Discretos Misto (LFE-MEDM): programa adotado no presente trabalho. Este modelo associa EDP e EDC rígidos. Podem assim ser realizados estudos em duas dimensões (2D) de PAAP, onde os EDP simulam os arcos e os muros de tímpano e os EDC simulam o enchimento. Com esta associação de ED são definidos novos contactos, que originam uma alteração do modo de deteção de novos contactos. No capítulo 4 é realizado um estudo mais detalhado do MED.

2.3.4 Análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos Discretos

A formulação padrão do método dos elementos finitos (MEF) pode ser incluída em modelos de elementos discretos, existindo vários tipos de modelos dentro deste método. Neste método a deformação do meio contínuo é representada pelo método dos elementos finitos e a interação entre os elementos é representada de acordo com o método dos elementos discretos (Rouxinol, 2007).

2.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais considerações sobre o comportamento estrutural das PAAP. Pretendeu-se reunir as principais informações que contribuem para a sua compreensão, tendo sido abordados os principais aspetos relativos aos elementos e aos materiais constituintes das PAAP, ao seu sistema estrutural e à evolução dos conhecimentos até ao século XX.

O arco pode apresentar diversas tipologias e dimensões consoante a Época de Construção. O mecanismo de transmissão de cargas difere nas direções transversal e longitudinal da PAAP. O enchimento tem como principal objetivo transmitir aos muros de tímpano e ao arco as cargas vindas do tabuleiro. Na direção transversal o enchimento provoca uma ação instabilizadora e na direção longitudinal tem uma ação estabilizadora aquando da ocorrência de deformação do arco nesta direção. Os muros de tímpano na direção transversal resistem à ação instabilizadora do enchimento transmitindo-a posteriormente ao arco. Nesta direção o comportamento da PAAP é largamente condicionado pelo comportamento dos muros de tímpano e pelas propriedades da ligação muros de tímpano/arcos (imbricamento). Na direção longitudinal os muros de tímpano apresentam uma elevada rigidez, contribuindo desta forma para a estabilização do arco, restringindo os deslocamentos do extradorso do arco nesta direção e impedindo o desenvolvimento de mecanismos de colapso. As características do enchimento, em conjunto com o confinamento conferido pelos arcos e pelos muros de tímpano, influenciam o comportamento do enchimento na degradação das cargas que lhe são

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

transmitidas. A diminuição de rigidez do enchimento conduz a uma menor degradação das cargas. Quanto menor for a altura do enchimento menor é a degradação das cargas.

Até ao século XX ocorreram diferentes fases no estudo do arco: uso de regras empíricas baseadas em proporções geométricas; uso de algoritmos algébricos e geométricos baseados no cálculo estático de mecanismos de colapso em arcos; uso de algoritmos algébricos e gráficos com recurso a coeficientes calibrados por investigação experimental; uso de métodos gráficos baseados na linha de impulso e análise numérica por recurso a meios computacionais, onde se insere o método dos elementos discretos que se apresenta no capítulo 4 e que se adota na análise numérica apresentada no capítulo 6.

Para a análise de estruturas de alvenaria de pedra são normalmente consideradas três hipóteses: (1) a alvenaria não resiste a tensões de tração; (2) os níveis gerais de tensões são baixos quando comparados com os resistentes e (3) o deslizamento entre unidades de alvenaria contíguas não ocorre. Deste modo o colapso do arco não ocorre por esmagamento das unidades de alvenaria, nem por deslizamento entre aduelas contíguas, mas sim por falta de equilíbrio. A falta de equilíbrio ocorre quando a linha de impulso passa alternadamente em pontos que se localizam no extremo da secção transversal entre o extradorso e o intradorso do arco. Este mecanismo corresponde à formação de rótulas, i.e., abertura das juntas, na superfície oposta à superfície onde a linha de impulso toca os extremos da secção transversal.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

De modo a preservar as pontes em arco de alvenaria de pedra, PAAP, é importante (1) conhecer o seu comportamento estrutural e (2) determinar os danos que podem ocorrer, bem como as suas possíveis causas e consequências.

O comportamento estrutural das PAAP depende das características dos materiais, dos elementos constituintes e respetivas ligações entre si, das dimensões da PAAP e das condições ambientais. Com o passar dos anos as PAAP começam a manifestar degradação dos seus materiais. Esta degradação natural associada à falta de manutenção, em conjunto com fatores como a poluição e cargas para as quais as PAAP não foram construídas, conduz ao desenvolvimento de danos, pondo em causa a sua segurança. Parte destes danos poderiam ser evitados se se recorresse à manutenção preventiva das PAAP e à redução do tráfego rodoviário/ferroviário e/ou à sua velocidade.

Aquando da observação dos danos há que ter presente que determinadas fendas não são sinal de perigo, pois as tensões mobilizadas são redistribuídas aumentando o valor das tensões em outras secções. No entanto, quando estas fendas colocam em causa a segurança da PAAP é necessário garantir a sua estabilidade através de medidas de intervenção, nomeadamente rever o plano de manutenção e reabilitação/reforço.

Não existe documentação de carácter normativo que forneça informação relativamente à forma como deve decorrer a inspeção, que informação deve ser recolhida, como deve ser realizado o diagnóstico e a intervenção em PAAP (Patrício, 2009). Existem somente recomendações para a orientação das intervenções no Património Arquitetónico dentro de um procedimento racional e científico e dentro de um contexto cultural (Oliveira e Lourenço,

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

2003). Relativamente aos Eurocódigos (EC), o EC1 (EN1991) trata da quantificação das ações e o EC6 (EN1996) trata do projeto geral das estruturas de alvenaria armada e não armada (Santos, 2007), e obviamente não podem ser utilizados, uma vez que não foram elaborados para estruturas já construídas.

Deste modo no presente capítulo são abordados os danos mais usuais em pontes em arco de alvenaria de pedra. Assim, na secção 3.1 são referidas as entidades públicas e privadas envolvidas no estudo de PAAP. Posteriormente na secção 3.2 são abordados os danos mais usuais em PAAP. São referidos os fatores desencadeadores; os tipos de danos (não estruturais e estruturais), sendo referidas de modo sucinto a sua forma de manifestação, as suas possíveis causas e as suas possíveis consequências. Na secção 3.3 são referidos os modos mais usuais de intervenção em PAAP. São apresentados os vários aspetos a ter em consideração no diagnóstico; as operações de manutenção e as operações de reabilitação/reforço. No final são relacionados os tipos de intervenção com os tipos de danos. Por fim, na secção 3.4 são apresentadas as considerações finais. A informação constante deste capítulo auxilia na criação da proposta de ficha de inspeção visual apresentada no Apêndice C, Quadro C-1, bem como no seu preenchimento, ver Apêndice D, Quadro D-2. Auxilia ainda na realização do relatório de inspeção apresentado no capítulo 5. Não são abordados neste trabalho os danos associados a PAAP revestidas nos seus paramentos por argamassa e pintura.

Para a realização deste capítulo foram consultados, entre outros, os trabalhos desenvolvidos por Catalogue des Désordres – Image de la qualité des ouvrages d’art, Ponts en maçonnerie – IQOA (1996); Oliveira e Lourenço (2003); Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico do International Council on Monuments and Sites, ICOMOS (2003); Martins, J. (2004); Vicente (2008); Costa, C. (2009); Costa, V. (2009); Patrício (2009); Proske e Gelder (2009); Costa, A. et al. (2010); Padrão (2010); Paupério et al. (2010); Rodrigues (2011). Foram contactados com *feedback* positivo José Padrão, docente do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da ESTGV, NCREP - Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património, a Rede Ferroviária Nacional, REFER e a OZ - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda. e Arlindo Begonha, docente no DEC da Faculdade de Engenharia do Porto. Foram contactadas sem *feedback* a EP - Estradas de Portugal, S.A. e o Grupo BETAR.

3.1 Entidades públicas e privadas envolvidas no estudo de pontes em arco de alvenaria de pedra

As PAAP dividem-se em pontes rodoviárias e ferroviárias, podendo algumas ser unicamente pedonais. Uma percentagem das PAAP existentes em Portugal encontra-se sobre a tutela de entidades gestoras de redes rodoviárias e ferroviárias (EP e REFER) e outras sobre a tutela das autarquias. A REFER tem na sua tutela 850 PAAP (Patrício, 2009). Atendendo ao

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

comentário da secção anterior não foi possível saber o número de PAAP sob a tutela da EP, nem das autarquias.

Entidades como a EP e a REFER publicam manuais/catálogos informativos sobre (1) o tipo de danos que se podem desenvolver nas PAAP, (2) os procedimentos de inspeção e diagnóstico e (3) as formas de intervenção sobre as mesmas. As entidades podem possuir o seu próprio sistema de gestão de obras de arte e a sua própria base de dados das várias PAAP (e.g., NCREP), ou podem recorrer a sistemas informáticos desenvolvidos por empresas (e.g., Concessionárias e Municípios). Refere-se o sistema utilizado em Portugal, o Sistema de Gestão de Obras de Arte – GOA do Grupo BETAR (Portugal, Grupo BETAR) do qual constam: inventário; inspeção principal; classificação por prioridade dos trabalhos de reparação; estimativa de custos; inspeção de rotina/manutenção; ajuste orçamental; sistema de informação geográfica (SIG); controlo de transportes especiais; histórico; consultas e planeamento financeiro.

Devido à sua importância referem-se ainda a existência do: (1) Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico (ICOMOS) e Organização Internacional de Normalização (ISO), organizações não-governamentais que estabelecem linhas orientadoras/recomendações para as ações de avaliação e preservação do Património Arquitectónico e Arqueológico (Internacional, ICOMOS); (2) Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico (IGESPAR) que tem por missão a gestão, a salvaguarda, a conservação e a valorização dos bens que integram o Património Cultural Arquitectónico e Arqueológico classificado português (Portugal, IGESPAR); (3) Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana, IP (IHRU) que tem por missão a salvaguarda e a valorização patrimonial (Portugal, IHRU); (4) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), instituto governamental que atua na coordenação e promoção da investigação científica e no desenvolvimento tecnológico necessários à boa prática da engenharia civil (Portugal, LNEC); (5) NCREP que atua nas áreas de manutenção e reabilitação/reforço, efetuando trabalhos no âmbito da inspeção e diagnóstico, elaboração de pareceres técnicos, execução de ensaios de caracterização material, de ensaios laboratoriais e *in-situ*, entre outros aspetos. Estas informações estão organizadas em bases de dados pertencentes a esta entidade (Portugal, NCREP); (6) EP, cuja missão consiste na prestação de um serviço público que consiste no financiamento, conservação, exploração, requalificação e alargamento das vias que integram a Rede Rodoviária Nacional; (7) REFER, cujo objetivo passa pela prestação do serviço público de gestão, construção e modernização das infraestruturas integrantes da rede ferroviária nacional (Patrício, 2009).

3.2 Danos em pontes em arco de alvenaria de pedra

Os danos que se podem identificar nas PAAP são divididos, de acordo com o ICOMOS (2003), em dois grupos: (1) danos estruturais e (2) danos não estruturais (ou degradações).

(1) Os danos estruturais mais frequentes estão relacionados com a fendilhação dos arcos, assentamento das fundações e a falta de verticalidade dos muros de tímpano.

(2) Os danos não estruturais mais frequentes são a perda de argamassa nas juntas preenchidas (consultar Quadro 2-2), a existência de vegetação, colonização biológica, presença de humidade e eflorescências e a degradação dos materiais (unidades de alvenaria e argamassa).

3.2.1 Fatores desencadeadores de danos

Segundo o ICOMOS (2003) as ações a que uma estrutura se encontra sujeita podem ser de origem mecânica, física, química e/ou biológica, ver Quadro 3-1. As ações mecânicas (e.g., forças, assentamentos) originam tensões e esforços. As ações físicas, químicas e biológicas afetam os materiais, reduzindo habitualmente a sua resistência. De seguida é feita uma breve abordagem das ações referidas.

Quadro 3-1: Classificação de diferentes tipos de ações sobre estruturas

(1)	Mecânicas	Estáticas	Diretas
		Dinâmicas	Indiretas
(2)	Físicas	Fenómenos que atuam sobre os materiais	-
	Químicas		
	Biológicas		

(1) Ações mecânicas

As ações mecânicas, de origem (i) estática ou (ii) dinâmica, podem eventualmente originar fendilhação, esmagamentos e assentamentos diferenciais.

(i) As ações mecânicas de origem estática podem-se classificar em (i.a) diretas e em (i.b) indiretas:

(i.a) As diretas são as ações permanentes (e.g., o peso próprio da estrutura) e as sobrecargas (e.g., tráfego rodoviário/ferroviário e pedonal). As alterações destas cargas (aumento e diminuição) podem resultar num aumento dos danos estruturais.

(i.b) As indiretas são deformações impostas nos apoios das PAAP (e.g., assentamentos do terreno).

(ii) As ações mecânicas de origem dinâmica são as acelerações transmitidas à estrutura provenientes de sismos, vento, tráfego rodoviário/ferroviário.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

(2) Ações físicas, químicas e biológicas

As ações físicas, químicas e biológicas afetam diretamente as propriedades mecânicas dos materiais, conduzindo à sua degradação e posterior alteração da resistência da estrutura. A forma de evolução das degradações depende muito das propriedades mecânicas dos materiais e do plano de manutenção preconizado e realizado.

Os fatores que influenciam de forma isolada ou combinada a degradação dos materiais podem ser:

(i) Intrínsecos aos materiais:

(a) A composição química dos materiais, que permite identificar os elementos mais vulneráveis a alterações químicas; (b) a textura e a estrutura do material pétreo, a sua resistência mecânica, a sua dureza e abrasividade, que permitem avaliar o comportamento do material pétreo sob agressões físicas; e (c) a porosidade e a estrutura da rede capilar do material pétreo, que permitem avaliar a permeabilidade aos gases e à água.

(ii) Extrínsecos (ambiente envolvente):

(a) Fatores constantes definidores do clima como seja o caso de variações de temperatura, humidade relativa do ar, energia radiante, regime pluviométrico, composição da atmosfera e (b) fatores aleatórios como seja o caso de fatores físicos (e.g., vibrações e sismos), químicos (e.g., oxidações, dissoluções e recristalizações), e bioquímicos (ações de micro e macro-organismos).

(iii) Impostos pela geometria e orientação da PAAP:

(a) A orientação face ao regime pluviométrico, eólico e ao tipo de insolação e (b) a configuração das superfícies expostas, se lisas ou rugosas.

(iv) Antropológicos:

(a) Construção da PAAP; (b) função da PAAP ao longo da sua vida; (c) intervenções ocorridas no passado; (d) utilização desadequada da estrutura (e.g., sobrecarga de tráfego, aumento da velocidade de tráfego e efeitos dinâmicos); (e) colisões (e.g., de veículos, de embarcações); (f) explosões; (g) incêndios (elevadas temperaturas durante longos períodos de tempo); e (h) atos de vandalismo.

3.2.2 Tipos de danos

Os danos são agora apresentados em (1) danos estruturais e (2) danos não estruturais. É referida a natureza das ações: (a) biológica; (b) meteorológica; (c) físico-química; (d) erosiva; (e) mecânica ou (f) sísmica. É ainda referida a localização dos danos como (i) generalizada ou (ii) localizada. A localização dos danos é generalizada quando os danos podem afetar qualquer elemento da PAAP, independentemente da sua função no comportamento estrutural da PAAP, e localizada quando os danos são específicos de um determinado elemento e do seu papel no comportamento estrutural da PAAP, ver Quadro 3-2. É adotada uma notação com letras e números para uma mais fácil esquematização e realização da proposta de ficha de

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

inspeção visual e do relatório de inspeção e diagnóstico, apresentados no capítulo 5. Assim, os tipos e subtipos de danos são identificados pela letra maiúscula D, que designa dano, seguida do número representativo do dano, seguido de ponto e número representativo do subtipo e ainda uma letra minúscula em alguns casos (e.g., D3.1a).

Quadro 3-2: Classificação de danos estruturais e não estruturais em PAAP: localização do dano (i) generalizada ou (ii) localizada, por ação (a) biológica, (b) meteorológica, (c) físico-química, (d) erosiva, (e) mecânica ou (f) sísmica

		Natureza						Localização	
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(i)	(ii)
D1	Destacamento de unidades de alvenaria e colapso da PAAP			•			•	•	
D2	Danos localizados nos arcos			•		•	•		•
D3	Danos localizados nos muros de tímpano					•	•		•
D4	Movimentos dos apoios e encontros			•			•		•
D5	Danos localizados nas fundações					•			•
D6	Degradações e danos no enchimento			•			•		•
D7	Danos localizados nos elementos secundários			•					•
D8	Depósitos de origem biológica	•						•	
D9	Presença de água e humidade		•					•	
D10	Degradação das unidades de alvenaria			•	•	•		•	
D11	Perda de argamassa nas juntas preenchidas			•	•	•		•	





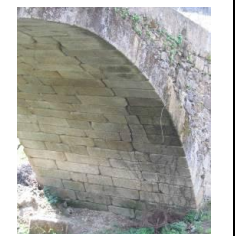



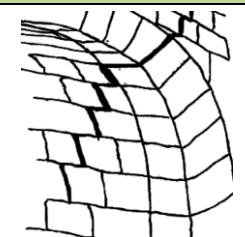

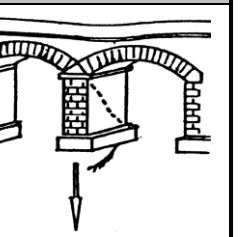
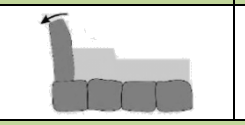
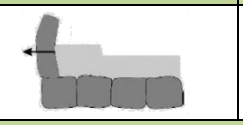

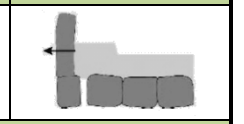
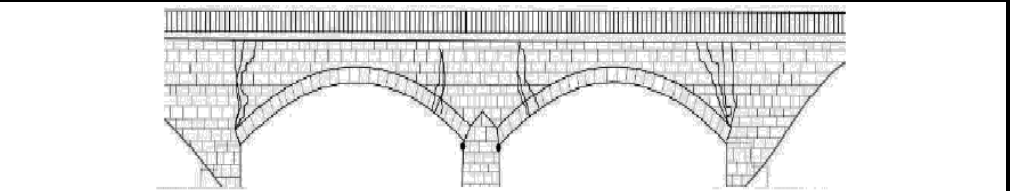

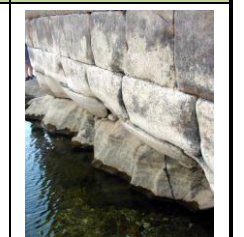
3.2.2.1 Danos estruturais

Os danos estruturais têm uma localização (i) generalizada ou (ii) localizada (ver Quadro 3-2). Manifestam-se sob a forma de colapso (parcial ou total) a nível dos elementos; de deformações e de fendilhação (nas juntas - afastamento das unidades de alvenaria - e/ou nas unidades de alvenaria), ver Quadro 3-3. Afetam a capacidade de resistência da estrutura, apresentando como causas a atuação de ações mecânicas externas (ações de tráfego elevadas e assentamentos) e deficiências no comportamento estrutural de um ou mais elementos. Refere-se ainda que o comportamento estrutural das PAAP se diferencia segundo dois planos: (1) no plano da estrutura e (2) fora do plano da estrutura.

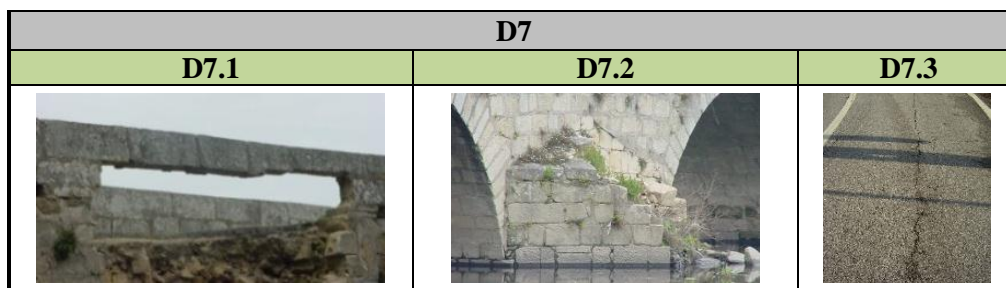
No Quadro 3-4 apresentam-se os modos de fendilhação no plano e os modos de colapso para fora do plano de um paramento de alvenaria. De seguida é feita uma breve abordagem relativa à (1) manifestação, (2) principais causas e (3) principais consequências dos danos estruturais. As duas primeiras são apresentadas por tipo ou por subtipo de dano e as consequências são apresentadas por tipo de dano.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

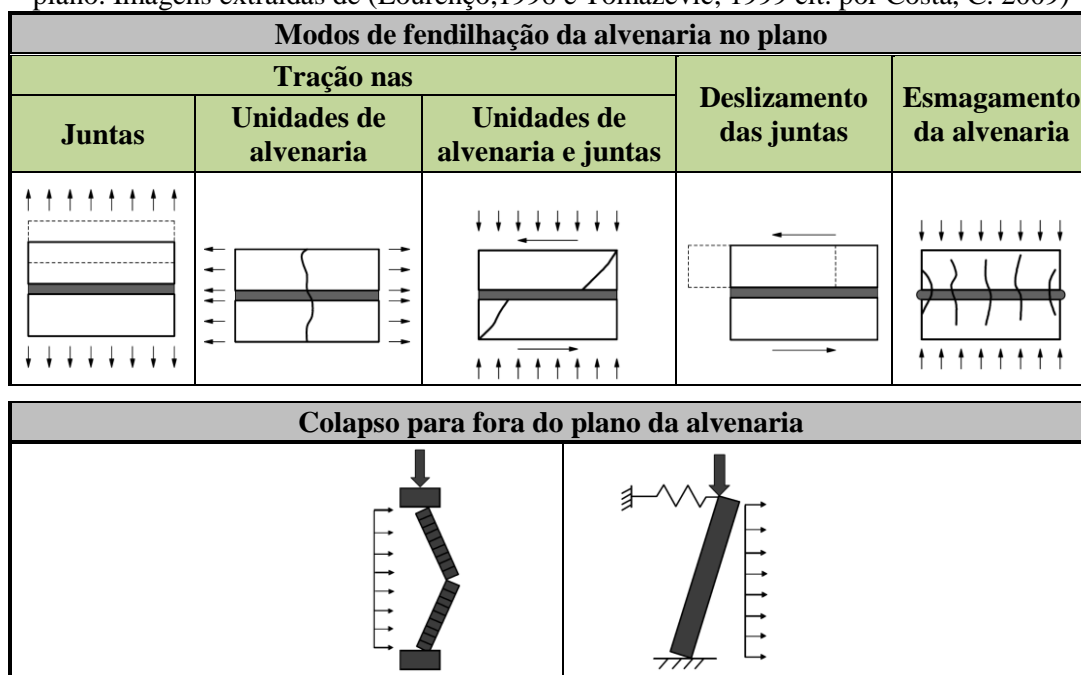
Quadro 3-3: Esquemas e imagens dos danos estruturais em PAAP. Imagens extraídas de (IQOA, 1996; Sowden, 1990 cit. por Martins, J. 2004; NCREP, Relatório de Inspeção à Ponte D. Zameiro, 2002; NCREP, Relatório de Inspeção à Ponte de Cepeda, 2007; Costa, C., 2009; Costa, V., 2009)

D1			
D1.1	D1.2	D1.2	D1.3
			
D2			
D2.1a	D2.1b	D2.1c	D2.2
			
D2.3	D2.4		D4
			
D3			
D3.1a	D3.1b	D3.1c	D3.1d
			
D3.2			
			
D5			
D5.1			D5.2
			

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO



Quadro 3-4: Modos de fendilhação da alvenaria no plano e modos de rotura da alvenaria para fora do plano. Imagens extraídas de (Lourenço,1996 e Tomazevic, 1999 cit. por Costa, C. 2009)



D1: Destacamentos de unidades de alvenaria e colapso de pontes em arco de alvenaria de pedra

(1) Manifestação

Os principais danos são: (i) destacamento de unidades de alvenaria, **D1.1**; (ii) falta de unidades de alvenaria, **D1.2**; e (iii) desmoronamento total ou parcial dos elementos constituintes da PAAP, **D1.3**.

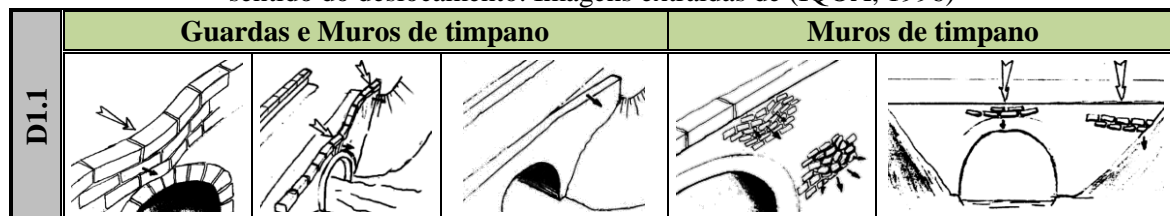
(2) Principais causas

Os danos D1 podem ocorrer devido a casos de degradação prolongada originados por: (i) existência de vegetação (D8.1), mais propriamente de raízes no enchimento; (ii) erosão (D10.1); (iii) percolação de água no material de enchimento com conseqüente perda de argamassa nas juntas (D11) e ausência de coesão entre as unidades de alvenaria ou (iv) ocorrência de condições adversas, e.g., cheias. Pode ainda resultar de (v) cargas excessivas; (vi) vibrações excessivas; (vii) movimentos de apoio por assentamento das fundações (D4); (viii) descompressão do arco (D2.4); (ix) incorreta execução de intervenções ou (x) falta de

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

manutenção, negligência e abandono. O Quadro 3-5 apresenta alguns casos de separação de unidades de alvenaria onde as setas indicam o sentido do deslocamento.

Quadro 3-5: Esquemas de alguns casos de separação de unidades de alvenaria, onde as setas indicam o sentido do deslocamento. Imagens extraídas de (IQOA, 1996)



(3) Principais consequências

Numa situação limite, e pensando numa mesma secção/zona, o dano D1.1 pode culminar no dano D1.2 permitindo a existência de vazios que permitem a entrada de água para o enchimento. O dano D1.2 numa situação limite pode conduzir ao aparecimento de fendilhação (D2 e D3.2) e à ocorrência de deslocamentos verticais, que denunciam um comportamento próximo do colapso.

D2: Danos localizados nos arcos

Os danos mais frequentes nos arcos são: (i) fendilhação longitudinal (concentrada numa zona ou distribuída), **D2.1**; (ii) fendilhação transversal, **D2.2**; (iii) fendilhação diagonal, **D2.3** e (iv) deformação excessiva, **D2.4**.

(1) Manifestação

D2.1: Fendilhação longitudinal

A fendilhação longitudinal pode-se desenvolver de três formas: (i) no intradorso do arco e paralelamente ao intradorso, **D2.1a**, podendo ser localizada ou distribuída ao longo do arco; (ii) no intradorso do arco entre a primeira fiada e as restantes, **D2.1b** (que pode alcançar os pilares e as fundações) ou (iii) no extradorso do arco entre a primeira fiada do arco e o muro de tímpano, **D2.1c**.

D2.2: Fendilhação transversal no intradorso do arco

A fendilhação transversal ocorre principalmente a (i) 1/4 do vão do arco, (ii) junto à aduela de fecho ou (iii) junto aos apoios (Bartuschka, 1995 cit. por Proske e Gelder 2009).

D2.3: Fendilhação diagonal no intradorso do arco

A fendilhação diagonal ocorre raramente em arcos.

D2.4: Deformação excessiva

Ocorre modificação da forma do arco.

(2) Principais causas

D2.1: Fendilhação longitudinal

A existência do dano D2.1a indica a existência de esforços de tração na direção transversal, que tem por origem (i) o tráfego rodoviário/ferroviário sobre a PAAP e (ii) o assentamento dos apoios (D4.1).

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Em relação ao dano D2.1b, as causas podem ser: (i) rigidez do muro de tímpano e do enchimento superiores à rigidez do arco; (ii) elevado volume de tráfego rodoviário/ferroviário que origina movimentos do muro de tímpano e (iii) entrada de água para o enchimento quando não existe impermeabilização ou esta se encontra danificada.

O dano D2.1c indica uma ineficiente ligação muro de tímpano/arco (durante a construção), apresentando como causas: (i) a diferença de rigidez entre o muro de tímpano e o arco e (ii) elevadas cargas horizontais no seio do enchimento provenientes do tráfego rodoviário/ferroviário ou da ação do gelo (Bartuschka, 1995 cit. por Proske e Gelder 2009). Complementarmente ao Quadro 3-3, o Quadro 3-6 apresenta alguns esquemas de fendilhação em arcos consoante algumas das causas referidas.

D2.2: Fendilhação transversal

A fendilhação transversal (i) evidencia sobrecarga do arco, (ii) podendo ainda ser uma consequência de deficiente funcionamento do enchimento (ver secção 2.1.1) e (iii) uma consequência de assentamentos diferenciais dos apoios (D4), ver Quadro 3-7.

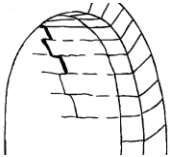


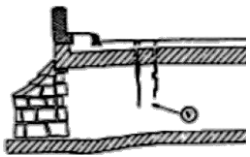
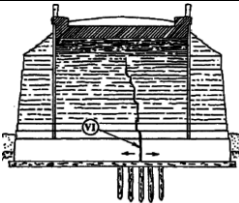
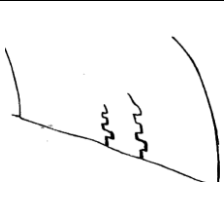
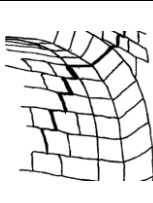
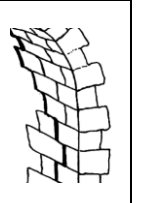

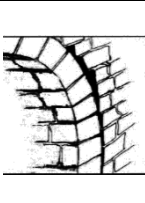
D2.3: Fendilhação diagonal

As causas mais comuns são: (i) assentamentos dos apoios (D4.1); (ii) distribuição desigual de cargas e (iii) ações sísmicas.

D2.4: Deformação excessiva

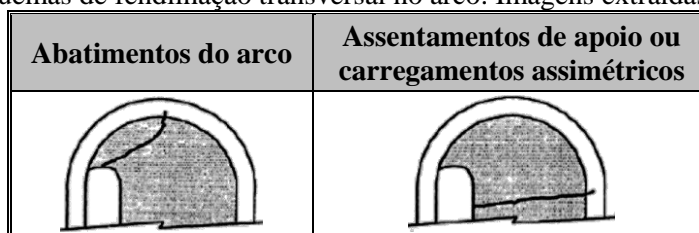
As causas mais comuns são: (i) a ocorrência de assentamentos dos apoios do arco (D4.1) e (ii) degradação do enchimento devido a infiltrações ocorridas durante longos períodos de tempo (D6).

Quadro 3-6: Esquemas de fendilhação longitudinal no arco. Imagens extraídas de (IQOA, 1996)

Descompressão lateral do arco	Próxima da aduela de fecho	Repartidas por toda a largura do arco	Na zona central do arco	Na zona central do pilar			
							
Assentamento ou infra-escavação	Na zona central do pilar	Na zona central da base do encontro	Assentamento dos apoios	Do encontro ao muro de tímpano	No encontro	Diferença de rigidez	Na ligação muro de tímpano/arco
							

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

Quadro 3-7: Esquemas de fendilhação transversal no arco. Imagens extraídas de (IQOA, 1996)



(3) Principais consequências

Os danos D2.1 conduzem a uma alteração do comportamento da PAAP, uma vez que o muro de tímpano contribui para a transmissão de cargas para o arco (ver secção 2.1.1.3). Os danos D2.1b e D2.1c podem conduzir à separação do muro de tímpano em relação ao arco (D3.1d e D3.1c, respetivamente). O dano D2.1c conduz à não consideração da contribuição do muro de tímpano na transferência de cargas ao arco. A existência dos danos D2.1 pode conduzir a uma descompressão no enchimento, podendo originar abatimento do tabuleiro e ineficiente transmissão de cargas ao arco.

O dano D2.4 origina a ocorrência de abertura e escorregamento das juntas transversais do (i) arco com consequente descompressão do arco e do (ii) muro de tímpano sobre a secção afetada.

Os danos D.2 causam ainda a perda de argamassa nas juntas (D11), permitem a infiltração de água para o enchimento e o desenvolvimento de vegetação (D8.1).

D3: Danos localizados nos muros de tímpano

(1) Manifestação

Os muros de tímpano apresentam cinco tipos de danos: (i) inclinação para fora do plano, **D3.1a**; (ii) encurvadura para fora do plano, **D3.1b**; (iii) escorregamento para fora do plano, **D3.1c**; (iv) fendilhação na primeira fiada do arco, destacamento do arco e destacamento entre o muro de tímpano e o arco, **D3.1d** e (v) fendilhação nos muros de tímpano, **D3.2**.

(2) Principais causas

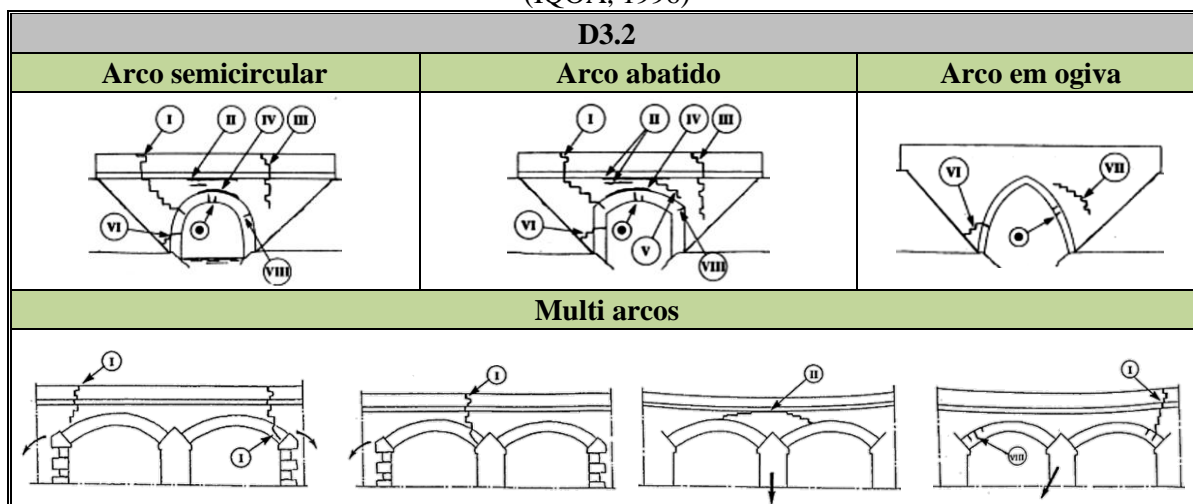
A principal causa do dano D3.1 deve-se aos impulsos laterais transmitidos aos muros de tímpano (ver secção 2.1.1.3). Segundo Costa, C. (2009) os danos D3.1a e D3.1b são consequência do efeito de flexão nos muros de tímpano, sendo que no D3.1b existe um efeito de imbricamento entre o tabuleiro e o muro de tímpano que conduz a uma restrição do deslocamento horizontal na parte superior, ver Quadro 3-4 (colapso para fora do plano da alvenaria) e secção 2.1.1.1. Os danos D3.1c e D3.1d dependem da relação muro de tímpano/arco (imbricamento). A presença de água no enchimento, o estado de degradação do enchimento (D6) e a presença de cargas devido ao tráfego, agravam os danos uma vez que levam a um aumento do impulso e a uma diminuição da resistência do enchimento.

O dano D3.2 é consequência de: (i) assentamentos das fundações (D5); (ii) assentamento dos pilares (D4.1) e (iii) ações sísmicas. O Quadro 3-8 apresenta alguns esquemas de danos D3.2 para diferentes tipologias de arco e para casos de PAAP com um ou mais arcos, consoante

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

algumas causas: (I) e (III) – assentamento dos encontros; (II), (IV) e (V) – assentamento das fundações; (VI) – assentamento descendente do ângulo inferior do encontro (devido a assentamento, infra-escavação ou existência de cavidades); (VII) – assentamento do terreno de fundação; (VIII) – formação de rótulas; (•) – fendilhação transversal no arco. As setas de maior espessura indicam o sentido dos assentamentos dos apoios.

Quadro 3-8: Esquemas de deformação e fendilhação nos muros de tímpano. Imagens extraídas de (IQA, 1996)



(3) Principais consequências

Os danos D3 permitem o desenvolvimento de outros danos, e.g., no enchimento (D6), nos arcos (D2), permitindo ainda infiltrações de água.

D4: Danos localizados nos apoios (pilares e encontros)

(1) Manifestação

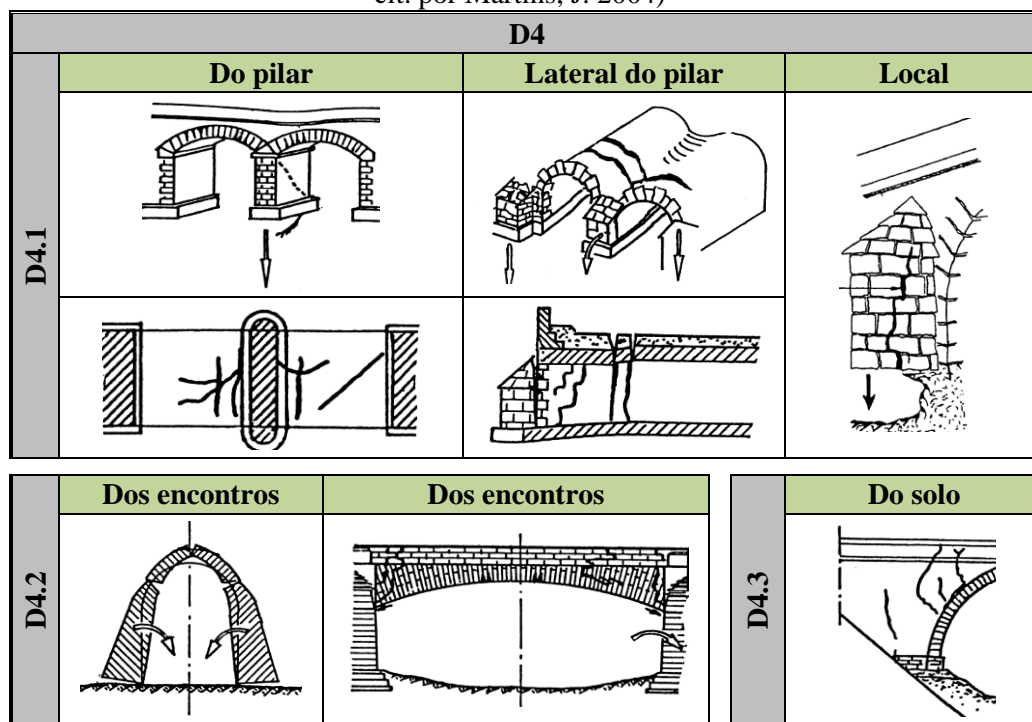
Os danos mais observáveis são: (i) assentamentos dos apoios (pilares e encontros) **D4.1**; movimentos dos apoios, **D4.2** e consolidação do terreno, **D4.3**. Os assentamentos podem ser observados pela: (i) existência de fendilhação no arco (D2.1, D2.2 e D2.3) e (ii) em casos mais graves, pela formação de rótulas devido à descompressão do arco (D2.4).

(2) Principais causas

Nas causas mais comuns destacam-se: (i) a falta de capacidade resistente das fundações (D5); (ii) o assentamento do terreno (e.g., movimento descendente de uma bacia de sedimentação que origina assentamentos verticais, que poderão ser diferenciais) e (iii) a falta de capacidade para mobilizar os impulsos passivos no enchimento, originando assim assentamentos horizontais. No Quadro 3-9 apresentam-se alguns esquemas de danos nos apoios relacionados com algumas das suas possíveis causas.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

Quadro 3-9: Esquemas de danos nos apoios e algumas causas. Imagens extraídas de (Sowden, 1990 cit. por Martins, J. 2004)



(3) Principais consequências

Se o dano D4 ocorrer de forma: (i) diferencial, podendo conduzir à formação de fendilhação longitudinal no arco (D2.1); (ii) horizontal, podendo levar a uma fendilhação diagonal do arco (D2.3), que se inicia junto aos apoios e se estende até ao topo do arco na zona central ou (iii) uniforme, conduzindo ao aparecimento de fendilhação transversal no arco (D2.2) (Sowden, 1990 cit. por Martins, J. 2004). O dano D4 pode ainda conduzir a (iv) uma descompressão do arco, levando ao seu abatimento (D2.4) ou ao destacamento de unidades de alvenaria do arco (D1).

D5: Danos localizados nas fundações

(1) Manifestação

Os danos mais frequentes nas fundações são: (i) perda de capacidade resistente das fundações, **D5.1** e (ii) descaçamento das fundações, **D5.2**.

(2) Principais causas

Apresenta como causas: (i) a incorreta execução das fundações; (ii) a execução das fundações a baixas profundidades com posterior fenómeno de infra escavação (fenómeno de erosão localizada – D10.1) provocado pelo escoamento do curso de água (que aumenta o risco de perda do terreno sob as fundações – D5.2); (iii) fenómenos de alteração dos seus constituintes (caso de estacas de madeira em PAAP mais antigas) e (iv) as características dos materiais constituintes das fundações. Salientam-se ainda: (v) insuficiente secção de vazão do curso de água; (vi) alteração do nível do curso de água (e.g., caso de cheia que causa um aumento da

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

velocidade de escoamento) e (vii) existência de perturbações no curso de água (e.g., pilares e fundações da própria PAAP e depósitos arrastados pela corrente). Por último: (viii) a deterioração ou ausência de proteção das fundações; (ix) problemas geológico-geotécnicos do terreno de fundação e (x) problemas de ordem geométrica dos apoios.

(3) Principais consequências

As situações de secção insuficiente e perturbações no escoamento podem inicialmente originar lavagem das fundações com conseqüente assentamento das mesmas, descompressão e abatimento da estrutura (D2.4) e no limite a perda de sustentação das fundações e colapso parcial dos muros de tímpano (D1.3).

Os danos D5 são responsáveis pelo assentamento dos apoios da PAAP (D4.1), que se pode observar pelo aparecimento de fendilhação nos arcos e pilares (D2.1, D2.2, D2.3 e D4), destacamentos das guardas (D7.1), fendilhação no tabuleiro da PAAP (D7.3), entre outros, e numa situação limite podem originar mecanismos de colapso da PAAP.

D6: Danos localizados no enchimento

(1) Manifestação

O dano mais frequente é a degradação do material de enchimento. Esta degradação apenas se torna visível no caso de colapso parcial dos muros de tímpano (D1.3).

(2) Principais causas

A principal causa do dano D6 é a entrada de água com conseqüente percolação no interior do material de enchimento originando a perda de finos e a ocorrência de vazios no seio do material de enchimento.

(3) Principais consequências

A presença de água no enchimento, o estado de degradação do material de enchimento e a presença de cargas devidas ao tráfego agravam os danos nos muros de tímpano (D3) uma vez que levam a um aumento do impulso e a uma diminuição da resistência do enchimento. Com o agravamento das condições de funcionamento da PAAP pode ocorrer o desmoronamento do enchimento aliado ao colapso parcial dos muros de tímpano (D1.3). A inexistência do enchimento (consultar secção 2.1.1.2) pode originar movimentos para o lado do intradorso (impulso ativo) do arco que poderão resultar em fendas transversais (D2.2), cuja localização no intradorso ou no extradorso depende do sentido do movimento horizontal e também se este é ou não acompanhado de movimento de rotação dos apoios (D4.2).

D7: Danos localizados nos elementos secundários

(1) Manifestação

Os principais danos são: (i) desmoronamento das guardas, **D7.1**; (ii) desmoronamento dos talha-mares e talhantes, **D7.2** e (iii) fendilhação no tabuleiro, **D7.3**.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

(2) Principais causas

As principais causas do dano D7.1 são: (i) o choque acidental (e.g. veículos) e (ii) os assentamentos dos apoios (D4.1).

Em relação ao dano D7.2 são: (i) a ocorrência de vórtices (ver Figura 2-13) e (ii) de condições de turbulência no escoamento do curso de água junto aos apoios, com posterior perda de argamassa nas juntas e degradação dos elementos referidos.

A nível do dano D7.3 a principal causa é a ocorrência de assentamentos dos apoios (D4.1).

(3) Principais consequências

Numa situação limite o desmoronamento dos elementos secundários afeta as condições de serviço da PAAP.

No caso do dano D7.1 deixa de existir a função de segurança que as guardas desempenham.

O dano D7.2 (i) provoca o ineficiente encaminhamento do curso de água junto aos apoios (ver secção 2.1.1.6) e (ii) a ocorrência de danos nas fundações (D5).

O dano D7.3 (i) afeta a circulação e (ii) possibilita a entrada de água para o enchimento podendo conduzir a possíveis danos no enchimento (D6).

A presença de vegetação de médio e grande porte (D8.1) aliado ao caso de existir um aparelhamento imperfeito contribui para o agravamento da degradação dos elementos secundários podendo conduzir ao colapso dos elementos (D1).

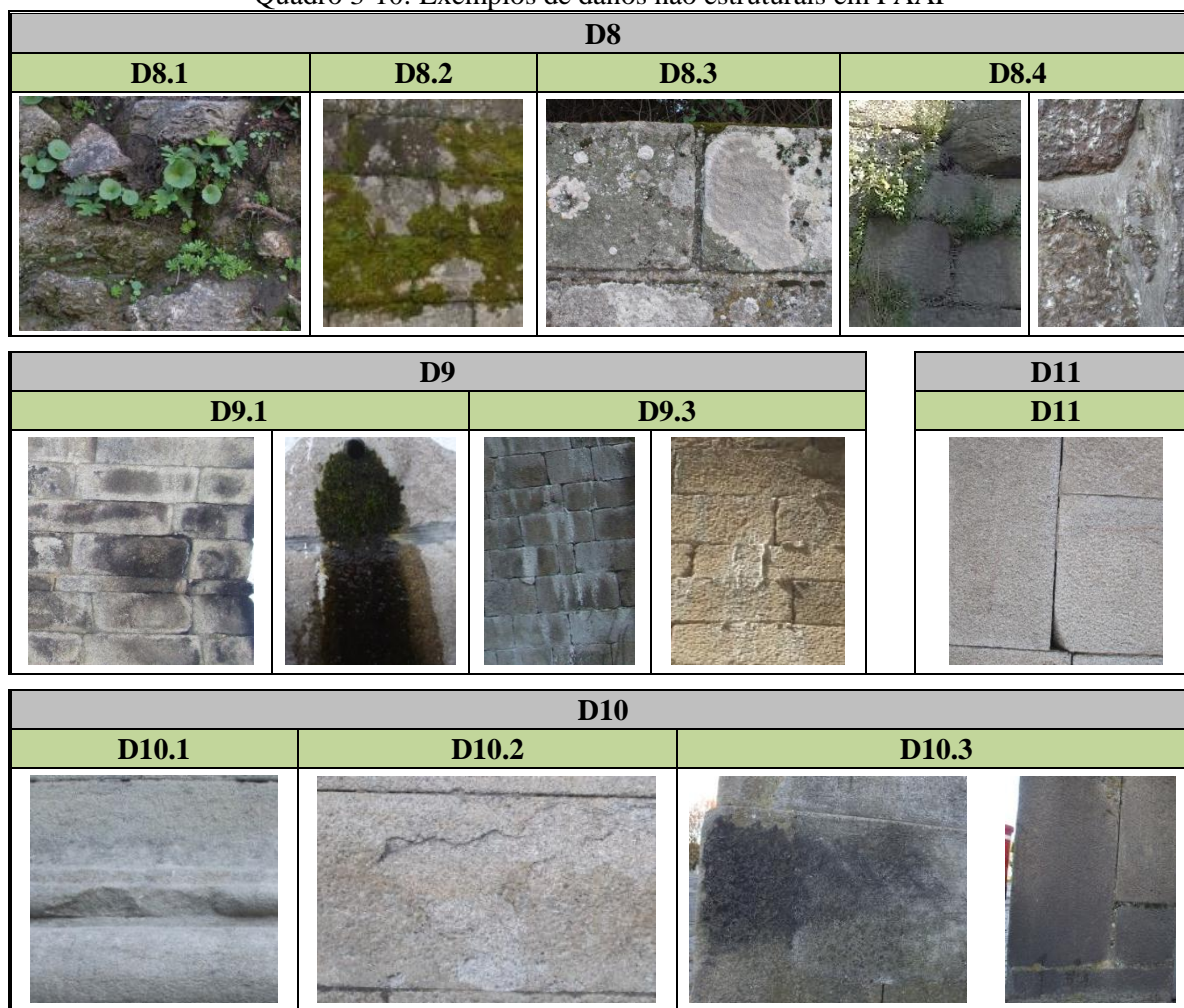
3.2.2.2 Danos não estruturais

Para auxiliar a realização desta secção foram observadas várias paredes e muros de alvenaria de pedra de modo a conseguir reconhecer os diferentes tipos de danos não estruturais. Os danos não estruturais (ou degradações) são generalizados (ver Quadro 3-2) e manifestam-se sob a forma de degradação dos materiais (unidades de alvenaria e argamassa), conduzindo a uma alteração das características mecânicas dos materiais. Os danos não estruturais apresentam como causas o envelhecimento natural e a exposição a ações erosivas, meteorológicas, físico-químicas, e biológicas (ver Quadro 3-2) associadas a uma deficiente ou inexistente manutenção ou a intervenções desadequadas. Afetam assim a durabilidade da estrutura, podendo a longo prazo contribuir para o agravamento das condições de segurança.

No Quadro 3-10 são apresentados, através de imagens, os danos não estruturais expostos a seguir. Sendo feita uma breve abordagem relativa à (1) manifestação, (2) principais causas e (3) principais consequências da existência dos diferentes tipos de danos não estruturais. As duas primeiras são apresentadas por tipo ou por subtipo de dano e as consequências são apresentadas por tipo de dano.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro 3-10: Exemplos de danos não estruturais em PAAP



D8: Depósitos de origem biológica

(1) Manifestação

D8.1: Vegetação de médio e pequeno porte

Desenvolvem-se em locais onde existe terra vegetal (D8.4b), podendo também se desenvolver junto a musgos (D8.2). Podem ser observadas plantas de diversas famílias, desde plantas de grandes a pequenas dimensões.

D8.2: Musgos

Desenvolvem-se em locais húmidos e sombreados. Têm uma tonalidade verde e atingem poucos centímetros de altura.

D8.3: Líquenes

Os líquenes são uma simbiose entre fungos e algas. Apresentam diversas morfologias, sendo os mais observados os das variedades incrustantes e folhosas. Podem apresentar tonalidades que vão desde o branco ao preto passando pelo amarelo, laranja, vermelho, castanho e verde. Os líquenes de tonalidade preta têm um aspeto semelhante a um dos minerais constituintes do material pétreo granito, o mineral biotite (do grupo das micas). No Quadro 3-11 são apresentadas imagens dos diversos líquenes que se podem observar em alvenarias.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

Quadro 3-11: Exemplos de danos D8.3 em alvenarias de granito



D8.4: Excrementos de aves e depósitos de terra vegetal

Os excrementos de aves, **D8.4a**, podem aparecer nas unidades de alvenaria e nas juntas. Os depósitos de terra vegetal, **D8.4b**, resultantes da decomposição de animais e plantas, desenvolvem-se nas juntas, aberturas e fendas existentes nas unidades de alvenaria.

(2) Principais causas

Como causas referem-se: (i) a exposição a condições agrestes de temperatura e de humidade; (ii) a presença de água nos paramentos, nas juntas e nas falhas nas unidades de alvenaria e no enchimento; (iii) falta de limpeza e manutenção e (iv) inexistência ou obstrução dos órgãos de drenagem.

(3) Principais consequências

A existência do dano D8.1, principalmente em grandes quantidades, pode ocultar a existência de danos estruturais. Segundo Costa, C. (2009) quando em grandes quantidades pode aumentar o peso sob a estrutura.

A presença de raízes de plantas nas juntas ou em fendas nas unidades de alvenaria pode provocar a desintegração mecânica do material pétreo (D10.2). Quando apresentam grandes dimensões podem originar ações mecânicas como o afastamento das unidades de alvenaria e fendas nas unidades de alvenaria (degradação física) (D10.2). Esta situação também se pode verificar nos afloramentos rochosos que servem de fundação em algumas PAAP. Ver Quadro 3-12.

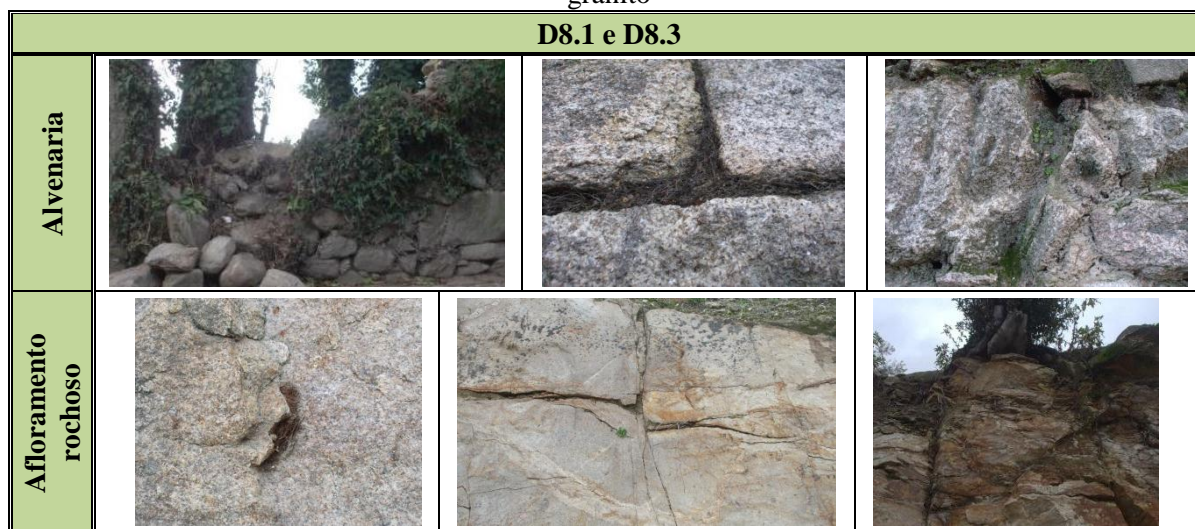
As raízes das plantas junto às PAAP (e.g., árvores) podem alterar o estado de humidade do terreno afetando consequentemente as fundações, sendo os efeitos agravados pelas variações sazonais. Por outro lado, a remoção desta vegetação leva a uma reabsorção de água por parte do solo com consequente afetação das fundações (Sowden, 1990 cit. por Martins, J. 2004).

Os danos D8.2, D8.3 e D8.4 originam a produção de agentes degradantes dos materiais (D10.2).

A existência de depósitos de terra vegetal e de excrementos de aves (D8.4) atua como fertilizante para a vegetação (D8.1), ver Quadro 3-12.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro 3-12: Consequências dos danos D8.1 e D8.3 em alvenarias e em afloramentos rochosos de granito



D9: Presença de água e humidade

(1) Manifestação

D9.1: Escorrências/depósitos de água e manchas de humidade

Manifestam-se nos paramentos por percolação ou ficam retidos por capilaridade no enchimento. Podem-se observar manchas esverdeadas associadas às escorrências.

D9.2: Eflorescências

Com uma tonalidade branca, manifestam-se sobre os paramentos das PAAP (sobre as unidades de alvenaria e argamassa), geralmente os não expostos à chuva. Podem-se formar nos paramentos das PAAP depósitos de sais arrastados pela água.

(2) Principais causas

D9.1: Escorrências/depósitos de água e manchas de humidade

Podem ser consequência: (i) da condensação do vapor de água da atmosfera que se pode infiltrar no enchimento; (ii) da infiltração no enchimento da água da chuva devido a um ineficiente ou inexistente sistema de impermeabilização ou devido à degradação da rede de drenagem de águas pluviais ou (iii) da absorção por capilaridade da água, que depende (a) da porosidade do material pétreo, (b) da evaporação, (c) da temperatura, (d) de variações cíclicas do nível do curso de água e (e) da falta de limpeza da PAAP.

D9.2: Eflorescências

As eflorescências resultam da cristalização de minerais de sais solúveis sobre a superfície das unidades de alvenaria e argamassa devido à ascensão à sua superfície de soluções salinas a partir (i) do solo, (ii) da atmosfera ou (iii) da dissolução do material pétreo.

(3) Principais consequências

Os danos D9.1 promovem o aparecimento de depósitos de origem biológica (D8). Os efeitos dos ciclos de gelo/degelo (devido às variações de temperatura) provocam variações de volume das unidades de alvenaria e do enchimento. Estas devem-se ao incremento de 9 % do volume

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

da água ao congelar, que pode conduzir ao aumento de esforços e conseqüentemente ao aparecimento de fendas nos paramentos da PAAP.

O movimento da água por percolação no enchimento promove: (i) a lavagem da argamassa nas juntas e acelera o processo de degradação da argamassa (D11) e (ii) a lavagem de finos e o surgimento de vazios originando um processo de degradação do material de enchimento (D6).

D10: Degradação das unidades de alvenaria

(1) Manifestação

D10.1: Erosão das unidades de alvenaria

A superfície das unidades de alvenaria sofre um desgaste apresentando um aspeto liso e arredondado. Em juntas preenchidas ocorre perda de argamassa.

D10.2: Meteorização (desagregação) das unidades de alvenaria

Caracteriza-se pela perda de coesão dos minerais constituintes das unidades de alvenaria, levando à perda de resistência mecânica pétreo e à fragmentação da estrutura das unidades de alvenaria.

Na superfície das unidades de alvenaria são visíveis: (i) pequenas cavidades, (ii) pequenos orifícios, (iii) pequenas fendas e/ou lascas ou (iv) formações pouco espessas sobre a forma de placas ou pequenas crateras (plaquetas). As placas vão-se destacando da superfície, acabando por se separar e caírem, ficando a superfície das unidades de alvenaria com aspeto de desagregação granular, i.e., um aspeto rugoso com os minerais (ou grãos) constituintes salientes (e.g., quartzo no caso de granitos). Num estado mais avançado de desagregação os minerais constituintes das unidades de alvenaria caem ao serem tocados. Ver Quadro 3-13, onde são apresentados alguns dos casos do dano D10.2 observados em alvenarias.

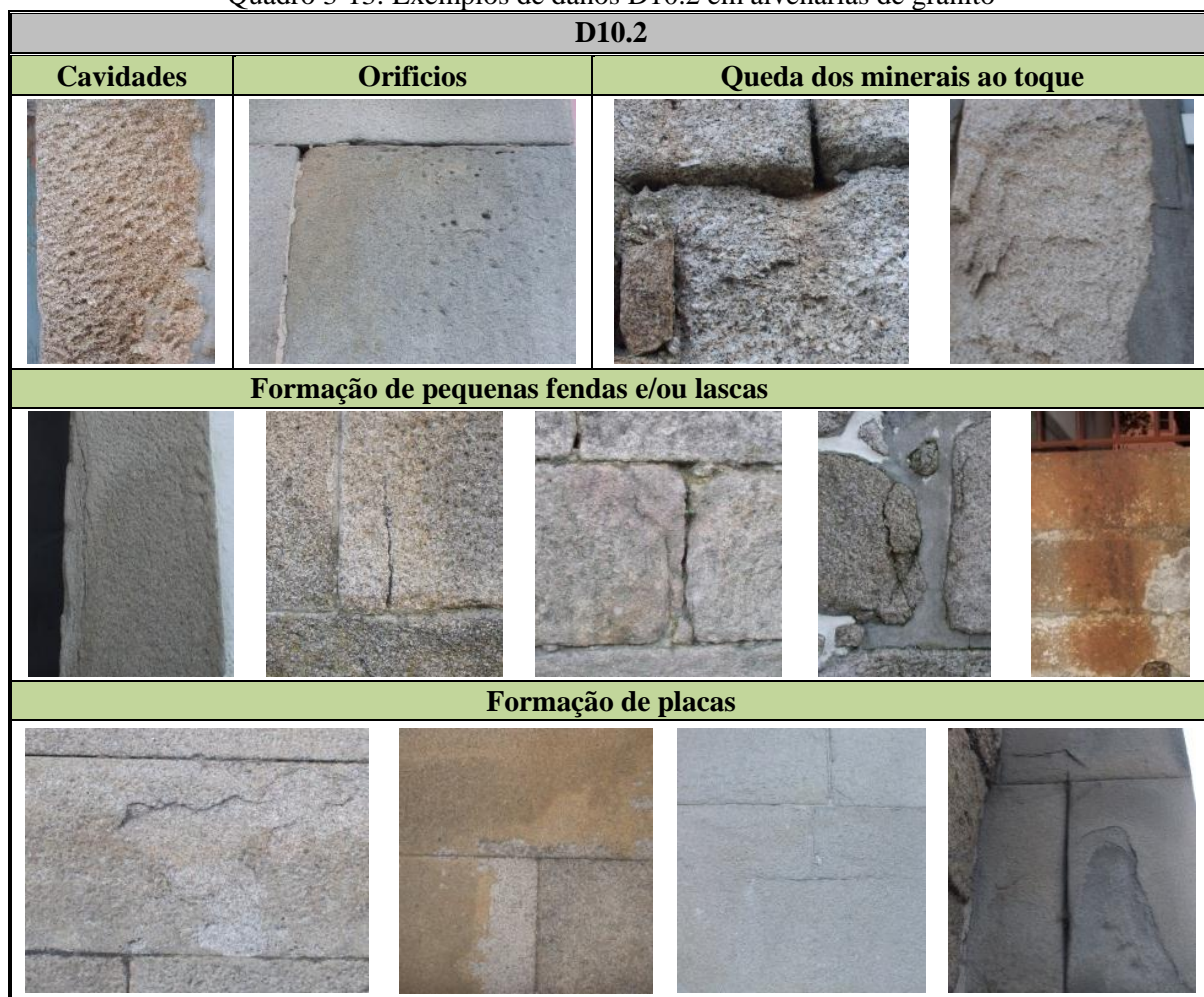
D10.3: Crostas negras e filmes negros

As crostas negras, **D10.3a**, são formações que se acumulam nos paramentos húmidos (nas unidades de alvenaria e na argamassa das juntas) sujeitos à ação direta ou indireta da água da chuva. A superfície das crostas negras é irregular e raramente acompanha a rugosidade superficial das unidades de alvenaria que recobre. Apresentam uma tonalidade negra e uma reduzida espessura, podendo a sua superfície apresentar relevo com uma forma semelhante a uma couve-flor (Begonha, 2011). São compostas por depósitos de cristais de gesso, cinzas volantes ricas em enxofre e cálcio.

Os filmes negros, **D10.3b**, são formações que cobrem a superfície das unidades de alvenaria de uma forma homogénea e têm uma consistência dura. Apresentam uma tonalidade negra ou castanha escura e uma reduzida espessura, com uma grande aderência à superfície das unidades de alvenaria. A superfície dos filmes negros tem um aspeto usualmente baço, podendo no entanto apresentar um brilho metálico. São compostas por depósitos de cristais de gesso, cinzas volantes ricas em enxofre, cálcio e ferro.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro 3-13: Exemplos de danos D10.2 em alvenarias de granito



(2) Principais causas

D10.1: Erosão das unidades de alvenaria

A ação combinada da chuva e do vento contendo partículas sólidas ou a ação da água e das partículas que a água transporta provocam o desgaste contínuo da superfície das unidades de alvenaria, dependendo os seus efeitos da dureza superficial e da resistência das unidades de alvenaria.

D10.2: Meteorização (desagregação) das unidades de alvenaria

A meteorização depende da natureza das unidades de alvenaria em conjunto com fenómenos climáticos e biológicos, destacando-se (Portugal, e-PORTFOLIO):

- (i) Variações de volume das unidades de alvenaria com consequentes pressões internas nos poros das unidades de alvenaria podendo conduzir à fraturação e desagregação devido à entrada de água nos poros em conjunto com os efeitos dos ciclos de gelo/degelo;
- (ii) Aumento das dimensões das fendas já existentes nas unidades de alvenaria devido ao crescimento de vegetação (D8.1) nessas fendas;
- (iii) Alteração dos minerais existentes nas unidades de alvenaria devido à ocorrência de reações químicas entre os minerais e substâncias existentes na água ou na atmosfera, destacando-se os processos de: (a) hidrólise (a água ácida, originada pela reação do dióxido de

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

carbono com a água, em contacto com o mineral, e.g., feldspato potássico, existente no material pétreo granito origina caulinite, mineral de argila); (b) dissolução dos minerais (a água ácida em contacto com o mineral carbonato de cálcio existente no material pétreo calcário origina carbonatação, ocorrendo dissolução do bicarbonato de cálcio na água e consequente formação de relevos); (c) oxidação (o oxigénio atmosférico dissolvido na água em contacto com os minerais ricos em ferro das unidades de alvenaria origina ferro oxidado, óxidos. Como este novo mineral não é solúvel em água, precipita-se dando uma cor avermelhada às unidades de alvenaria); (d) pressões desenvolvidas no interior dos poros das unidades de alvenaria (devido ao processo de hidratação/desidratação dos sais); (iv) Desagregação provocada pelos sais contidos nas argamassas cimentícias aplicadas nas juntas.

D10.3: Crostas negras e filmes negros

As crostas negras, D10.3a, resultam da queima de combustíveis, e.g., de indústrias, veículos e de alguns seres vivos como os fungos (D8.3).

Os filmes negros, D10.3b, estão associados à poluição atmosférica e a eventuais ataques de chuvas ácidas.

(3) Principais consequências

A presença dos danos D10 (i) causa uma alteração ou destruição das unidades de alvenaria por ataque químico e/ou físico; (ii) conduz a uma perda de secção das unidades de alvenaria com respetiva redução de resistência e (iii) facilita a ação de outros fenómenos de degradação, e.g., depósitos de origem biológica (D8).

D11: Perda de argamassa nas juntas preenchidas

(1) Manifestação

Perda de argamassa nas juntas entre as unidades de alvenaria.

(2) Principais causas

Apresenta como possíveis causas (i) as características da própria argamassa, i.e., a sua constituição ou a sua incorreta execução e aplicação. Pode resultar ainda (ii) de condições externas à estrutura: (a) erosão causada pela ação conjunta do vento e da água em ciclos de gelo/degelo e secagem/molhagem; (b) presença de matéria orgânica e vegetação, e.g., raízes de plantas (D8); (c) ação de micro organismos; (d) lavagem de finos no material de enchimento devido a infiltração de água; (e) efeito de estanquidade ou drenagem e (f) uso de argamassas cimentícias no refechamento das juntas que origina efeitos de natureza físico-química por incompatibilidade entre os materiais aplicados e os existentes, originando ainda uma alteração do comportamento mecânico da alvenaria.

(3) Principais consequências

O dano D11 origina (i) uma redução da área de contacto entre as unidades de alvenaria (nas juntas) com consequente aumento da tensão nos pontos de contacto das unidades de alvenaria

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

e consequente alteração do comportamento mecânico da alvenaria. Permite ainda (ii) a entrada de água no enchimento, que por sua vez poderá originar a degradação do enchimento (D6).

3.3 Intervenção em pontes em arco de alvenaria de pedra

Segundo o documento/norma ICOMOS (2003) o correto diagnóstico de uma estrutura consiste num conjunto de procedimentos complementares entre si, ver o Quadro 3-14, que se baseiam em 4 fases: (1) informação histórica; (2) abordagem qualitativa; (3) abordagem quantitativa e (4) global, em que após os procedimentos referidos, é realizado um relatório de inspeção e diagnóstico, onde são identificados os problemas e é definida a intervenção adequada. Para traduzir a situação real das PAAP, a organização do relatório deve ser eficaz e complementada por recomendações de ações a implementar.

Quadro 3-14: Fases do diagnóstico de intervenção em PAAP

Fases		Meios	Objetivos
(1)	Histórica	Consulta de documentos ^(a) , fotografias, estudos realizados sobre as PAAP, entre outras informações	(i) Obtenção de informação sobre a ocorrência de operações de manutenção e reabilitação/reforço ^(b) ; (ii) Obtenção de informação sobre a manifestação de danos; (iii) Obtenção de informação sobre a existência de inspeções e intervenções ou de alterações.
(2)	Qualitativa	Inspeção visual ^(c)	(i) Obtenção de informação sobre a geometria, materiais e elementos construtivos da PAAP; (ii) Identificação de danos dos materiais; (iii) Identificação de efeitos do meio ambiente sobre a PAAP; (iv) Determinação da estabilidade dos fenómenos visualizados; (v) Decisão sobre a existência de riscos imediatos e, se necessário, implementação de medidas de salvaguarda.
(3)	Quantitativa	Análise numérica e realização de ensaios ^(d)	(i) Descrição da estrutura original; (ii) Fornecimento de informação sobre os danos observados.
(4)	Global	Concilia as fases (2) e (3)	(i) Determinação das causas dos danos e estabelecimento de medidas de intervenção ^(e) .

^(a) Os documentos de origem histórica, cultural ou arquitetónica podem ter sido elaborados sem conter a correta informação (no contexto estrutural).

^(b) Manutenção consiste nas atividades necessárias à conservação das PAAP. Reabilitação consiste na adaptação das PAAP a uma nova utilização, sem alterar as partes de valor histórico. Reforço consiste no aumento da capacidade de carga das PAAP.

^(c) Parte visual da investigação que exclui a realização de ensaios de materiais e de ensaios estruturais e análise estrutural.

^(d) As análises *in-situ* e/ou laboratoriais não são do âmbito deste trabalho.

^(e) Intrusão física.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

Segundo Cruz (2006) na inspeção de uma PAAP são consideradas como parte integrante desta operação as estruturas ou os elementos contíguos (e.g., os muros de contenção de terras, os taludes e as vias de acesso à PAAP) que possam ter influência sobre esta.

São de seguida abordadas as operações de manutenção e as operações de reabilitação/reforço, sendo apresentadas algumas das técnicas existentes.

3.3.1 Operações de manutenção

As operações de manutenção asseguram a longevidade da PAAP, reduzindo significativamente o desenvolvimento de danos mais graves que podem por em causa a eficiência das PAAP e obrigar a intervenções mais elaboradas e dispendiosas. Estas operações: (1) garantem a integridade e a segurança estrutural; (2) asseguram a funcionalidade e (3) preservam o valor patrimonial das PAAP. Consoante o tipo de trabalhos envolvidos consideram-se três tipos de manutenção: (i) manutenção corrente; (ii) manutenção preventiva; e (iii) manutenção especializada. É adotada uma notação com letras e números para uma mais fácil esquematização e realização da proposta de ficha de inspeção visual e do relatório de inspeção e diagnóstico apresentados no capítulo 5. Assim, as letras maiúsculas MC, MP, ME designam respetivamente as operações de manutenção consoante o tipo (i), (ii) e (iii), seguida do número representativo da técnica (e.g., MC1).

O Quadro 3-15 apresenta as principais técnicas existentes identificadas pela notação referida e por tipo de operação de manutenção sendo seguidamente abordadas de modo sucinto.

Quadro 3-15: Técnicas de manutenção em PAAP, podendo ser (i) corrente; (ii) preventiva e (iii) especializada

Tipos	Técnicas	Operações		
		(i)	(ii)	(iii)
MC1	Limpeza dos paramentos e dos elementos secundários	●		
MC2	Limpeza e desobstrução dos órgãos de drenagem	●		
MC3	Limpeza dos elementos contíguos às PAAP	●		
MC4	Desobstrução e limpeza do curso de água	●		
MC5	Reparações pontuais da estrutura e dos elementos secundários	●		
MP1	Tratamento de proteção do material pétreo		●	
MP2	Regularização do curso de água e proteção das suas margens e fundo		●	
MP3	Impermeabilização do tabuleiro e drenagem da PAAP		●	
MP4	Medidas restritivas de limitação da carga e da velocidade do tráfego		●	
ME1	Reposição do tabuleiro			●
ME2	Reabilitação do sistema de drenagem e de impermeabilização			●
ME3	Proteção e reparação dos apoios e/ou fundações/maciço de fundação			●

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

MC1: Limpeza dos paramentos e dos elementos secundários

A limpeza dos elementos estruturais e não estruturais (ver Quadro 2-1) consiste na remoção de depósitos biológicos (D8), de manchas devido à presença de água (D9) e das crostas negras e filmes negros (D10.3) por recurso a (1) meios mecânicos e/ou químicos, e.g., herbicida, compatíveis com a estrutura físico-química da PAAP e na (2) escovagem ligeira não abrasiva com recurso a escova de nylon e água. A remoção da vegetação (D8) deve ser realizada de modo a não danificar as unidades de alvenaria e a argamassa das juntas.

MC2: Limpeza e desobstrução dos órgãos de drenagem

A limpeza e desobstrução dos órgãos de drenagem têm como objetivo preservar a secção de vazão original dos órgãos de drenagem.

MC3: Limpeza dos elementos contíguos à PAAP

A limpeza dos elementos contíguos à PAAP (e.g., taludes e vias de acesso) tem como objetivo a desobstrução e a eliminação da vegetação indesejável por recurso aos meios referidos em MC1.

MC4: Desobstrução e limpeza do curso de água

A desobstrução e limpeza do curso de água têm como objetivo repor a secção de vazão original e/ou compatível com as PAAP, de modo a evitar (1) situações de cheia para as quais a ponte não está preparada e (2) o posterior desenvolvimento de danos ao nível dos talhamares, dos talhantes e dos pilares.

MC5: Reparações pontuais da estrutura e dos elementos secundários

As reparações pontuais consistem na (1) substituição de unidades de alvenaria e na (2) reposição ou selagem das juntas, permitindo repor a geometria da PAAP, evitar a infiltração de água e o agravamento dos danos nas fundações e apoios. A reparação do tabuleiro depende da sua constituição, se original se de outro material (e.g., betuminoso) e consiste na reposição de material e selagem de fendas existentes.

MP1: Tratamento de proteção das unidades de alvenaria

O tratamento de proteção das unidades de alvenaria tem como objetivo impedir a evolução do processo de degradação das unidades de alvenaria e evitar o desenvolvimento de novos processos de degradação. São aplicadas sobre a superfície das unidades de alvenaria soluções à base de resinas, silicones, entre outros. A aplicação deste tratamento deve ser sempre ponderada, avaliando o impacto da sua aplicação. Devem ser realizados exames ao material pétreo para determinar o estado de degradação e ter em consideração a sua localização e causas de modo a avaliar os benefícios da sua aplicação.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

MP2: Regularização do curso de água e proteção das suas margens e fundo

A regularização do curso de água (e.g., correção do traçado, definição da secção transversal e realização de dragagens) e a proteção das margens e/ou do fundo do curso de água (e.g., enrocamentos, ensacados e colocação de plantas e materiais vegetais) têm como objetivo (1) assegurar o escoamento eficiente, (2) evitar problemas de erosão e assoreamento do leito do curso de água (Abreu, 2010/2011) e consequentes danos ao nível das fundações, talha-mares e talhantes.

MP3: Impermeabilização do tabuleiro e drenagem da PAAP

A impermeabilização do tabuleiro das PAAP consiste na aplicação de membranas de impermeabilização sobre o enchimento da PAAP em casos de sistema de drenagem e impermeabilização insuficiente e/ou inadequado ou mesmo inexistente. A drenagem das PAAP consiste na realização de caleiras no tabuleiro da PAAP e na abertura de gárgulas (ou pingadeiras) nos paramentos ao nível do tabuleiro. No caso das gárgulas se localizarem ao nível do enchimento, devem existir sistemas que impeçam a saída dos finos do enchimento. Pode ainda encaminhar-se a água para sistemas de drenagem existentes na zona. A impermeabilização e a drenagem têm por objetivo evitar ou diminuir a infiltração de água no enchimento da PAAP que se manifesta através de manchas no intradorso dos arcos e nos paramentos.

MP4: Medidas restritivas de limitação de carga e velocidade do tráfego

As medidas restritivas de limitação de carga e de velocidade do tráfego rodoviário/ferroviário têm como objetivo (1) evitar sobrecargas excessivas na PAAP e consequente possibilidade de desenvolvimento de danos (e.g., fendilhação nos arcos) e (2) colisões nas guardas.

ME1: Reposição do tabuleiro

A reposição do tabuleiro consiste na: (1) recolocação do tabuleiro existente com adição de unidades de alvenaria similares; (2) colocação de um tabuleiro compatível com o original ou (3) na colocação de um tabuleiro de materiais não pétreos (e.g., materiais betuminosos).

ME2: Reabilitação do sistema de drenagem e de impermeabilização

A reabilitação do sistema de drenagem e de impermeabilização consiste na reposição das condições de funcionamento do sistema de drenagem e de impermeabilização da PAAP, através da reposição, limpeza ou substituição das camadas de impermeabilização e do sistema de drenagem.

ME3: Proteção e reparação dos apoios e/ou fundações/maciço de fundação

A forma de proteção mais usual dos apoios com ou sem talha-mares e talhantes e das fundações/maciço de fundação, que apresentam danos provocados pelo escoamento do curso de água, consiste na construção de paramentos em betão em torno dos elementos referidos. É deste modo impedida a evolução dos danos referidos (ver secção 2.1.1.6).

3.3.2 Operações de reabilitação/reforço

Na escolha da solução de intervenção de reabilitação/reforço devem ser considerados vários aspetos, entre eles destacam-se: (1) valor patrimonial; (2) o conhecimento do comportamento estrutural da PAAP; (3) os danos existentes e as suas causas; (4) o conhecimento das consequências da intervenção escolhida sobre o comportamento estrutural da PAAP; (5) os aspetos de ordem social e financeira; (6) período de intervenção e (7) aspetos estéticos.

Deve ser definido o objetivo funcional da intervenção, tendo presente as imposições quando se trata de PAAP classificadas. Deve ainda ser definida a vida útil, com base em estudos de tráfego, estudos hidráulicos e nas ações dinâmicas a que as PAAP se poderão encontrar sujeitas durante este período. As técnicas de reabilitação/reforço devem ser, sempre que possível, aferidas por modelos de análise estrutural das PAAP.

A intervenção deve ser pouco intrusiva (princípio da intervenção mínima) e as características dos materiais a aplicar devem assegurar três aspetos: (1) compatibilidade entre os materiais aplicados e os materiais existentes; (2) durabilidade da solução escolhida e (3) possibilidade de reversibilidade. Assim:

- (1) Compatibilidade mecânico-estrutural, de modo a minimizar as alterações das características de rigidez e do comportamento estrutural original. Compatibilidade físico-química, de modo a evitar o aparecimento de novos danos. Devem ser consideradas as diferenças de comportamentos físicos e/ou químicos entre os materiais empregues.
- (2) Durabilidade dos materiais empregues superior à dos utilizados nas estruturas atuais.
- (3) Reversibilidade, de modo a ser possível a remoção dos materiais aplicados (no fim da sua vida útil, no caso de revelarem sinais de não adequabilidade ou no caso de surgirem novas técnicas) sem provocar danos na estrutura inicial.

Pode-se recorrer a (1) técnicas tradicionais ou a (2) técnicas modernas e inovadoras. As primeiras empregam materiais e processos construtivos idênticos aos originais. As segundas incorporam materiais e equipamentos modernos com o objetivo de tornar mais eficientes as soluções de reabilitação/reforço.

Pode-se ainda recorrer a (1) técnicas de reforço passivo ou a (2) técnicas de reforço ativo. Nas primeiras, o reforço aplicado apenas entra em funcionamento para ações de valores superiores às ações correspondentes ao estado de equilíbrio da estrutura ou para deformações superiores. Nas segundas o reforço aplicado pressupõe uma reação imediata da estrutura.

Consoante o tipo de trabalhos envolvidos consideram-se dois tipos de reabilitação/reforço: (i) consolidação da alvenaria e (ii) reforço. Tal como na secção 3.3.1, é adotada uma notação com letras e números para uma mais fácil esquematização e realização da proposta de ficha de

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

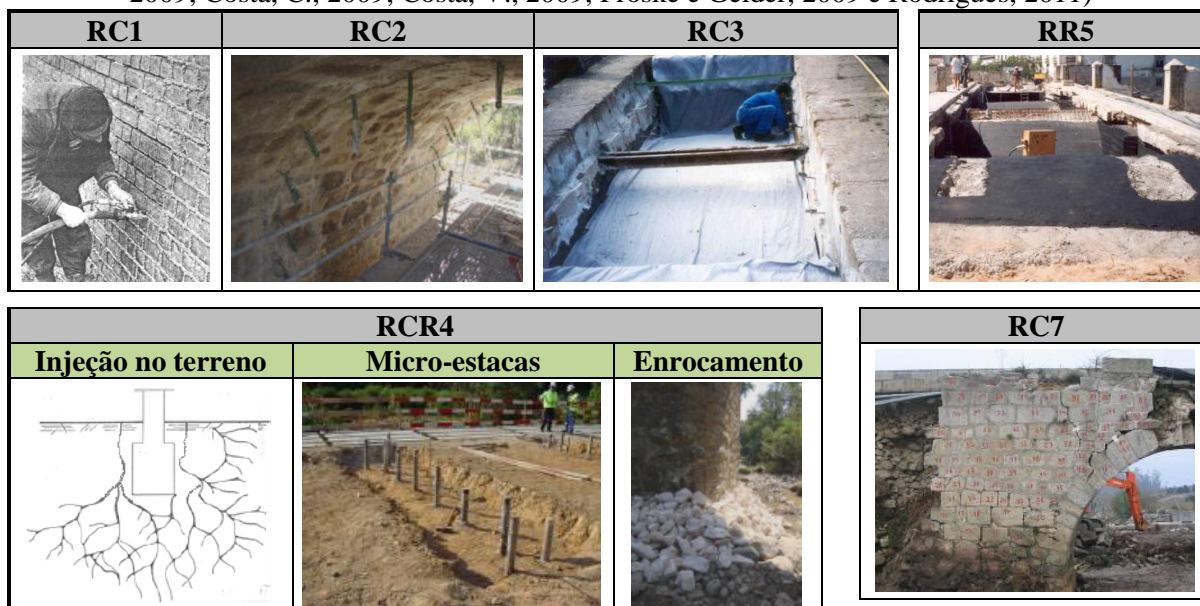
inspeção visual e do relatório de inspeção e diagnóstico apresentados no capítulo 5. Assim, as letras maiúsculas RC, RR designam respetivamente as operações de reabilitação/reforço consoante o tipo (i) e (ii), seguida do número representativo da técnica (e.g., RC2).

O Quadro 3-16 apresenta as principais técnicas, que seguem o princípio da intervenção mínima anteriormente referido, sendo ainda referidas duas técnicas intrusivas. Algumas técnicas podem corresponder a dois tipos reabilitação/reforço (e.g., RCR4). No Quadro 3-17 são apresentadas algumas figuras para mostrar o resultado das técnicas referidas. No Quadro 3-18 são apresentadas as técnicas de manutenção e reabilitação/reforço referidas de acordo com os tipos de danos não estruturais e estruturais referidos anteriormente.

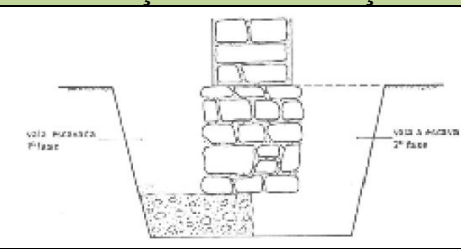
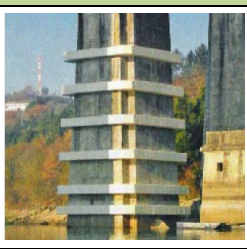

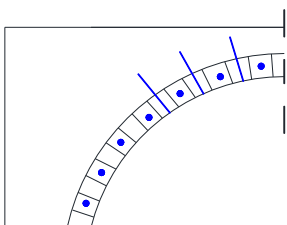
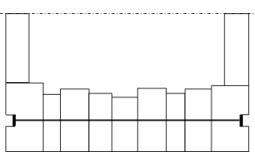

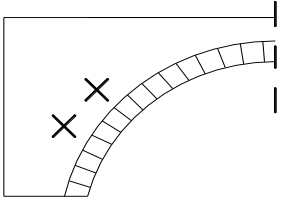
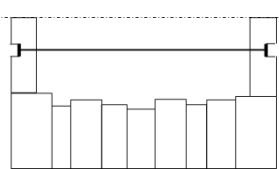
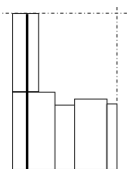
Quadro 3-16: Técnicas de reabilitação/reforço de PAAP, podendo ser de (i) consolidação da alvenaria, (ii) reforço

Tipos	Técnicas	Operações	
		(i)	(ii)
RC1	Refechamento das juntas	●	
RC2	Injeção de caldas	●	
RC3	Impermeabilização do tabuleiro	●	
RCR4	Consolidação e reforço de fundações e pilares (melhoramento do terreno)	●	●
RR5	Adição de elementos de betão armado		●
RR6	Adição de elementos metálicos e elementos compósitos reforçados com fibras		●
RC7	Desmonte e reconstrução parcial ou total	●	

Quadro 3-17: Algumas técnicas de reabilitação/reforço. Algumas figuras extraídas de (Alves, A., 2009; Costa, C., 2009; Costa, V., 2009; Proske e Gelder, 2009 e Rodrigues, 2011)



PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Recalçamento de fundações		Cintagem de pilar	
		 	
RR6			
Nos arcos	Tirantes transversais e pregagens radiais		Vigas metálicas
	 		
Nos muros de tímpano	Tirantes transversais		Tirantes verticais
	 		

RC1: Refechamento das juntas

O refechamento tem como objetivo o restauro das condições de integridade dos elementos, através: (1) da substituição da argamassa degradada nas juntas e (2) da colocação da argamassa onde esta já não existe, ou existe uma argamassa não compatível com o material pétreo. Há assim (i) uma restituição das características mecânicas dos elementos e (ii) o impedimento da entrada de água no enchimento.

RC2: Injeção de caldas

A injeção de caldas, aplicadas a baixas pressões, aplica-se: (1) no preenchimento dos vazios nos paramentos e no enchimento e (2) na selagem de fendas existentes nos paramentos. Tem por objetivos (i) a melhoria do comportamento global da PAAP (consolidação da estrutura) e (ii) consequentemente das características mecânicas da alvenaria.

As caldas a aplicar devem ter uma composição compatível com os materiais existentes, como referido anteriormente.

RC3: Impermeabilização do tabuleiro

A impermeabilização do tabuleiro evita a infiltração da água no enchimento. Consultar técnicas MP3 e ME2, secção 3.3.1.

3. Danos tipo em pontes em arco de alvenaria de pedra

RCR4: Consolidação e reforço de fundações e pilares

Recorre-se à consolidação e reforço de fundações e pilares em PAAP que apresentam: (1) descalçamento e/ou erosão das fundações ou problemas de infra-escavação; (2) deterioração ou ausência de proteção das fundações; (3) problemas nas características dos materiais constituintes ou (4) assentamentos das fundações devido a uma insuficiente capacidade resistente do terreno.

As técnicas de consolidação e reforço das fundações permitem: (1) dotar as fundações de melhores condições de resistência; (2) eliminar/reduzir possíveis assentamentos diferenciais das fundações e (3) proteger as fundações de fenómenos de infra escavação.

Existem dois tipos de técnicas: (1) técnicas de melhoramento do terreno e (2) técnicas de reforço das fundações. Nas primeiras recorre-se a: (i) injeções de caldas de cimento no terreno de fundação; (ii) enrocamentos sob as fundações; (iii) “jet-grouting”; (iv) adição de estacas e micro-estacas (preenchidas com caldas de cimento). Nas segundas recorre-se a: (i) preenchimento das fundações com injeções; (ii) reforço das fundações com aumento de secção através de (a) encamisamentos e (b) pregagens.

De referir que o recurso a microestacas e o aumento de secção alteram o aspeto das PAAP, podendo deste modo descaracterizá-la.

RR5: Adição de elementos de betão armado - técnica intrusiva

Trata-se de uma técnica intrusiva que não cumpre as indicações do ICOMOS (2003).

A adição de elementos de betão armado é aplicada nos arcos de PAAP que apresentam uma baixa capacidade resistente devido à (1) reduzida espessura dos arcos ou à (2) degradação em tabuleiros devido à sua incapacidade de degradação das cargas rodoviárias/ferroviárias.

A adição de elementos de betão armado consiste na introdução de uma laje de betão (moldada no local, pré-fabricada ou projetada) no intradorso ou no extradorso do arco, podendo ser reforçada pela colocação de armaduras de aço ou fibras de materiais compósitos.

Pode-se ainda recorrer à realização de uma laje de betão armado associada à técnica RE3 de modo a regularizar o tabuleiro e diminuir o impacto do tráfego rodoviário/ferroviário. Recorre-se ainda à adição de elementos de betão armado para aumentar o perfil transversal das PAAP.

RR6: Adição de elementos metálicos e elementos compósitos reforçados com fibras

A adição de elementos metálicos e de elementos compósitos é aplicada em PAAP que apresentam: (1) deslocamentos transversais ou excessivas deformações nos muros de tímpano; (2) fendas longitudinais no intradorso dos arcos; (3) separação entre a primeira fiada no intradorso do arco e as restantes fiadas; (3) destacamento ou falta de unidades de alvenaria no intradorso dos arcos ou (4) reduzida capacidade resistente.

A adição de elementos nos arcos ou na ligação muros de tímpano/arcos apresenta como objetivo: (i) a melhoria da capacidade das propriedades mecânicas da alvenaria; (ii) a melhoria da resistência da PAAP à ação sísmica e (iii) a estabilização da geometria da PAAP. Pode-se recorrer à utilização de: (a) varões e perfis de aço; (b) tirantes; (c) pregagens e

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ancoragens ou (d) materiais compósitos reforçados com fibras em varões, laminados ou mantas. Estes elementos podem ser colocados longitudinalmente, transversalmente, verticalmente ou radialmente.

RC7: Desmonte e reconstrução parcial ou total - técnica intrusiva

Trata-se de uma técnica intrusiva.

O desmonte e reconstrução aplica-se em PAAP que tenham sofrido: (1) colapso total ou parcial; (2) fendilhação ou (3) deformações excessivas. O desmonte e posterior reconstrução pode ser total ou parcial, tendo como objetivos: (1) a reposição das condições iniciais da geometria com conseqüente melhoria da capacidade mecânica da alvenaria e conseqüentemente do comportamento original da PAAP; (2) a correção de problemas associados a fendilhação e deformações e (3) correções de verticalidade.

Durante a operação de desmonte, as unidades de alvenaria a recolocar são numeradas. Apenas se recorre a unidades de alvenaria novas na impossibilidade de recuperar as existentes ou na sua ausência, devendo estas apresentar características compatíveis com as existentes.

Pode-se ainda recorrer a esta técnica aquando de procedimentos de alargamento da estrutura existente. Para minimizar o impacto da intervenção recorre-se à reutilização das unidades de alvenaria dos elementos secundários que iriam ficar encobertos.

Quadro 3-18: Danos e possíveis técnicas de intervenção por manutenção (i) corrente; (ii) preventiva e (iii) especializada e Técnicas de reabilitação/reforço por (I) consolidação da alvenaria e (II) reforço

Danos		Intervenção																
		Manutenção											Reabilitação/Reforço					
		(i)					(ii)				(iii)		(I)			(II)		(I) (II)
		MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MP1	MP2	MP3	MP4	ME1	ME2	ME3	RC1	RC2	RC7	RR5	RR6
Estruturais	D1				•				•	•					•			
	D2								•					•	•	•	•	
	D3								•					•	•		•	
	D4								•			•		•	•		•	•
	D5				•			•	•			•			•		•	•
	D6							•	•					•				
	D7				•	•		•	•	•		•			•			
Não estruturais	D8	•	•	•							•							
	D9	•	•	•				•			•							
	D10	•	•				•											
	D11					•							•					

3.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais considerações relativas aos danos e à intervenção em PAAP, de modo a auxiliar a realização do capítulo 5.

Apesar de ser cada vez maior o interesse por parte dos técnicos no estudo e na manutenção e reabilitação/reforço das PAAP e de serem escritos cada vez mais artigos relativos a esta matéria, salienta-se a dificuldade sentida, bem como alguma confusão aquando da procura e do tratamento da informação. Para a realização deste trabalho foram pesquisados na sua maioria trabalhos elaborados por entidades, trabalhos académicos e artigos de conferência e similares. Observou-se alguma discrepância em alguns termos utilizados na área das PAAP e na área de manutenção e de reabilitação/reforço. Observou-se ainda a ausência de alguns aspetos base que poderiam facilitar a melhor apreensão de conhecimentos. Os procedimentos a seguir para a intervenção em PAAP e as bases de dados de danos e de inspeções, apenas existem em entidades para seu próprio uso. Contudo, a informação pode ser acedida através de endereços de internet, artigos de conferência e similares, e por pedido direto aos autores.

O diagnóstico de uma PAAP, como qualquer outra estrutura, consiste num conjunto de processos complementares entre si e que se baseiam na: (1) aquisição de informação sobre a PAAP, (2) inspeção visual, (3) realização de ensaios e (5) análise numérica. Depois da realização destes processos procede-se à análise das causas dos danos e estabelecimento das medidas de intervenção.

É fundamental distinguir os tipos de ações que atuam nas PAAP e as suas consequências, de modo a perceber como os danos se desenvolvem. As ações físicas, químicas e biológicas a que as PAAP estão sujeitas afetam as propriedades mecânicas dos materiais, conduzindo à sua degradação, i.e., a danos não estruturais, e posterior alteração da resistência da estrutura. Estes danos são consequência do passar dos anos, da ausência e/ou da existência de desadequados planos de manutenção. As ações mecânicas (i.e., ações permanentes, sobrecargas provocadas pelo tráfego ferroviário/rodoviário e deformações impostas) podem originar fendilhação, esmagamento, deformações excessivas e/ou assentamentos diferenciais, i.e., danos estruturais.

É de extrema importância saber identificar os tipos de danos e saber onde e como se manifestam e as consequências do seu não tratamento. Deve-se ter presente que por vezes a causa é de difícil identificação por estar associada ou ser consequência de outros danos. A realização de ensaios contribui para uma mais correta definição dos danos. Os danos não estruturais podem-se desenvolver pela generalidade da PAAP, com mais incidência em determinados locais de acordo com a orientação da estrutura, o ambiente onde esta se localiza e ainda de acordo com o tipo de material pétreo. Os danos estruturais podem ser generalizados ou ser localizados em elementos específicos da estrutura.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

O plano de intervenção em PAAP passa pelas operações de manutenção e pelas operações de reabilitação/reforço. As primeiras asseguram a longevidade da PAAP, reduzindo o desenvolvimento de danos que poderão colocar em causa a sua eficiência. As segundas têm como objetivo a correção e o tratamento de danos que poderão colocar em causa a sua estabilidade e o seu funcionamento como PAAP. Na escolha da melhor solução devem ser considerados vários aspetos, salientando-se o conhecimento do comportamento estrutural das PAAP e as consequências das soluções de intervenção, aspetos de ordem social, financeira e estética. As técnicas adotadas devem ser, sempre que possível, aferidas por modelos de análise estrutural. Devem ser pouco intrusivas e os materiais aplicados devem ser compatíveis com os materiais existentes de modo a minimizar as alterações de rigidez das PAAP, e consequentemente do seu comportamento estrutural, e a não causarem novos danos. Devem ainda ter uma maior durabilidade que os materiais existentes e possibilitar a sua remoção sem causar danos na estrutura.

As técnicas de manutenção consistem na limpeza da PAAP e dos elementos contíguos; na limpeza do curso de água e/ou na sua regularização; em reparações pontuais; na reparação ou proteção dos apoios e/ou fundações/maciço de fundação; na impermeabilização do tabuleiro e drenagem e/ou sua reabilitação ou reposição e em medidas restritivas de carga e de velocidade de tráfego. As técnicas de reabilitação/reforço consistem no refechamento das juntas; na injeção de caldas; na impermeabilização do tabuleiro; na consolidação e reforço das fundações e pilares; na adição de elementos metálicos e elementos compósitos reforçados com fibras e, apesar de serem consideradas intrusivas, na adição de elementos de betão armado e no desmonte e reconstrução total ou parcial dos elementos da PAAP.

4. Método dos Elementos Discretos

Os métodos numéricos permitem analisar modelos matemáticos. Trata-se, genericamente, de um conjunto de hipóteses que permitem representar sistemas físicos, i.e., as estruturas. Em engenharia o objetivo não é a descrição da “realidade”, mas a representação das características essenciais que regem o comportamento das estruturas. Os modelos numéricos podem ser (1) contínuos ou (2) descontínuos, tendo em consideração a forma como são tratadas as discontinuidades das estruturas. Nos modelos descontínuos, e.g., modelos de elementos discretos (ED) ou blocos, o sistema é formado por um conjunto de elementos independentes, os ED, com interação entre si através de superfícies (ou zonas) de contacto correspondentes às discontinuidades criadas pelas juntas.

Para poder analisar uma estrutura através de modelos descontínuos é necessário definir: (1) o modelo geral da estrutura, onde constam a geometria, a duas ou a três dimensões (2D ou 3D, respetivamente) e a forma de representação da interação entre ED e (2) os modelos constitutivos, onde constam as características fundamentais do comportamento dos materiais e dos contactos.

Deste modo no presente capítulo são apresentados os principais fundamentos do método dos elementos discretos (MED) utilizado pelo código mencionado na secção 2.3.3, o LFE-MEDM. Apesar de, neste trabalho, ser seguida a hipótese dos elementos discretos poligonais (EDP) rígidos, sendo a sua deformabilidade representada pelos contactos e a sua formulação ser em termos de forças, são mencionados os principais requisitos do MED. Para a realização do presente capítulo foram consultados os trabalhos de Vieira (1997); Rouxinol (2007); Morgado (2008) e Rocha, N. (2010).

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Assim, na secção 4.1 é resumida a forma de representação dos ED e na secção 4.2 as restrições ao movimento. Na secção 4.3 é apresentada a interação entre os ED, nomeadamente a representação dos contactos entre ED, o arredondamento dos seus vértices, o comprimento de influência do contacto, os tipos de contacto, as tolerâncias de sobreposição e de separação, a deteção e atualização de contactos e o modelo constitutivo dos contactos. Na secção 4.4 encontram-se os principais aspetos relativos à ação permanente e à sobrecarga e na secção 4.5 algumas teorias sobre o amortecimento. Na secção 4.6 são apresentados os principais pressupostos sobre as equações de movimento, a sua integração e o passo de tempo. Na secção 4.7 é abordado o comportamento mecânico dos materiais constituintes das PAAP, nomeadamente a caracterização da alvenaria (unidades de alvenaria e juntas) e do material de enchimento. Por fim, na secção 4.8 são expostas as considerações finais.

4.1 Representação dos elementos discretos

Existem dois tipos de modelos para a representação do material sólido constituinte do sistema: (1) modelo de ED rígidos e (2) modelo de ED deformáveis.

(1) No modelo de ED rígidos os movimentos das descontinuidades (abertura, fecho, rotação e escorregamento) são os principais responsáveis pela deformação do sistema.

(2) O modelo de ED deformáveis é utilizado quando se pretende representar a deformação dos ED, sendo estes divididos geralmente em elementos triangulares de modo a introduzir deformabilidade dos ED.

Geralmente para o estudo de sistemas descontínuos é considerado o modelo de ED rígidos. A posição de cada ED é definida pela posição do seu centro de massa. Cada ED apresenta três graus de liberdade: duas translações e uma rotação.

Como referido na secção 2.3.3, os ED podem ser: (1) poligonais (EDP) ou (2) circulares (EDC). Os primeiros podem ser rígidos ou deformáveis e os segundos são rígidos. O EDP é composto por três a cinco vértices, ficando definido se todos os seus vértices forem identificados pelas suas coordenadas. Devem ser evitadas relações entre comprimentos das arestas (ou lados) muito desproporcionadas, devendo o comprimento da menor aresta ser igual ou superior a duas vezes a distância de arredondamento, ver secção 4.3.2, de forma a evitar que os vértices teóricos (após arredondamento) se sobreponham. Os ED não podem ser côncavos e a numeração dos vértices segue o sentido retrógrado. O EDC fica definido pelas coordenadas do seu centro de massa e pelo seu raio.

4.2 Restrições de movimento

Os ED localizados na região envolvente do sistema, e.g., apoios e fundações, têm um ou todos os seus deslocamentos impedidos. Na Figura 4-1 estão representados os tipos de restrições que podem ser utilizados nos EDP e EDC.

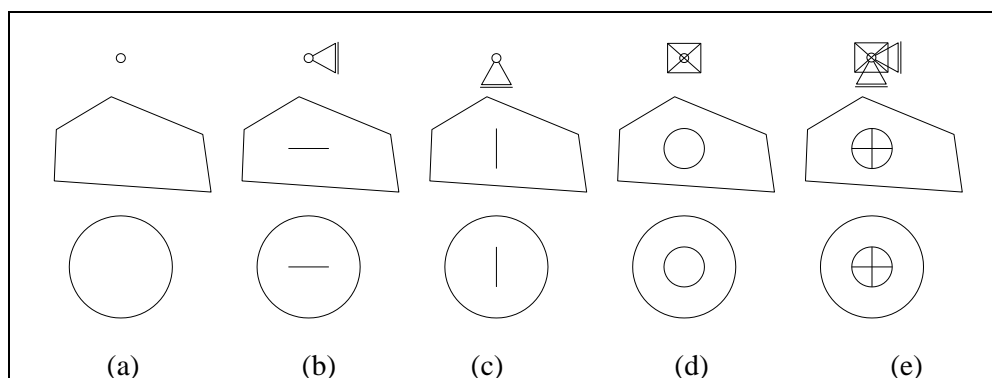


Figura 4-1: Restrições de movimento para EDP e EDC: (a) nenhuma; (b) horizontal; (c) vertical; (d) rotação e (e) todos. Adaptado de (Rouxinol, 2007)

4.3 Interação entre elementos discretos

4.3.1 Representação dos contactos

Existem dois modelos de contacto entre ED: (1) modelo de contacto rígido e (2) modelo de contacto deformável.

(1) No modelo de contacto rígido não ocorre sobreposição dos ED. O modelo é apropriado para sistemas de EDC que se movem com velocidades elevadas e interagem através de colisões.

(2) No modelo de contacto deformável ocorre uma pequena sobreposição entre os ED na presença de forças de compressão, correspondendo este modelo à aproximação de junta de espessura nula. Como na realidade ocorrem deformações ao nível das juntas este modelo representa uma aproximação do comportamento real, correspondendo ao utilizado na maioria das formulações (Lemos, 1995 cit. por Rouxinol 2007).

A superfície de contacto pode ser representada por dois modelos: (1) contacto lado-lado e (2) contacto pontual.

(1) No contacto lado-lado as deformações da junta são expressas em termos de deslocamentos e rotações relativos médios (Belytschko 1983, Petrinic 1996 e Lemos 1999 cit. por Rouxinol 2007).

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

(2) No contacto pontual, adotado na maioria das formulações, as propriedades da superfície de contacto são concentradas em pontos de contacto. Deste modo a designação de descontinuidade dá lugar ao termo contacto, C , i.e., ponto a partir do qual se transmitem as forças de contacto entre ED: forças normais, $F_{C,n}$, e forças tangenciais, $F_{C,s}$, ver secção 4.3.4.

A variação das forças de contacto depende do deslocamento dos dois ED em contacto. Podem ser utilizadas duas formulações para a sua determinação: (1) formulação em termos de tensões e (2) formulação em termos de forças.

(1) Na formulação em termos de tensões, é atribuído a cada contacto pontual uma parcela da área ou comprimento total da superfície em contacto, designada de área ou comprimento de influência, ver secção 4.3.3, sendo deste modo a rigidez proporcional à área ou comprimento do contacto. O modelo aplica-se a problemas onde se pretende uma boa aproximação das tensões médias, e.g., determinar a história dos deslocamentos do sistema estrutural.

(2) Na formulação em termos de forças, o valor da rigidez das juntas é igual para todos os contactos, não sofrendo variações aquando da alteração da área ou do comprimento, tornando o modelo vantajoso em relação ao anterior em termos de rapidez. Aplica-se mais a problemas onde se pretende apenas determinar a capacidade de carga do sistema estrutural. Situação em que a determinação da história dos deslocamentos não é significativa para a determinação do mecanismo de colapso.

4.3.2 Arredondamento dos vértices

De modo a garantir a correta definição dos contactos entre ED e a evitar a ocorrência de instabilidades numéricas na transição entre contactos, os vértices dos EDP são arredondados através de arcos circulares. Recorre-se a este procedimento porque: (1) representa uma aproximação da realidade, pois devido à concentração de tensões nestas zonas as arestas encontram-se fraturadas, sendo estas aproximadamente arredondadas; (2) facilita a definição unívoca dos parâmetros geométricos do contacto, i.e., as direcções normal, n , e tangencial, t ; e (3) permite a passagem de forma contínua de um contacto do tipo vértice-vértice para um contacto do tipo vértice-lado, ver secção 4.3.4.

O arredondamento é obtido através da consideração de um parâmetro, designado parâmetro de distância de arredondamento, d_r . Este parâmetro tem um valor igual para todos os vértices de cada EDP e define a distância entre o vértice e cada um dos dois pontos de concordância dos lados adjacentes e o arco de arredondamento. Com este arredondamento a cada vértice, V , corresponde um vértice teórico, VT , coincidente com o centro do arco de arredondamento, ver Figura 4-2 (a). Geralmente a distância de arredondamento é da ordem de 1 a 5 % da dimensão média das arestas do EDP, L_P . Vieira (1997) apresenta uma distância de arredondamento, igual para todos os EDP do sistema de $0,01L_P$. O arredondamento dos vértices do EDP em problemas onde se pretende avaliar a capacidade de carga da estrutura permite reduzir os

efeitos de imbricação. No caso dos EDC também se recorre a este parâmetro, de modo a que as tolerâncias de sobreposição e separação, ver secção 4.3.5, sejam definidas em função deste parâmetro, apesar de não ser necessário, ver Figura 4-2 (b).

4.3.3 Comprimento de influência do contacto

O comprimento de influência é diferente consoante se opte por uma (1) formulação em termos de tensões ou por uma (1) formulação em termos de forças.

(1) Na primeira opção deve existir um valor mínimo para o comprimento de influência entre EDP (contactos do tipo vértice-vértice, ver 4.3.4). Em Rouxinol (2007) é adotado, de acordo com Coulomb, um valor de 10% da altura da secção, de modo a evitar saltos numéricos bruscos entre as iterações.

(2) Na segunda opção o comprimento de influência é fixo, $L_{C,fix}$, e é obtido: pela relação $0,5L_P - d_r$ para contactos entre EDP e pela média dos diâmetros dos vários EDC para contactos entre EDP e EDC e para contactos entre EDC.

Nos modelos a duas dimensões compostos por EDP e EDC, o comprimento de influência depende do tipo de ED em contacto e do tipo de contacto, podendo ser definidos três tipos de comprimentos de influência, L_C : (1) $L_{C,P-P}$, contacto entre EDP (P-P); (2) $L_{C,P-C}$, contacto entre EDP e EDC (P-C); (3) $L_{C,C-C}$, contacto entre EDC (C-C).

Segundo Rouxinol (2007) as duas formulações conduzem a resultados similares.

4.3.4 Tipos de contacto

Os tipos de contactos podem ser divididos em dois grupos, tendo em consideração o arredondamento dos vértices e a geometria: (1) contactos entre EDP e (2) contactos que envolvem EDC. Ao primeiro grupo pertencem os contactos do tipo: (i) vértice-vértice; (ii) vértice-lado e (iii) lado-vértice. Ao segundo grupo pertencem os contactos: (iv) círculo-círculo; (v) vértice-círculo; (vi) lado-círculo; (vii) círculo-vértice e (viii) círculo-lado.

Para definir um contacto é necessário conhecer nove quantidades/variáveis: (1) identificação da ordem do contacto; (2) tipo de contacto; (3) coordenadas do ponto do contacto, $x_{C,i}$; (4) normal da superfície do contacto, n_C ; (5) número de ordem dos dois ED envolvidos no contacto, A e B ($A < B$); (6) coordenadas dos centros de massa dos ED, A e B, $x_{CM,A,i}$ e $x_{CM,B,i}$; (7) coordenadas dos vértices, VA e VB, $x_{VA,i}$ e $x_{VB,i}$; (8) coordenadas dos vértices teóricos, VTA e VTB, $x_{VTA,i}$ e $x_{VTB,i}$, e (9) raios dos arcos de arredondamento, R_{VTA} e R_{VTB} . Por uma questão de uniformidade na definição dos contactos, o vértice, V, e o vértice teórico, VT, também são definidos para os EDC, sendo estes coincidentes com o centro de massa do elemento.

4.3.5 Tolerâncias de sobreposição e de separação

É necessário definir tolerâncias de sobreposição e separação para controlar o processo de cálculo do MED, existindo deste modo: (1) a tolerância de sobreposição, $d_{over,C}$, que impede a sobreposição excessiva e o atravessamento dos ED e (2) a tolerância de separação, $d_{gap,C}$, que permite que um contacto virtual permaneça ativo numericamente mesmo quando não é efetivo, permitindo a redução do tempo de cálculo associado à deteção de contactos, ver secção 4.3.6.

Um contacto pontual é considerado efetivo quando ocorre sobreposição dos ED em contacto. Um contacto pontual virtual é estabelecido quando, antes da sobreposição, os ED se encontram suficientemente próximos. As forças de contacto surgem somente no caso de o contacto ser efetivo.

As tolerâncias para sistemas de EDP são usualmente da ordem de grandeza da distância de arredondamento (Síncrian e Lemos, 1998a cit. por Rouxinol 2007), ver equação (4-1). Para sistemas de EDC, são de ordem de grandeza inferior à dimensão do ED (Itasca, 2002 cit. por Rouxinol 2007), ver equação (4-2). Para sistemas de EDP e EDC, as tolerâncias são definidas por condições geométricas que relacionam as distâncias de arredondamento dos dois tipos de ED (Rouxinol, 2007), ver equação (4-3).

$$d_{over,C} = \min(d_{r,A}, d_{r,B}) \quad (4-1)$$

$$d_{over,C} = \frac{1}{2} \min(d_{r,A}, d_{r,B}) \quad (4-2)$$

$$d_{over,C} = \left\{ \begin{array}{l} 2d_{r,B} \Leftarrow R_{VTA} \geq R_{VTB} \\ 2d_{r,A} \Leftarrow R_{VTA} < R_{VTB} \end{array} \right\} \quad (4-3)$$

Onde:

- $d_{r,K}$ – Distância de arredondamento do EDP K ;
- $d_{over,C}$ – Tolerância de sobreposição do contacto C ;
- R_{VTK} – Raio do arco de arredondamento do EDP K .

4.3.6 Deteção e atualização de contactos

No decorrer do cálculo é necessário fazer a atualização de contactos, uma vez que a localização e a orientação dos ED podem ser alteradas, podendo levar à eliminação de contactos e à formação de novos contactos.

A deteção de contactos é ativada no início da execução do programa de ED, sendo posteriormente ativada quando é ultrapassado um determinado valor de deslocamento. A definição de contacto virtual permite que os contactos estejam ativos (apesar das forças de contacto serem nulas), evitando a sua constante ativação e desativação. É criado um contacto quando a separação entre dois ED é igual ou inferior à tolerância de separação. Existem diversos métodos de deteção de contacto, no entanto não são referidos no presente trabalho. A determinação dos comprimentos de influência dos contactos é feita após a ativação destes.

A atualização de contactos é efetuada no início de cada passo de tempo (ou iteração). A cada passo de tempo, Δt , devido ao incremento do deslocamento dos vértices, é necessário atualizar os parâmetros que definem os contactos, i.e., as coordenadas do contacto, a sua normal, averiguação da necessidade de reclassificação do tipo de contacto e verificação da possibilidade de eliminação por sobreposição ou separação excessivas. Um contacto pode ter as seguintes reclassificações (ver secção 4.3.4): (1) os contactos do tipo i podem-se transformar em contactos do tipo ii ou iii e vice-versa; (2) os contactos do tipo iv não podem sofrer qualquer tipo de transformação; (3) os contactos do tipo v podem transformar-se em contactos do tipo vi e vice-versa e (4) os contactos do tipo vii podem-se transformar em contactos do tipo viii e vice-versa.

4.3.7 Modelo constitutivo dos contactos

O comportamento mecânico das juntas é descrito por modelos constitutivos, que relacionam as forças de contacto com as deformações (na direção normal e tangencial), definidas através do deslocamento nos pontos de contacto, ver secção 4.6. No presente trabalho são seguidas as seguintes relações constitutivas: (1) na direção normal a relação entre a variação da força de contacto normal, $\Delta F_{C,n}$, e o deslocamento normal é linear, e não existe nenhum critério de resistência; (2) na direção tangencial a relação entre a variação da força de contacto tangencial, $\Delta F_{C,s}$, e o deslocamento tangencial é linear até o valor da força de contacto tangencial corresponder a uma condição de deslizamento na junta. Nesta direção a resistência ao deslizamento é simulada pelo critério de Mohr-Coulomb que fornece a força de contacto tangencial máxima, $F_{C,s,max}$, que o contacto pode mobilizar, ver equação (4-4). Para juntas sem preenchimento a coesão pode ser nula.

$$F_{C,s,max} = c + F_{C,n} \tan \phi \quad (4-4)$$

Onde:

- $F_{C,s,max}$ – Força de contacto tangencial máxima;
- c – Coesão;
- $F_{C,n}$ – Força de contacto normal;
- ϕ – Ângulo de atrito interno.

4.4 Carregamento (ação permanente e sobrecarga)

A ação permanente, G , corresponde ao peso próprio dos ED e é determinada automaticamente.

A sobrecarga é designada de força variável pontual, Q , e fica definida pelas suas componentes no referencial global (x_1, x_2) e pelo seu ponto de aplicação que, coincide com um vértice quando se trata de EDP ou com o centro de massa quando se trata de EDC. No caso dos EDP a sobrecarga é de compressão se o seu produto interno pela normal da superfície do elemento for negativa e de tração se o produto interno for positivo, ver Figura 4-2 (c). No caso de EDC é introduzido um parâmetro que torna a ação negativa ou positiva consoante seja de tração ou compressão respetivamente, ver Figura 4-2 (d).

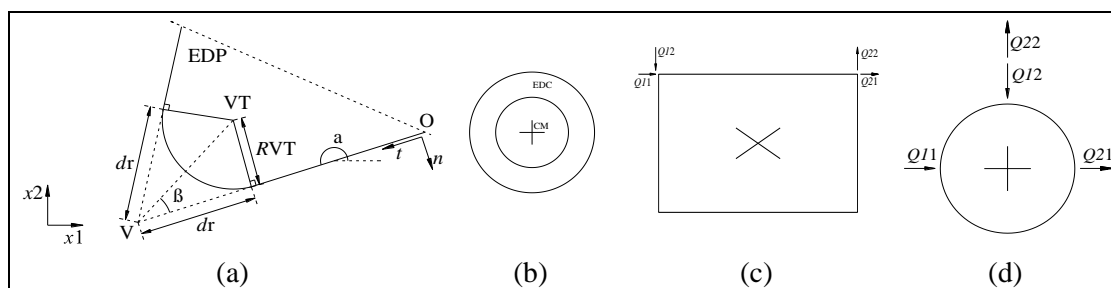


Figura 4-2: Caracterização do arredondamento: (a) do vértice V de um EDP; (b) de um EDC. Aplicação de uma sobrecarga de compressão $Q1$ e de tração $Q2$ num: (c) EDP e (d) EDC. Adaptadas de (Rouxinol, 2007)

4.5 Amortecimento

O MED baseia-se numa formulação dinâmica, sendo necessária a introdução de amortecimento tanto para problemas estáticos como dinâmicos. A análise dinâmica não é abordada por não ser do âmbito deste trabalho. Na simulação de problemas estáticos recorre-se à técnica de relaxação dinâmica (Underwood, 1983 cit. por Rouxinol 2007). Considera-se um amortecimento fictício de modo a reduzir progressivamente a velocidade dos ED por dissipação de energia cinética. Deste modo o movimento de translação e rotação dos ED é suavizado conduzindo a um estado de equilíbrio ou a um mecanismo de colapso do sistema estrutural.

A consideração do amortecimento é obtida através da introdução de forças e momentos de amortecimento, F_D e M_D , nas equações de movimento de translação e rotação dos ED, ver secção 4.6. Pode-se recorrer a dois tipos de amortecimento: (1) amortecimento global (ou amortecimento viscoso) ou (2) amortecimento local (ou amortecimento não viscoso).

(1) O amortecimento global é considerado através de uma força proporcional à velocidade (sentido oposto) e à massa de cada ED, i.e., a constante de proporcionalidade, c , é dada pelo produto da constante de amortecimento global, α_v , pela massa do ED, m . Usualmente a constante de amortecimento global toma valores iguais para movimentos de translação e rotação. Segundo Rouxinol (2007) o valor da constante de amortecimento global, α_v , mais adequado situa-se entre os valores de 500 s^{-1} a 1000 s^{-1} .

No entanto, Cundall (1987, cit. Por Rouxinol 2007) refere que a utilização de um valor para a constante de amortecimento constante para todo o sistema pode conduzir a um processo de convergência muito lento (número de iterações excessivo). O mesmo autor propõe um algoritmo de modo a acelerar o processo de convergência, designado de amortecimento global adaptável, que consiste no ajustamento energético contínuo da constante de amortecimento global.

(2) O amortecimento local é considerado através de uma força de amortecimento de grandeza proporcional às forças não equilibradas e com sentido oposto (Cundall 1987, cit. por Rouxinol 2007), opondo-se ao movimento dos ED. A constante de amortecimento local, α_{nv} , ao contrário da constante de amortecimento global, é constante ao longo da análise e diferente para cada ED, é adimensional, não depende das propriedades dos materiais constituintes do sistema estrutural nem da frequência angular própria do sistema estrutural e os ED em estado estacionário não são amortecidos. Segundo Itasca (2002 cit. por Rouxinol 2007) o valor da constante de amortecimento local é de 0,8 para EDP e de 0,7 para EDC.

Segundo Rouxinol (2007) o amortecimento global, global adaptável e local conduzem a resultados similares. Contudo a adoção do amortecimento global adaptável ou do amortecimento local permitem um menor tempo de cálculo.

4.6 Integração das equações de movimento e passo de tempo

O MED é estabelecido através de duas relações fundamentais: (1) a lei de movimento e a lei de conservação de momento angular (Rouxinol, 2007) com base na segunda lei de Newton ao nível dos ED, que permite determinar o deslocamento de cada ED devido à ação das sobrecargas aplicadas e (2) a lei força-deslocamento ao nível dos contactos, que permite determinar a variação das forças de contacto correspondentes ao deslocamento de dois ED em contacto.

4.6.1 Lei de movimento e lei de conservação do momento angular

Através da lei de movimento e da lei de conservação do momento angular são definidas as equações de movimento de translação e de rotação ver equação (4-5). Uma força, F , aplicada no centro de massa de um ED é igual à derivada da quantidade de movimento desse ED (deslocamento do centro de massa) em ordem ao tempo, obtendo-se a relação força aplicada

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

igual ao produto da massa do ED pela aceleração da gravidade do centro de massa, \ddot{u} . O momento total de um ED, M , devido às forças aplicadas é igual à derivada do momento angular desse ED (ou quantidade de movimento angular) em ordem ao tempo, obtendo-se a relação momento total igual ao produto do momento polar de inércia de massa do ED relativamente a um eixo de rotação perpendicular ao plano do sistema estrutural, I , pela aceleração angular, $\ddot{\theta}$.

$$F = m\ddot{u}_{CM} \quad (4-5)$$

Onde:

F – Força;

m – Massa dos ED;

\ddot{u}_{CM} – Aceleração da gravidade.

4.6.2 Forças não equilibradas

As forças não equilibradas têm componentes para os movimentos de translação e rotação, correspondendo ao somatório das forças (peso próprio e sobrecarga) e momentos reduzidos ao centro de massa de cada ED, respetivamente.

O estado de convergência do sistema estrutural é indicado pelas (1) forças não equilibradas e (2) velocidade dos centros de massa dos ED. Se no decorrer da análise o valor das forças não equilibradas tender para um valor nulo ou para o valor do fator de tolerância de erro, o método converge e há equilíbrio. Se tender para um valor constante não nulo ou aumentar, o método diverge e não há equilíbrio, ocorrendo assim um aumento progressivo da velocidade dos ED.

4.6.3 Lei força deslocamento

As forças de contacto ao nível dos contactos entre ED são pares de ação reação (de acordo com a terceira lei de Newton) e dependem unicamente dos deslocamentos relativos ocorridos ao nível dos contactos. Os deslocamentos são obtidos pela derivada da velocidade relativa no ponto de contacto.

As forças elásticas de contacto normais, $F_{elas,C,n}$, e tangenciais, $F_{elas,C,s}$ a cada passo de tempo (iteração) são obtidas pelo somatório das forças de contacto normais, $F_{C,n}$, e tangenciais, $F_{C,s}$, no passo de tempo anterior com o incremento das forças elásticas de contacto normais, $\Delta F_{elas,C,n}$, e tangenciais, $\Delta F_{elas,C,s}$. Estes incrementos são obtidos pela relação entre as rigidezes normal, K_n , e tangencial, K_s , e os incrementos de deslocamento normal, $\Delta u_{C,n}$, e tangencial $\Delta u_{C,s}$. Ver equação (4-6).

$$\begin{Bmatrix} \Delta F_{elas,C,s} \\ \Delta F_{elas,C,n} \end{Bmatrix} = -E_C \begin{Bmatrix} \Delta u_{C,s} \\ \Delta u_{C,n} \end{Bmatrix} \quad (4-6)$$

Onde:

$\Delta F_{elas,C,s}$ – Incremento das forças elásticas de contacto tangenciais;

$\Delta F_{elas,C,n}$ – Incremento das forças elásticas de contacto normais;

E_C – Matriz constitutiva elástica;

$\Delta u_{C,s}$ – Incremento de deslocamento tangencial;

$\Delta u_{C,n}$ – Incremento de deslocamento normal.

4.6.4 Passo de tempo

As equações de movimento dos ED são integradas no tempo. A integração necessita da utilização de um passo de tempo (iterações ou passos de cálculo), Δt , limitado por um passo de tempo crítico, Δt_{cr} . O passo de tempo crítico é determinado a partir das propriedades de rigidez e de massa do sistema estrutural. Ver equação (4-7).

$$\Delta t = 2\eta \sqrt{\frac{m_{\min}}{K_{\max}}} \leq \Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (4-7)$$

Onde:

Δt – Passo de tempo;

η – Fator que considera a possibilidade de existência de vários contactos para um ED;

m_{\min} – Menor massa entre todos os ED do sistema;

K_{\max} – Rigidez máxima de todos os contactos;

Δt_{cr} – Passo de tempo crítico;

ω_{\max} – Frequência angular própria máxima não amortecida do sistema de N graus de liberdade, N_{GDL} .

Em cada passo de tempo são determinadas as forças de contacto que são adicionadas às forças não equilibradas e às forças de amortecimento (no caso de uma formulação com amortecimento local).

4.7 Comportamento mecânico dos materiais

Para a realização desta secção foram consultados sobretudo os trabalhos de Rouxinol (1999); Costa, C. (2002a); Costa, C. (2002b); Lança (2006); Rouxinol (2007); Costa, C. (2009). Foram ainda contactados com *feedback* positivo Paulo Lourenço, docente no DEC da Universidade do Minho, Paulo Providência, docente da Universidade de Coimbra e o LNEC, através do investigador Vieira de Lemos.

A modelação numérica requer a calibração dos parâmetros do comportamento dos materiais/juntas. Para tal recorre-se à caracterização dos materiais: (1) mecânica; (2) física e (3) química/mineralógica. As caracterizações podem ser efetuadas em ensaios laboratoriais

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

e/ou *in situ*. Os ensaios de caracterização mecânica permitem conhecer a deformabilidade e a resistência dos materiais face às solicitações aplicadas e às deformações resultantes. Os ensaios de caracterização física permitem conhecer a porosidade e absorção da água por parte dos materiais. Estes ensaios permitem determinar a evolução dos processos de degradação dos materiais ao longo da vida das PAAP. Os ensaios de caracterização química/mineralógica contribuem para a compreensão dos processos de degradação dos materiais.

Não são do âmbito deste trabalho a realização de ensaios (laboratoriais e *in situ*) aos materiais constituintes da ponte em estudo, nem os resultados obtidos por ensaios físicos e químico/mineralógicos. Na análise a efetuar são considerados os valores médios para caracterizar os materiais, i.e., unidades de alvenaria, argamassa e material de enchimento, de acordo com diversos ensaios realizados por vários autores.

Em modelos de EDP rígidos, ver secção 4.1, a deformabilidade da alvenaria é dada pela rigidez da junta (rigidez normal, K_n , e rigidez tangencial, K_s), bastando ser definida a massa volúmica das unidades de alvenaria.

4.7.1 Caracterização da alvenaria

O comportamento mecânico da alvenaria é influenciado por dois aspetos: (1) propriedades mecânicas dos materiais que a compõem (unidades de alvenaria e argamassa, quando esta existir) e pela descontinuidade entre os elementos constituintes da estrutura; (2) dimensão e posição dos materiais devido à anisotropia e à heterogeneidade da alvenaria (as juntas constituem planos de descontinuidade e fraqueza da alvenaria onde podem ocorrer abertura/fecho e escorregamento entre unidades de alvenaria).

4.7.1.1 Caracterização das unidades de alvenaria

O comportamento das unidades de alvenaria pode ser traduzido através de valores de: (1) resistência à compressão, f_b ; (2) resistência à tração, f_{bt} ; (3) módulo de elasticidade, E_b , e (4) coeficiente de Poisson, ν_b . No caso de alvenarias com juntas sem preenchimento os valores de f_{bt} são nulos. No Quadro 4-1 são apresentados os resultados obtidos por alguns autores em ensaios para diferentes tipos de materiais pétreos. Apesar do presente trabalho se cingir ao material pétreo granito, são apresentados valores de outros materiais para salientar a diferença de características entre si. De referir que os valores apresentados podem apresentar diferenças devido a vários fatores como a: degradação, local de extração do provete (se na pedreira, se na PAAP), local de origem (regiões de Portugal diferentes e países diferentes).

Relativamente à alvenaria os valores usuais da resistência à compressão da alvenaria encontram-se entre os 5 MPa e os 30 MPa. Os valores usuais do modulo de elasticidade da alvenaria encontram-se entre os 5 GPa e os 15 GPa.

4. Método dos Elementos Discretos

Quadro 4-1: Valores da resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de unidades de alvenaria. Adaptado de (Rouxinol, 2007)

Tipo de material pétreo	Autores (construção)	Resistência à compressão f_b (MPa)	Resistência à tração f_{bt} (MPa)	Módulo de elasticidade E_b (GPa)	Coefficiente de Poisson ν_b (-)
Granito	Rocha, M., 1971	118	6,3	76	0,21
	Teles e Begonha, 1998 ⁽⁸⁾	100 a 250	7 a 25	–	–
	Costa, C., 2002a (Ponte da Lagoncinha ^{(4), (6)})	38,8 a 68,8	3,4 a 7,0	22,5 a 58,2	0,17 a 0,27
	Costa, P., 2003 ⁽⁸⁾	50 a 75	3 a 5	17 a 35	–
	Costa, C. et al, 2005 ⁽⁸⁾	$\leq 0,5$	–	–	–
	Costa, P., 2007 (Ponte de Vila Fria ^{(2), (3), (7)})	60,2 a 78,2 14,9 a 37,8 ⁽¹⁾	3,0 a 4,6	15,5 a 29,4	–
	Muralha, 2000 (Mosteiro da Serra do Pilar ^{(4), (5), (6)})	92,48 a 98,95	3,53	16 a 27	–
Basalto	Rocha, M., 1971 ⁽⁸⁾	215	22,9	100	0,25
Calcário	Rocha, M., 1971 ⁽⁸⁾	113	4,4	83	0,23
	Gago, Alfaiate, Almeida, 2003	33,3	–	14,1	–
Gnaise	Rocha, M., 1971 ⁽⁸⁾	160	4,9	93	0,22
Grés	Rocha, M., 1971 ⁽⁸⁾	82,0	3,7	53,0	0,25
	Page, 1993 ⁽⁸⁾	–	22 a 44	–	–
Arenito	Rocha, M., 1971 ⁽⁸⁾	40,0	–	–	–
	Page, 1993 ⁽⁸⁾	–	22 a 44	–	–
	Oliveira, Lourenço, Roca, 2000 ^{(2), (7)}	81,4 ⁽⁹⁾ 57,1 ⁽¹⁰⁾	–	15,42 ⁽⁹⁾ 14,80 ⁽¹⁰⁾	–
<p>⁽¹⁾ Provetes saturados. ⁽⁶⁾ Norte de Portugal. ⁽²⁾ Ensaio realizado e posterior tratamento estatístico dos dados segundo a Norma NP 1926-2000. ⁽⁷⁾ Espanha. ⁽³⁾ Extraído de pedraira. ⁽⁸⁾ Trabalhos realizados com varios ensaios sobre materiais pétreos. ⁽⁴⁾ Extraído <i>in situ</i>. ⁽⁹⁾ Ensaio realizado em provetes cilindricos. ⁽⁵⁾ Material pétreo em estado de deterioração. ⁽¹⁰⁾ Ensaio realizado em provetes prismáticos.</p>					

4.7.1.2 Caracterização das juntas

O comportamento das interfaces entre as unidades de alvenaria pode ser traduzido através de valores de: (1) ângulo de atrito interno, ϕ ; coesão, c ; ângulo de dilatância, que por se aplicar mais a alvenarias confinadas (Lourenço, 1996 e Sîncraian, 2001 cit. por Rouxinol 2007) sai do âmbito do presente trabalho; (2) força máxima de tração, $F_{t,max}$; (3) rigidez normal, K_n e (4) rigidez tangencial, K_s . Para a determinação dos valores anteriormente referidos são realizados ensaios de compressão e de corte em provetes constituídos por unidades de alvenaria justapostas com ou sem argamassa, para obter a resistência normal em função do

Onde:

- K_n – Rigidez normal das unidades de alvenaria;
- K_s – Rigidez tangencial das unidades de alvenaria;
- E_b – Módulo de elasticidade das unidades de alvenaria;
- L_b – Espessura das aduelas do arco;
- G_b – Módulo de distorção das unidades de alvenaria;
- ν_b – Coeficiente de Poisson das unidades de alvenaria.

4.7.2 Caracterização do material de enchimento

O comportamento do material de enchimento é determinado através da caracterização do material: (1) mecânica e (2) física.

(1) A caracterização mecânica do material de enchimento (no contexto da modelação numérica) é determinada através de ensaios de caracterização de solos (e.g., ensaios triaxiais e ensaios endométricos), permitindo obter (i) parâmetros elásticos e (ii) parâmetros de evolução do comportamento em regime não linear. Sendo que no primeiro caso são determinados o módulo de elasticidade, E , o peso volúmico, γ , e o coeficiente de Poisson, ν . No segundo caso são determinadas curvas que representam a resposta do material em termos de tensões versus deformações, o ângulo de atrito, ϕ , e a coesão, c .

(2) A caracterização física do material de enchimento é obtida através de curvas granulométricas, índice de vazios, teor em água e grau de compactação.

No entanto, tendo em consideração o referido na secção 2.1.1.2, deve-se ter em consideração que o material de enchimento pode não apresentar a mesma composição em toda a sua extensão.

Como não é do âmbito do presente trabalho a realização de ensaios são considerados os valores obtidos em trabalhos similares.

4.8 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais considerações sobre os ED, nomeadamente sobre EDP, e sobre o programa utilizado, LFE-MEDM, para a realização do capítulo 6.

As estruturas de alvenaria são representadas por modelos, que correspondem a malhas que são constituídas por elementos independentes, ED. Os ED contactam entre si através das discontinuidades, juntas. Os seus vértices são arredondados, permitindo definir de forma unívoca as direcções normal e tangencial do contacto entre os ED e o movimento dos ED de forma contínua durante a análise.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

O mais usual na análise numérica é considerar como principais responsáveis pela deformação do modelo os movimentos ao nível das juntas, i.e., movimentos de abertura, fecho, rotação e escorregamento. A superfície de contacto entre os ED é usualmente representada por pontos onde se concentram as propriedades das juntas e através dos quais se transmitem as forças de contacto (normal e tangencial) entre os ED - contacto pontual. O comportamento mecânico das juntas é descrito por modelos constitutivos, que relacionam as forças de contacto entre ED com as deformações. As deformações são definidas através do deslocamento nos pontos de contacto nas direções normal e tangencial, permitindo a determinação das forças de contacto. Geralmente, na direção normal é adotada uma relação linear sem limites e na direção tangencial é adotada uma relação linear até à força de contacto tangencial corresponder a uma condição de deslizamento na junta. Deste modo, a força de contacto tangencial máxima segue o critério de Mohr-Coulomb, dependendo do valor da força de contacto normal, do ângulo de atrito e da coesão.

Quando o objetivo é determinar a capacidade de carga do modelo, recorre-se a modelos constitutivos em termos de forças, uma vez que nestes modelos o valor da rigidez é igual para todos os ED do modelo. O estado de convergência ou de colapso dos modelos em análise é indicado pelas forças não equilibradas e pela velocidade dos ED ao nível dos seus centros de massa. Quando as forças não equilibradas tenderem para um valor constante diferente de zero ou diferente de uma tolerância imposta o modelo entra em colapso, ocorrendo um aumento progressivo da velocidade dos ED. No modelo de ED, é necessário diminuir a velocidade dos ED por dissipação de energia. Para tal recorre-se a um amortecimento fictício, que consiste na introdução de forças e momentos de amortecimento nas equações que representam o movimento dos ED durante a análise. Através da lei de movimento e da lei da conservação do momento angular são determinados os deslocamentos de cada ED devido à ação das sobrecargas. Através da relação força/deslocamento ao nível dos contactos é determinada a variação das forças de contacto correspondentes ao deslocamento entre ED em interação.

É ainda necessário representar as propriedades mecânicas dos materiais constituintes, de modo a obter o comportamento da estrutura de alvenaria. Deste modo o comportamento das unidades de alvenaria é traduzido pela sua resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. O comportamento das juntas é usualmente traduzido pelo ângulo de atrito interno, coesão, rigidez normal e rigidez tangencial. O mesmo se passa relativamente ao enchimento, que se pode comparar a solos reconstituídos. Assim, o seu comportamento é usualmente traduzido pelo seu módulo de elasticidade e pelo seu peso volúmico.

5. Relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

Com o presente capítulo pretende-se apresentar o relatório de inspeção e diagnóstico da ponte em estudo, Ponte Românica de Mondim da Beira.

Com a informação dos capítulos 2 e 3 foi elaborada uma proposta de ficha de inspeção visual, que dada a sua extensão, se encontra no Apêndice C, Quadro C-1. A ficha de inspeção visual está dividida em três partes: identificação e características gerais da PAAP; registo de danos e anexos / outras informações. Da primeira parte constam: (1) dados gerais; (2) ocorrência de intervenções e de alterações (3) constituição; (4) geometria. Da segunda parte constam: (5) danos estruturais; (6) danos não estruturais e (7) Observações. A realização da primeira parte da ficha baseou-se na informação apresentada do Quadro 2-1 ao Quadro 2-3; na Figura 2-1; Figura 2-3 e Figura 2-8. A realização da segunda parte da ficha baseou-se na informação apresentada do Quadro 3-2 ao Quadro 3-5. Estes quadros podem ser consultados como auxiliares para o preenchimento dos campos da ficha de inspeção visual. É seguida a notação apresentada nas secções 3.2.2.

Posteriormente foram realizadas duas visitas à ponte em estudo a fim de: (1) efetuar a inspeção visual; (2) detetar erros e/ou lapsos na proposta de ficha de inspeção visual elaborada e (3) observar possíveis diferenças após sete meses. A primeira visita foi realizada no dia 11 de fevereiro de 2011 e a segunda visita no dia 23 de setembro de 2011. Durante as duas visitas, e com base na informação recolhida, foi preenchida a proposta de ficha de inspeção visual, que pode ser consultada no Apêndice D e efetuado, como complemento, um levantamento fotográfico. Para conhecer a geometria da ponte, foi efetuado pela Câmara Municipal de Tarouca o levantamento topográfico. Foram consultados o Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana (IHRU), nomeadamente o Sistema de Informação para o

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Património Arquitetónico (SIPA), ver Anexo C, e o Instituto de Gestão do Património Arquitetónico e Arqueológico (IGESPAR). De todos os contactos referidos houve um *feedback* positivo.

Com base na informação reunida na ficha de inspeção visual, e tendo em consideração as fases do diagnóstico de intervenção em PAAP apresentadas no Quadro 3-14 (secção 3.3) foi elaborado o presente capítulo. Este capítulo tende a aproximar-se muito de um documento tipo Relatório de Inspeção e Diagnóstico. Assim, pode ser entendido como parte integrante de um relatório de inspeção e diagnóstico, se bem que terá que se ter presente toda a notação utilizada no capítulo 3. Este relatório é ainda composto pelos Anexos I e II, que dada a sua extensão, se encontram no Apêndice E e F do presente trabalho. Eventualmente o relatório de inspeção e diagnóstico completo teria que contemplar as características dos materiais cuja tarefa apenas seria possível através da realização de ensaios.

Assim na secção 5.1 é apresentada a descrição da ponte, na secção 5.2 as intervenções e alterações efetuadas na ponte e junto desta. Na secção 5.3 é referido o levantamento geométrico da ponte. Na secção 5.4 são apresentados os danos (não estruturais e estruturais) observados durante a inspeção visual e na secção 5.5 é apresentado o diagnóstico e uma proposta de intervenção na ponte. Por fim, na secção 5.6 são apresentadas as considerações finais. De referir que as fotografias referidas ao longo do presente capítulo se encontram nos Anexos I e II do relatório (Apêndices E e F, respetivamente).

5.1 Descrição da Ponte Românica de Mondim da Beira

A ponte em estudo atravessa o rio Barosa e situa-se na Rua José Fernandes, Lugar do Outeiro, no Lugar de Mondim de Baixo, Freguesia de Mondim da Beira, Concelho de Tarouca, Distrito de Viseu, com acesso pela Estrada Nacional EN 226 (Tarouca/Moimenta), ver Figura 5-1. A orientação da ponte é SO/NE (sudoeste/nordeste). O rio Barosa nasce na Serra de Leomil e desagua no Rio Douro.

Consultando o endereço de internet do Instituto de Meteorologia de Portugal (Portugal, Instituto de Meteorologia de Portugal) a região de Mondim da Beira encontra-se num clima de estepe fria e de latitude média. Não foi possível ter acesso aos dados sismográficos na região onde se localiza a ponte devido aos custos associados à receção desta informação por parte do Instituto de Meteorologia de Portugal. Também não foi possível obter informação relativamente à orientação dos ventos.

A ponte em estudo, ver Figura 5-2, encontra-se registada no Inventário Português Arquitetónico (IPA) do SIPA sob a designação de Ponte Românica de Mondim da Beira com o N° IPA de PT011820040008, é considerada Imóvel de Interesse Público (IIP) pelo

5. Relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

IGESPAR, segundo o Decreto n.º 40 361, DG 228 de 20 Outubro de 1955. Ainda segundo o IGESPAR não é abrangida nas Zonas Especiais de Proteção (ZEP), nem nas Zonas de Proteção (ZP). Segundo o SIPA a ponte é propriedade pública (Municipal).

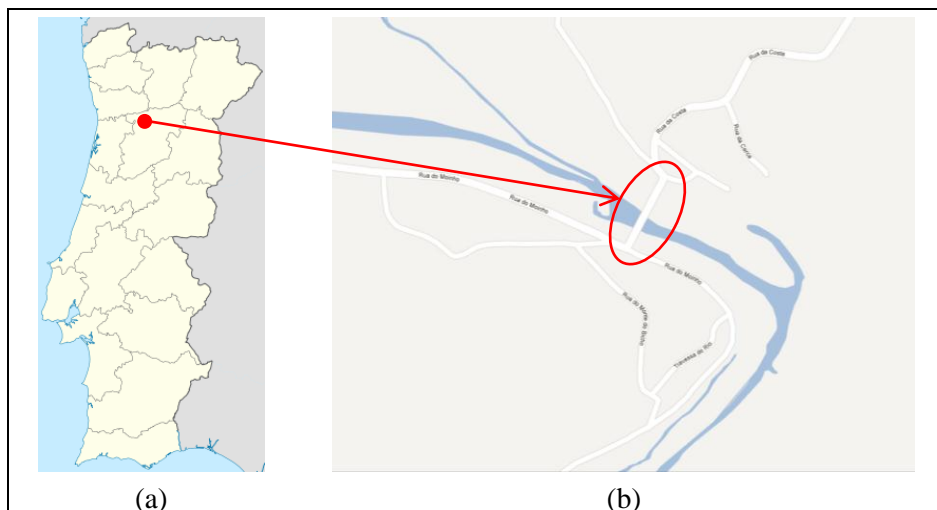


Figura 5-1: Localização da ponte em estudo (a) em Portugal Continental. Extraída de (Wikipédia) e (b) na Freguesia de Mondim da Beira. Extraída de (GoogleMapas)



Figura 5-2: Fotografia da Ponte Românica de Mondim da Beira: (a) fotografia aérea. Extraída de (Portugal, Município de Tarouca) e (b) alçado montante. Fornecida pela Câmara Municipal de Tarouca

Trata-se de uma ponte medieval de arquitetura românica, cuja data de construção se conjectura, segundo o SIPA entre os séculos XIII e XIV e segundo o IGESPAR na transição para o século XIV. Ainda segundo o IGESPAR aparenta a existência de mais de uma fase construtiva, localizando-se na via medieval que liga o Concelho de Mondim da Beira ao Concelho de São João de Bastos. Além deste acesso apenas existe uma estrada a cerca de 6 km que atravessa várias localidades.

A ponte foi construída em alvenaria de granito aparelhada, não apresentando juntas com grande expressão (ver Quadro 2-2) nos arcos, muros de tímpano e guardas. Não foi possível saber a constituição do enchimento, para tal seria necessário a realização de ensaios. A ponte tem a sua fundação num afloramento rochoso de granito, que se encontra parcialmente oculto

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

por obras destinadas à praia fluvial que ocupa os dois alçados. É constituída por dois arcos desiguais em dimensão e tipologia, sobre os quais assenta um tabuleiro em cavalete. Segundo o IGESPAR o tabuleiro original é composto por um lajedo de granito e segundo a Câmara Municipal de Tarouca entre estas unidades de alvenaria existiam unidades de alvenaria de pequenas dimensões. Contudo atualmente apenas é visível uma camada de betuminoso, mantendo-se o tabuleiro original por baixo. A ponte atinge a sua cota mais alta sobre a aduela de fecho do arco de maior dimensão. Segundo o SIPA o arco de maior dimensão é ligeiramente apontado e o de menor dimensão é ogivado (ver Figura 2-8). Entre os dois arcos, e a montante, encontra-se um talha-mar triangular. As principais dimensões da Ponte Românica de Mondim da Beira apresentam-se no Quadro 5-1.

Quadro 5-1: As principais dimensões da ponte

	Arco			Pilar	Talha-mar	Tabuleiro	Guardas
	Maior	Menor					
Flecha	7,2	2,5	Largura	4,9	4,9	4,0	0,4
Vão	15,7	4,4	Comprimento	4,6	----	56,5	56,5
Espessura	1,0	1,0	Altura	2,1	2,1	----	0,9 / 1,2 ⁽¹⁾
Recobrimento	0,0	3,0					

⁽¹⁾ Altura sobre a aduela de fecho / altura na restante PAAP.

Consultar o Anexo I do relatório, Quadro E-1 (Apêndice E), onde consta: (1) localização da ponte; (2) esquemas; (3) levantamento fotográfico geral e para cada elemento constituinte da ponte. Este apresenta a informação referida a seguir sob a forma fotográfica. Contudo algumas das fotografias são referidas no texto.

Pressupõe-se que houve colocação de leitada de argamassa de cal de modo a uniformizar o contacto entre as unidades de alvenaria, uma vez que no arco menor é visível esta argamassa esmagada a ocupar as juntas (ver Figura F-20 e Figura F-21).

Em ambos os arcos a aduela de fecho é mais saliente, para baixo e para cima, que as aduelas de contrafecho e as restantes (ver Figura E-5 e Figura E-6). Nos dois arcos o encontro é saliente relativamente ao intradorso dos arcos, existindo saliências no intradorso dos arcos para apoio dos cimbres (ver Figura E-8). No arco menor existe sensivelmente ao nível das impostas, e de cada lado, uma fila de quatro saliências e no arco maior duas filas de quatro saliências, não sendo a altura a que se encontram coincidente entre os dois arcos, ver Figura E-3 e Figura E-4. As aduelas dos dois arcos apresentam uma largura reduzida em comparação com a espessura. É visível uma sigla numa unidade de alvenaria na ligação muro de tímpano/do arco menor no alçado jusante, lado NE (ver Figura E-3 (e)). O talha-mar tem uma altura de aproximadamente uma fiada acima da segunda fila de saliências do arco maior, apresentando continuidade de construção com o pilar até uma altura inferior às saliências (ver Figura E-3 (a) e (d), Figura E-4 (a) e (d)). As guardas são compostas por duas fiadas, em altura, de unidades de alvenaria (ver Figura E-6, Figura E-7, Figura E-14, Figura E-15 e

5. Relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

Figura E-16). Na última fiada das guardas é visível a existência de cavidades e dos elementos de ligação (gatos em chumbo) entre as unidades de alvenaria justapostas (ver Figura E-16). As duas fiadas não se mantêm até ao final do comprimento da ponte no lado SO (ver Figura E-15). O muro de tímpano em ambos os alçados encontra-se ligeiramente saliente em relação às guardas (ver Figura E-10 (c)). No encontro do arco maior nos alçados montante e jusante a parte inferior encontra-se saliente em relação à parte superior (ver Figura E-10 (a) e (b)). O talha-mar apresenta um capeamento de unidades de alvenaria de pequena espessura (ver Figura E-12). O arco maior não apresenta recobrimento (ver Figura E-5 (a)), sendo visível no tabuleiro, em ambos os alçados a sua forma sob o tabuleiro e as aduelas desde a aduela de fecho, até à secção do rim (ver Figura E-6 e Figura E-7 (a)), isto aquando da primeira visita.

A ponte não apresenta sistema de drenagem. Junto ao encontro do arco maior, no alçado montante, lado SO, existe uma construção que parece ser um moinho (ver Figura E-8 (a) e ((f)). Entre esta construção e a ponte é visível o que parece ser um muro que tem continuidade de construção com o encontro do arco maior (ver Figura E-3 (a), Figura E-4 (b), Figura E-8 (a) e (f)). Encostado ao encontro do arco maior, no alçado jusante, existe, o que parece ser, um muro sem continuidade de construção com o encontro do arco maior (ver Figura E-3 (b) e Figura E-4 (b), Figura E-8 (b) e (f)). No acesso SO existe um muro confinante com o encontro do arco maior em ambos os alçados, estando o do alçado montante interrompido por um edifício de alvenaria de pedra (ver Figura E-9 e Figura E-13 (b)), no acesso NE, no alçado montante existe um muro confinante e que se ergue sobre uma parte do encontro, servindo de parque de estacionamento (ver Figura E-9 (c)) e no alçado jusante um edifício de alvenaria de pedra e um edifício de madeira de apoio à praia fluvial (ver Figura E-8 (d), Figura E-13 (a) e Figura E-14 (b)).

5.2 Intervenções e alterações na Ponte Românica de Mondim da Beira

Não se encontra documentado no IGESPAR nem no SIPA a realização de inspeções nem de intervenções na ponte. Consultando o Anexo I do relatório, Quadro E-1 (Apêndice E), é possível obter mais informação do que se segue sob a forma de fotografia. As fotografias são referidas no texto através da numeração da respetiva legenda.

Relativamente a operações de manutenção, foi realizada em 2011 a limpeza de alguma vegetação que se localizava nas juntas, por recurso a meios manuais sem produtos químicos/fitofarmacêuticos. Não foi possível arranjar imagens do decorrer desta operação.

Relativamente a operações de intervenção e alterações, refere-se, salientando que não foi possível arranjar imagens do decorrer das obras referidas:

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

(1) Em 1985 com vista à impermeabilização do tabuleiro foi efetuada sobre o tabuleiro original uma pavimentação através de uma camada de betuminoso com aproximadamente 10 cm de espessura (ver Figura E-14). Segundo a Câmara Municipal de Tarouca as unidades de alvenaria constituintes do tabuleiro original apresentavam sinais de grande desgaste. O enchimento começou a sofrer infiltrações de água através das juntas do tabuleiro. As unidades de alvenaria de menores dimensões começaram a afundar-se no enchimento. Os veículos que atravessavam a ponte provocavam grandes vibrações. Após esta intervenção deixaram de ser sentidas vibrações aquando da passagem de veículos. Foi ainda restringido o trânsito, tendo sido colocado em ambos os acessos ao tabuleiro da ponte (ver Figura E-16 (a) e (b)) um sinal vertical de trânsito proibido a automóveis de mercadorias (automóveis ligeiros e pesados de mercadorias, o que corresponde a um limite máximo de 3,5 toneladas, de acordo com o Código da Estrada).

(2) Em 1993 foram efetuadas obras junto à ponte com destino a transformar o local que circunda a ponte em praia fluvial:

(i) Junto ao alçado jusante do lado Este da ponte foi construído um edifício de madeira de apoio à praia fluvial (ver Figura E-8 (d)).

(ii) Junto aos apoios da ponte foram aplicados pavimentos constituídos por unidades de alvenaria de dimensão variável e argamassa de cimento que encobrem parcialmente o afloramento rochoso (ver Figura E-3 (c)).

(iii) Foram colocadas escadas em madeira preenchidas com areia no alçado jusante junto ao pilar da ponte e caminhos metálicos junto às margens do rio (ver Figura E-11 (c)).

(iv) Foi construída o que parece ser uma pequena represa que serve de passagem entre as margens do lado jusante da ponte e onde é colocado, aquando da época balnear, um corrimão metálico (ver Figura E-2 (b)).

(v) Junto aos muros de tímpano e encontros existem árvores de grande e médio porte.

(vi) Nas margens do rio foram talhados caminhos e escadas no maciço rochoso e construídos caminhos com o mesmo material referido para os pavimentos junto à PAAP (ver Figura E-8 (b) e (c)).

(vii) No lado SO no alçado jusante no encontro da ponte foi colocada uma escada metálica (ver Figura E-8 (b)).

(viii) Foi colocada iluminação (candeeiros apoiados nas juntas) no intradorso dos dois arcos e no muro confinante com o encontro do arco maior no alçado jusante, lado SO (ver Figura E-8 (a) e (d), Figura E-9 (b)) e colocação de um candeeiro junto ao encontro do arco maior no alçado montante, lado SO (ver Figura E-9 (a)).

(3) Entre o arco de maior dimensão e o encontro do lado SO foi colocada uma conduta metálica que está fixa à ponte por meio de barras e parafusos, encontrando-se encoberta no alçado jusante por uma camada constituída por unidades de alvenaria de dimensão variável e argamassa de cimento (ver Figura E-8 (a) e Figura E-11(a)). Não se sabe quais foram as obras de escavação junto ao encontro do arco maior necessárias para a colocação desta tubagem, quando ocorreram estas obras e o motivo da colocação.

5. Relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

(4) Nas guardas e no encontro a SO, no alçado jusante, existem juntas preenchidas com argamassa de cimento (ver Figura E-9 (b) e Figura E-16 (e)). Em algumas unidades de alvenaria das guardas e em algumas aduelas do alçado jusante são visíveis ferros (ver Figura E-7). Não foi possível saber quando ocorreram estas operações e o motivo da colocação dos ferros referidos.

(5) Em Setembro de 2011 com o objetivo de regularizar e eliminar a degradação do tabuleiro, foi realizada uma ligeira operação de pavimentação com colocação de uma camada de betuminoso com aproximadamente 3 cm de espessura. Esta nova camada encobre as aduelas do arco maior antes visíveis, à exceção da aduela de fecho (ver Figura E-15).

5.3 Levantamento geométrico da Ponte Românica de Mondim da Beira

O levantamento geométrico da ponte foi realizado com equipamento topográfico. O levantamento e respetivo desenho do alçado jusante foram efetuados pelo topógrafo Carlos Barros e pelo desenhador Paulo Trindade da Câmara Municipal de Tarouca (ver Figura E-1, onde se apresenta a planta, o alçado e o corte transversal da ponte e as principais dimensões).

5.4 Danos observados na Ponte Românica de Mondim da Beira

Os danos estruturais observados foram a deformação excessiva do arco maior, lado SO, afastamento das unidades de alvenaria no arco menor, o destacamento de uma unidade de alvenaria nas guardas e destacamento de uma unidade de alvenaria do arco maior. Refere-se ainda como dano estrutural a degradação do material de enchimento de acordo com a informação recolhida. Os danos não estruturais estão presentes de uma forma quase generalizada na ponte. Foram observados depósitos de origem biológica, presença de água, humidade e eflorescências, degradação das unidades de alvenaria.

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos danos observados, encontrando-se uma informação mais detalhada no Anexo II do relatório, Quadro F-1 (Apêndice F). No Quadro 5-2 são apresentados os danos observados e o número da secção do Anexo II do relatório a consultar, uma vez que este se encontra subdividido para os diferentes tipos de dano. Do Anexo II constam: (1) localização da ponte; (2) danos observados; (3) esquema da ponte com localização dos danos; (4) descrição dos danos por subtipo; (5) ensaios realizados; (6) possíveis causas dos danos; (7) consequências dos danos; (8) possíveis formas de prevenção dos danos; (9) possíveis formas de intervenção sob os danos e (10) observações. Neste Anexo é seguida a notação apresentada nas secções 3.2.2 e 3.3. As soluções de intervenção apresentadas baseiam-se no constante do Quadro 3-16, Quadro 3-17 e do Quadro 3-18 da secção 3.3. É seguida a notação apresentada nas secções 3.2.2 e 3.3 e no Apêndice D.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro 5-2: Danos observados na Ponte Românica de Mondim da Beira e respetivas secções do Anexo II do relatório a consultar

Danos	Estruturais							Não estruturais											
	D1	D1.1	D2	D2.1	D6	D6	D7	D7.1	D8	D8.1	D8.2	D8.3	D9	D9.1	D9.2	D10	D10.1	D10.2	D10.3
Anexo II	Secção 1	Secção 2	Secção 2	Secção 3	Secção 3	Secção 3	Secção 4	Secção 4	Secção 5	Secção 5	Secção 5	Secção 5	Secção 6	Secção 6	Secção 6	Secção 7	Secção 7	Secção 7	Secção 7

Destacamentos de unidades de alvenaria e colapso da ponte em arco de alvenaria: D1

Destacamento de unidades de alvenaria: D1.1

Apesar da vegetação existente é visível uma unidade de alvenaria destacada na fiada ao lado da secção de fecho localizada aproximadamente a meio da largura do arco maior.

Danos localizados nos arcos: D2

Fendilhação longitudinal paralelamente ao intradorso: D2.1a

O arco menor apresenta afastamento das unidades de alvenaria no seu intradorso, i.e., abertura de fendas longitudinais entre a secção de fecho e a secção do rim de uma forma distribuída e paralela ao intradorso. Não existem arquivos nem informação relativamente a esta deformação e não foram fornecidas informações relativas a intervenções no arco menor, por parte da Câmara Municipal de Tarouca, do IGESPAR e do IHRU.

Deformação excessiva: D2.4

O arco maior apresenta uma deformação na sua geometria, mais visível no lado SO, sem visualização de abertura de juntas. Não há registo por parte da Câmara Municipal de Tarouca de quando tenha surgido esta deformação. Como o afloramento rochoso, que serve de fundação à ponte, se encontra parcialmente encoberto pelas obras destinadas à praia fluvial não é possível visualizar quaisquer danos nessa zona e logo a sua falta de capacidade de suporte. Não foi possível saber se ocorreu alguma obra, do tipo escavação profunda junto à ponte, que pudesse causar a perda de capacidade resistente da fundação (D5.1). de referir que a degradação do afloramento rochoso (D10.1 e D10.2) num estado elevado conduz à incapacidade deste desempenhar a sua função de suporte da ponte (D5.1). Nas guardas do lado SO é visível um abatimento.

Danos e degradações localizadas no enchimento: D6

De acordo com a informação fornecida pela Câmara Municipal de Tarouca, ver secção 5.2, pode-se concluir existir alguma degradação não visível do material de enchimento.

Danos localizados nos elementos secundários: D7

Desmoronamento das guardas: D7.1

A última unidade de alvenaria da última fiada da guarda no alçado montante, lado SO encontra-se ligeiramente destacada em relação à primeira fiada. Na zona mais elevada da

5. Relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

ponte, no alçado montante, o elemento de ligação entre unidades de alvenaria não existe. Esta situação não se observa no alçado jusante.

Fendilhação no tabuleiro: D7.3

Aquando da primeira inspeção a camada de betuminoso apresentava uma elevada degradação, sendo visível uma faixa longitudinal ao longo de quase todo o tabuleiro, com uma largura considerável, reparada. Posteriormente foi colocada uma nova camada de betuminoso que encobriu a degradação existente.

Depósitos de origem biológica: D8

Vegetação de médio e pequeno porte: D8.1

A ponte apresenta uma grande quantidade de vegetação de médio porte (plantas trepadeiras) no intradorso e extradorso do arco maior, no muro de tímpano, talha-mar e guardas no alçado montante, lado NE e ainda no extradorso do arco maior no alçado jusante junto à aduela de fecho. Podem-se observar os caules das plantas, alguns já secos, com origem nas juntas. A presença acentuada da vegetação no intradorso do arco maior impede a observação de possíveis danos. Existe vegetação de diversas espécies de pequeno porte nas juntas de uma forma generalizada por todos os elementos da ponte. Junto à PAAP ao nível dos encontros e pilar existem árvores de médio e grande porte.

Musgos: D8.2

Os musgos desenvolvem-se nas zonas mais sombrias da ponte. Deste modo encontram-se: no encontro do arco maior, no alçado jusante, junto ao afloramento rochoso, bem como no próprio afloramento; no lado NE do talha-mar (do lado do arco menor) e na zona saliente que liga o muro de tímpano e a primeira fiada das guardas nos dois alçados.

Líquenes: D8.3

Os líquenes encontram-se na generalidade da ponte e ocupam quase totalmente a superfície das unidades de alvenaria. Encontram-se das variedades incrustante e folhosa e com diferentes tonalidades: branco, amarelo, laranja, verde e cinzento. A sua presença mostra que se está numa zona sem grandes níveis de poluição, contudo a sua presença contribuiu para a degradação pétreo, devido à sua produção de ácidos, facilitando o aparecimento de plantas (D8.1), uma vez que são seres colonizadores primários.

Excrementos de aves e depósitos de terra vegetal: D8.4

Existem depósitos de terra vegetal, (D8.4b) nas zonas onde se localizam vegetação (D8.1) e musgo (D8.2). Deste modo foram observados depósitos: no encontro do arco maior, no alçado jusante; na zona saliente que liga o muro de tímpano e a primeira fiada das guardas nos dois alçados. Foram ainda observados depósitos: no intradorso e extradorso do arco maior; no muro de tímpano; no talha-mar e guardas, no alçado montante, lado SE e no extradorso do arco maior, no alçado jusante, junto à aduela de fecho.

Nas unidades de alvenaria do encontro do arco maior no alçado jusante junto ao afloramento rochoso existe uma camada de depósitos de terra que pode ser resultante do salpicar da água que, durante as chuvas, cai no afloramento rochoso e transporta depósitos de terra aí existentes.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Refere-se ainda a existência de lixo colocado na ponte, e.g., latas e cigarros nas aberturas para apoio ao cimbre, maços de tabaco, papéis e plásticos amarrotados nas juntas das guardas e nas aberturas para colocação do cimbre, e no intradorso do arco menor. A existência deste lixo pode contribuir para o desenvolvimento de depósitos que se acumulam nas juntas, podendo contribuir para a degradação das unidades de alvenaria (D10.2), mas sem consequência a nível estrutural.

Presença de água e humidade: D9

Escorrências/depósitos de água e manchas de humidade: D9.1

Os dois arcos apresentam no seu intradorso: escorrências, ainda que em menor quantidade no arco menor, e ainda manchas de humidade de tonalidade escura. No afloramento rochoso sob o pilar, lado SO, e sob o encontro do arco maior existem manchas de humidade de tonalidade escura e verde acima do nível do curso de água.

Eflorescências: D9.2

Os dois arcos apresentam no seu intradorso eflorescências, ainda que em muito pouca quantidade no arco menor.

Degradação das unidades de alvenaria: D10

Erosão das unidades de alvenaria: D10.1

De um modo generalizado as unidades de alvenaria apresentam um arredondamento das arestas e vértices. Em algumas unidades de alvenaria encontra-se um significativo desgaste no seu centro, assemelhando-se em alguns casos a cavidades no centro ou junto aos vértices. O talha-mar apresenta um acentuado desgaste das unidades de alvenaria no seu vértice e no lado SO (voltado para o arco maior).

Meteorização das unidades de alvenaria: D10.2

De um modo generalizado na zona não encoberta pelos danos D8 as unidades de alvenaria apresentam sinais de degradação, apresentando um aspeto rugoso devido à perda de minerais constituintes na sua superfície. Em algumas unidades de alvenaria ocorreu destacamento de placas de material pétreo da superfície com posterior queda dessas placas. Algumas unidades de alvenaria apresentam total ou parcialmente a camada superficial com uma tonalidade acastanhada. As zonas não acastanhadas devem-se ao destacamento e posterior queda dessa placa acastanhada. Em algumas unidades de alvenaria, após formação de fendas oblíquas os vértices destacaram-se, não sendo já visíveis em alguns casos.

No arco menor existe uma fenda oblíqua, visível no intradorso e no extradorso, junto ao talha-mar, ocupando duas unidades de alvenaria. Ainda no arco menor é visível uma fenda ao longo da altura de uma unidade de alvenaria aproximadamente a meio do intradorso e perto da secção de fecho. No encontro do arco maior no alçado jusante, lado SO, existem algumas unidades de alvenaria com fendas verticais ao longo de toda ou parte da sua altura. A superfície destas fendas apresenta algum desgaste, observando-se o afastamento entre as duas parcelas das unidades de alvenaria.

5. Relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

Crostas negras e filmes negros: D10.3

O alçado montante na sua generalidade apresenta crostas negras e filmes negros, sendo mais visíveis no recobrimento e no extradorso do arco menor e no encontro do arco maior.

5.5 Diagnóstico e proposta de intervenção na Ponte Românica de Mondim da Beira

De referir que as causas apontadas podem não ser as reais, uma vez que numa inspeção visual não é possível ter acesso a todos os aspetos, e como referido no capítulo 3, a um dano podem estar associadas causas não perceptíveis ou mais do que uma causa e ser apenas observada uma delas.

Os danos observados na ponte denotam a falta de um plano de manutenção e inspeção (ver secção 5.2) associado às ações degradantes. Recomenda-se assim, seguir um adequado plano de manutenção e de reabilitação/reforço típico/padrão de PAAP, não intrusivo de acordo com as recomendações do ICOMOS e de acordo com o IHRU, tendo em consideração que se está perante uma ponte classificada.

Como forma de intervenção sobre os danos observados, ver secção 3.3, recomenda-se:

(1) A limpeza dos paramentos e dos elementos secundários (MC1) de modo a remover a vegetação e raízes, musgos e líquenes (D8); as eflorescências e manchas de humidade (D9) e as crostas negras e os filmes negros (D10.3). A ponte fica deste modo preparada para as posteriores operações de intervenção. Não se deve recorrer a produtos que causem degradação das unidades de alvenaria nem se deve recorrer a métodos que causem abrasão ou degradação da superfície das unidades de alvenaria (ver Quadro 3-13). Uma vez que a degradação das unidades de alvenaria não é igual em toda a extensão da ponte e pode apresentar diferentes necessidades de intervenção, é aconselhado a realização de ensaios nas unidades de alvenaria com produtos e métodos a aplicar antes da sua efetiva aplicação.

(2) A ponte sofreu infiltrações no enchimento no passado através do tabuleiro original e posteriormente através das camadas de betuminoso degradado. A inexistência de leitada de argamassa nas juntas dos paramentos também teve o seu contributo para as infiltrações no enchimento, bem como a inexistência de um sistema de drenagem de águas pluviais. De modo a evitar: a evolução da degradação do material de enchimento (D6); a criação de condições para o desenvolvimento de depósitos de origem biológica (D8); a desagregação das unidades de alvenaria (D10.2) e o aparecimento de fendas nos paramentos da ponte (D2.1, D2.2, D2.3 e D3.2) devem ser seguidas medidas para evitar/diminuir infiltrações para o enchimento. Para tal, recomenda-se atuar ao nível do tabuleiro. Pode-se recorrer a duas opções: (i) colocar à vista o tabuleiro original (ME1), com remoção das camadas betuminosas existentes e

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

colocação de unidades de alvenaria em falta similares às existentes, com posterior refechamento das juntas de modo a evitar infiltrações para o enchimento e tratamento das unidades de alvenaria existentes ou substituição por similares em caso de acentuada degradação; (ii) reabilitação da camada de betuminoso existente (ME2). Em qualquer uma das opções aconselha-se ainda a colocação de um sistema de drenagem de águas pluviais. Deve ser respeitada a compatibilidade entre os materiais a aplicar e os materiais existentes (ver secção 3.3.2). Em termos de ação do tráfego, ao recorrer à primeira opção de intervenção garante-se uma rugosidade que poderá evitar a circulação de veículos a elevadas velocidades, apesar de contribuir para amplificação do efeito da ação do tráfego no comportamento da ponte (ver secção 2.1.1.1). Ao recorrer à segunda opção ocorre um aumento da espessura do tabuleiro, alterando o funcionamento da ponte (ver secção 2.1.1.1). Contudo, este aumento de espessura por si só não contribui para um aumento significativo da degradação das cargas pontuais transmitidas ao enchimento.

Porém, o mais correto seria a realização de um projeto de requalificação multidisciplinar, onde seria relevante a presença de um arquiteto e de um historiador ou de um arqueólogo. Isto porque se deve ter em consideração o facto de a ponte ser classificada, o facto de terem que ser respeitados os interesses locais, entre outros fatores. Deste modo como solução a curto prazo recomenda-se manter a camada de betuminoso e proteger o tabuleiro antigo, de forma a mais tarde poder ser reabilitado da forma mais eficaz.

Recomenda-se a realização de ensaios não destrutivos ou pouco invasivos de modo a averiguar o estado do enchimento para proceder à melhor forma de intervenção do enchimento, e.g., RC2 no enchimento através de uma argamassa compatível com o material de enchimento existente de modo a obter a sua consolidação e melhor desempenho das suas funções.

(3) Recomenda-se a reposição das unidades de alvenaria destacadas nas guardas e no arco maior (MC5).

(4) Recomenda-se a remoção da argamassa com cimento das juntas das guardas e do encontro do arco maior, no alçado jusante, e a sua substituição por uma argamassa compatível com as unidades de alvenaria (MC5).

(5) Dado o esmagamento da leitada existente nas juntas e o seu desaparecimento noutras, recomenda-se a colocação de uma argamassa compatível de modo a evitar o aumento do desgaste das unidades de alvenaria (RC1).

(6) Recomenda-se manter as medidas restritivas de limitação de carga e aplicar medidas restritivas de limitação da velocidade do tráfego (MP4), evitando deste modo recorrer a outras intervenções de reabilitação/reforço.

(7) Recomenda-se uma análise do arco menor de modo a averiguar se a deformação visível necessita de uma intervenção.

5.6 Considerações finais

Foi atingido o objetivo proposto da realização de uma proposta de ficha de inspeção visual que permitisse: (1) o seu acessível preenchimento durante a inspeção; (2) descrição das PAAP e dos seus danos; (3) que apresentasse campos para acrescentar observações que não fossem abordadas nos campos apresentados; e (4) que permitisse a sua posterior e acessível consulta. Contudo foram sentidas muitas dificuldades na sua realização, salientando-se a (1) sequência e a disposição dos campos, (2) a uniformização dos termos, (3) a apresentação da informação de forma a abranger os aspetos essenciais numa inspeção visual, (4) facilidade de compreensão dos campos e seu preenchimento, (5) posterior consulta sem suscitar dúvida e (6) o fato da ficha se poder adaptar a qualquer tipo de PAAP.

Durante a inspeção visual à Ponte Românica de Mondim da Beira foi efetuado um levantamento fotográfico. Os Anexos I e II foram preenchidos através da proposta de ficha de inspeção visual, do levantamento fotográfico e do levantamento topográfico. Estes anexos completam o presente capítulo, que funciona como parte integrante de um relatório de inspeção e diagnóstico. No preenchimento da ficha de inspeção visual e na elaboração dos Anexos I e II foram sentidas dificuldades na interpretação de alguns danos e na associação das possíveis causas, devido à falta de sensibilidade e experiência na inspeção de construções antigas. Refira-se que a realização de um relatório de inspeção e diagnóstico limitado à inspeção visual para a identificação dos danos numa PAAP não permite identificar o verdadeiro estado da PAAP, sendo necessário recorrer à realização de ensaios.

Assim, no presente capítulo/relatório encontra-se a descrição da ponte, das intervenções e alterações ocorridas na ponte e nos elementos contíguos a esta. São expostos os danos observados. E Posteriormente é apresentada uma proposta de diagnóstico, elaborada com base na informação apresentada no capítulo 3, na bibliografia e nas entidades consultadas.

Relativamente aos danos estruturais observados, podem-se destacar a deformação do arco maior, o destacamento de aduelas no intradorso do arco maior e a fendilhação longitudinal no intradorso do arco menor. Relativamente aos danos não estruturais, pode-se referir que, de uma forma genérica, a ponte apresenta depósitos biológicos, presença de humidade e degradação pétreo. É de salientar que a existência de vegetação dificulta a observação de possíveis danos estruturais, como seja o caso do arco maior, onde a vegetação existente não só contribui para a degradação do material pétreo, como impede a visualização de fendilhação ou de mais aduelas destacadas.

Como não é do âmbito do presente trabalho a realização de ensaios, salienta-se a importância da informação fornecida pela Câmara Municipal de Tarouca. Sem esta informação não seria possível associar a deformação do arco maior ao enchimento e à infiltração de água através do tabuleiro. Contudo salienta-se a necessidade da confirmação através de ensaios de modo a

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

proceder à intervenção mais adequada e não causar futuros danos na ponte. No capítulo seguinte é apresentada a análise da ponte para avaliar a sua capacidade de cargas de tráfego. Deste modo é avaliada a necessidade de reforço da ponte ou a simples limitação do tráfego e/ou da velocidade.

É de referir a importância da experiência na apresentação do diagnóstico de PAAP. As soluções de intervenção a apresentar não podem seguir uma ideia fixa, i.e., tem que se avaliar vários fatores, entre eles, o conhecimento do comportamento estrutural das PAAP, as consequências das soluções de intervenção, aspetos de ordem social e patrimonial, financeira e estética. Tendo em consideração que se está perante uma ponte classificada recomenda-se um plano de manutenção e de reabilitação/reforço não intrusivo.

De forma resumida as recomendações passam por: remoção dos depósitos de origem biológica e das manchas provocadas pela presença da água, pela poluição e pela acumulação de detritos; medidas para evitar/diminuir as infiltrações para o enchimento; reposição das unidades de alvenaria destacadas nas guardas e no arco maior; remoção da argamassa de cimento onde esta se encontra e substituição por uma argamassa compatível; refechamento das juntas de modo a evitar o aumento do desgaste das unidades de alvenaria; manter as medidas restritivas de limitação de carga e aplicar medidas restritivas de limitação de velocidade do tráfego de modo a evitar o recurso posterior a outras intervenções de reabilitação/reforço no arco maior.

6. Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira

Com o presente capítulo pretende-se apresentar a análise numérica da ponte em estudo, Ponte Românica de Mondim da Beira, através do programa de elementos discretos misto (2D) LFE-MEDM, desenvolvido por Rouxinol (2007).

Como primeiro objetivo pretendem-se aferir as técnicas de intervenção recomendadas (Lourenço e Oliveira, 2003) na secção 5, sendo deste modo avaliada a capacidade de carga da ponte em estudo, nomeadamente do arco maior. Obviamente para a elaboração de um Relatório de Intervenção um estudo mais rigoroso teria de ser efetuado. Como segundo objetivo pretende-se comparar o valor da capacidade de carga obtido através de dois tipos de geração de malha de EDP: (1) por recurso ao levantamento geométrico da ponte, designado por Caso I e (2) por recurso à geração automática designado por Caso II. Para cada um dos Casos apresenta-se o estudo de três modelos: (i) Modelo 0 - arco isolado; (ii) Modelo 1 - arco isolado com simulação do peso próprio do enchimento através de cargas verticais aplicadas ao longo do extradorso do arco e (iii) Modelo 2 - arco com muro de tímpano. Em todos os modelos é considerada a carga permanente, i.e., o peso próprio da estrutura, e uma sobrecarga pontual do tipo faca aplicada a 1/4 do vão do arco maior. Esta carga é aplicada de forma incrementada até ser atingido o colapso da estrutura. A análise é efetuada por largura unitária, sendo apresentada a estimativa da capacidade de carga da ponte em 3D por recurso a uma combinação entre os modelos 1 e 2 (Morais, M., Rouxinol e Pimenta, 2012).

Assim, na secção 6.1 é feita uma breve descrição da ponte em estudo. Da secção 6.2 constam as considerações gerais, nomeadamente, a caracterização mecânica dos materiais da ponte em estudo recorrendo à bibliografia especializada; as considerações sobre o programa adotado; as cargas e a geração das malhas de ED. Na secção 6.3 e na secção 6.4 é apresentada a análise

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

numérica dos três modelos para cada um dos Casos, sendo expostos os resultados comparativos para as três gamas de valores de rigidez normal dos modelos. Na secção 6.5 são analisados os resultados obtidos e referidas as vantagens de se recorrer a cada uma das gerações. Por fim, na secção 6.6 são expostas as considerações finais.

A realização deste capítulo baseia-se na informação apresentada no capítulo 4, nas secções 5.1, 5.3 e 5.4, e nos trabalhos de: Vieira (1997); Rouxinol (2007), Morgado (2008) e Rocha, N. (2010).

6.1 Descrição da Ponte Românica de Mondim da Beira

A ponte em estudo, como referido no capítulo 5, é uma ponte medieval de arquitetura românica, cuja data de construção se conjectura entre os séculos XIII e XIV (IGESPAR). Apresenta uma tipologia regular com juntas sem preenchimento, sendo composta por material pétreo granito. Tem a sua fundação num afloramento rochoso de granito, que se encontra parcialmente oculto por obras, destinadas à praia fluvial, que ocupam os dois alçados. É constituída por dois arcos desiguais em dimensão e tipologia, sobre os quais assenta um tabuleiro em cavalete. Sobre o tabuleiro existem guardas em material pétreo. O arco maior apresenta uma tipologia que se aproxima da tipologia de arco de volta perfeita e o arco menor apresenta uma tipologia de arco ogival (ver Figura 2-8 e secção 5.1). Aquando da inspeção visual o principal dano estrutural observado foi a deformação do arco maior (ver secção 5.4).

A ponte apresenta um comprimento de aproximadamente 56,5 m, uma altura máxima de aproximadamente 11,9 m (na zona do recobrimento do arco maior) e uma largura de 4,8 m. O arco maior apresenta um vão de 15,7 m, uma flecha de 7,2 m, e uma espessura média de 1,0 m. O recobrimento sobre o arco maior é inexistente. Na Figura 6-1 é apresentado o alçado jusante obtido por levantamento topográfico e o corte na secção de recobrimento do arco maior. No Quadro 6-1 são apresentadas as principais dimensões do arco maior: vão (L), flecha (a_f), espessura (e) e recobrimento (d) e as relações geométricas flecha/vão, espessura/vão e recobrimento/espessura.

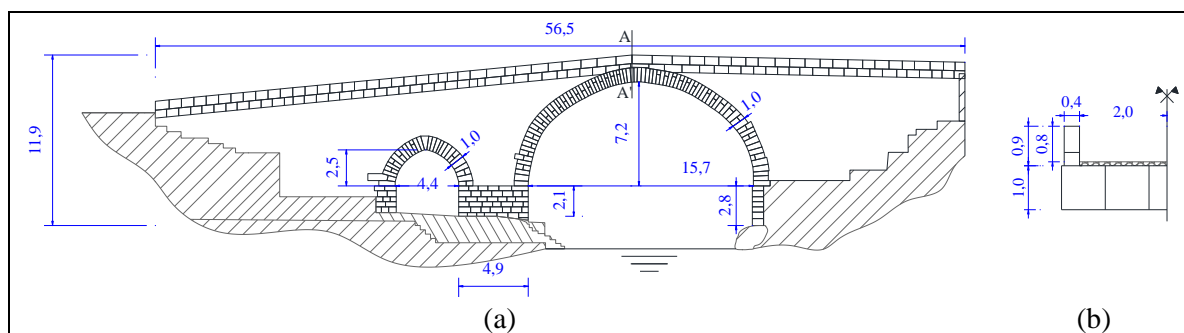


Figura 6-1: Ponte Românica de Mondim da Beira: (a) alçado jusante e (b) corte AA'

6. Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira

Quadro 6-1: Dimensões principais do arco maior e relações geométricas

Dimensões do arco maior				Relações		
L (m)	a_f (m)	e (m)	d (m)	a_f/L	e/L	d/e
15,7	7,2	1,0	0,0	1/2	1/15,7	-

6.2 Considerações gerais

6.2.1 Caracterização mecânica dos materiais

Não é do âmbito do presente trabalho a realização de ensaios aos materiais constituintes, tendo sido adotados para as suas características mecânicas os valores referidos na bibliografia especializada. Deste modo os valores da tensão de compressão máxima das unidades de alvenaria, f_b , do coeficiente de Poisson, ν_b , e do módulo de elasticidade, E_b , foram considerados de acordo com os valores de Costa, C. (2002a) constantes do Quadro 6-2. Para o valor da massa volúmica das unidades de alvenaria, ρ_b , e para o valor máximo da tensão de tração das unidades de alvenaria, f_{bt} , foram considerados os valores considerados em Rouxinol (2007). Para o módulo de distorção das unidades de alvenaria, G , recorreu-se à fórmula apresentada implicitamente na secção 4.7.1.2. No Quadro 6-2 apresentam-se as propriedades mecânicas da ponte em estudo. Como se desconhece a composição do enchimento da ponte foi adotada uma mistura de brita, areia e argila com as características de massa volúmica, ρ_b , igual a 1890 kg/m³ e módulo de deformabilidade, E_f , igual a 40 MPa, de acordo com Rouxinol (2007). Para o valor do ângulo de atrito foi adotado o valor de 36° de acordo com Vieira (1997). Para o valor da rigidez tangencial de contacto foi adotada a relação K_s igual a 0,4 da K_n (ver secção 4.7.1.2).

Quadro 6-2: Propriedades mecânicas da Ponte Românica de Mondim da Beira

f_b (MPa)	f_{alv} (MPa)	f_{bt} (MPa)	E_b (GPa)	ν_b	G_b (GPa)	ρ_b (kg/m ³)
43,80	5,00 a 30,00	5,00	15,00	0,20	6,25	2100,00

Para o valor da tensão de tração máxima das juntas foi adotado um valor nulo. Para o valor da tensão de compressão máxima das juntas foi adotado o valor máximo da tensão de compressão das unidades de alvenaria, f_b . Foram consideradas três gamas de valores de rigidez normal de contacto iguais a 1, 10 e 100 GPa/m.

6.2.2 Considerações sobre o LFE-MEDM

Como referido no capítulo 4, para a análise apresentada foram adotadas as considerações que se seguem: (1) formulação em termos de forças, i.e., o comprimento de influência, L_C , é fixo; (2) amortecimento local, cuja constante, α_{nv} , toma o valor de 0,8 e (4) distância de arredondamento dos vértices dos EDP, d_r , fixa, tendo sido adotado o valor de 1,0 cm. O

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

comprimento de influência foi obtido pela relação $0,5L_P - d_r$, onde L_P representa a espessura média das aduelas. A distância de arredondamento foi obtida pela relação $0,01L_P$. Os restantes parâmetros do LFE-MEDM, como seja o caso do fator de passo de tempo, dos fatores de deteção, ativação e atualização de contactos, foram considerados de acordo com Rouxinol (2007) e com Rouxinol, et al. (2006).

6.2.3 Carga permanente e sobrecarga

O LFE-MEDM considera o peso próprio das unidades de alvenaria que já está representado por ED, não sendo, deste modo necessário recorrer à introdução dos valores. Contudo o peso próprio do enchimento não é considerado, uma vez que não é representado por ED, sendo deste modo necessária a colocação dos valores sobre o extradorso do arco. Como o programa apenas permite introdução automática dos valores para PAAP com tabuleiro horizontal, foi necessário calcular o peso próprio localizado entre o extradorso de cada aduela e o tabuleiro. Para tal, recorreu-se a uma folha de cálculo de Excel e a desenhos de AutoCad, ver Figura 6-2 e Figura 6-4. O valor do peso próprio sobre cada aduela foi dividido e aplicado sobre os dois vértices localizados no extradorso da aduela. A Figura 6-2 apresenta a peso próprio sobre cada aduela e a numeração dos respetivos vértices. Na Figura 6-4 (c) e (d) o peso próprio é representado por setas, contudo estas não se conseguem visualizar corretamente devido a uma impossibilidade por parte do programa de modificar a escala destes à semelhança da escala para o traço que representa o contacto.

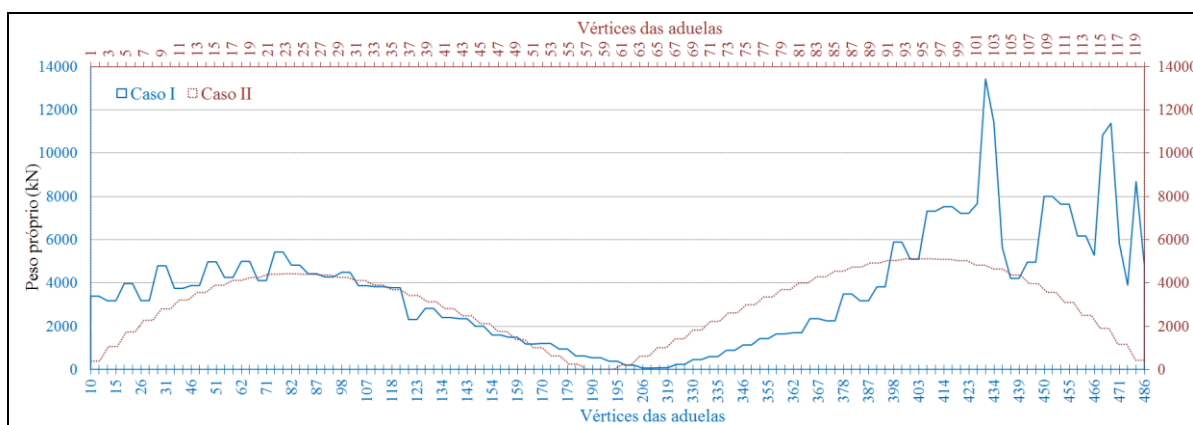


Figura 6-2: Peso próprio do material de enchimento do modelo 1: a linha azul para o Caso I e a linha vermelha tracejada para o Caso II

Nos três modelos a sobrecarga foi aplicada a 1/4 do vão do arco maior, com incrementos de 10 kN até se atingir o colapso, sendo os últimos incrementos de 1 kN, de modo a ter um valor mais exato. A secção referida é uma das mais desfavoráveis. A escolha da aplicação de uma carga pontual (ver secção 2.3.1) diretamente sob o extradorso do arco maior deve-se ao facto de a espessura do enchimento sobre o arco maior na secção do rim ser reduzida. A carga pontual foi dividida sobre os vértices do extradorso dos EDP 44 e 31 do arco para o Caso I e para o Caso II, respetivamente. Segundo Rouxinol (1999) a carga ao ser repartida origina a

6. Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira

distribuição da carga ao longo de várias aduelas, simulando a dispersão através do enchimento. A carga foi aplicada em pequenos incrementos para se poder avaliar com maior rigor a relação carga/deslocamento.

6.2.4 Geração de malhas

A geometria da ponte foi obtida por recurso ao levantamento topográfico realizado pelos topógrafos e pelo desenhador da Câmara Municipal de Tarouca. O desenho foi gravado sob a forma de um ficheiro dwg de AutoCad. Para obter a malha de EDP para o Caso I foi necessário desenhar cada unidade de alvenaria do ficheiro referido, obedecendo a uma determinada sequência. Os EDP foram desenhados no sentido retrógrado sendo constituídos por 3 a 5 vértices, não podendo ser côncavos. A malha foi guardada sob a forma de um ficheiro dxf de AutoCad, para o LFE-MEDM conseguir ler o ficheiro. Ver Figura 6-4 (a), (c) e (e). Para obter a malha de EDP para o Caso II, o programa apresenta algumas rotinas que permitem a geração automática de diferentes elementos de alvenaria, como seja o caso do arco de volta perfeita, segmentado, junção de dois meios arcos de volta perfeita e paredes. Para os dois arcos foi escolhida a rotina que melhor se adaptava à geometria. Deste modo, foi adotada para os dois arcos uma geração de arco de volta perfeita. Contudo, estas rotinas não representam a forma real dos arcos. A geração do arco maior apresenta desde as aduelas de saímel à aduela de fecho, uma altura superior ao arco real de aproximadamente 0,6 m (9 %), ver Figura 6-3. Esta diferença deve-se ao facto de se estar a recorrer a um arco de volta perfeita, enquanto o arco real apresenta uma configuração deformada entre a secção dos rins e a secção de fecho. Para o arco menor não foi possível representar a tipologia de arco ogivado. Nos dois arcos reais a disposição das aduelas não única não é uniforme ao longo dos arcos, tendo-se optado por uma espessura única de 1 m. Para obter a geração do muro de tímpano (incluindo o pilar e os encontros) recorreu-se a uma geração de malha automática retangular com a altura e comprimento da ponte. Após geração das três malhas separadamente, por recurso ao programa AutoCAD, procedeu-se à adaptação da malha retangular ao extradorso dos arcos e ao tabuleiro. Ver Figura 6-4 (b), (d) e (f).

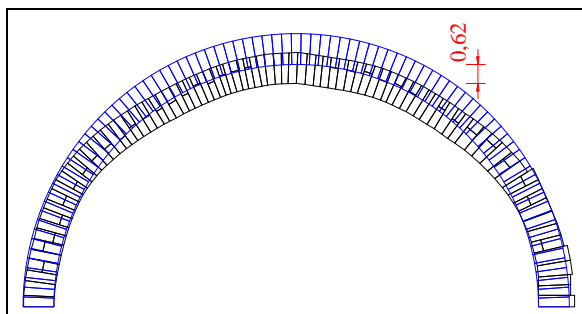


Figura 6-3: Diferença na altura indicada a vermelho (em metros) do arco entre os dois Casos: Caso I a preto e Caso II a azul

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

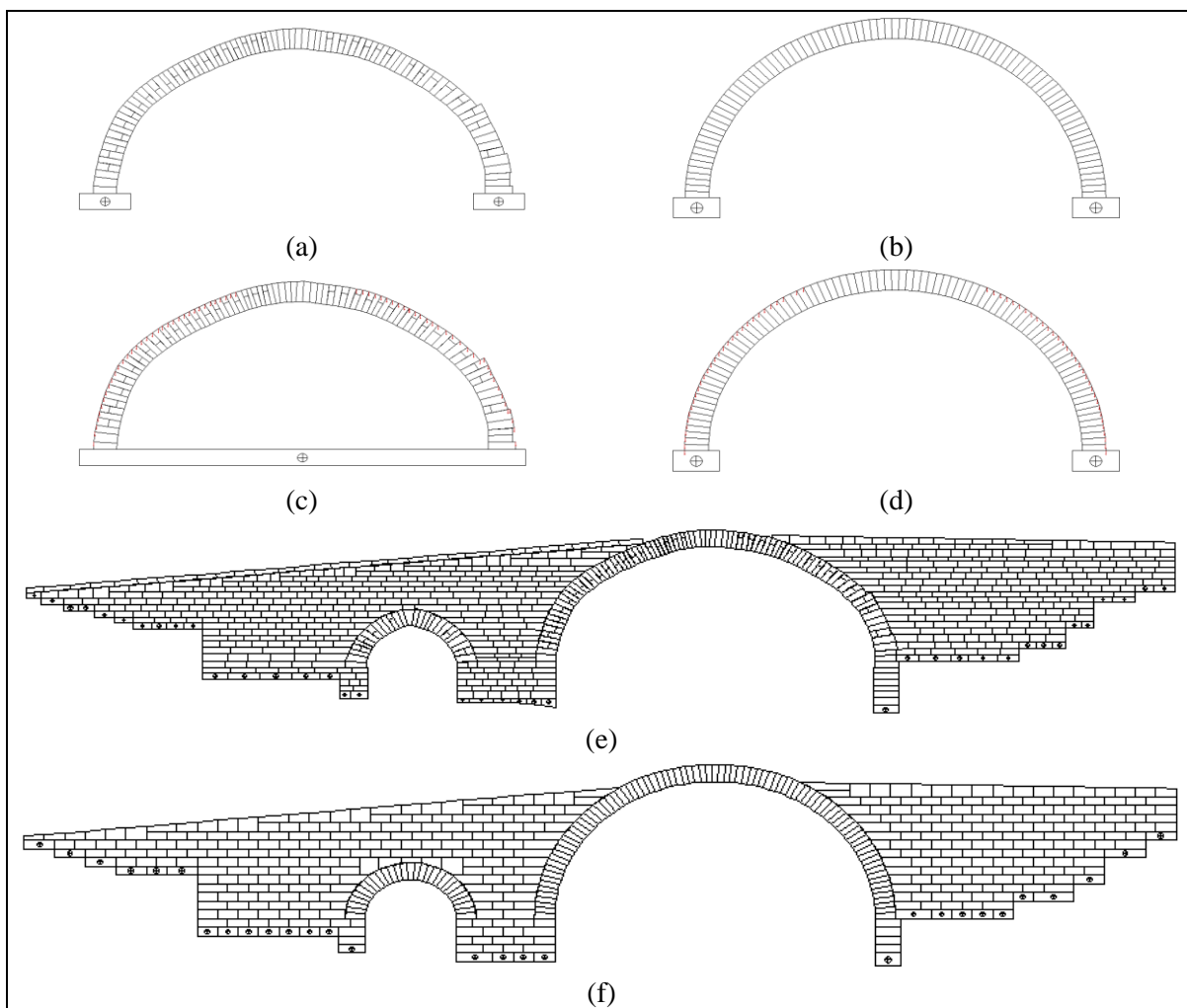


Figura 6-4: Malha de EDP e representação do peso próprio: (a), (c) e (f) Caso I; (b), (d) e (f) Caso II

No Caso I, de modo a obter uma solução que se aproximasse o mais possível da situação real optou-se por fazer corresponder a cada unidade de alvenaria um EDP, com algumas alterações, que se referem a seguir. A disposição das aduelas do arco maior corresponde ao desenho obtido pelo levantamento topográfico, mas com uma espessura média de modo a ser representativa de qualquer secção ao longo da largura da ponte. Tendo em consideração as posteriores dimensões dos EDP após o arredondamento dos vértices, foram alteradas as dimensões dos EDP muito pequenos.

Nos dois Casos e para o modelo 2, considerou-se o muro de tímpano como uma parede vertical de 1 m de largura (modelo 2D). Os elementos das guardas não foram considerados na análise realizada devido à sua não existência ao longo de toda a largura da ponte.

6.3 Análise numérica do Caso I – levantamento geométrico

6.3.1 Modelo 0 – arco isolado

Da análise deste modelo conclui-se que, para as três gamas de valores de rigidez normal, a geometria do arco não permite a sua estabilização para o peso próprio, ver Figura G-1 e Quadro G-1 no Apêndice G.

Para a primeira gama de rigidez forma-se um mecanismo de colapso de 4 rótulas: (1) no extradorso entre o apoio e o primeiro EDP do lado esquerdo; (2) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado esquerdo; (3) no extradorso junto à secção de fecho do lado esquerdo e (4) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado direito. Para a segunda e terceira gama de valores de rigidez normal não se formam rótulas, verificando-se uma perda de ligação dos ED, ver Figura G-1 do Apêndice G.

6.3.2 Modelo 1 – arco isolado com simulação do material de enchimento

Da análise deste modelo conclui-se que para a primeira e para a terceira gamas de valores de rigidez normal o modelo é mais dúctil e rígido, respetivamente, tal como se pode observar na Figura G-8, do Apêndice G. O deslocamento inicial do centro de massa do ED considerado para aplicar a carga, devido ao peso próprio, para as três gamas de valores de rigidez normal foi de 17,90, 1,85 e 0,20 mm, respetivamente. A capacidade de carga foi de 132, 162 e 162 kN/m e o deslocamento foi de 87,01, 10,28 e 1,02 mm, respetivamente (ver Quadro G-2). Verificou-se um aumento da capacidade de carga de 22,7 % entre a primeira e as outras duas gamas e uma redução no deslocamento sofrido de 89,9 % entre a segunda e a terceira gama. Relativamente ao valor das tensões máximas de compressão, para as duas primeiras gamas de valores de rigidez normal, verificou-se que o valor máximo é inferior a 1,5 MPa no contacto 2 até ao 8º incremento e é inferior a 1,6 MPa, no contacto 301 até ao último incremento. Para a 3ª gama de rigidez verificou-se um comportamento similar, sendo inferior a 1,7 MPa no contacto 301 no último incremento. O contacto 2 localiza-se entre o primeiro EDP do arco do lado esquerdo e o apoio (extradorso) e o contacto 301 localiza-se entre o último EDP do arco do lado direito e o apoio (extradorso), ver Figura 6-5.

Para as três gamas de valores de rigidez normal forma-se um mecanismo de colapso de 4 rótulas: (1) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado esquerdo; (2) no extradorso no ponto de aplicação da carga; (3) no intradorso na secção do rim do lado direito e (4) no extradorso aproximadamente junto ao apoio direito, ver Figura G-2.

6.3.3 Modelo 2 – arco com muro de tímpano

Da análise deste modelo conclui-se que para a primeira e para a segunda gamas de valores de rigidez normal o modelo é mais dúctil e rígido, respetivamente, tal como se pode observar na

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Figura G-9. O deslocamento inicial, devido ao peso próprio, para as três gamas de valores de rigidez normal foi de 11,64, 1,27 e 0,15 mm, respetivamente. Talvez devido à elevada rigidez do modelo, a análise para a terceira gama de rigidez deu erro após 4 incrementos de 10 kN. Este erro pode dever-se à elevada sobreposição entre alguns EDP. Deste modo este modelo foi excluído da análise. A capacidade de carga para as duas gamas de rigidez foi de 535 e 684 kN/m e o deslocamento foi de 95,31 e 16,04 mm, respetivamente (ver Quadro G-3). Verificou-se um aumento da capacidade de carga de 27,8 % entre a primeira e a segunda gama e uma redução no deslocamento sofrido de 83,2 % entre a primeira e a segunda gama. Relativamente ao valor das tensões máximas de compressão, para as duas gamas de rigidez, verificou-se que o valor máximo é inferior a 0,8 MPa no contacto 1298 até ao 13º e 14º incrementos, respetivamente, e é inferior a 2,5 e 2,7 MPa, respetivamente, no contacto 3096 até ao último incremento. O contacto 1298 localiza-se entre dois EDP do lado direito junto ao apoio (extradorso) e o contacto 3096 localiza-se entre dois EDP do lado esquerdo, sendo um deles o EDP onde foi aplicada a carga (extradorso), ver Figura 6-5.

Para as duas gamas de valores de rigidez normal forma-se um mecanismo de colapso de 4 rótulas: (1) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado esquerdo; (2) no extradorso na zona de aplicação da carga; (3) no intradorso na secção de fecho e (4) no extradorso na secção do rim do lado direito. Ver Figura G-3, onde se apresentam os mecanismos de colapso da primeira gama.

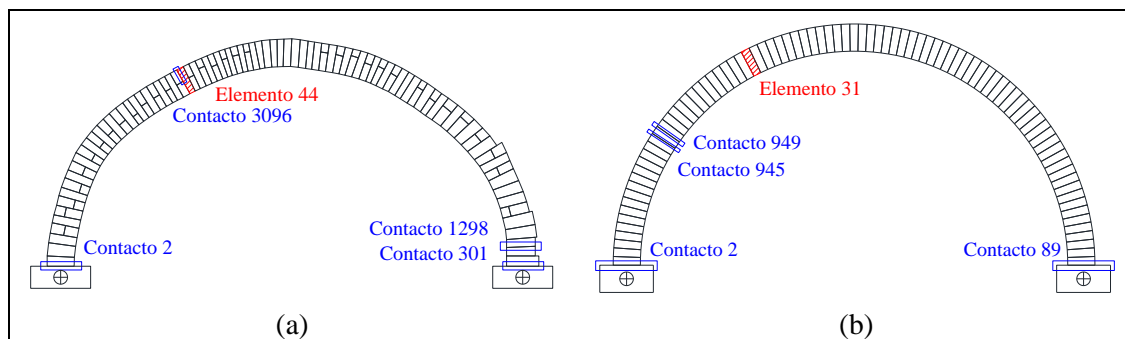


Figura 6-5: Localização de alguns dos contactos entre EDP: (a) Caso I e (b) Caso II

6.4 Análise numérica do Caso II – geração automática

6.4.1 Modelo 0 – arco isolado

Da análise deste modelo conclui-se que para a primeira e para a terceira gamas de valores de rigidez normal o modelo é mais dúctil e rígido, respetivamente. O deslocamento inicial, devido ao peso próprio, para as três gamas de valores de rigidez normal foi de 14,40, 1,44 e 0,14 mm, respetivamente, tal como se pode observar na Figura G-7. A capacidade de carga foi de 21, 32 e 34 kN/m e o deslocamento foi de 19,22, 2,83 e 0,29 mm, respetivamente (ver Quadro G-1). Verificou-se um aumento da capacidade de carga de 52,4 % entre a primeira e

6. Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira

as outras duas gamas e uma redução no deslocamento sofrido de 89,8 % entre a segunda e a terceira gama. Relativamente ao valor das tensões máximas de compressão, para as três gamas de valores de rigidez normal, verificou-se que o valor máximo é inferior a 0,6 MPa no contacto 2 até ao 2º incremento e no contacto 89 desde o 3º ao último incremento. O contacto 2 localiza-se entre o primeiro EDP do arco do lado esquerdo e o apoio (extradorso) e o contacto 89 localiza-se entre ultimo EDP do arco e o apoio do lado direito (extradorso), ver Figura 6-5.

Para as duas primeiras gamas de valores de rigidez normal forma-se um mecanismo de colapso de 5 rótulas: (1) no extradorso entre o apoio e o primeiro EDP do lado esquerdo; (2) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado esquerdo; (3) no extradorso junto à secção de fecho do lado esquerdo; (4) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado direito e (5) no extradorso entre o apoio e o último EDP do lado direito. Para a terceira gama o mecanismo é de 4 rótulas: (1) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado esquerdo; (2) no extradorso junto à secção de fecho do lado esquerdo; (3) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado direito e (4) no extradorso entre o apoio e o último EDP do lado direito, ver Figura G-4.

6.4.2 Modelo 1 – arco isolado com simulação do material de enchimento

Da análise deste modelo conclui-se que para a primeira e para a terceira gamas de valores de rigidez normal o modelo é mais dúctil e rígido, respetivamente, tal como se pode observar na Figura G-8. O deslocamento inicial, devido ao peso próprio, para as três gamas de valores de rigidez normal foi de 15,23, 1,50 e 0,15 mm, respetivamente. A capacidade de carga foi de 127, 143 e 144 kN/m e o deslocamento foi de 59,82, 6,40 e 0,64 mm, respetivamente (ver Quadro G-2). Verificou-se um aumento da capacidade de carga de 12,6 % entre a primeira e as outras duas gamas e uma redução no deslocamento sofrido de 90,10 % entre a segunda e a terceira gama. Relativamente ao valor das tensões máximas de compressão, para as três gamas de valores de rigidez normal, verificou-se que o valor máximo é inferior a 1,5 MPa no contacto 89 desde o primeiro ao último incremento. O contacto 89 localiza-se entre o ultimo EDP do arco e o apoio do lado esquerdo (extradorso), ver Figura 6-5.

Para as duas primeiras gamas de valores de rigidez normal forma-se um mecanismo de colapso de 4 rótulas: (1) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado esquerdo; (2) no extradorso junto à zona de aplicação da carga; (3) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado direito e (4) no extradorso entre o apoio e o último EDP do lado direito, ver Figura G-5, onde se apresentam os mecanismos de colapso.

6.4.3 Modelo 2 – arco com muro de tímpano

Da análise deste modelo conclui-se que para a primeira e para a terceira gamas de valores de rigidez normal o modelo é mais dúctil e rígido, respetivamente, tal como se pode observar na

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Figura G-9. O deslocamento inicial, devido ao peso próprio, para as três gamas de valores de rigidez normal foi de 10,90, 1,08 e 0,11 mm, respetivamente. A capacidade de carga foi de 601, 715 e 760 kN/m e o deslocamento foi de 86,39, 13,43 e 2,53 mm, respetivamente (ver Quadro G-3). Verificou-se um aumento da capacidade de carga de 26,5 % entre a primeira e a terceira gama e uma redução no deslocamento sofrido de 81,2 % entre a segunda e a terceira gama. Relativamente ao valor das tensões máximas de compressão, para a primeira gama de rigidez, verificou-se que o valor máximo é inferior a 1,7 MPa no contacto 949 desde o primeiro incremento ao último incremento. Para a segunda e terceira gamas de valores de rigidez normal, verificou-se que o valor máximo é inferior a 2,0 MPa no contacto 949 até ao 71º e 73º incrementos, respetivamente, e é inferior a 2,5 MPa no contacto 945 até ao último incremento. O contacto 945 e 949 localizam-se entre os EDP localizados aproximadamente a metade da altura do arco do lado esquerdo (intradorso), ver Figura 6-5.

Para as três gamas de valores de rigidez forma-se um mecanismo de colapso de 4 rótulas: (1) no intradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado esquerdo; (2) no extradorso na zona de aplicação da carga; (3) no intradorso na secção de fecho e (4) no extradorso a aproximadamente meia altura do arco do lado direito. Para as três gamas os EDP do muro de tímpano na ligação muro de tímpano/arco na secção do rim do lado esquerdo não acompanharam o deslocamento do arco. Tal pode dever-se às suas dimensões que contribuem para o apoio dos EDP entre si. No entanto, na secção do rim do lado direito os EDP do muro de tímpano na ligação muro de tímpano/arco acompanharam o deslocamento do arco, uma vez que estavam a ser empurrados, ver Figura G-6.

6.5 Análise dos resultados

A Figura 6-6 apresenta a relação carga-deslocamento para os modelos mais relevantes e para os Casos I e II. Os valores das tensões de compressão máximas obtidas são em todos os modelos inferiores aos valores máximos apresentados no Quadro 6-2. Foi obtido o mecanismo de colapso esperado de 4 / 5 rótulas localizadas alternadamente entre o intradorso e o extradorso.

A capacidade de carga a 3D da ponte obtém-se de forma aproximada através da proporção entre as larguras dos elementos (enchimento com uma largura de 4,0 m e o muro de tímpano com uma largura total de 0,8 m) e a capacidade de carga de cada um dos Casos, ver Quadro 6-3.

Pode-se assim concluir que para os dois Casos os valores das cargas são muito próximos, não se verificando uma diferença padrão entre os dois Casos. Deste modo, adotando um coeficiente de combinação, γ_Q , de 1,5 e adotando o menor valor da capacidade de carga de

6. Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira

cada um dos Casos, obtém-se uma capacidade de carga de 132,8 kN/m, 199,2/1,5, onde $199,2 = (4,0 \times 132,0 + 0,8 \times 535,0) / 4,8$.

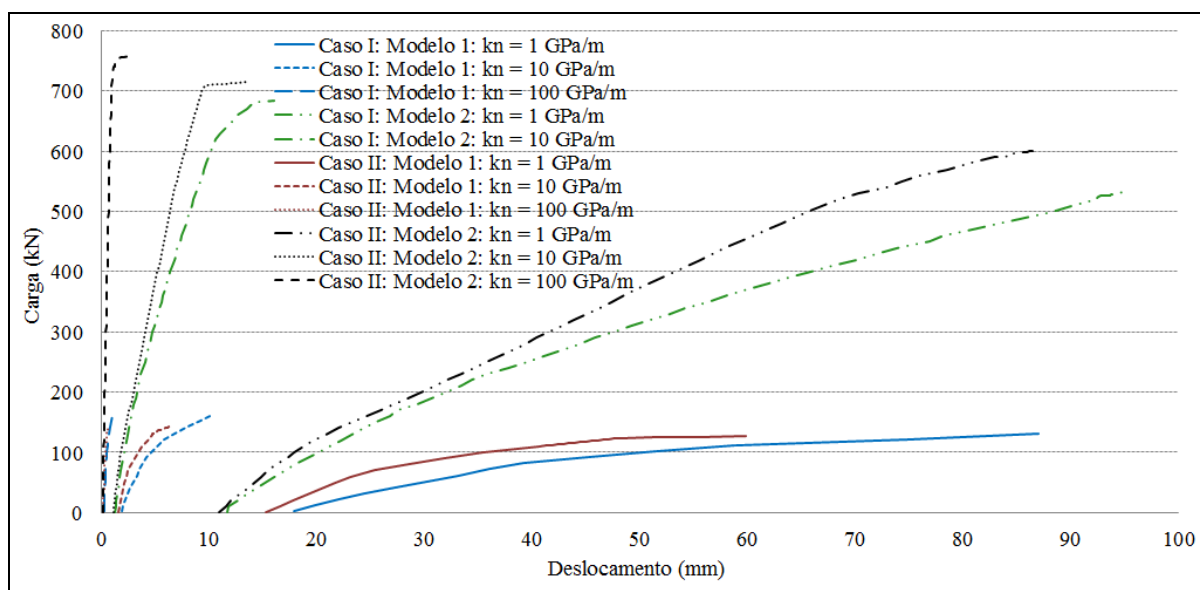


Figura 6-6: Relação carga-deslocamento para os dois Casos para os modelos 1 e 2: a azul e a verde de os modelos 1 e 2 do Caso I e a vermelho e a preto os modelos 1 e 2 do Caso II

Quadro 6-3: Valores da capacidade de carga da ponte (kN/m) – modelo 3D

kn (GPa/m)	Capacidade de carga - Caso I			Capacidade de carga - Caso II		
	Modelo 1	Modelo 2	3D	Modelo 1	Modelo 2	3D
1	132,0	535,0	199,2	127,0	601,0	206,0
10	162,0	684,0	249,0	143,0	715,0	238,3
100	162,0	----	----	144,0	760,0	246,7

6.6 Considerações finais

A análise apresentada neste capítulo teve como objetivo a avaliação da capacidade de carga da ponte em estudo, Ponte Românica de Mondim da Beira, através de um programa de ED, de modo a aferir a solução de intervenção adotada no capítulo 5. Recorreu-se a dois tipos de geração de malha de EDP, por levantamento geométrico e automática, de modo a avaliar quais as diferenças nos resultados obtidos. Foi estudada a influência da simulação do enchimento e do muro de tímpano na capacidade de carga e no mecanismo de colapso e ainda a influência da rigidez.

Para a aplicação da sobrecarga foi considerada uma carga pontual numa das secções mais desfavoráveis. Esta carga foi aplicada diretamente sobre o extradorso do arco, uma vez que a altura do muro de tímpano e do enchimento nessa secção é reduzido, deste modo, não foi considerada a dispersão da carga pelo enchimento. O aumento da rigidez do modelo associada

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

à contribuição do enchimento e do muro de tímpano conduz a um significativo aumento da capacidade da carga. Contudo, ao aumentar muito a rigidez a diferença na capacidade de carga deixa de ser relevante, havendo apenas menores deslocamentos do arco. A rigidez conferida pelo material de enchimento simulada por cargas verticais e pelo muro de tímpano limitam os movimentos do arco no plano.

Apesar da deformação existente no arco não se verifica uma diferença relevante na capacidade de carga do arco e conseqüentemente da ponte. Contudo, verificam-se diferenças a nível das rótulas formadas. Pode-se ainda referir que alguns aspetos geométricos podem condicionar o comportamento do arco e conseqüentemente da ponte. Entre eles destacam-se: a posição dos EDP, a ligação muro de tímpano/arco e a sequênciã dos EDP não única na espessura do arco.

Relativamente à disposição não única dos EDP na espessura do arco maior no Caso I, em consequência da elevada compressão no extradorso do arco maior, ocorre abertura das juntas no intradorso com conseqüente destacamento e posterior queda de EDP que se encontram do lado do intradorso.

Apesar da existência de um manual de utilização do programa LFE-MEDM em Rocha, N. (2010) e de organogramas de cálculo em Rouxinol (2007), foram sentidas grandes dificuldades na utilização do programa. Destacam-se como causas a inexistência de informação relativamente aos cuidados a ter relativamente ao número e às dimensões dos EDP, na zona entre o muro de tímpano e o arco, e a forma de incrementação da carga a aplicar. Para os valores das características mecânicas dos materiais foram adotados os valores consultados na bibliografia especializada. De modo a avaliar as diferenças nos resultados obtidos teria sido necessário a realização de ensaios.

7. Conclusões

7.1 Considerações finais sobre o trabalho desenvolvido

O presente trabalho insere-se no Protocolo entre a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu e a Câmara Municipal de Tarouca, tendo como objetivo a apresentação de um Projeto que consiste no diagnóstico e na análise estrutural da Ponte Românica de Mondim da Beira. Para tal, dividiu-se o presente trabalho em duas fases. Na primeira fase foi elaborada uma pesquisa de informação teórica com conseqüente escrita dos capítulos 2, 3 e 4. Na segunda fase foram aplicados os conhecimentos da primeira fase ao diagnóstico e análise estrutural da Ponte Românica de Mondim da Beira nos capítulos 5 e 6. Além do objetivo principal deste trabalho, pretendeu-se contribuir para a divulgação das principais informações relativas à análise e à intervenção em PAAP. Procurou-se, apesar da dificuldade sentida, seguir uma estruturação que permitisse uma consulta acessível e motivadora. Pretendeu-se, ainda, contribuir para que futuros trabalhos similares e/ou trabalhos na área de intervenção em PAAP sejam mais acessíveis de realizar e que possam ter no presente trabalho uma base de trabalho. Na sequência da exposição do trabalho apresentado nos capítulos anteriores, apresenta-se na presente secção as principais conclusões.

Para poder estabelecer um correto diagnóstico de uma ponte é fundamental conhecer o seu comportamento estrutural, nomeadamente do arco. Deste modo, é importante conhecer o comportamento dos materiais que a compõem e o comportamento e a interação entre os elementos que as constituem. É ainda fundamental conhecer as ações a que estão sujeitas e as suas conseqüências na durabilidade, eficiência e funcionamento.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

A geometria do arco permite determinar o caminho das cargas desde o seu ponto de aplicação até aos apoios, i.e., a determinação da linha de impulso. O arco pode apresentar diversas tipologias e dimensões consoante a Época de Construção, os conhecimentos e os meios existentes na altura de construção. O mecanismo de transmissão de cargas (peso próprio e sobrecargas) é diferente nas direções transversal e longitudinal da ponte. Na direção transversal depende da ligação entre elementos, i.e., da interação enchimento/muros de tímpano/arco e da interação muros de tímpano/arco. Na direção longitudinal depende, essencialmente, do funcionamento do arco sob a ação das cargas que lhe são transmitidas pelo enchimento e pelos muros de tímpano.

Na análise de estruturas de alvenaria de pedra são consideradas três hipóteses: (1) a alvenaria não resiste a tensões de tração; (2) os níveis gerais de tensões são baixos quando comparados com os resistentes e (3) o deslizamento entre unidades de alvenaria contíguas não ocorre. Deste modo o colapso do arco não ocorre por esmagamento das unidades de alvenaria, nem por deslizamento entre aduelas contíguas, mas sim por falta de equilíbrio. Num arco que se encontra em equilíbrio com o seu peso próprio e as sobrecargas, a linha de impulso encontra-se contida no terço central da espessura do arco (núcleo central da estrutura arco). Ao sofrer colapso por falta de equilíbrio, i.e., por instabilidade, a linha de impulso passa alternadamente em pontos que se localizam no extremo da secção transversal entre o extradorso e o intradorso do arco. Este mecanismo corresponde à formação de rótulas, i.e., abertura das juntas, na superfície oposta à superfície onde a linha de impulso toca os extremos da secção.

O material de enchimento tem como principal objetivo estrutural transmitir aos muros de tímpano e ao arco as cargas vindas do tabuleiro. Na direção transversal o enchimento provoca uma ação instabilizadora e na direção longitudinal tem uma ação estabilizadora aquando da ocorrência de deformação do arco no sentido longitudinal. Os muros de tímpano na direção transversal resistem à ação instabilizadora do enchimento transmitindo-a posteriormente ao arco. O comportamento da ponte na direção transversal é largamente condicionado pelo comportamento dos muros de tímpano e pelas propriedades da ligação muro de tímpano/arco (imbricamento). Na direção longitudinal apresentam uma elevada rigidez, contribuindo desta forma para a estabilização do arco, restringindo os deslocamentos do extradorso do arco na direção longitudinal e impedindo o desenvolvimento de mecanismos de colapso com formação de rótulas. As características do material de enchimento em conjunto com o confinamento conferido pelo arco e pelos muros de tímpano influenciam o comportamento do enchimento na degradação das cargas que lhe são transmitidas. A diminuição de rigidez do enchimento conduz a uma menor degradação das cargas. Quanto menor for a altura do enchimento, menor é a degradação das cargas. As condições de apoio devem ser consideradas, dada a possibilidade de eventuais movimentos do terreno, com conseqüente movimento dos apoios.

É ainda fundamental saber os aspetos a considerar na intervenção em PAAP, de modo a se evitarem falhas e retornos na avaliação e no diagnóstico apresentado. A recolha de informação é de grande importância pois permite conhecer a “história” da ponte. A realização da inspeção visual é fundamental para verificar determinados aspetos da informação recolhida e completar a descrição da ponte, bem como observar os danos que esta apresenta. A existência de uma ficha de inspeção visual permite o não esquecimento de nenhum pormenor da inspeção e permite uma mais acessível elaboração do relatório de inspeção e diagnóstico. A realização de ensaios contribui para o melhor conhecimento do estado de conservação da ponte e contribuiu para uma mais correta determinação de danos, contudo não era do âmbito do presente trabalho. Deste modo salienta-se a importância do protocolo de colaboração para obtenção da informação. De outro modo não seria possível saber o nível de infiltração que a ponte sofreu pelo tabuleiro e que contribuiu para a degradação não visível do enchimento e consequente deformação do arco maior. Contudo, apenas a realização de ensaios ao material de enchimento pode confirmar esta conclusão de modo a proceder à intervenção mais adequada.

É fundamental saber identificar os tipos de danos, onde e como se manifestam e as consequências do seu não tratamento. Contudo, salienta-se que por vezes a causa é de difícil identificação, por estar associada ou ser consequência de outros danos. A ponte em estudo apresenta de forma generalizada depósitos biológicos, presença de humidade e degradação pétreo. Estes danos não estruturais apresentam como possíveis causas o envelhecimento natural e a exposição a ações erosivas, meteorológicas, físico-químicas e biológicas, associadas a uma deficiente ou inexistente manutenção ou a intervenções desadequadas. Relativamente aos danos estruturais, destaca-se a deformação do arco maior, o destacamento de uma aduela no intradorso do mesmo e a fendilhação longitudinal no intradorso do arco menor. A existência dos danos de origem biológica, e.g., a vegetação, dificultou a observação de outros possíveis danos estruturais. Esta situação verificou-se, e.g., no arco maior, onde a vegetação existente não só contribuiu para a degradação do material, como impediu a observação de fendilhação ou de mais aduelas destacadas.

Um plano de intervenção passa pelas operações de manutenção e pelas operações de reabilitação/reforço. A solução apresentada deve ser, sempre que possível, aferida por modelos de análise estrutural. As técnicas de intervenção recomendadas devem ser pouco intrusivas e os materiais aplicados devem ser compatíveis com os materiais existentes de modo a minimizar as alterações de rigidez da ponte e consequentemente do seu comportamento estrutural, e a não causarem novos danos. Os materiais a aplicar devem ainda ter uma maior durabilidade que os materiais existentes e possibilitar a sua remoção sem causar danos na estrutura.

O programa adotado para a análise da ponte em estudo foi o LFE-MEDM. A malha de ED é constituída por ED, que contactam entre si através das descontinuidades criadas pelas juntas.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Os seus vértices são arredondados, permitindo definir de forma unívoca as direções normal e tangencial do contacto entre os ED e o movimento dos ED de forma contínua durante a análise. Na análise apresentada foram adotados modelos rígidos, contactos deformáveis e pontuais. Considerou-se a rigidez igual para todos os ED. Foi seguido um modelo em termos de forças e o modelo constitucional na direção normal apresenta uma relação linear elástica e na direção tangencial apresenta uma relação linear limitada pelo Critério de Mohr Coulomb. Para obter o comportamento da ponte foi ainda necessário definir as propriedades mecânicas dos materiais constituintes, i.e.: (1) a resistência à compressão, a resistência à tração, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a massa volúmica das unidades de alvenaria, (2) o ângulo de atrito interno, a coesão, a rigidez normal e rigidez tangencial para as juntas e (3) o módulo de elasticidade e a massa volúmica para o material de enchimento. Como não era do âmbito do presente trabalho a realização de ensaios para determinação destas características, adotaram-se os valores referidos na bibliografia especializada.

Além se pretender aferir a solução de intervenção para a ponte em estudo, pretendeu-se ainda avaliar as diferenças entre recorrer à geometria real da ponte e recorrer a geometrias obtidas por gerações automáticas relativamente à capacidade de carga da ponte. Deste modo a geração por levantamento geométrico representa a deformação do arco maior, enquanto a geração automática representa o arco perfeito. Pretendeu-se ainda avaliar a importância do material de enchimento e do muro de tímpano na capacidade de carga do arco maior, bem como a influência da rigidez normal e tangencial do modelo.

Os dois tipos de geração de malha de EDP conduzem a resultados muito similares, concluindo-se que se pode recorrer a uma malha de EDP automática de forma a obter uma estimativa rápida da capacidade de carga de PAAP.

7.2 Desenvolvimentos futuros

De modo a contribuir para uma boa avaliação e intervenção em PAAP, apresentam-se a seguir alguns desenvolvimentos possíveis ao trabalho realizado.

Elaboração de uma base de dados com os termos usuais no estudo de PAAP de modo a não serem utilizados diversos termos mas com o mesmo significado, contribuindo deste modo para a sua uniformização, não originando equívocos em posteriores estudos e contribuindo para a qualidade das várias fases que conduzem a uma adequada intervenção em PAAP.

Construção de uma base de dados com informação relativamente aos danos, causas, inspeção e formas de intervenção em PAAP. Continuação do desenvolvimento do Anexo II do relatório de inspeção e diagnóstico aqui apresentado onde consta para cada tipo de dano: (1) descrição; (2) esquema/fotografia; (3) possíveis causas; (4) consequências; (5) prevenção; (6) possíveis

intervenções e (7) observações. Sugere-se a indicação para cada tipo de operação de intervenção: (1) dos procedimentos a seguir, bem como possíveis alternativas e ensaios necessários de realizar; (2) das vantagens e desvantagens, bem como cuidados a ter; e (3) de uma estimativa de custos, seguindo, e.g., o modelo desenvolvido por Martins, D. (2011) e adaptando-o ao caso das PAAP.

Desenvolvimento de um software para iPad ou similar para utilização da proposta da ficha de inspeção visual e para a realização do Anexo I e II do relatório de inspeção e diagnóstico, de modo a criar uma espécie de curriculum da PAAP que se possa atualizar de cada vez que se faça uma visita de inspeção, ensaios ou intervenções nas PAAP, guardando a informação em sites/servidores. Haveria deste modo um contributo para uma utilização mais acessível, rápida e ecológica *in situ*.

Elaboração de uma base de dados com informação sobre ensaios de materiais constituintes das PAAP de modo a se poderem aplicar em futuras análises numéricas.

Relativamente ao LFE-MEDM sugere-se o desenvolvimento de rotinas de gerações automáticas de tipologias de arcos além das tipologias de arco perfeito e segmentado e de rotinas de gerações automáticas da ligação muro de tímpano com o arco. Sugere-se ainda, a possibilidade de as gerações automáticas de arcos permitirem uma disposição de EDP não única ao longo da sua espessura, de modo a permitirem uma análise mais próxima das situações reais.

Relativamente à ponte em estudo, propõem-se a seguir alguns trabalhos. Sugere-se a análise do arco com a simulação do material de enchimento em toda a ponte e não apenas sobre o arco. Sugere-se a sua análise para valores de incrementos de carga diferentes de modo a comparar a sua influência no valor da carga de colapso. Finalmente outro desenvolvimento possível seria realizar uma análise sísmica de modo a averiguar as suas consequências.

7.3 Autoavaliação

O trabalho apresentado inicialmente consistiu na realização de 11 tarefas: (1) apresentação do comportamento de PAAP; (2) apresentação dos danos que normalmente ocorrem em PAAP; (3) apresentação das fichas de inspeção visual tipo e/ou apresentar uma proposta de ficha de inspeção visual; (4) inspeção visual da Ponte Românica de Mondim da Beira, com preenchimento da proposta de ficha de inspeção visual elaborada e levantamento topográfico; (5) elaboração da malha de ED; (6) estudo do método dos elementos discretos misto bidimensional, MEDM a 2D; (7) com base na tarefa 1 e 4 determinar a origem dos danos na ponte em estudo; (8) determinar a capacidade de carga da ponte em estudo; (9) apresentar

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

soluções para correção dos danos observados; (10) apresentar as principais conclusões do trabalho e (11) criticar o trabalho realizado.

Estes objetivos foram atingidos, mas com algumas alterações. Numa primeira fase foi elaborada uma pesquisa de informação teórica com conseqüente escrita sobre: (1) o comportamento das PAAP, através da apresentação: dos elementos e materiais constituintes das PAAP; do seu sistema estrutural consoante a sua Época de Construção e da evolução dos conhecimentos ao longo do tempo; (2) os fatores desencadeadores de danos, os principais tipos de danos, os principais aspetos a considerar no diagnóstico das PAAP e os tipos de intervenção mais usuais; e (4) os principais fundamentos do método dos elementos discretos (MED). Numa segunda fase foram aplicados os conhecimentos da primeira fase: (5) ao diagnóstico e (6) à análise estrutural da Ponte Românica de Mondim da Beira. Foi elaborada uma proposta de ficha de inspeção visual, sendo posteriormente realizado o diagnóstico da ponte em estudo, que consistiu na: (i) realização da inspeção visual da ponte em estudo com o preenchimento da proposta de ficha de inspeção visual elaborada; (ii) realização por parte da Câmara Municipal de Tarouca do levantamento topográfico da ponte e respetivo desenho e (iii) apesar de não ser do âmbito do presente trabalho, na elaboração de um relatório de inspeção e diagnóstico com base na informação histórica recolhida sobre a ponte e na informação recolhida durante a inspeção visual. A análise estrutural consistiu em dois objetivos: (i) na avaliação da capacidade de carga da ponte em estudo de modo a aferir as técnicas de intervenção recomendadas no diagnóstico e (ii) na comparação do valor da capacidade de carga obtido através de dois tipos de geração de malha de elementos discretos (a) por recurso ao levantamento geométrico da ponte e (b) por recurso à geração automática.

A realização do presente trabalho passou pela pesquisa e estudo de informação sobre a qual se tinha pouco ou nenhum conhecimento, destacando-se o comportamento estrutural das PAAP e o método dos ED. Deste modo, foram sentidas dificuldades na sua compreensão e na posterior organização da informação a apresentar. A não uniformização da informação não facilitou o trabalho. A falta de sensibilidade relativamente ao programa de ED conduziu a um atraso na análise da ponte em estudo. A inexistência de experiência da realização de inspeções dificultou a elaboração da proposta da ficha de inspeção visual. Houve dificuldade na organização do tempo em cada tarefa.

Foram contactadas entidades de modo a adquirir conhecimentos e alguma sensibilidade relativamente ao reconhecimento de danos, formas de intervenção e aspetos a ter em consideração. Foram observadas várias paredes e muros de alvenaria de pedra de modo a conseguir reconhecer os diferentes tipos de danos não estruturais. Foram contactadas pessoas envolvidas em estudos/trabalhos relativos a análise numérica e ao método dos ED de modo a adquirir conhecimentos. Foram analisados exemplos de modelos de modo a reconhecer falhas e ganhar sensibilidade ao programa de ED.

7. Conclusões

Ao tentar elaborar um trabalho que permitisse uma consulta acessível e motivadora e que contribuísse para a realização mais acessível de futuros trabalhos similares, conseguiu-se atingir um nível específico de organização do trabalho.

Tendo em consideração que este trabalho pode ter uma continuação foram apresentados alguns desenvolvimentos futuros.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

REFERÊNCIAS

ABREU, T. (2010/2011) – **Aula 6: Regularização Fluvial e Controlo de Cheias: Obras de Beneficiação e Requalificação incluindo Proteção das Margens**. Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação, Infra-estruturas Hidráulicas. 1ª ed. Viseu: Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu do Instituto Politécnico de Viseu. Vol. 6.

ALMEIDA, C. M. N. V. (2000) – **Análise do comportamento da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar sob a acção dos sismos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.

ALVES, A. S. C. (2009) – **Reabilitação e Reforço de Pontes de Alvenaria**. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação de Mestrado.

ALVES, E. e LOURENÇO, P. B. (2000) – **Investigação Sobre a Estrutura das Ruínas da Igreja Visigótica da Plaza del Rey em Barcelona**. Guimarães: Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

BARTUSCHKA, P. (1995) – **Instandsetzungsmaßnahmen an hochwertiger Bausubstanz von Gewölbebrücken**. Dresden: Institut für Tragwerke und Baustoffe, Technische Universität Dresden. Diplomarbeit.

BEGONHA, A. (2011) – **PATOLOGIA DA PEDRA: CASOS DE OBRA**, 1^{as} Jornadas de MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

BELYTSCHKO, T. (1983) – **An overview of Semidiscretization and time integration procedures, COMPUTACIONAL METHODS FOR TRANSIENT ANALYSIS**. Eds. T. Belytschko e T. J. R. Hughes. [S.l.]: North-Holland. p. 245-265.

BRITO, J. (2005) – **Patologias em Pontes de Betão. DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS (algumas conclusões)**, 1º Ciclo de Seminários de Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

CORRADI, M. (1998) – **Empirical methods for the construction of masonry arch bridges in the 19th century**. Arch Bridges: history, analysis, assessment, maintenance and

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

repair. Proceedings of the second international arch bridge conference. Eds. A. Sinopoli, Venice 6–9. Balkema Rotterdam. p. 25-36.

CORRADI, M. e Filemio, V. (2004) – **A brief comparison between mechanical aspects and construction of arch bridges during the XVIIIth and XIXth centuries.** Arch Bridges IV – Advances in Assessment, Structural Design and Construction. Eds. P. Roca e C. Molins CIMNE. Barcelona. p. 79-86.

COSTA, A. [et al.] (2010) – **Intervenção no Património – A experiencia do NCREP/IC da FEUP.** Congresso Património 2010. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

COSTA, C. M. R. (2002a) – **Análise do Comportamento da Ponte da Lagoncinha sob a Ação do Tráfego Rodoviário.** Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.

COSTA, C. M. R. (2002b) – **Artigo 4: Modelação e análise do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra.** [S.l.].

COSTA, C. M. R. (2002c) – **MODELAÇÃO E ANÁLISE NUMÉRICA DE PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA.** Tomar: Escola Superior de Tecnologia de Tomar do Instituto Politécnico de Tomar.

COSTA, C. M. R. (2009) – **Análise numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra.** Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Doutoramento.

COSTA, P. M. Q. M. (2007) – **Análise da Construção e do Comportamento duma Ponte de Pedra.** Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.

COSTA, V. M. (2009) – **Desempenho e Reabilitação de Pontes Rodoviárias.** Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Dissertação de Mestrado.

CRUZ, P. (2006) – **LINHAS ORIENTADORAS DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO, CONSERVAÇÃO E INSPECCÃO DE PONTES,** JPEE: 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

CUNDALL, P. A. (1971a) – **The measurement and analysis of accelerations in rock slopes.** London: University of London. Doctoral Thesis.

CUNDALL, P. A. (1971b) – **A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems**, Proc. Of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. [S.l.]: Vol. 1, paper n.º II-8.

CUNDALL, P. A. (1987) – **Distinct Element Models of Rock and Soil Structure**, Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics. Eds. E. T. Brown. London: Allen & Unwin. p. 129-163.

CUNDALL, P. A. (1988) – **Formulation of three-dimensional distinct element model – Part I: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks**. [S.l.]: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol. 25, n.º 3. p. 107-116. [S.l.].

CUNDALL, P. A. e HART, R. D. (1992) – **Numerical Modeling of Discontinua**. [S.l.]: Engineering Computations. Vol. 9, n.º 2. p. 101-113.

CUNDALL, P. A. e STRACK, O. D. L. (1979) – **A discrete Numerical Model for Granular Assemblies**. [S.l.]: Géotechnique, Vol. 29. p. 47-65.

DUARTE, F. (2006) – **Pontes Romanas do Alentejo**. Lisboa: Aldraba, Associação do Espaço e Património Popular.

ENGEL, H. (1981) – **Sistemas de Estruturas**. São Paulo: Hemus.

ESPANHA. CivilGeeks.com: La web del Ingeniero Civil [Em linha]. [Consult. 19 de Setembro de 2011]. Disponível em <<http://civilgeeks.com/teoremas-de-castigliano>>.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Itasca Consulting Group, Inc. (1999) – **UDEC - Universal Distinct Element Code**, User's Manual, Version 3.1.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Itasca Consulting Group, Inc. (2002) – **PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions)**, User's Guide, Version 3.0.

EUROCODE N.º 6 (1998) - **Common unified rules for masonry structures**. COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.

Flickr [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://www.flickr.com>>.

FOCE, F. (2002) – **Sulla teoria dell' arco murario: una rilettura storico-critica**. In: Becchi, A.; Foce, F. Degli archi e delle volte: Arte del costruire tra meccanica e stereotomia. Venezia: Marsilio.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FRANÇA. L'association ASCO TP - Association pour la Connaissance des Travaux Publics [Em linha]. [Consult. 20 de Setembro de 2011]. Disponível em <<http://www.planete-tp.com>>.

GAGO, A. S. (2004) – **Análise estrutural de arcos, abóbadas e cúpulas. Contributo para o estudo do património construído.** Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Tese de Doutoramento.

GAGO, A. S.; ALFAIATE, J. e ALMEIDA, J. R. (2003) – **Simulação numérica de um ensaio experimental efetuado numa ponte em alvenaria de pedra**, VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional. Évora: Universidade de Évora.

GEOCACHING [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://www.geocaching.com>>.

Google Maps. [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://maps.google.com>>.

HAMMAH, R. E.; YACOUB, T. e CURRAN, J. H. (2009) – **Variation of Failure Mechanisms of Slopes in Jointed Rock Masses With Changing Scale**, ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium. Eds. M.Diederichs and G. Grasselli. Toronto.

HEYMAN, J. (1972) – **COULOMB'S MEMOIR ON STATICS: An Essay in the History of Civil Engineering.** Cambridge: Cambridge University Press.

HEYMAN, J. (1995) – **THE STONE SKELETON: STRUCTURAL ENGINEERING OF MASONRY ARCHITECTURE.** Cambridge: Cambridge University Press.

HORTAL, J. CARASCO (2002) – **LA ESTRUCTURA GÓTICA CATALANA: SOBRE LOS CONCEPTOS DE MEDIDA Y ESPACIO. EL PROBLEMA DE LA FORMA EN LA CUBIERTA.** Catalunã: Universitat Politècnica de Catalunya. Disertación.

HUERTA, S. (1996) – **La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico.** [S.l.]: Obra Pública. Vol. 38.

HUERTA, S. (2001) – **Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach.** Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques. Eds. P.B. Lourenço, P. Roca. Guimarães: Universidade do Minho. ISBN: 9728692013.

HUERTA, S. (2004) – **Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica.** Madrid: Instituto Juan de Herrera. ISBN: 8497281292.

ICOMOS - Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico (2003) – **Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do Património Arquitectónico**; trad. por P. B. Lourenço e D. V. Oliveira.

IGESPAR - Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico – **Ponte românica de Mondim da Beira** [Em linha]. [Consult. 9 de Agosto de 2011]. Disponível em <<http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/pesquisa/geral/patrimonioimovel/detail/72376>>.

IMAGE DE LA QUALITÉ DES OUVRAGES D'ART (1996) – **Pont en maçonnerie, CATALOGUE DES DÉSORDRES.** Bagnex Cedex: Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes. F 9639 CA.

IPHAN - Instituto do Património Histórico e Artístico Nacional (2000) – **MANUAL DE CONSERVAÇÃO DE CANTARIAS.** Brasil: IPHAN - Instituto do Património Histórico e Artístico Nacional.

KURRER, K. E. (2008) – **THE HISTORY OF THE THEORY OF STRUCTURES: From Arch Analysis to Computational Mechanics.** Berlin: Ernest & Sohn.

LANÇA, P. D. S. (2006) – **Análise estrutural de abóbadas poli-nervuradas: Aplicação ao Coro Alto do Mosteiro dos Jerónimos.** Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Dissertação de Mestrado.

LEMOS, J. V. (1995a) – **Segurança de arcos de alvenaria,** IV Encontro Nacional de Mecânica Computacional. Lisboa. Vol. 1. p. 91-99.

LEMOS, J. V. (1999) – **Modelling and failure analysis in rock engineering.** Lisboa: TESES E PROGRAMAS DE INVESTIGAÇÃO LNEC.

LOURENÇO, P. B. (1996) – **Computational Strategies for Masonry Structures.** Delft: Delft University of Technology. Doctoral Thesis. ISBN: 90-407-1221-2, NUGI 841.

LOURENÇO, P. B. (2001) – **Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations.** Historical Constructions. Eds. P. B. Lourenço, P. Roca. Guimarães: Universidade do Minho.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

LOURENÇO, P. B. e OLIVEIRA D. V. (2003) – **Pontes de alvenaria - Técnicas de construção e fundações. Técnicas de inspeção e de reforço.** Casos de estudo. Braga: Escola de Engenharia da Universidade do Minho.

LOURENÇO, P. B.; ROCA, P. e ALVES, E. (2000) – **TEMA 4, Propostas para a superestrutura da igreja visigótica na praça do rei (Barcelona)**, Modelação e Segurança de Estruturas Antigas, Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. Ed. S. Pompeu Santos [et al.]. Lisboa, p. 437-446.

MARTINS, D. M. (2011) – **Estrutura geral de custos em obras de reabilitação de edifícios em alvenaria de pedra existentes.** Viseu: Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu do Instituto Politécnico de Viseu. Dissertação de Mestrado.

MARTINS, J. P. (2004) – **Análise de pontes de alvenaria em arco: Aplicação à ponte de Soeiro.** Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Trabalho de projecto individual.

MORAIS, A. (2007) – **Ruptura de um Arco de Alvenaria**, ARTITEXTOS05. Lisboa: ARTITEXTOS.

MORAIS, M. J. C. (2010) – **DIAGNÓSTICO E MANUTENÇÃO/REABILITAÇÃO DE UMA PATOLOGIA: TRATAMENTO DE FISSURAS EXTERIORES E REABILITAÇÃO TÉRMICA.** Viseu: Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu do Instituto Superior de Viseu. Trabalho individual no âmbito da disciplina de Patologias e Reabilitação de Edifícios, 2010. (Trabalho não publicado).

MORAIS, M. J. C., ROUXINOL, G. A. F. e PIMENTA, P. J. R. (2012) – **ASSESSMENT OF THE CAPACITY OF MONDIM DA BEIRA BRIDGE USING TWO DISTINCT MESH GENERATIONS**, 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. Wroclaw.

MORGADO, R. S. (2008) – **Avaliação da capacidade de carga de pontes em arco de alvenaria pelo método dos elementos discretos.** Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado.

MURALHA (2000) – **Ensaio de mecânica das rochas na Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar**, Relatório n.º 277/00-NOS. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

N 1991-1-1:2002, CT 115, EUROCÓDIGO 1 - **Acções em Estruturas.** Versão Portuguesa. Monte da Caparica: Instituto Português da Qualidade.

- NUNES, P. C. C. (2009) – **Teoria do Arco de Alvenaria: Uma Perspectiva Histórica**. Brasília: Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Dissertação de Mestrado.
- OLIVEIRA, D. V. e LOURENÇO, P. B. (2003) – **Pontes de alvenaria - Técnicas de construção e fundações. Técnicas de inspeção e de reforço**. Casos de estudo. Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- OLIVEIRA, D. V. e LOURENÇO, P. B. (2004) – **REPAIR OF STONE MASONRY ARCH BRIDGES - Arch Bridges**, ARCH'04 - 4th International Conference on Arch Bridges. Eds. P. Roca and E. Oñate. Barcelona: CIMNE - International Center for Numerical Methods in Engineering.
- OLIVEIRA, D. V.; LOURENÇO, P. B. e ROCA, P. (2003) – **Tema 3: Técnicas de Inspeção e Diagnóstico: Comportamento experimental de muros de pedra sujeitos a esforços de compressão e corte**, Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. Eds. S. Pompeu Santos [et al.]. Lisboa.
- ORBÁN, Z. (2007) – **UIC Project on assessment, inspection and maintenance of masonry arch railway bridges**, ARCH'07 - 5th International Conference on Arch Bridges. Madeira.
- PADRÃO, J. (2010) – **Durabilidade de Estruturas II: Comportamento Estrutural**. Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação. 1ª ed. Viseu: Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu do Instituto Politécnico de Viseu. Vol. 3.
- PAGE, J. (1993) – **Masonry arch bridges (State of the Art Review)**. Londres: Transport Research Laboratory, Department of Transport.
- Panorâmico [Em linha]. [Consult. 21 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://www.panoramio.com>>.
- PATRÍCIO, H. (2009) – **Inspeção de Pontes Ferroviárias**, 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP'09. Lisboa: ASCP - ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA PARA A SEGURANÇA E CONSERVAÇÃO DE PONTES.
- PAUPÉRIO, E. [et al.] (2010) – **Inspeção e diagnóstico de estruturas**, Congresso Património 2010. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PERRONET, J. R. (1987) – **CONSTRUIRE DES PONTS AU XVIII SIECLE**. Paris: Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

PETRINIC, N. (1996) – **Aspects of discrete element modelling involving facet-to-facet contact detection and interaction**. Swansea: University of Wales Swansea.

PORTUGAL. Alentejo – Um local de sonho [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://localentejo.blogspot.com>>.

PORTUGAL. e-PORTFOLIO [Em linha]. [Consult. 24 de Outubro de 2011]. Disponível em <<http://maisbiogeologia.blogspot.com>>.

PORTUGAL. Grupo BETAR (2006) – **Manual da Qualidade do Grupo Betar** [Em linha]. Disponível em <<http://www.betar.pt>>.

PORTUGAL. GRUPO DE ESTUDOS DA PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, PATORREB [Em linha]. [Consult. 23 de Novembro de 2010]. Disponível em <<http://www.patorreb.com>>.

PORTUGAL. GUIADACIDADE [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://www.guiadacidade.pt>>.

PORTUGAL. Igogo – Turismo e Lazer em Portugal [Em linha]. [Consult. 21 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://www.igogo.pt>>.

PORTUGAL. INSTITUTO DE METEOROLOGIA, IP [Em linha]. [Consult. 20 de Outubro de 2011]. Disponível em <<http://www.meteo.pt>>.

PORTUGAL. Instituto Politécnico de Tomar – **Metodologias simplificadas para análise estrutural. Aplicação ao Caso de estudo do troço do Aqueduto dos Pegões localizado na Quinta Nova da Raposa** [Em linha]. Tomar: Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Tomar [Consult. 21 de Novembro de 2010]. Disponível em <<http://portal.estt.ipt.pt/engcivil/estt3701/Index.html>>.

PORTUGAL. Jornal O TEMPLÁRIO [Em linha]. [Consult. 21 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://www.otemplario.pt>>.

PORTUGAL. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [Em linha]. [Consult. 29 de Novembro de 2010]. Disponível em <<http://www.lnec.pt>>.

PORTUGAL. Município de Tarouca [Em linha]. [Consult. 20 de Outubro de 2011]. Disponível em <<http://www.cm-tarouca.pt>>.

PORTUGAL. NCREP: Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património – **Relatório de Inspeção à Ponte D. Zameiro** [Em linha]. [ed.]. Porto: Núcleo de

Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património [Consult. 29 de Março de 2011]. Disponível em <<http://ncrep.fe.up.pt/bd.asp>>.

PORTUGAL. NCREP: Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património – **Relatório de Inspeção à Ponte de Cepeda** [Em linha]. [ed.]. Porto: Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património [Consult. 29 de Março de 2011]. Disponível em <<http://ncrep.fe.up.pt/bd.asp>>.

PORTUGAL. Olhares Fotografia Online [Em linha]. [Consult. 23 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://olhares.sapo.pt>>.

PORTUGAL. OZ - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda. – **RELATÓRIO DE INSPEÇÃO PRINCIPAL (2008)**. [ed.]. Lisboa: OZ.

PORTUGAL. OZ - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda. – **RELATÓRIO DE INVENTÁRIO (2008)**. [ed.]. Lisboa: OZ.

PORTUGAL. Portal da habitação [Em linha]. [Consult. 15 de Novembro de 2010]. Disponível em <<http://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/index.jsp>>.

PORTUGAL. Retratos e Recantos [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://retratoserecantos.pt>>.

PORTUGAL. São Pedro Velho [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://saopedrovelho.blogspot.pt>>.

PORTUGAL. Trás-os-Montes, mar de pedra [Em linha]. [Consult. 21 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://mardepedra.blogspot.com>>.

PORTUGAL. Trás-os-Montes.Net [Em linha]. [Consult. 20 de Maio de 2011]. Disponível em <<http://trasosmontesnet.blogspot.com>>.

PORTUGAL. Universidade da Madeira – **Ficha-de-inspeção-diagnóstico** [Em linha]. Madeira: Universidade da Madeira [Consult. 18 de Novembro de 2010]. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/15968711/ficha-de-inspeção-diagnóstico>>.

PROSKE, D. e GELDER, P. V. (2009) – **Safety of Historical Stone Arch Bridges**. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-77616-1, e-ISBN: 978-3-540-77618-5, DOI 10.1007/978-3-540-77618-5.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ROCHA, M. (1971) – **Curso de mecânica das rochas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

ROCHA, N. C. G. N. G. (2010) – **Análise de Patologias Estruturais em Arcos de Alvenaria pelo Método dos Elementos Discretos**. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado.

RODRIGUES, N. (2011) – **REABILITAÇÃO DE PONTES HISTÓRICAS DE ALVENARIA: Estudo tendente ao estabelecimento de metodologias de atuação**, Directrizes para o diagnóstico, conservação, manutenção e reabilitação de pontes de alvenaria. Lisboa: EP: Estradas de Portugal, S.A..

ROUXINOL, G. A. F. (1999) – **Modelo Simplificado para o Estudo da Estabilidade de Arcos em Alvenaria**. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado.

ROUXINOL, G. A. F. (2007) – **Modelação e Avaliação Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria**. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Tese de Doutoramento.

ROUXINOL, G. A. F.; PROVIDÊNCIA, P. e LEMOS, J. V., (2006) – **The discrete element method with 2D rigid polygonal and circular elements**, Proceedings of the V International Conference Structural Analysis of Historical Constructions. Eds. P. B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal. New Delhi. ISBN: 972-8692-27-7. Vol. 2. p. 1023-1031.

SALVADORI, M. G. (2006) – **POR QUE OS EDIFÍCIOS FICAM DE PÉ**. São Paulo: Martins Fontes.

SANTOS, S. P. (2007) – **O CONTEXTO NORMATIVO RECENTE DOS EUROCÓDIGOS SOBRE ESTRUTURAS DE ALVENARIA**, Seminário sobre Paredes de Alvenaria. Eds. P. B. Lourenço [et al]. [S.l.].

SERRA, J. L. F. A. – **Teoria de Estruturas: arcos tri-articulados**. Notas de aulas do Curso de Engenharia Civil. Brasil: Faculdades Integradas Einstein de Limeira.

SILVA, A. [et al.] (2010) - **LEVANTAMENTO DO TIPO DE PAREDES E MUROS ANTIGOS NA ZONA DE VISEU E GUARDA**. Viseu: Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu do Instituto Superior de Viseu. Trabalho de grupo no âmbito da disciplina de Durabilidade de Estruturas II, 2010. (Trabalho não publicado).

- SILVA, B.; GUEDES, J. M. e COSTA, A. (2010) – **Estratégias de modelação numérica no estudo de estruturas históricas. Experiência do NCREP (FEUP)**, Congresso Património 2010. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SILVA, V. C. e LANÇA, P. (2002) – **Ferramenta de Apoio ao Diagnóstico de Pontes e Viadutos de Betão**, 2º Congresso Rodoviário Português. ESTRADA 2002. Lisboa: OZ, Ld.^a.
- SÎNCRAIAN, G. E. (2001) – **Seismic Behaviour of Blocky Masonry Structures: A Discrete Element Methods Approach**. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Tese de Doutoramento.
- SÎNCRAIAN, G. E. e LEMOS, J. V. (1998a) – **A discrete element program based on a rigid block formulation**, Relatório 40/98 – NDE/NEE. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- SIPA - Sistema de Informação para o Património Arquitetónico – **Ponte românica de Mondim da Beira** [Em linha]. [Consult. 9 de Agosto de 2011]. Disponível em <http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=5010>.
- SOWDEN, A. M. (1990) – **The Maintenance of Brick and Stone Masonry Structures**. [S.l.]: E. & F.N. Spon.
- SUSSEKIND, J. C. (1981) – **Curso de análise estrutural**. 3ª ed. Porto Alegre: Globo. Vol. 3.
- TOMAZEVIC, M. (1999) – **EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN OF MASONRY BUILDINGS. Series on Innovations in Structures and Construction**. London: Imperial College Press. Vol. 1.
- UNDERWOOD, P. (1983) – **Dynamic Relaxation, Computational Methods for Transient Analysis**. Eds. T. Belytschko e T. J. R. Hughes. [S.l.]. p. 1-65.
- VASCONCELOS, G. [et al.] (2003) – **Caracterização das Propriedades de Granitos - Implicações para a Conservação e Reabilitação do Património Arquitectónico**. Lisboa: 3º Encore – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- VICENTE, R. S. (2008) – **Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana: Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra**. Aveiro: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Aveiro. Tese de Doutoramento.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

VIEIRA, J. L. M. (1997) – **Um Modelo de Elementos Discretos para o Estudo de Estruturas de Alvenaria**. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação de Mestrado.

DA VINCI, L. e RICHTER, J. P. (1970) – **THE NOTEBOOKS OF LEONARDO DA VINCI: COMPILED AND EDITED FROM THE ORIGINAL MANUSCRIPTS BY JEAN PAUL RICHTER**. New York: Dover. Vol. 2.

Wikipédia [Em linha]. [Consult. 31 de Junho de 2011]. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org>>.

APÊNDICE A – Método MEXE

No presente Apêndice são referidas as principais noções do método MEXE.

O método MEXE (Military Engineering Experimental Establishment)

Desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), tinha como principal objetivo dotar os engenheiros durante as campanhas militares de um procedimento rápido para a avaliação da capacidade de carga das PAAP que os veículos militares tinham que transpor. Tratava-se de um método geralmente conservativo, que sofreu várias revisões devido às mudanças de cargas nas pontes (Proske e Gelder, 2009).

No método MEXE foram admitidos alguns pressupostos, entre eles destacam-se: (1) os arcos são parabólicos e construídos com unidades de alvenaria de boa qualidade, apresentando uma razão vão/flecha igual a 4; (2) as juntas encontram-se fechadas; (3) os arcos possuem adequados encontros; (4) existe um limite para o vão dos arcos de 18 metros no máximo e (5) o enchimento e os muros de tímpano não são considerados. Recorria-se a um ábaco, ver Figura A-1 (a), e a uma equação de equivalência, ver expressão (A-1), para a avaliação da carga provisória, P_v , que era posteriormente afetada de fatores corretivos, que se apresentam a seguir, conduzindo ao valor da carga admissível, P_{adm} , ver expressão (A-2).

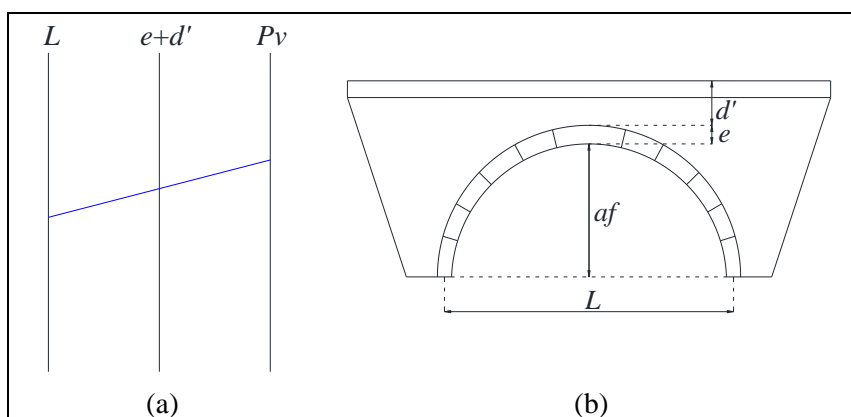


Figura A-1: (a) Ábaco para determinar a carga provisória. (b) Variáveis para o método MEXE

$$P_v = \frac{740(e+d')^2}{L^{1,3}} \leq 70 \quad (\text{A-1})$$

$$P_{adm} = f_{sr} * f_p * f_m * f_i * f_{cM} * P_v \quad (\text{A-2})$$

Onde, d , h e L são apresentadas na Figura A-1 (b) e P_v [toneladas] é a carga provisória e P_{adm} [toneladas] a carga admissível.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Os fatores baseiam-se em informação quantitativa obtida após inspeção cuidada da estrutura:

(1) f_{sr} , representa a razão vão/flecha e permite corrigir o valor de P_v para valores de vão/flecha diferentes de 4. Quando esta relação toma valores superiores a 4 o fator é reduzido de 1 até 0,6 (este último no caso da razão tomar o valor igual a 8);

(2) f_p , representa a razão vão/flecha para valores diferentes de 3/4. Assim para valores superiores a 3/4 o fator toma valores inferiores a 1;

(3) f_m representa a ponderação entre a qualidade do material das aduelas e do enchimento e varia entre 0,6 e 1,2;

(4) f_j , tem em consideração a espessura e a largura das juntas e a qualidade da argamassa. Toma valores entre 0,5 e 1;

(5) f_{cM} , é a resultante da apreciação geral do estado da estrutura. É um fator de carácter subjetivo que varia entre 0 e 1.

APÊNDICE B - Relações empíricas de natureza geométrica

No presente Apêndice, nomeadamente no Quadro B-1, são expostas as relações empíricas de natureza geométrica, onde as variáveis, ver Figura B-1, são: (1) b , largura em planta no sentido longitudinal; (2) S_s , largura em planta do pilar; (3) h , altura do pilar; (4) e , espessura do arco; (5) a_f , flecha do arco; (6) L , vão do arco; (7) h^* , altura fictícia do pilar; (8) h_1 , espessura do enchimento na zona do recobrimento do arco e (9) H , altura total.

Quadro B-1: Relações empíricas de natureza geométrica

	Gambarotta	Lagomarsino [et al.]
Espessura do arco (m)	$e = \frac{L}{12} a \frac{L}{17}$ $e = 0,33 + 0,33L$	$\frac{e}{a_f} = 0,325 + 0,0347L$ $e = 0,33 + \frac{L}{15}$ $e = 0,1 + 0,2L^{1/2}$ $e = 0,2L^{1/2}$ $e = \frac{(1 + 0,1L)}{3}$ $e = 0,43 + 0,05L$
Largura do pilar (m)	$b = 0,2h + 0,6$ $b = 0,125L$ $h_1 \leq 0,4 \text{ metros}$	$S_s = (0,6 + 0,04h^*)L^{1/2}$ $S_s = (0,6 + 0,162L) \left[\frac{(h^* + 0,25L)0,865}{(H(0,25L + e))} \right]^{1/2}$ $S_s = 0,305 + \frac{5L}{24} + \frac{h}{6} + \frac{h_1}{12}$

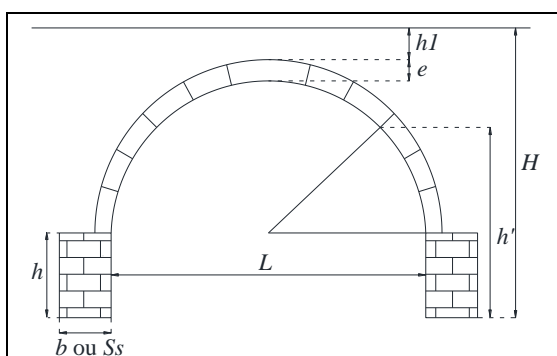


Figura B-1: Variáveis para as fórmulas empíricas. Adaptado de (Costa, P., 2007)

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

APÊNDICE C – Proposta de Ficha de inspeção visual

No presente Apêndice, Quadro C-1, é apresentada a proposta de ficha de inspeção visual elaborada, de modo a se poder adaptar a qualquer PAAP.

Para a realização ficha de inspeção visual foram consultados: Costa, C. (2002c); Brito (2005); Ficha de Inspeção e Diagnóstico (Portugal, Universidade da Madeira); Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (2004); Vicente (2008); Morais, M. (2010); Silva, A. et al. (2010) e o Caso de estudo do troço do Aqueduto dos Pegões (Portugal, Instituto Politécnico de Tomar). Foi consultado o NCREP , com um *feedback* positivo, nomeadamente a técnica Esmeralda Paupério. Foi contactada a Nova Conservação/NC com objetivo de obter informações relativas à inspeção, levantamento de danos e intervenções de manutenção e reparação de construções de alvenaria, nomeadamente de PAAP. Foi obtido *feedback*, apesar de a informação ter sido no sentido de se estar perante um trabalho de especialidade de engenharia civil para o qual não podiam ajudar. Foi ainda consultada a informação e o relatório facultados pela OZ (OZ, RELATÓRIO DE INSPECÇÃO PRINCIPAL, 2008 e OZ, RELATÓRIO DE INVENTÁRIO, 2008).


Não foram encontradas fichas de inspeção visual tipo para PAAP, apenas nas situações em que entidades ou autores individuais para fins académicos utilizam uma ficha de inspeção e/ou base de dados para seu uso, e.g., NCREP, OZ e BETAR.

Na primeira visita ao local da ponte em estudo, foi preenchida a ficha de inspeção visual de modo a perceber quais as dificuldades sentidas e detetar erros e/ou lapsos. As dificuldades iniciais resumem-se em: (1) criar campos de informação de forma a refletirem os vários aspetos relevantes para uma PAAP de modo a serem facilmente preenchidos; (2) dificuldade em associar danos e respetivas causas; (3) dificuldade em obter informação sobre alguns campos no local. Relativamente ao segundo aspeto: pode não se conseguir identificar no local as causas dos danos; podem existir diversas causas para o mesmo dano; as causas do dano podem ser outros danos. Deste modo foram efetuadas as respetivas alterações. Optou-se por não colocar as possíveis causas dos danos na ficha de inspeção visual mas sim no Anexo II do relatório de inspeção e diagnóstico, tornando-se deste modo relevante a sua criação. Deste modo, no Apêndice F, do Quadro F-1 ao Quadro F-7, é apresentado o Anexo II do relatório de inspeção e diagnóstico e são referidos os vários trabalhos consultados para a sua criação.

O tamanho dos campos de descrição, notas, observações e danos, pode ser adaptado consoante a PAAP em estudo. Os campos de notas e observação ajudam a referir informação que não se inclui nas opções dadas. Os campos de notas tornam os campos de observação menos extensos.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro C-1: Proposta de ficha de inspeção visual de PAAP elaborada

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA _____	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
Ficha nº: _____	Data: ___/___/____; ___/___/____
Equipa/Técnico: _____	


IDENTIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PAAP

1: Dados Gerais


1.1: Localização

(i) Distrito: _____ (v) Localidade: _____
(ii) Concelho: _____
(iii) Freguesia: _____ (vi) Rua: _____
(iv) Curso de água: _____

1.2: Esquemas

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
Ficha nº: _____ Data: __/__/____; __/__/____ Equipa/Técnico: _____	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
1.3: Acesso	
(i) Tipo: Estrada Nacional <input type="checkbox"/> Estrada Municipal <input type="checkbox"/> Caminho Municipal <input type="checkbox"/> Caminho particular <input type="checkbox"/> (ii) Nome: _____ (iii) Existência de outros acessos na proximidade: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (iv) Localização dos outros acessos (km): _____ (v) Estrada / ponte (outros acessos): _____ (vi) Localidade (outros acessos): _____	
1.4: Época construtiva	
(i) Data: _____ (ii) Tipologia da PAAP: Romana <input type="checkbox"/> Medieval <input type="checkbox"/> Moderna <input type="checkbox"/> Várias <input type="checkbox"/> (iii) Designação: _____ (iv) Fonte de informação: _____	
1.5: Classificação	
(i) Propriedade: _____ (ii) Fonte de informação: _____ (iii) Segundo o IHRU/SIPA: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> N° IPA: _____ (iv) Segundo o IGESPAR: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Classificação: _____	
1.6: Utilização	
(i) Em funcionamento: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (ii) Notas: _____ (iii) Utilização: Pedonal <input type="checkbox"/> Rodoviária <input type="checkbox"/> Ferroviária <input type="checkbox"/> (iv) Tráfego diário: _____ (v) Sobrecarga pesadas: Frequente <input type="checkbox"/> Ocasional <input type="checkbox"/> (vi) N° de vias rodoviárias/ferroviárias: _____	
1.7: Registos sismológicos	
(i) Ocorrência de sismos: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (ii) Grau: _____ (iii) Notas: _____ _____ _____	
1.8: Observações	Fotos
_____ _____	_____ _____

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____	
Equipa/Técnico: _____	

_____ _____ _____ _____	
----------------------------------	--

2: Ocorrência de Intervenções e de Alterações

2.1: Existência de registos de outras inspeções

(i) Sim Não (ii) Fonte de informação: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao das ocorrências.

(iii) Nº: _____ (iv) Data: ___/___/____ (v) Autor: _____

(vi) Tipo de inspeção realizada: _____

(vii) Descrição:	Fotos

2.2: Existência de manutenção

(i) Sim Não (ii) Fonte de informação: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao das ocorrências.

(iii) Nº: _____ (iv) Data: ___/___/____ (v) Autor: _____

(vi) Tipo de manutenção realizada: _____

(vii) Descrição:	Fotos


2.3: Existência de intervenções/alterações

(i) Sim Não (ii) Fonte de informação: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao das ocorrências.

(iii) Nº: _____ (iv) Data: ___/___/____ (v) Autor: _____


(vi) Tipo intervenção/alteração realizada: _____

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 DEC <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____ Equipa/Técnico: _____	Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático

(vii) Descrição: _____ _____ _____ _____ _____	Fotos
2.4: Observações	Fotos
_____ _____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____ _____

3: Constituição	
3.1: Tabuleiro	
(i) Descrição do tipo de material: _____ _____ _____	
(ii) Disposição/tipo: Placas de UA regular <input type="checkbox"/> Placas de UA irregular <input type="checkbox"/> Camada de betuminoso <input type="checkbox"/>	
Nota: UA – Unidades de Alvenaria	
3.2: Enchimento	
(i) Descrição do tipo de material: _____ _____ _____	
3.3: Muros de tímpano	
(i) Descrição do tipo de material: _____ _____	
(ii) Disposição/tipo: Regular com preenchimento <input type="checkbox"/> Regular sem preenchimento <input type="checkbox"/> Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/> Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	
(iii) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>	
3.4: Arcos	
(i) Nº de arcos: _____	
Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos arcos.	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____	Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra
Equipa/Técnico: _____	Estudo de um caso prático

(ii) Arco: _____

(iii) Descrição do tipo de material: _____

(iv) Disposição/tipo:

Regular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Regular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>
--	--	--	--

(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original Compatível Cimento Portland

3.5: Pilares e encontros

(i) Nº de pilares e encontros: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos pilares e encontros.

(ii) Pilar / encontro: _____

(iii) Descrição do tipo de material: _____

(iv) Disposição/tipo:

Regular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Regular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>
--	--	--	--

(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original Compatível Cimento Portland

3.6: Talha-mares e talhantes

(i) Nº de talha-mares e talhantes: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos talha-mares e talhantes.

(ii) Talha-mares / talhantes: _____

(iii) Descrição do tipo de material: _____

(iv) Disposição/tipo:

Regular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Regular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>
--	--	--	--

(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original Compatível Cimento Portland

3.7: Fundações


(i) Descrição do tipo de material: _____

(ii) Disposição/tipo:

Direta por sapata sobre maciço rochoso <input type="checkbox"/>	Indireta por pegão/poço sobre maciço rochoso <input type="checkbox"/>	Diretamente sobre maciço rochoso <input type="checkbox"/>
---	---	---

3.8: Guardas

(i) Descrição do tipo de material: _____

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____	
Equipa/Técnico: _____	

(ii) Disposição/tipo:
 Regular com preenchimento Regular sem preenchimento Irregular com preenchimento Irregular sem preenchimento

(iii) Tipo de argamassa nas juntas: Original Compatível Cimento Portland

3.9: Observações	Fotos

4: Geometria

4.1: Dimensões globais

(i) Comprimento total: _____ **(ii) Largura total:** _____ **(iii) Altura máxima:** _____

4.2: Tabuleiro

(i) Largura da via: _____ **(ii) Largura dos passeios:** _____

(iii) Perfil do tabuleiro: _____

(iv) Notas:	Fotos

4.3: Arcos

(i) Nº de arcos: _____

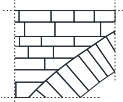
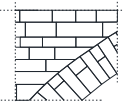
Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos arcos.

(ii) Arco: _____

(a) Tipologia: Volta perfeita Segmentado Parabólico Ogival Abatido Adintelado

(b) Flecha: _____ **(c) Vão:** _____ **(d) Dimensão média dos elementos:** _____


(e) Posição das aduelas:

	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
---	--------------------------	---	--------------------------

(f) Recobrimento sobre a aduela de fecho: _____

(iii) Notas:	Fotos

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____	
Equipa/Técnico: _____	

4.4: Pilares

(i) N° de pilares: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos pilares.

(ii) Pilar: _____ (a) Altura: _____ (b) Largura: _____

(iii) Notas: _____ _____ _____	Fotos
---	-------

4.5: Talha-mares e talhantes

(i) N° de talha-mares: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos talha-mares.

(a) Talha-mares: _____ (a1) Altura: _____ (a2) Largura: _____

(ii) N° de talhantes: _____

Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos talhantes.

(b) Talhantes: _____ (b1) Altura: _____ (b2) Largura: _____

(iii) Notas: _____ _____ _____	Fotos
---	-------

4.6: Fundações

Nota: acrescentar campos em caso de as fundações não serem iguais para toda a PAAP.

(i) Altura: _____ (ii) Largura: _____

(iii) Notas: _____ _____ _____	Fotos
---	-------


4.7: Guardas

(i) Dos dois lados: Sim Não

(ii) Guarda direita: (a1) Altura: _____ (a2) Largura: _____

(iii) Guarda esquerda: (b1) Altura: _____ (b2) Largura: _____

(iii) Notas: _____ _____ _____	Fotos
---	-------

<p>FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA</p> <p>_____</p> <p>Ficha nº: _____ Data: __/__/____; __/__/____</p> <p>Equipa/Técnico: _____</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra</p> <p>Estudo de um caso prático</p>
---	--

4.8: Observações	Fotos

REGISTO DE DANOS

5: Danos estruturais


Esquema de danos estruturais

Danos/localização/detalhe	Fotos
---------------------------	-------

D1: Destacamentos de unidades de alvenaria e colapso da PAAP


D1.1: Destacamento de unidades de alvenaria <input type="checkbox"/>	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO


FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____ Equipa/Técnico: _____	Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático

D1.2: Falta de unidades de alvenaria	<input type="checkbox"/>
D1.3: Desmoronamento total ou parcial dos elementos constituintes da PAAP	<input type="checkbox"/>


D2: Danos localizados nos arcos	
D2.1a: Fendilhação longitudinal no intradorso do arco e paralelamente ao intradorso	<input type="checkbox"/>
D2.1b: Fendilhação longitudinal no intradorso do arco entre a primeira fiada e as restantes	<input type="checkbox"/>

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 DEC <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____ Equipa/Técnico: _____	Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
D2.1c: Fendilhação longitudinal no extradorso entre a primeira fiada do arco e o muro de tímpano	
	<input type="checkbox"/>
D2.2: Fendilhação transversal no intradorso do arco	
	<input type="checkbox"/>
D2.3: Fendilhação diagonal no intradorso do arco	
	<input type="checkbox"/>
D2.4: Deformação excessiva do arco	
	<input type="checkbox"/>
D3: Danos localizados nos muros de tímpano	
D3.1a: Inclinação para fora do plano	
	<input type="checkbox"/>


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

<p>FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA</p> <p>_____</p> <p>Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____</p> <p>Equipa/Técnico: _____</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra</p> <p>Estudo de um caso prático</p>
---	--

D3.1b: Encurvadura para fora do plano	<input type="checkbox"/>
D3.1c: Escorregamento para fora do plano	<input type="checkbox"/>
D3.1d: Fendilhação na primeira fiada do arco e destacamento do arco	<input type="checkbox"/>
D3.2: Fendilhação no muro de tímpano	<input type="checkbox"/>
D4: Danos localizados nos apoios (pilares e encontros)	
D4.1: Assentamento dos apoios	<input type="checkbox"/>

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA		 <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____ Equipa/Técnico: _____		Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
D4.2: Movimento dos apoios	<input type="checkbox"/>	
D4.3: Consolidação do terreno	<input type="checkbox"/>	
D5: Danos localizados nas fundações		
D5.1: Perda de capacidade resistente das fundações	<input type="checkbox"/>	
D5.2: Descalçamento das fundações	<input type="checkbox"/>	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO


FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	 <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____ Equipa/Técnico: _____	Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático

D6: Danos localizados no enchimento	
D6.1: Degradação do material de enchimento	<input type="checkbox"/>
_____ _____ _____ _____ _____	

D7: Danos localizados nos elementos secundários	
D7.1: Desmoronamento das guardas	<input type="checkbox"/>
_____ _____ _____ _____ _____	

D7.2: Desmoronamento dos talha-mares e talhantes	<input type="checkbox"/>
_____ _____ _____ _____ _____	

D7.3: Fendilhação no tabuleiro	<input type="checkbox"/>
_____ _____ _____ _____ _____	

<p>FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA</p> <p>_____</p> <p>Ficha nº: _____ Data: __/__/____; __/__/____</p> <p>Equipa/Técnico: _____</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra</p> <p>Estudo de um caso prático</p>
---	--

6: Danos não estruturais

Esquema de danos não estruturais


Danos/localização/detalhe	Fotos
---------------------------	-------

D8: Depósitos de origem biológica

D8.1: Vegetação de médio e pequeno porte	

D8.2: Musgos	
--------------	--

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA _____	 DEC <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____	Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra
Equipa/Técnico: _____	Estudo de um caso prático


D8.3: Líquenes <input type="checkbox"/>	

D8.4: Excrementos de aves e depósitos de terra vegetal <input type="checkbox"/>	


D9: Presença de água e humidade	
D9.1: Escorrências, depósito de água e manchas de humidade <input type="checkbox"/>	

D9.2: Eflorescências <input type="checkbox"/>	

D10: Degradação do material pétreo	
D10.1: Erosão das unidades de alvenaria <input type="checkbox"/>	

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA		 DEC <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small>
Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____ Equipa/Técnico: _____		Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
D10.2: Meteorização (desagregação) das unidades de alvenaria		<input type="checkbox"/>
D10.3: Crostas negras e filmes negros		<input type="checkbox"/>
D11: Perda de argamassa nas juntas preenchidas		
D11.1: Perda de argamassa		<input type="checkbox"/>
7: Observações		
Detalhe	Fotos	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

<p style="text-align: center;">FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA</p> <p>_____</p> <p>Ficha nº: _____ Data: ___/___/____; ___/___/____</p> <p>Equipa/Técnico: _____</p>	 DEC <small>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL</small> Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
ANEXOS / OUTRAS INFORMAÇÕES	
<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	

APÊNDICE D – Proposta de ficha de inspeção visual preenchida para a Ponte Românica de Mondim da Beira

No presente Apêndice pode-se encontrar no Quadro D-2 a proposta de ficha de inspeção visual preenchida com a informação recolhida sobre a Ponte Românica de Mondim da Beira.

Foram contactados o IGESPAR e o IHRU a fim de reunir informação sobre a ponte e sobre a natureza e data das intervenções realizadas na ponte e junto a esta. O *feedback* foi positivo e as informações disponíveis pelas entidades encontram-se nos seus endereços de internet. Foi contactado o Instituto de Meteorologia de Portugal a fim de obter informação sobre sismos ocorridos na Região de Tarouca, mas dado o valor elevado do orçamento (100,71 €), não foi possível ter esta informação.

Como referido no Apêndice C, o tamanho dos campos de descrição, notas, observações e danos pode ser adaptado consoante a PAAP, caso que se passou na ponte em estudo.

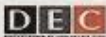
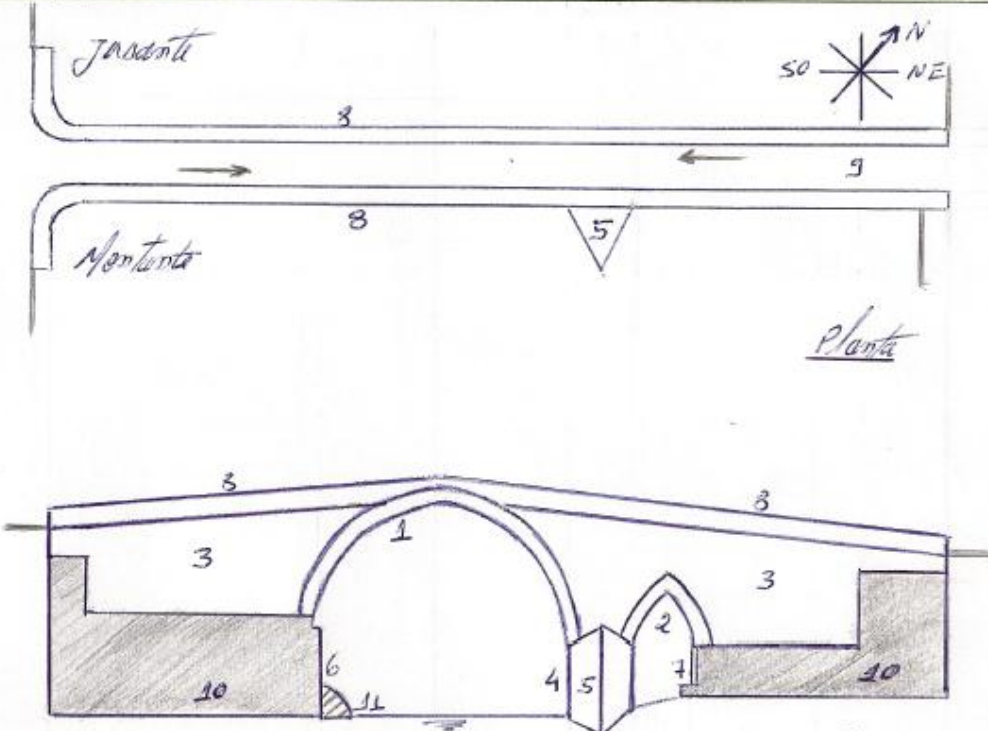
É seguida a notação apresentada na secção 3.2.2. Do mesmo modo é adotada uma notação para os elementos da ponte em estudo para facilitar a esquematização e o preenchimento da ficha de inspeção visual e posteriormente dos Anexo I e Anexo II do relatório de inspeção e diagnóstico (apresentados no Apêndice E e Apêndice F, respetivamente). Deste modo os elementos são identificados pela letra maiúscula representativa do elemento em causa, seguida de ponto e número representativo da quantidade de elementos do mesmo tipo, ver Quadro D-1. É ainda adotada para unidade de alvenaria a notação UA.


Quadro D-1: Notação a seguir para os elementos da Ponte Românica de Mondim da Beira

Elementos	Notação	Elementos	Notação
Tabuleiro	TB	Pilar	P
Enchimento	E	Encontro junto ao arco maior	EC1
Muro de tímpano	MT	Encontro junto ao arco menor	EC2
Arco maior	A1	Talha-mar	T
Arco menor	A2	Guardas	G


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro D-2: Proposta de ficha de inspeção visual preenchida da Ponte Românica de Mondim da Beira

<p align="center">FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA <i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i></p>		 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático																				
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>11/02/2011</u> ; <u>23/09/2011</u>																					
Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Almeida</u>																						
IDENTIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PAAP																						
I: Dados Gerais																						
1.1: Localização																						
(i) Distrito: <u>Vila Real</u>	(v) Localidade: <u>Mondim da Beira</u>																					
(ii) Concelho: <u>Tanegoca</u>																						
(iii) Freguesia: <u>Mondim da Beira</u>	(vi) Rua: <u>Luzes do Outeiro - Praça José Formoso</u>																					
(iv) Curso de água: <u>Rio Banera</u>																						
1.2: Esquemas da PAAP																						
																						
<p align="right"><i>Alçado montante</i></p>																						
<p>Lenda:</p> <table border="0"> <tr> <td>1 - A1</td> <td>11 - alvenaria</td> </tr> <tr> <td>2 - A2</td> <td>menor</td> </tr> <tr> <td>3 - MT</td> <td>nicho</td> </tr> <tr> <td>4 - P</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5 - T</td> <td></td> </tr> <tr> <td>6 - Ec1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>7 - Ec2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8 - G</td> <td></td> </tr> <tr> <td>9 - TB</td> <td></td> </tr> <tr> <td>10 - muro confinado</td> <td></td> </tr> </table>			1 - A1	11 - alvenaria	2 - A2	menor	3 - MT	nicho	4 - P		5 - T		6 - Ec1		7 - Ec2		8 - G		9 - TB		10 - muro confinado	
1 - A1	11 - alvenaria																					
2 - A2	menor																					
3 - MT	nicho																					
4 - P																						
5 - T																						
6 - Ec1																						
7 - Ec2																						
8 - G																						
9 - TB																						
10 - muro confinado																						

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte Românica de Mendim da Beira</i>	
Ficha nº: <i>1</i>	Data: <i>11/02/2016 ; 23/09/2011</i>
Equipa/Técnico(a): <i>Maria José da Cruz Morais</i>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
1.3: Acesso	
(i) Tipo:	Estrada Nacional <input type="checkbox"/> Estrada Municipal <input type="checkbox"/> Caminho Municipal <input checked="" type="checkbox"/> Caminho particular <input type="checkbox"/>
(ii) Nome:	<i>Ramal da EN 226</i>
(iii) Existência de outros acessos na proximidade:	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
(iv) Localização dos outros acessos (km):	<i>26 Km</i>
(v) Estrada / ponte (outros acessos):	<i>mão de conseguir obter esta informação.</i>
(vi) Localidade (outros acessos):	<i>mão de conseguir obter esta informação.</i>
1.4: Época construtiva	
(i) Data:	<i>século XIII / XIV (data conjectural).</i>
(ii) Tipologia da PAAP:	Romana <input type="checkbox"/> Medieval <input type="checkbox"/> Moderna <input type="checkbox"/> Várias <input checked="" type="checkbox"/>
(iii) Designação:	<i>Românica e Gótica - Ponte Românica de Mendim da Beira</i>
(iv) Fonte de informação:	<i>segundo o SIPA.</i>
1.5: Classificação	
(i) Propriedade:	<i>Pública (Câmara Municipal de Tanouca).</i>
(ii) Fonte de informação:	<i>SIPA.</i>
(iii) Segundo o IHRU/SIPA:	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> N° IPA: <i>PT011820040008.</i>
(iv) Segundo o IGESPAR:	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Classificação: <i>Imóvel de Interesse Público (IIP).</i>
1.6: Utilização	
(i) Em funcionamento:	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (ii) Notas: <i>Ponte de 20 vãos.</i>
(iii) Utilização:	Pedonal <input type="checkbox"/> Rodoviária <input checked="" type="checkbox"/> Ferroviária <input type="checkbox"/>
(iv) Tráfego diário:	<i>Não foi possível apurar esta informação. seria necessário o estudo de tráfego.</i>
(v) Sobrecarga pesadas:	Frequente <input type="checkbox"/> Ocasional <input checked="" type="checkbox"/> <i>segundo Câmara Municipal.</i>
(vi) N° de vias rodoviárias/ferroviárias:	<i>2 vias sem barreiras no tabuleiro.</i>
1.7: Registos sísmológicos	
(i) Ocorrência de sismos:	Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (ii) Grau: <i>—</i>
(iii) Notas:	<i>No local não foi possível obter esta informação. Junto do Instituto de Meteorologia, não foi possível obter esta informação devido aos custos associados.</i>
1.8: Observações	
(i) A cota do curso de água não é a mesma face à época construtiva da ponte, podendo ser observado o afloramento em algumas zonas. Não foi possível apurar se as causas foram naturais ou antropicas.	Fotos <i>2, 3, 24</i>


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i>	
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>11/09/2011</u> ; <u>23/09/2011</u>
Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Florida</u>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
2: Ocorrência de Intervenções e de Alterações	
2.1: Existência de registos de outras inspeções	
(i) Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (ii) Fonte de informação: <u>Não foi possível obter esta informação.</u>	
Nota: acrescentar campos em igual nº ao das ocorrências.	
(iii) Nº: <u>—</u> (iv) Data: <u>—/—/—</u> (v) Autor: <u>—</u>	
(vi) Tipo de inspeção realizada: <u>—</u>	
(vii) Descrição: <u>—</u>	Fotos <u>—</u>
2.2: Existência de manutenção	
(i) Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (ii) Fonte de informação: <u>Câmara Municipal de Taveira</u>	
Nota: acrescentar campos em igual nº ao das ocorrências.	
(iii) Nº: <u>1</u> (iv) Data: <u>—/03/2011</u> (v) Autor: <u>Câmara Municipal de Taveira</u>	
(vi) Tipo de manutenção realizada: <u>Limpeza de vegetação nos paramentos</u>	
(vii) Descrição: <u>Limpeza de alguma vegetação localizada nos pontos dos paramentos por recurso a meios manuais em produtos químicos ou fitofarmacêuticos.</u>	Fotos <u>Não existem Fotos</u>
<u>Nota: não existem fotos desta operação.</u>	
2.3: Existência de intervenções/alterações	
(i) Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> (ii) Fonte de informação: <u>Câmara Municipal de Taveira</u>	
Nota: acrescentar campos em igual nº ao das ocorrências.	
(iii) Nº: <u>1</u> (iv) Data: <u>—/—/1985</u> (v) Autor: <u>Câmara Municipal de Taveira</u>	
(vi) Tipo intervenção/alteração realizada: <u>Pavimentação do tabuleiro.</u>	
(vii) Descrição: <u>(a) Intervenção: Com vista à impermeabilização do traço efetuada sobre o TB original a pavimentação afiançada da camada de 50 cm com a espessura de aproximadamente 10 cm.</u>	Fotos <u>Não existem Fotos</u>
<u>(b) Motivo: As UA const. Traços do TB original apresentavam</u>	

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA
Ponte Românica do Mondim da Beira

Ficha nº: 1 Data: 23/02/2011 ; 23/09/2011

Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais


 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra
 Estudo de um caso prático

piniais de desgarro. O E começou a sofrer infiltrações de água a partir das juntas das UA do T3. As UAs de menores dimensões começaram a afundar-se no E. Os veículos que atravessavam a ponte provocavam grandes vibrações na ponte.

(c) consequências: Após a intervenção de veram de suportar as vibrações quando da passagem de veículos.

Foi ainda restringido o trânsito, tendo sido colocado um ambrósio em acurso ao T3 um sinal vertical de trânsito proibido a automóveis de manobras.


→ 26,39,41


(iii) Nº: 2 (iv) Data: -1-1993 (v) Autor: Câmara Munic. Palaturoca.

(vi) Tipo intervenção/alteração realizada: Obras para Póua Fluid.

(vii) Descrição:	Fotos
Construções realizadas junto à ponte:	
(a) Edifício em madeira de apoio à ponte junto ao ECA aliado junto, lado NE.	3,5,9,9 → 92,13
(b) Pavimentos construídos para UA de dimensão variável e angamansa cumpre-se junto aos EE e que encobrem parcialmente o pavimento rodoviário.	2,3,8,9 → 28,36,46 27,28
(c) Escadas em madeira preenchidas com areia, no aliado junto do P.	3,17,25 → 22,13
(d) Lameiras metálicas junto às margens do curso de água no aliado junto.	→ 13,14
(e) Pequena represa que serve de passagem entre as margens no lado junto onde é colocado, quando da época salina, a laminação metálica.	→ 28,35 13,14
(f) Existência de árvores de grande e média porte junto aos MTE ao EE em ambrósio aliado.	3,8, → 28,12; 14,20
(g) Lameiras talladas no maciço rochoso, sem como escadas e caminhos com o mesmo material referido no	→ 15,24 → 15,33

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<p><i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i></p> <p>Ficha nº: <u>1</u> Data: <u>11/09/2013 ; 23/09/2011</u></p> <p>Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Morais</u></p>	
 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>	
<p>ponto (4).</p> <p>(b) Escada metálica no alçado jussante, lado SO do E.C.1.</p>	<p>→ 1; 20 15</p>
<p>(c) Colocação de iluminação e candeeiros apoiados nas juntas no intradossos dos 2, A, no mesmo conformato com o E.C.1 no alçado jussante, lado SO; candeeiro junto ao E.C.1 no alçado montante, lado SO.</p>	<p>→ 1; 2; 7; 12; 35; 43; 22</p>
<p>(iii) Nº: <u>3</u> (iv) Data: <u>-1-1998</u> (v) Autor: <u>Câmara Mun. e. pal de Tarouca.</u></p> <p>(vi) Tipo intervenção/alteração realizada: <u>Colocação de conduta metálica.</u></p> <p>(vii) Descrição:</p>	
<p>é visível no intradossos do A1 (no E.C.1) a conduta metálica que se encontra fixa à ponte por meio de barras e de parafusos, encontrando-se encastada por 1 camada consistente por UA de dimensão variável e argamassa cimentícia no alçado jussante, lado SO no mesmo conformato.</p> <p>Não foi possível obter informação sobre as obras necessárias como seja o caso de escavações junto ao E.C.1.</p>	<p>Fotos</p> <p>31; 38; 39; 40 27; 41; 44; 20; 42 15; 22</p>
<p>(iii) Nº: <u>4</u> (iv) Data: <u>-1-1-</u> (v) Autor: <u>Câmara Mun. e. pal de Tarouca.</u></p> <p>(vi) Tipo intervenção/alteração realizada: <u>Aplicação de argamassa cimentícia.</u></p> <p>(vii) Descrição:</p>	
<p>Preenchimento de juntas com argamassa cimentícia nos 6 e no E.C.2, alçado jussante, lado SO.</p>	<p>Fotos</p> <p>61; 50; 52</p>
<p>(iii) Nº: <u>5</u> (iv) Data: <u>-1/09/2011</u> (v) Autor: <u>Câmara Municipal de Tarouca.</u></p> <p>(vi) Tipo intervenção/alteração realizada: <u>Regularização do tabuleiro.</u></p>	


FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA		 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
<i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i>		
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>11/02/2011</u> ; <u>23/09/2011</u>	
Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Morais</u>		


(vii) Descrição: <i>Com o objetivo de regularizar e diminuir a despedaçação do TB foi realizada a ligeira operação de pavimentação com colocação de 1 camada de betuminoso com aproximadamente 3 cm de espessura. Esta camada impede a observação das aduelas do A1.</i>	Fotos <i>59; 60; 74, 77; 37, 42</i>
--	---

2.4: Observações	Fotos
<i>(i) Observa-se a diferença no aspeto das UA entre o MT e o B</i>	<i>→ 1, 4</i>
<i>(ii) junto ao Ee1 no alçado montante existe a construção que parece ser a muralha. Entre esta construção e o Ee1 é visível o que parece ser a muralha que tem continuidade de construção com o Ee1.</i>	<i>→ 1, 38, 40; 3, 2, 3, 20; 22, 23</i>
<i>(iii) Em frente do Ee1, no alçado jusante, existe o que parece ser a muralha mas sem continuidade de construção com o Ee1.</i>	<i>→ 33, 40, 1, 4, 14</i>
<i>(iv) No alçado SE, alçado jusante, existe a muralha conforme com o Ee1.</i>	<i>→ 1, 2, 38; 2, 40, 30; 2, 19, 25</i>
<i>(v) No alçado NE, alçado montante, existe a muralha conforme com o Ee2, alçada que se ergue sobre a parte do Ee2 e que se destina a estacamento.</i>	<i>→ 4, 11; 36, 39</i>
<i>(vi) O terreno envolvente encontra-se com alterações relativamente aos fotos disponíveis no site do SIPA.</i>	—
<i>(vii) A ponte não apresenta sistema de drenagem.</i>	—
<i>(viii) São visíveis pedras colocadas em algumas UA das guardas e em algumas aduelas do alçado jusante junto ao TB.</i>	<i>→ 1, 1, 13; 1, 5, 16</i>






3: Constituição	
3.1: Tabuleiro	
(i) Descrição do tipo de material:	<i>Placas de UA de granito (originalmente) tapadas com 1 camada de betuminoso.</i>
(ii) Disposição/tipo:	Placas de UA regular <input type="checkbox"/> Placas de UA irregular <input type="checkbox"/> Camada de betuminoso <input checked="" type="checkbox"/>
<small>Nota: UA – Unidades de Alvenaria</small>	


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA		 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
Pontes Romanicas de Mondim da Beira Ficha nº: <u>1</u> Data: <u>23/02/2011 ; 23/09/2001</u> Equipa/Técnico(a): <u>João José do Couto Moraes</u>			
3.2: Enchimento			
(i) Descrição do tipo de material: <u>Dada a natureza do trabalho não foi possível realizar exames para conhecer a composição do enchimento.</u>			
3.3: Muros de tímpano			
(i) Descrição do tipo de material: <u>VA de granito.</u>			
(ii) Disposição/tipo:			
Regular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/>	Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>
(iii) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>			
3.4: Arcos			
(i) Nº de arcos: <u>2 arcos desiguais (A1 e A2).</u>			
Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos arcos.			
(ii) Arco: <u>A1 (A de maior dimensão - lado SO)</u>			
(iii) Descrição do tipo de material: <u>VA de granito.</u>			
(iv) Disposição/tipo:			
Regular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/>	Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>
(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>			
(ii) Arco: <u>A2 (A de menor dimensão - lado NE).</u>			
(iii) Descrição do tipo de material: <u>VA de granito.</u>			
(iv) Disposição/tipo:			
Regular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/>	Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>
(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>			
3.5: Pilares e encontros			
(i) Nº de pilares e encontros: <u>1 P e 2 EC (EC1-A1, EC2-A2).</u>			
Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos pilares e encontros.			
(ii) Pilar / encontro: <u>P</u>			
(iii) Descrição do tipo de material: <u>VA de granito.</u>			
(iv) Disposição/tipo:			
Regular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/>	Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/>	Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>
(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>			
(ii) Pilar / encontro: <u>EC1 (lado SO).</u>			


FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte românica de Mendim da Beira</i>	
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>21/02/2011</u> ; <u>23/05/2011</u>
Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Morais</u>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
(iii) Descrição do tipo de material: <u>UA de granito.</u>	
(iv) Disposição/tipo: Regular com preenchimento <input type="checkbox"/> Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/> Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/> Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	
(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>	
(ii) Pilar / encontro: <u>EC 2 (lado N^o).</u>	
(iii) Descrição do tipo de material: <u>UA de granito.</u>	
(iv) Disposição/tipo: Regular com preenchimento <input type="checkbox"/> Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/> Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/> Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	
(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>	
3.6: Talha-mares e talhantes	
(i) N ^o de talha-mares e talhantes: <u>1 talha-mar (T) e não existe talhante.</u>	
Nota: acrescentar campos em igual n ^o ao dos talha-mares e talhantes.	
(ii) Talha-mares / talhantes: <u>T</u>	
(iii) Descrição do tipo de material: <u>UA de granito.</u>	
(iv) Disposição/tipo: Regular com preenchimento <input type="checkbox"/> Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/> Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/> Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	
(v) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>	
3.7: Fundações	
(i) Descrição do tipo de material: <u>Afloramento rochoso de granito sob a ponte (P, EC1 e EC2).</u>	
(ii) Disposição/tipo: Direta por sapata sobre maciço rochoso <input type="checkbox"/> Indireta por pegão/poço sobre maciço rochoso <input type="checkbox"/> Diretamente sobre maciço rochoso <input checked="" type="checkbox"/>	
3.8: Guardas	
(i) Descrição do tipo de material: <u>UA de granito em 2 fiadas sendo visível na última fiada a existência de cavidades e elementos de ligação.</u>	
(ii) Disposição/tipo: Regular com preenchimento <input type="checkbox"/> Regular sem preenchimento <input checked="" type="checkbox"/> Irregular com preenchimento <input type="checkbox"/> Irregular sem preenchimento <input type="checkbox"/>	
(iii) Tipo de argamassa nas juntas: Original <input type="checkbox"/> Compatível <input type="checkbox"/> Cimento Portland <input type="checkbox"/>	
3.9: Observações	Fotos
(i) A ligação entre as UA das 1 ^a e 2 ^a através de gater do chumbo	→ 10x26; 53x80
(ii) Presunção de a colocação de 1 fiada de argamassa de cal de modo a uniformizar o contacto entre as UA, uma vez	→ 27x30; 34


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte romana de Mendim da Beira</i>	
Ficha nº: <u>4</u>	Data: <u>21/02/2011</u> ; <u>23/05/2011</u>
Equipa/Técnico(a): <i>Mário José da Cruz Focuss</i>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
<i>que no A2 é visível esta argamassa e ocupam as juntas.</i>	23-28
4: Geometria	
4.1: Dimensões globais	
(i) Comprimento total: <u>56,5m</u> (ii) Largura total: <u>4,8m</u> (iii) Altura máxima: <u>11,9m</u>	
4.2: Tabuleiro	
(i) Largura da via: <u>4,0m</u> (ii) Largura dos passeios: <u>Não existe.</u>	
(iii) Perfil do tabuleiro: <u>Não horizontal (em cavalete segundo os PA).</u>	
(iv) Notas:	Fotos
<i>O TB tem a cota mais alta sobre a aduela de fecho do A1.</i>	<i>1;8; 7;</i>
<i>O A1 não apresenta necessariamente sobre a aduela de fecho.</i>	<i>16;2;8;</i>
<i>sendo visível no nível do TB a forma do A1, as</i>	<i>25;37</i>
<i>aduelas desde a aduela de fecho em direcção do</i>	<i>2;40;</i>
<i>não e proximadamente. Desta modo a altura</i>	<i>1;4;</i>
<i>das B é menor sobre esta direcção visível do A1</i>	<i>15;20;</i>
	<i>39;45;</i>
	<i>75;76</i>
4.3: Arcos	
(i) Nº de arcos: <u>2 (A1 e A2) - arco maior.</u>	
Nota: acrescentar campos em igual nº ao dos arcos.	
(ii) Arco: <u>A1 (Vedoso)</u>	
(a) Tipologia:	Volta perfeita <input checked="" type="checkbox"/> Segmentado <input type="checkbox"/> Parabólico <input type="checkbox"/> Ogival <input type="checkbox"/> Abatido <input type="checkbox"/> Adintelado <input type="checkbox"/>
(b) Flecha: <u>7,2m</u>	(c) Vão: <u>15,7m</u> (d) Dimensão média dos elementos: <u>0,7m a 1,0m</u>
(e) Posição das aduelas:	 <input type="checkbox"/>  <input checked="" type="checkbox"/>
(f) Recobrimento sobre a aduela de fecho: <u>Não existe.</u>	
(ii) Arco: <u>A2 (Vedoso) - arco menor.</u>	
(a) Tipologia:	Volta perfeita <input type="checkbox"/> Segmentado <input type="checkbox"/> Parabólico <input type="checkbox"/> Ogival <input checked="" type="checkbox"/> Abatido <input type="checkbox"/> Adintelado <input type="checkbox"/>
(b) Flecha: <u>2,5m</u>	(c) Vão: <u>4,4m</u> (d) Dimensão média dos elementos: <u>1,0m</u>
(e) Posição das aduelas:	 <input type="checkbox"/>  <input checked="" type="checkbox"/>

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte Românica de Gondim da Beira</i>	
Ficha n.º: <u>1</u>	Data: <u>11/02/2011</u> ; <u>23/09/2011</u>
Equipa/Técnico(a): <i>Maria José da Cruz Morais</i>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
(f) Recobrimento sobre a aduela de fecho: <u>3,0 m</u>	
(iii) Notas:	Fotos
(a) As aduelas dos 2 arcos apresentam a largura reduzida em comparação com a espessura.	→ 4,1, 4,9, 5,18, 20
(b) Em ambos os arcos a aduela do fecho é mais saliente que as aduelas de contrafecho e as restantes.	→ 18, 23
(c) Existe 1 sigla numa VA dentro do traçado do A2 e o MT no alçado gusante, lado NE.	→ 24
(d) Nos 2 arcos DEC é saliente relativamente ao interior dos arcos. Isto para o apoio dos cumbrões.	→ 16, 23 → 30
(e) No A2 existe 1 fila de 4 saliências e no A1 existem 2 filas de 4 saliências, mas sendo a altura a que se encontram coincidente.	
(f) As medidas apresentadas estão de acordo com o levantamento topográfico realizado pela Câmara Municipal de Terouca.	
4.4: Pilares	
(i) N.º de pilares: <u>1 P</u>	
Nota: acrescentar campos em igual n.º ao dos pilares.	
(ii) Pilar: <u>P</u>	(a) Altura: <u>2,1 m</u> (b) Largura: <u>4,9 m</u>
(iii) Notas:	Fotos
(a) As medidas estão de acordo com o levantamento topográfico.	—
4.5: Talha-mares e talhantes	
(i) N.º de talha-mares: <u>1 T</u>	
Nota: acrescentar campos em igual n.º ao dos talha-mares.	
(a) Talha-mares: <u>T</u>	(a1) Altura: <u>2,1 m</u> (a2) Largura: <u>4,9 m</u>
(ii) N.º de talhantes: <u>Não existem.</u>	
Nota: acrescentar campos em igual n.º ao dos talhantes.	
(b) Talhantes: <u>—</u>	
(iii) Notas:	Fotos
(a) T tem a altura aproximadamente de 1/3 da altura da 2ª fila de saliências do A1, apresentando continuidade de construção com o P entre 1 das saliências.	5,16, 23 → 24

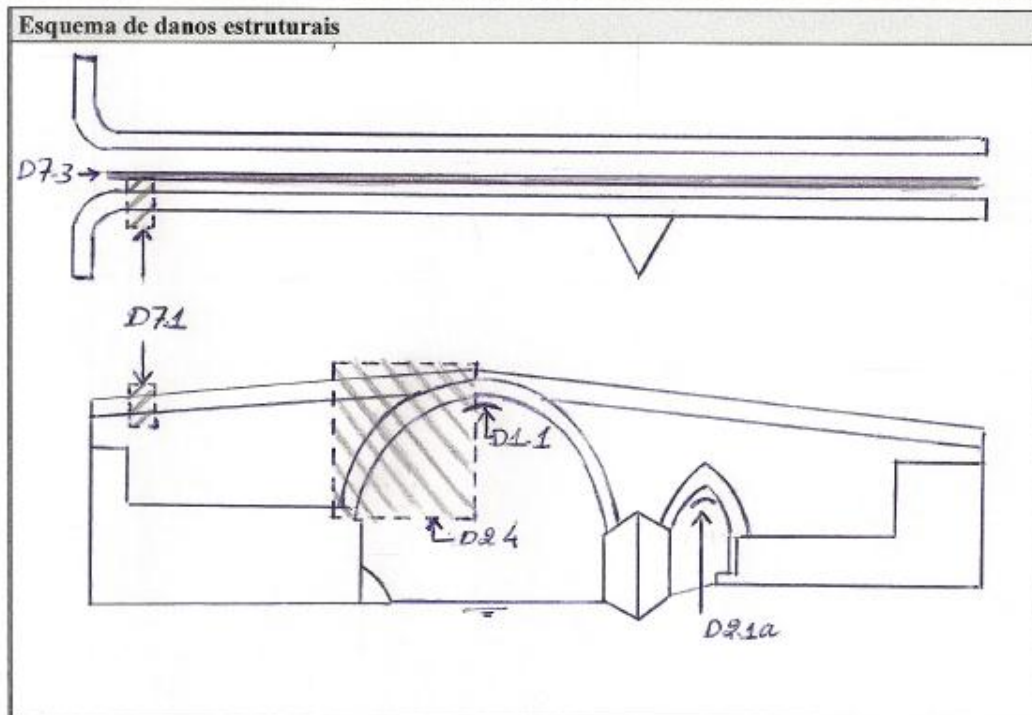
PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO


FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i>	
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>11/02/2011</u> ; <u>23/09/2011</u>
Equipa/Técnico(a): <u>Álvaro Jorge da Cruz Morais</u>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
5) O T apresenta o aprofundamento de VA de pequena espessura. →	
	2; 36,5; 43; 27,28 65
4.6: Fundações	
Nota: acrescentar campos em caso de as fundações não serem iguais para toda a PAAP.	
(i) Altura: _____	(ii) Largura: _____
(iii) Notas: <i>tal como se trata de um aprofundamento necessário não foi possível ter as medidas.</i>	
	Fotos → 1; 4; 8; 36; 40; 16; 20; 28; 15
4.7: Guardas	
(i) Dos dois lados: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>	
(ii) Guarda direita:	(a1) Altura: <u>0,9 a 1,2m</u> (a2) Largura: <u>0,4m</u>
(iii) Guarda esquerda:	(b1) Altura: <u>0,9 a 1,2m</u> (b2) Largura: <u>0,4m</u>
(iii) Notas: <i>(a) As 2 guardas de VA que compõem as 6 não se mantêm até ao final do comprimento da ponte no lado SE.</i>	
	Fotos → 1; 24; 7; 22; 41
4.8: Observações	
(i) O HT em ambos os alçados em contra-relevo saliente em relação às 0.	
(ii) No EEI no alçado usando a parte inferior em contra-relevo saliente em relação a parte superior.	
	Fotos → 18; 22; 23; 69 27; 78 28; 6; 7 34; 35

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA		 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
<i>Ponte Românica de Hendim da Balsa</i>		
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>11/09/2011 ; 23/09/2011</u>	
Equipa/Técnico(a): <i>Maria José da Cruz Morais</i>		


REGISTO DE DANOS


5: Danos Estruturais




Danos/localização/detalhe	Fotos
D1: Destacamentos de unidades de alvenaria e colapso da PAAP	
D1.1: Destacamento de unidades de alvenaria <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) UA no intradesso do A1 destacada na fiada da parede de fundo localizada a proximadamente a meio da altura do A1. (ii) A existência de vegetação impede a visualização de mais UA destacadas.	41245 328 
D1.2: Falta de unidades de alvenaria <input type="checkbox"/>	
(i) A existência de vegetação impede a visualização da possível falta de UA. (ii) Nas zonas sem vegetação não são visíveis UA em falta.	—


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<p><i>Ponte Românica de Mendim da Beira</i></p> <p>Ficha nº: <u>1</u> Data: <u>11/09/2011; 23/09/2011</u></p> <p>Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Pereira</u></p>	
 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>	
D1.3: Desmoronamento total ou parcial dos elementos constituintes da PAAP <input type="checkbox"/>	
<p>(1) <i>Não foi observada desmoronamento total nem parcial da ponte.</i></p>	—
D2: Danos localizados nos arcos	
D2.1a: Fendilhação longitudinal no intradorso do arco e paralelamente ao intradorso <input checked="" type="checkbox"/>	
<p>(1) <i>A2 apresenta no seu intradorso afastamento das UA longitudinalmente entre a peça de fecho e a peça dos n.ºs de 1 forma distribuída e paralelamente ao intradorso de A2.</i></p> <p><i>Não foi possível a realização de ensaios para determinar a causa deste afastamento, dada não sendo possível de fazer-se a realização de ensaios</i></p>	<p>→ 25;26 51;54a 58;1; 9211</p>
D2.1b: Fendilhação longitudinal no intradorso do arco entre a primeira fiada e as restantes <input type="checkbox"/>	
<p>(1) <i>Nas zonas sem vegetação não é visível fendilhação nos 2 arcos.</i></p>	—
D2.1c: Fendilhação longitudinal no extradorso entre a primeira fiada do arco e o muro de tímpano <input type="checkbox"/>	
<p>(1) <i>Nas zonas sem vegetação não é visível fendilhação entre os 2 arcos e o M.T.</i></p>	—
D2.2: Fendilhação transversal no intradorso do arco <input type="checkbox"/>	
<p>(1) <i>Nas zonas sem vegetação não é visível fendilhação nos 2 arcos.</i></p>	—


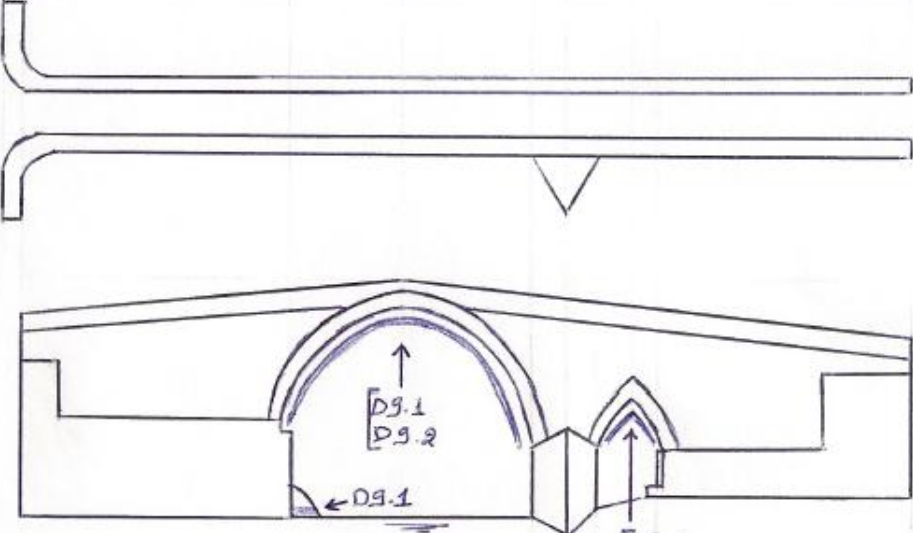
FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte Românica de Mendim da Beira</i>	
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>11/02/2011; 23/09/2011</u>
Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Morais</u>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
<p>D2.3: Fendilhação diagonal no intradorso do arco <input type="checkbox"/></p> <p>(i) <i>Nas zonas sem vegetação não é visível fendilhação nos 2 arcos.</i></p>	
<p>D2.4: Deformação excessiva do arco <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>(i) <i>Deformação do A1 mais pronunciada no lado SD, sem visualização de abertura de juntas.</i></p> <div style="float: right; text-align: right;"> <p>12x3; 37x40; 1x5; 15x20; 29x31; 13x15; 21x25; 31x33;</p> </div>	
<p>D3: Danos localizados nos muros de tímpano</p>	
<p>D3.1a: Inclinação para fora do plano <input type="checkbox"/></p> <p>(i) <i>Não é visível inclinação na zona sem vegetação.</i></p>	
<p>D3.1b: Encurvadura para fora do plano <input type="checkbox"/></p> <p>(i) <i>Não são visíveis sinais de encurvadura na zona sem vegetação.</i></p>	
<p>D3.1c: Escorregamento para fora do plano <input type="checkbox"/></p> <p>(i) <i>Não é visível escorregamento nas zonas sem vegetação.</i></p>	


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<p><i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i></p> <p>Ficha nº: <i>1</i> Data: <i>11/09/2011; 23/09/2011</i></p> <p>Equipa/Técnico(a): <i>Álvaro José do Gregório</i></p>	
 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>	
<p>D3.1d: Fendilhação na primeira fiada do arco e destacamento do arco <input type="checkbox"/></p> <p>(e) <i>Não é visível fendilhação na zona sem vegetação.</i> —</p>	
<p>D3.2: Fendilhação no muro de tímpano <input type="checkbox"/></p> <p>(e) <i>Não é visível fendilhação na zona sem vegetação.</i> —</p>	
<p>D4: Danos localizados nos apoios (pilares e encontros)</p>	
<p>D4.1: Assentamento dos apoios <input type="checkbox"/></p> <p>(e) <i>Não é visível assentamentos dos apoios.</i> —</p>	
<p>D4.2: Movimento dos apoios <input type="checkbox"/></p> <p>(e) <i>Não é visível movimento, i.e., sinais de movimento dos apoios.</i> —</p>	
<p>D4.3: Consolidação do terreno <input type="checkbox"/></p> <p>(e) <i>Não é possível observar se existe consolidação do terreno.</i> —</p>	


FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte Românica de Mendim da Beira</i>	
Ficha nº: <i>1</i>	Data: <i>11/09/2011</i> ; <i>23/09/2011</i>
Equipa/Técnico(a): <i>Maria José da Cruz Morais</i>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
D5: Danos localizados nas fundações	
D5.1: Perda de capacidade resistente das fundações <input type="checkbox"/>	
(i) <i>Não é possível visualizar danos que indiquem perda de capacidade resistente.</i>	—
D5.2: Descalçamento das fundações <input type="checkbox"/>	
(i) <i>A existência do pavimento parcialmente sobre o afloramento rochoso 5m acima a existência dos pilares referidos impede a visualização de possíveis danos. Nas zonas não cobertas não são visíveis danos.</i>	—
D6: Danos localizados no enchimento	
D6.1: Degradação do material de enchimento <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) <i>Por informação da Câmara Mun. e por devarreio procuram infiltrações de águas pluviais. As VA do TB original começaram a se afundar no E.</i>	Não é visível.
D7: Danos localizados nos elementos secundários	
D7.1: Desmoronamento das guardas <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) <i>A última VA da última fiada da G moleto momento, lado SO encontra-se ligeiramente deslocada em relação à 1ª fiada.</i>	1,78 a 80
D7.2: Desmoronamento dos talha-mares e talhantes <input type="checkbox"/>	
(i) <i>Não são visíveis sinais de desmoronamento de T.</i>	—


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

<p align="center">FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA <i>Ponte Românica de Mendim da Beira</i></p>		 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
Ficha nº: <u>1</u> Data: <u>11/02/2019</u> : <u>23/09/2018</u> Equipa/Técnico(a): <u>Maria José do Lago Henriques</u>		
D7.3: Fendilhação no tabuleiro <input checked="" type="checkbox"/>		
(i) A camada de betuminosa apresenta elevada degradação sendo visível a faixa longitudinal ao longo de quase todo o TB com a largura considerável supurada. Não foi possível obter informações sobre os motivos.		20;11; 152;17; 19;20; 23;24
(ii) Com a colocação da 2ª camada de betuminosa esta degradação deixou de ser visível.		59;60; 67;68;74 77
6: Danos Não Estruturais		
Esquema de danos não estruturais		
		
Danos/localização/detalhe		Fotos
D8: Depósitos de origem biológica		
D8.1: Vegetação de médio e pequeno porte <input checked="" type="checkbox"/>		
(i) Vegetação de médio porte (planta tapadinho) e caules secos no estradouro e no estradouro de AA, no MT, T, G no alçado montante, lado NE e no estradouro de AA no alçado		127;15 20;39 40;44;38 40


FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<p><i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i></p> <p>Ficha nº: <i>1</i> Data: <i>11/09/2011; 23/09/2011</i></p> <p>Equipa/Técnico(a): <i>Maria José da Cruz Morais</i></p>	
 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>	
<p><i>pusante junto à aduela de fecho.</i></p> <p>(i) <i>Vizetação de diversas espécies de pequena porte nas juntas de forma generalizada por todos os elementos da ponte.</i></p>	<p><i>105</i></p> <p><i>Em quase toda a ponte.</i></p>
<p>D8.2: Musgos <input checked="" type="checkbox"/></p>	
<p>(i) <i>Musgos nas zonas mais sombreadas da ponte: EC1, no alçado susante, lado so, junto ao afloramento rochoso e no friso de afloramento; no lado NE do T (do lado do A2); na zona da junta que liga o MT à 1ª fiada das G e no alçado montante e susante.</i></p>	<p><i>18; 23; 35; 43; 62; 14; 56; 66; 69; 73; 78; 17; 20</i></p>
<p>D8.3: Líquenes <input checked="" type="checkbox"/></p>	
<p>(i) <i>Líquenes de modo generalizado por toda a ponte, ocupando quase totalmente a superfície das UA. Encontram-se das variedades imbricaria e foliosa e com diferentes tonalidades (branco, laranja, verde e cinzento).</i></p>	<p><i>visível em quase todas as fotos.</i></p>
<p>D8.4: Excrementos de aves e depósitos de terra vegetal <input checked="" type="checkbox"/></p>	
<p>(i) <i>Depósitos de terra vegetal nas zonas onde se localiza vegetação e os musgos: no EC1, alçado susante, lado so; na zona da junta que liga o MT à 1ª fiada fiada das G no alçado montante e susante; no lado do A1, no MT, no T e nas G no alçado montante, lado NE; no exterior do A2, alçado susante junto à aduela de fecho.</i></p>	<p><i>Ver fotos dos D8.1 e D8.2.</i></p>
<p>(ii) <i>Depósitos de terra nas UA do EC, no alçado susante junto ao afloramento rochoso, possivelmente resultante do respingar da água, que durante as chuvas, vai no afloramento e transporta depósitos de terra residentes.</i></p>	<p><i>10; 11; 32</i></p>
<p>(iii) <i>Alcunas nas juntas encontram-se preenchidas com dep. Fos de terra vegetal.</i></p>	<p><i>8; 10; 11; 32</i></p>

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<i>Ponte Românica de Mondim da Beira</i>	
Ficha nº: <u>1</u>	Data: <u>11/09/2011; 23/09/2011</u>
Equipa/Técnico(a): <u>Maria José de Cruz Henriques</u>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
D9: Presença de água e humidade	
D9.1: Escorrências, depósito de água e manchas de humidade <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) Escorrências no intradosso dos 2 arcos.	28ª33;
(ii) Manchas de humidade de tonalidade escura no intradosso dos 2 arcos.	18ª20; 23ª27;
(iii) Manchas de tonalidade escura e verde no aflatamento ao longo do P do lado, SO (no intradosso do A1) e do OEE1 acima do nível do curso de água (no lado do intradosso do A1).	39ª45; 50ª58; 1; 3ª22; 26
D9.2: Eflorescências <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) Eflorescências no intradosso do A1 e em menor quantidade no A2.	4ª45; 23ª26; 55ª58; 3ª8; 1; 9ª22; 26
D10: Degradação do material pétreo	
D10.1: Erosão das unidades de alvenaria <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) De um modo generalizado as UA apresentam arredondamento das arestas e dos vértices.	V21/ston dos elementos Textos
(ii) No centro de algumas UA é visível um signo f.reativo desgaste.	
(iii) Algumas UA apresentam no centro ou junto aos seus vértices zonas de desgaste que se assemelham a cavidades.	
(iv) Nas bas UA apresentam grande desgaste junto à zona onde se encontra o elemento de ligação. Em algumas UA já não existe elemento de ligação.	
(v) Nas tas UA apresentam um acentuado desgaste.	
	30ª26; 59ª63; 67; 68; 69 74ª76
	43; 36; 34ª38; 47ª49

FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA	
<p style="text-align: center;"><u>Ponte Romana de Honório da Beira</u></p> <p>Ficha nº: <u>1</u> Data: <u>23/09/2011</u> ; <u>23/09/2011</u></p> <p>Equipa/Técnico(a): <u>Maria José da Cruz Morais</u></p>	
 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático	
D10.2: Meteorização (desagregação) das unidades de alvenaria <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) De um modo generalizada na zona onde não existe D8 as UA apresentam sinais de desagregação.	Ver fotos dos vários elementos do pont.
(ii) As UA apresentam um aspeto rugoso devido à perda de minerais constituintes na sua superfície.	
(iii) Em algumas UA ocorreu destacamento de placas de material pétreo da superfície com posterior queda dessas placas.	
(iv) Algumas UA apresentam total ou parcialmente a camada superficial com a tonalidade acastanhada. As zonas não acastanhadas diferem-se ao destacamento e posterior queda dessa placa acastanhada.	
(v) Em algumas UA, após formação de fendas oblíquas as verticais destacaram-se, não sendo fá visíveis em alguns casos.	
(vi) No A2E visível a fenda ao longo da altura de 1 UA no intradorso.	58;1
(vii) No E1, no alçado jussante, lado SE, existem algumas UA com fendas verticais ao longo de toda a parte da sua altura. A superfície destas fendas apresenta algum desgaste, observando-se o afastamento entre as 2 partes da UA.	6 à 14; 13
(viii) A existência do pavimento parcialmente pedre o afloramento ocioso impede a visualização de D10.1 e de D10.2 nas zonas não cobertas do E1 não são visíveis D10.1 nem D10.2.	—
(ix) No intradorso do A2 e no extradorso junto do T1 visível a fenda oblíqua que ocupa 2 UA.	41;36; 50;51;56
D10.3: Crostas negras e filmes negros <input checked="" type="checkbox"/>	
(i) São visíveis nestas zonas e filmes negros em toda o alçado montante da ponte, sendo mais visíveis no recobrimento do A2; no extradorso do A2 e no E1.	41;42; 51;52; 27;38; 11;22

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

<p align="center">FICHA DE INSPEÇÃO VISUAL DA <i>Ponte Remanica de Mondim da Beira</i></p>		 <p align="center">Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>
Ficha nº: <i>1</i>	Data: <i>11/02/2011 ; 23/09/2011</i>	
Equipa/Técnico(a): <i>Maragosa da Cruz Moraes</i>		

D11: Perda de argamassa nas juntas preenchidas	
D11.1: Perda de argamassa <input type="checkbox"/>	
<p>(i) A espessura das juntas é reduzida. Destimada mão de obra perante juntas com preenchimento. Assim não existe perda de argamassa.</p>	<p>49;52; 58;76</p>

7: Observações	
Detalhe	Fotos
<p>(i) Não é visível fundição no P₁ no EC.</p> <p>(ii) Apesar do referido, a vizinhança no intradado de A e no MT impede a visualização de possíveis danos.</p> <p>(iii) Existe lixo em algumas juntas e esburacos para o cimento no A e, e.g., papéis, micas de tampa, plásticos amantados, cigarros e latas de refrigerante.</p> <p>Nota: Foi pedido à Câmara Municipal de Taveira que trouxesse algumas fotos.</p>	<p>—</p> <p>20;34; → 46</p>

ANEXOS / OUTRAS INFORMAÇÕES
<p>(i) Foi elaborado um levantamento fotográfico em complemento à inspeção visual.</p> <p>(ii) Foi consultada a Câmara Municipal de Taveira e a informação disponível no site da SIPA e do IGESPAR.</p> <p>(iii) O levantamento topográfico realizado pela Câmara Municipal de Taveira aplicável na geometria da ponte.</p> <p>(iv) Algumas fotos foram tiradas pela Câmara Municipal a pedido.</p>


APÊNDICE E – Anexo I do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

No Quadro E-1 é apresentado o Anexo I do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira, onde constam: (1) localização da ponte; (2) esquemas (alçado e cortes) e (3) levantamento fotográfico por elementos constituintes da ponte realizado aquando das duas inspeções visuais efetuadas. De referir que são apenas apresentadas as fotografias consideradas mais relevantes de modo a não tornar o trabalho muito extenso.

Na Figura CC-1 (Anexo C) podem ser consultadas as imagens disponibilizadas no endereço de internet do SIPA (IHRU). É seguida a notação apresentada no Apêndice D.

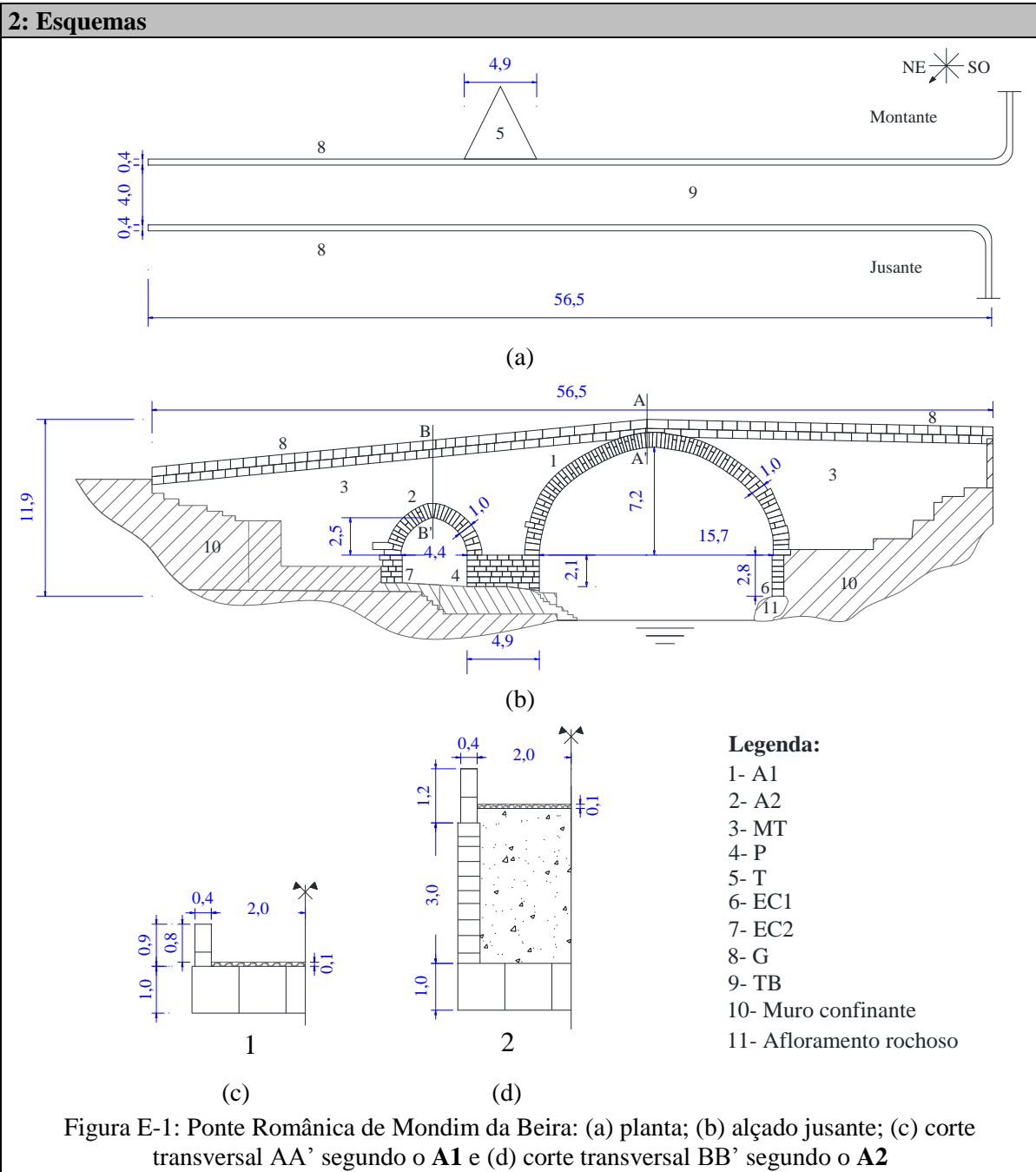
PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO


Quadro E-1: Anexo I do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira

ANEXO I DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo I Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico: Maria José da Cruz Morais	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
---	--

1: Localização

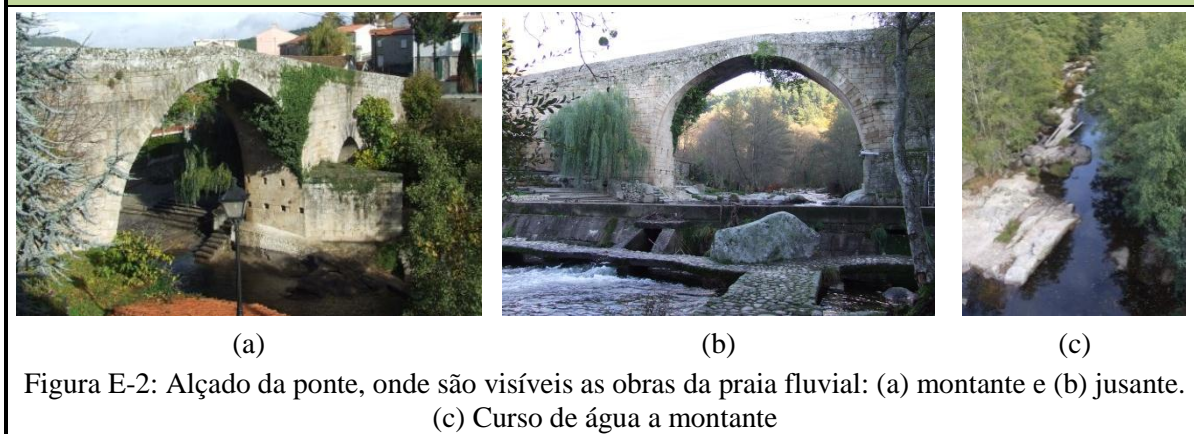
<p>(i) Distrito: Viseu (ii) Concelho: Tarouca (iii) Localidade: Mondim da Beira</p>	<p>(iv) Rua: Lugar do Outeiro na Praça José Fernando (v) Curso de água: Rio Barosa</p>
--	---



<p>ANEXO I DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira</p> <p>Anexo I Data: 11/02/2011 e 23/09/2011</p> <p>Equipa/Técnico: Maria José da Cruz Morais</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra</p> <p>Estudo de um caso prático</p>
--	--

3: Levantamento fotográfico

3.1: Geral



3.2: Muros de tímpano, arco maior e arco menor

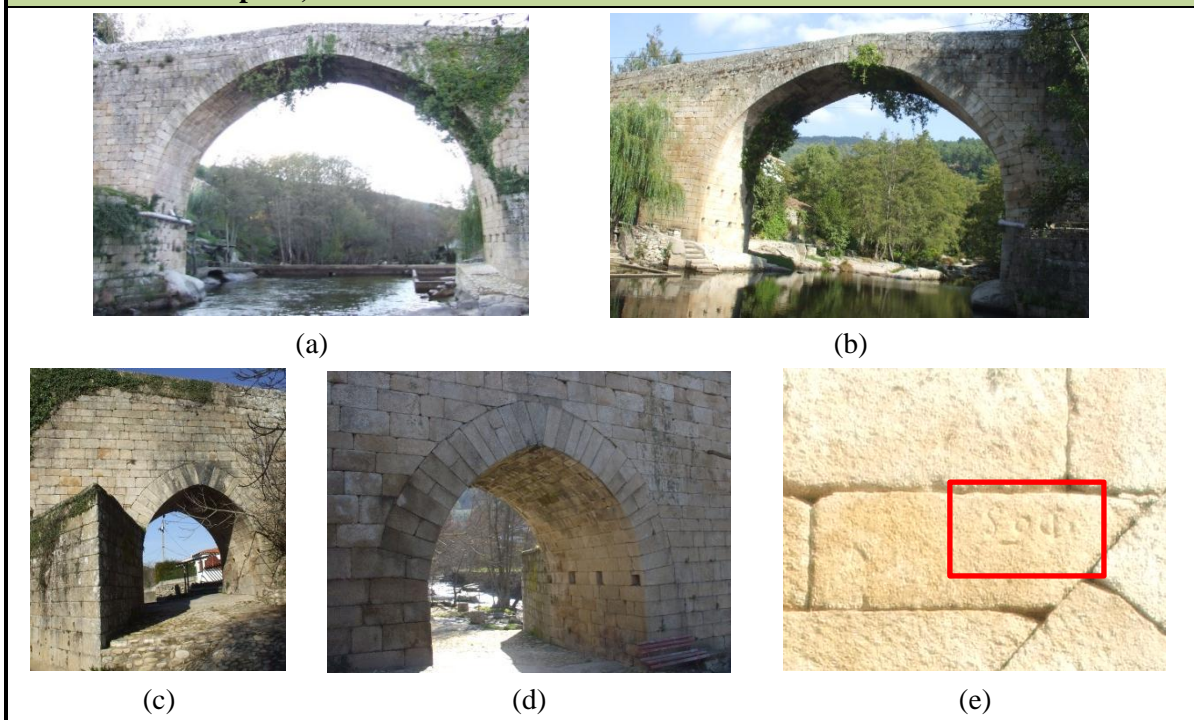


Figura E-3: **A1** com visualização das aberturas e saliências para colocação do cimbrio, da tubagem metálica e do candeeiro no alçado: (a) montante e (b) jusante. **A2** com visualização das aberturas e saliências para colocação do cimbrio no alçado: (c) montante e (d) jusante. (e) Sigla visível na ligação **MT/A2** no alçado jusante (marcada com um retângulo)

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO I DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo I Data: 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico: Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático



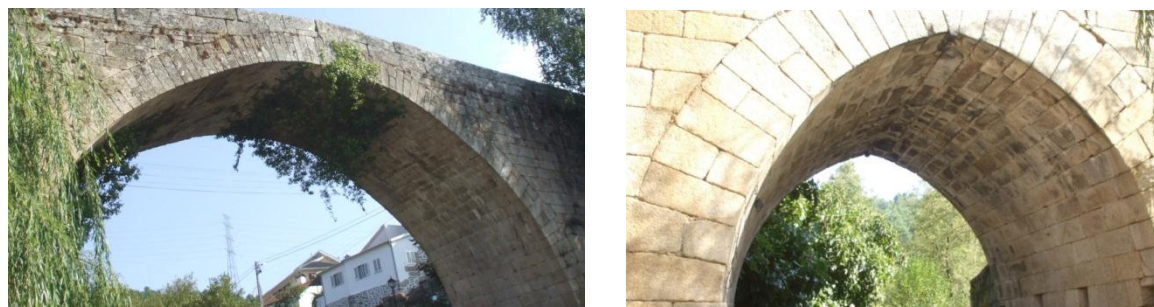
(a)

(b)

(c)

(d)

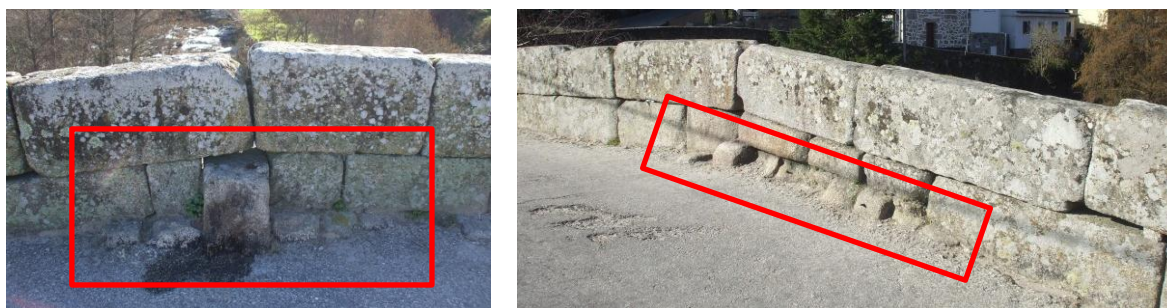
Figura E-4: Intradorso do **A1** do lado: (a) NE, onde é visível a continuidade de construção com o **T** até uma dada altura e (b) SO, sendo visível o moinho, o muro com continuidade de construção com o **EC1** no alçado montante e o muro sem continuidade no alçado jusante. São ainda visíveis aberturas e saliências para colocação do cimbre e são visíveis a conduta e o candeeiro. Intradorso do **A2** do lado: (c) NE, onde é visível parte do edifício de apoio à praia fluvial e os caminhos construídos e (d) SO, onde é visível a continuidade de construção com o **T** até uma certa altura e os caminhos construídos



(a)

(b)


Figura E-5: Intradorso dos arcos, com visualização da aduela de contrafecho saliente em relação às restantes aduelas: (a) **A1**, podendo-se observar a inexistência do recobrimento sobre o **A1**, bem como a existência de vegetação e (b) **A2**



(a)

(b)

Figura E-6: Aduelas do **A1** (marcadas com um retângulo a vermelho) desde a aduela de fecho até à secção do rim, destacando a maior dimensão da aduela de fecho, no alçado: (a) montante e (b) jusante, sendo visíveis ferros

<p>ANEXO I DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira</p> <p>Anexo I Data: 11/02/2011 e 23/09/2011</p> <p>Equipa/Técnico: Maria José da Cruz Morais</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra</p> <p>Estudo de um caso prático</p>
--	--



(a)



(b)

Figura E-7: Ferros colocados no alçado jusante, lado NE (marcados com elipses a vermelho): (a) nas aduelas visíveis do **A1** e numa **UA** das **G** e (b) nas **UA** das **G** junto ao acesso da ponte, lado NE

3.3: Pilares, encontros e fundações



(a)



(b)



(c)

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO I DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo I Data: 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico: Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático



(d)

(e)

(f)

Figura E-8: **EC1**, sendo visíveis árvores, os muros confinantes e o moinho, no alçado: (a) montante, lado SO; (b) jusante, lado SO, onde são visíveis os caminhos e escadas talhadas no afloramento rochoso. **EC2**, sendo visíveis árvores e parte dos caminhos construídos, no alçado: (c) montante, lado NE e (d) jusante, lado NE, sendo visível a construção de apoio à praia fluvial. (e) **P** no alçado jusante, sendo visível uma árvore junto a este. (f) Muros confinantes em ambos os alçados do **EC1**, lado SO, sendo visíveis árvores, o moinho no alçado montante, a conduta metálica no intradorso do **A1**, a escada metálica no alçado jusante e o afloramento rochoso



(a)

(b)

(c)

Figura E-9: Pormenor da ligação muro confinante/**EC**, sendo visíveis árvores e líquenes na ponte e muros: (a) **EC1**, no alçado montante, lado SO; (b) **EC1**, no alçado jusante, lado SO, sendo visível um candeeiro e (c) **EC2**, no alçado montante, lado NE




(a)

(b)

(c)

Figura E-10: Parte inferior do **EC1** saliente em relação à parte superior (marcada pelo retângulo a vermelho), lado SO, no alçado: (a) montante, sendo visível parte do afloramento rochoso onde o **EC1** assenta e (b) jusante, sendo visíveis árvores e um candeeiro. (c) Última fiada do **MT** saliente em relação às **G** no alçado jusante, (esta saliência também existe no alçado montante)

<p>ANEXO I DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira</p> <p>Anexo I Data: 11/02/2011 e 23/09/2011</p> <p>Equipa/Técnico: Maria José da Cruz Morais</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra</p> <p>Estudo de um caso prático</p>
--	--

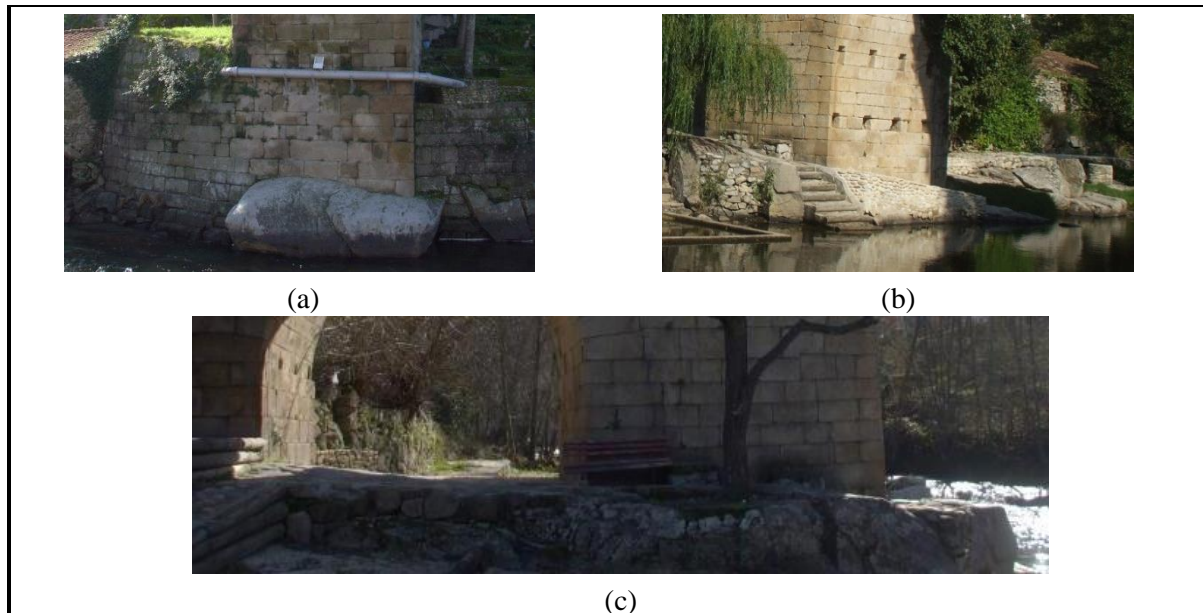


Figura E-11: Afloramento rochoso de fundação da ponte parcialmente encoberto: (a) sob o **EC1**, lado **SO**, sendo visíveis os muros confinantes, a conduta metálica e o candeeiro (ambos no intradorso do **A1**); (b) sob o **P**, sendo visíveis os caminhos e escadas construídos; (c) sob o **P** e sob o **EC2**, no alçado jusante, lado **NE**, sendo visíveis os caminhos construídos

3.4: Talha-mar

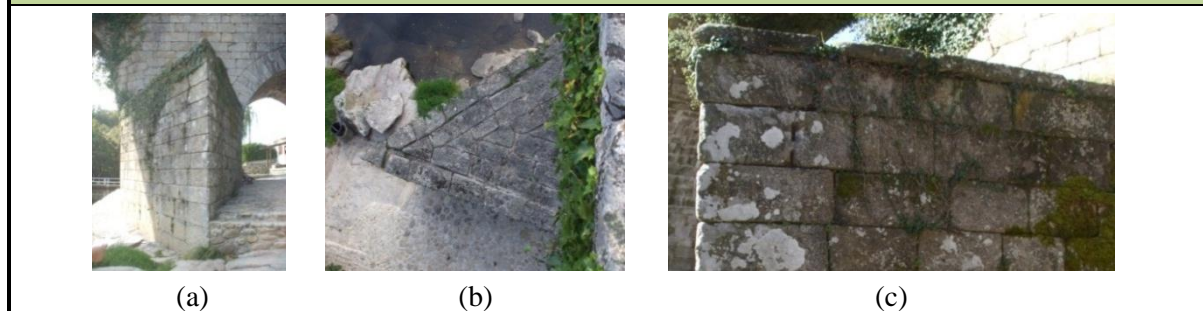


Figura E-12: **T**, sendo visível vegetação no seu capeamento e parte dos caminhos construídos: (a) no alçado montante; (b) visto de cima e (c) capeamento, sendo visíveis musgos e líquenes

3.5: Tabuleiro e guardas



Figura E-13: Acesso ao **TB** da ponte no lado, sendo visíveis construções junto à ponte: (a) **NE** e (b) **SO**

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO I DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo I Data: 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico: Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático



(a)



(b)

Figura E-14: **TB** e **G**, aquando da primeira inspeção, onde as setas indicam a elevada degradação deste, visto do lado: (a) NE, sendo visível a zona mais alta do **TB** sobre o **A1** e (b) SO, onde é visível a zona que serve de estacionamento no alçado montante e o acesso à praia fluvial junto ao edifício no alçado jusante



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura E-15: **TB** e **G**, aquando da segunda inspeção: (a) e (b) visto do lado NE, sendo visíveis as aduelas de fecho em ambos os alçados; (c) e (d) visto do lado SO, onde se pode observar a forma do **EC1** sob o **TB** e as aduelas de fecho em ambos os alçados (marcado com o retângulo a vermelho)

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

APÊNDICE F – Anexo II do relatório de inspeção e reabilitação da Ponte Românica de Mondim da Beira


No presente Apêndice é apresentado, do Quadro F-1 ao Quadro F-7, as secções 1 a 7 que compõem o Anexo II do relatório de inspeção e diagnóstico da Ponte Românica de Mondim da Beira.

Apesar de não ser do âmbito do presente trabalho, após o primeiro preenchimento da proposta de ficha de inspeção visual e após consultar os trabalhos que se referem a seguir, revelou-se útil a elaboração do Anexo II do relatório. O Anexo II é uma adaptação das fichas consultadas.

Foram consultados: Costa, C. (2002c); Silva, V. e Lança (2002); Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (2004); Vicente (2008); Silva, A. et al. (2010) e o Caso de estudo do troço do Aqueduto dos Pegões; alguns relatórios do GRUPO DE ESTUDOS DA PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, PATORREB; alguns relatórios facultados para observação por parte do NCREP e a informação e relatório facultados pela OZ (OZ, RELATÓRIO DE INSPECÇÃO PRINCIPAL, 2008 e OZ, RELATÓRIO DE INVENTÁRIO, 2008).

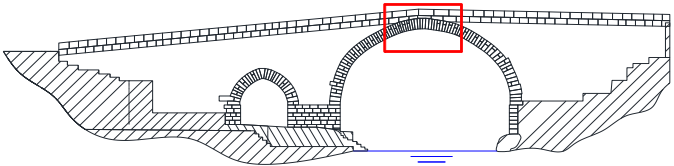


PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro F-1: Secção 1 do Anexo II

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 1 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
---	---

1: Localização	
(i) Distrito: Viseu	(v) Localidade: Mondim da Baixo
(ii) Concelho: Tarouca	
(iii) Freguesia: Mondim da Beira	(vi) Rua: Lugar do Outeiro, na Praça José Fernando
(iv) Curso de água: Rio Barosa	


2: Dano observado	
(i) Tipo de dano: D1	(ii) Localização: D1.1: Intradorso A2

3: Esquema da ponte/fotografias com localização do(s) dano(s)	
	
<p>Figura F-1: Esquema da ponte com a localização dos danos D1.1 a vermelho no alçado jusante</p>	
	
(a)	(b)
<p>Figura F-2: D1.1 (marcado com o círculo a vermelho), através do destacamento de uma UA na fiada ao lado da secção de fecho localizada aproximadamente a meio da largura do A1: (a) e (b)</p>	

4: Descrição do(s) dano(s)
4.1: Subtipo de dano: D1.1
Existência de uma UA destacada na fiada ao lado da secção de fecho localizada aproximadamente a meio da largura do A1.


5: Ensaios realizados
Não realizados.

6: Possíveis causas do(s) dano(s)
Como possíveis causas referem-se: (i) a existência de vegetação (D8.1), mais propriamente de raízes no E; (ii) erosão (D10.1); (iii) a percolação de água no material de E com conseqüente perda da leitada de argamassa e a ausência de coesão entre as UA; (iv) carregamentos excessivos; (v) vibrações excessivas; (vi) movimentos de apoio por assentamento das fundações (D4); (vii) descompressão do A1 (D2.4), ver secção 2 do Anexo II e (viii) uma incorreta execução de intervenções e falta de manutenção e/ou negligência e/ou abandono.

<p align="center">ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 1 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 <p align="center">Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>
<p>7: Consequências do(s) dano(s)</p>	
<p>Numa situação limite o dano D1.1 pode culminar no dano D1.2 permitindo a existência de vazios que permitem a entrada de água para o E.</p>	
<p>8: Possíveis formas de prevenção do(s) dano(s)</p>	
<p>Seguir um correto plano de manutenção preconizado.</p>	
<p>9: Possíveis formas de intervenção sob o(s) dano(s)</p>	
<p>Recomenda-se a técnica de manutenção MC1 de modo a remover a vegetação existente (D8.1) e proceder à posterior averiguação da existência de mais UA destacadas. Relativamente à UA destacada recomenda-se a sua reposição e posterior operação de manutenção MC5.</p>	
<p>10: Observações</p>	
<p>Não é possível observar mais nenhuma UA destacada dada a elevada concentração de vegetação (D8.1) no intradorso do A1.</p>	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro F-2: Secção 2 do Anexo II

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 2 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
---	---

1:Localização	
(i) Distrito: Viseu	(v) Localidade: Mondim da Baixo
(ii) Concelho: Tarouca	
(iii) Freguesia: Mondim da Beira	(vi) Rua: Lugar do Outeiro, na Praça José Fernando
(iv) Curso de água: Rio Barosa	

2:Dano(s) observado(s)	
(i) Tipo de dano: D2	(ii) Localização: D2.1a: intradorso do A2 D2.4: A1

3: Esquema da ponte/fotografias com localização do(s) dano(s)

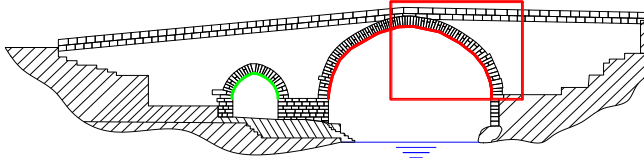






Figura F-3: Esquema da ponte com a localização dos danos D2.1a a verde e D2.4 a vermelho no alçado jusante

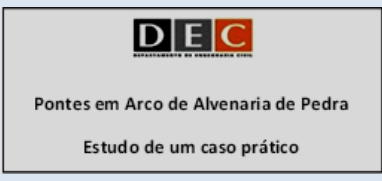


(a)



(b) (c)

Figura F-4: (a) D2.1a (marcado com o retângulo a vermelho e em pormenor) no intradorso do A1. D2.4 no A1 visto do alçado: (b) montante e (c) jusante

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 2 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	
4: Descrição do(s) dano(s)	
4.1: Subtipo de dano: D2.1a	
(i) O A2 apresenta no seu intradorso afastamento das UA , i.e., abertura de fendas longitudinais entre a secção de fecho e a secção do rim de uma forma distribuída e paralela ao intradorso do A2 . (ii) Não foram fornecidas informações relativas a possíveis intervenções no A2 .	
4.2: Subtipo de dano: D2.4	
(i) O A1 apresenta uma deformação na sua geometria mais pronunciada no lado SO , sem visualização de abertura de juntas. (ii) Não se conseguiu obter informação relativamente a esta deformação.	
5: Ensaio realizados	
Não realizados.	
6: Possíveis causas do(s) dano(s)	
4.1: Subtipo de dano: D2.1a	
Como possível causa refere-se a existência de esforços de tração na direção transversal, que tem por origem o tráfego rodoviário sobre a ponte.	
4.2: Subtipo de dano: D2.4	
(i) Como possíveis causas referem-se: (a) o assentamento dos apoios (D4); (b) a circulação de veículos pesados associada a uma reduzida espessura de E e (c) a infiltração de águas pluviais no E (D9.1), devido à inexistência de rede de drenagem. (ii) Seria necessário a realização de ensaios a fim de averiguar a causa. Não foi possível saber o estado de degradação do afloramento rochoso sobre o qual a ponte assenta nem o estado de degradação do material de enchimento, embora pela informação fornecida seja a causa mais provável, consultar secção 3 do Anexo II.	
7: Consequências	
6.1: Subtipo de dano: D2.1a	
A existência dos danos D2.1 pode conduzir: (i) a uma descompressão no E , podendo originar o abatimento do TB e uma ineficiente transmissão de cargas aos arcos; (ii) ao esmagamento da leitada de argamassa nas juntas e posterior queda; (iii) a infiltração de água no E (D9.1) e (iv) ao desenvolvimento de vegetação (D8.1).	
6.2: Subtipo de dano: D2.4	
O dano D2.4 permite a: (i) ocorrência de abertura e escorregamento das juntas transversais do A1 com consequente descompressão do A1 e do MT sobre a secção afetada; (ii) perda da leitada de argamassa nas juntas; (iii) infiltração de água no E (D9.1) e (iv) desenvolvimento de vegetação (D8.1).	
8: Possíveis formas de prevenção do(s) dano(s)	
Manter ou reforçar a operação de manutenção MP4 de modo a evitar sobrecargas elevadas sobre a ponte.	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 2 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>
---	---

9: Possíveis formas de intervenção sob o(s) dano(s)

9.1: Subtipo de dano: D2.1a

Recomenda-se uma análise do **A2** de modo a averiguar se o dano visível corresponde a um estado de instabilidade, de modo a proceder à melhor intervenção.

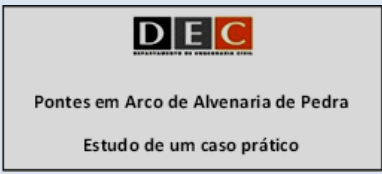
9.2: Subtipo de dano: D2.4

Recomenda-se a operação de manutenção MC1 de modo a remover a vegetação no intradorso do **A1** para posterior averiguação da existência de afastamento entre **UA** (D2.1, D2.2 e D2.3). Recomenda-se ainda a realização de ensaios de modo a perceber a causa da deformação e proceder posteriormente à intervenção mais adequada.

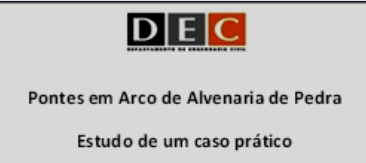
10: Observações

- (i) A espessura do recobrimento sobre o **A1** é reduzida não conduzindo à degradação de cargas. Deste modo existe uma maior concentração de esforços no **A1**.
- (ii) Como o afloramento rochoso que serve de fundação se encontra parcialmente encoberto pelas obras da praia fluvial não é possível observar danos nessa zona (D10.1 e D10.2) e logo a sua falta de capacidade de suporte da ponte (D5.1), i.e., a existência de desagregação num estado elevado conduz à incapacidade de o afloramento rochoso sob a ponte desempenhar a sua função de suporte.
- (iii) Não foi possível saber quais foram as obras de escavação que ocorreram junto ao **EC1** necessárias para a colocação da tubagem existente, de modo a poder avaliar se poderiam causar a perda de capacidade resistente da fundação (D5.1) e consequentemente assentamento dos apoios (D4).
- (iv) Nas zonas do intradorso do **A1** não cobertas pela vegetação não é visível fendilhação.
- (v) Não é visível fendilhação no **P** nem no **EC1**.
- (vi) Foi aplicada sobre **TB** original uma camada betuminosa (ver secção 4 do Anexo II), nesta camada, aquando da primeira visita, não era visível fendilhação, apenas uma faixa longitudinal ao longo de quase todo o **TB** com uma largura considerável, reparada, no alçado montante.
- (vii) Nas **G** do lado SO é visível um abatimento.


Quadro F-3: Secção 3 do Anexo II

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 3 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>		
1: Localização		
(i) Distrito: Viseu	(v) Localidade: Mondim da Baixo	
(ii) Concelho: Tarouca		
(iii) Freguesia: Mondim da Beira	(vi) Rua: Lugar do Outeiro, na Praça José Fernando	
(iv) Curso de água: Rio Barosa		
2: Dano(s) observado(s)		
(i) Tipo de dano: D6	(ii) Localização: D6: E (não visível, obtido por informação)	
3: Esquema da ponte/fotografias com localização do(s) dano(s)		
Não é visível a degradação do E.		
4: Descrição do(s) dano(s)		
<p>A degradação do E não é visível. Pressupõe-se a sua degradação pela informação fornecida pela Câmara Municipal de Tarouca.</p> <p>O E começou a sofrer infiltrações de água através das juntas das UA constituintes do TB, começando as UA de menores dimensões a afundar-se no E. Posteriormente os veículos ao atravessarem a ponte provocavam grandes vibrações.</p>		
5: Ensaio(s) realizados do(s) dano(s)		
Não realizados.		
6: Possíveis causas do(s) dano(s)		
Como possível causa refere-se a entrada de água através das juntas das UA que compõem o TB original conduzindo à percolação no interior do E, que por sua vez causa perda de finos e ocorrência de vazios no seio do material de enchimento.		
7: Consequências do(s) dano(s)		
<p>(i) A infiltração e presença de água no E em conjunto com o estado de degradação do material de E e a presença de cargas de tráfego agrava os danos nos MT (D3) pois causa um aumento do impulso e uma diminuição da resistência do E.</p> <p>(ii) A infiltração de águas pluviais no E pode conduzir a danos nos arcos (D2.4).</p> <p>(iii) Numa situação limite pode ocorrer o desmoronamento do E aliado ao colapso parcial dos MT (D1.3). A inexistência do E pode originar movimentos para o lado do intradorso (impulso ativo) dos arcos que poderão resultar em fendas transversais (D2.2), cuja localização no intradorso ou no extradorso depende do sentido do movimento horizontal e também se este movimento é ou não acompanhado de movimento de rotação dos apoios.</p>		
8: Possíveis formas de prevenção do(s) dano(s)		
Evitar infiltrações, mantendo uma adequada impermeabilização e/ou drenagem das águas pluviais.		

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 3 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	
9: Possíveis formas de intervenção sob o(s) dano(s)	
<p>Recomenda-se a realização de ensaios não destrutivos ou pouco invasivos de modo a averiguar o estado do material de E para proceder à melhor forma de intervenção do E (e.g., RC2 no E através de uma argamassa compatível com o material de E existente de modo a obter a sua consolidação e melhor desempenho das suas funções).</p> <p>Recomenda-se ainda a técnica de manutenção ME2 e a técnica de reabilitação/reforço RC1 nos paramentos da ponte.</p>	
10: Observações	
<p>(i) A camada de betuminoso colocada sobre o TB original restringe o movimento dos MT para fora do plano. A rugosidade do TB original pode levar a que os veículos circulem a velocidades reduzidas, apesar de poder contribuir para amplificação do efeito da ação do tráfego no comportamento dinâmico da ponte. Esta rugosidade em conjunto com a sua espessura pode influenciar a degradação das cargas pontuais transmitidas ao E. Contudo o aumento de espessura por si só não contribui para um aumento significativo da degradação das cargas pontuais transmitidas ao E.</p>	

Quadro F-4: Secção 4 do Anexo II

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 4 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
--	--

1:Localização	
(i) Distrito: Viseu	(v) Localidade: Mondim da Baixo
(ii) Concelho: Tarouca	
(iii) Freguesia: Mondim da Beira	(vi) Rua: Lugar do Outeiro, na Praça José Fernando
(iv) Curso de água: Rio Barosa	

2:Dano(s) observado(s)	
(i) Tipo de dano: D7	(ii) Localização: D7.1: G (alçado montante, lado SO) D7.3: TB (alçado montante)

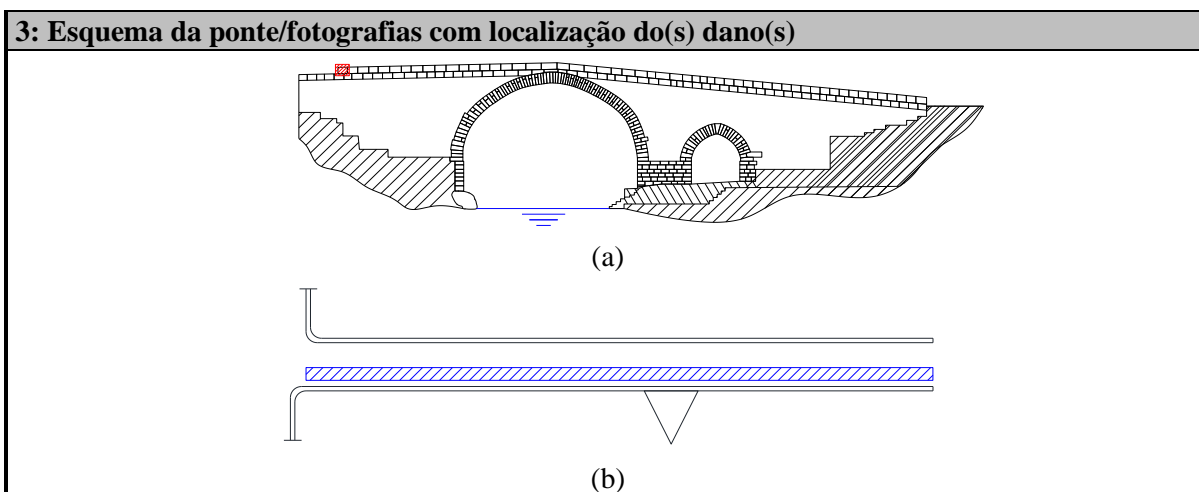


Figura F-5: Esquema da ponte com a localização dos danos (a) D7.1 a vermelho no alçado montante e (b) D7.3 a azul na planta

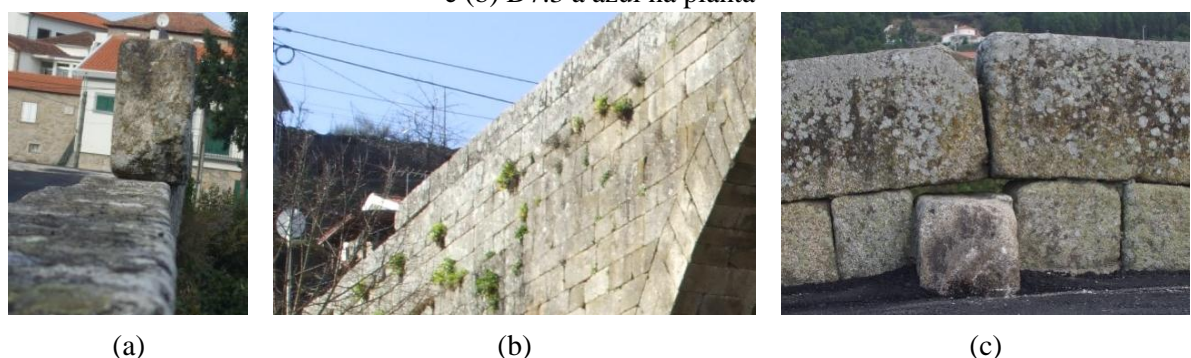


Figura F-6: UA desviada na **G** observada pelo: (a) lado SO e (b) alçado montante. (c) UA na **G** (sobre o **A1**) sem elemento de ligação, no alçado montante

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo II – Secção 4 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático



(a)



(b)

Figura F-7: Faixa reparada no **TB** no alçado montante observada: (a) do lado NE e (b) junto ao lado SO

4: Descrição do(s) dano(s)

4.1: Subtipo de dano: D7.1

A última **UA** da última fiada da **G** no alçado montante, lado SO encontra-se ligeiramente desviada em relação à primeira fiada.

4.2: Subtipo de dano: D7.3

Aquando da primeira visita a camada de betuminoso apresentava uma elevada degradação, sendo visível uma faixa longitudinal ao longo de quase todo o **TB**, no alçado montante, com uma largura considerável, reparada. Na segunda visita já foi observada uma nova camada de betuminoso que encobre a degradação existente na camada anterior.

5: Ensaios realizados

Não realizados.

6: Possíveis causas do(s) dano(s)

6.1: Subtipo de dano: D7.1

Como possíveis causas referem-se: (i) o choque de veículos e (ii) atos de vandalismo.

6.2: Subtipo de dano: D7.3

(i) Pode ser consequência de: (a) ocorrência de assentamentos dos apoios (D4) ou (b) circulação de veículos pesados.

(ii) Seria necessário a realização de ensaios a fim de averiguar a causa.

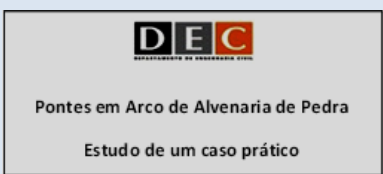
7: Consequências do(s) dano(s)

7.1: Subtipo de dano: D7.1

Numa situação limite o dano D7.1 conduz à ausência da sua função de segurança (peões e veículos).


7.2: Subtipo de dano: D7.3

O dano D7.3: (i) afeta a circulação e (ii) possibilita a entrada de água para o **E**, podendo conduzir a possíveis danos no **E** (D6).

<p align="center">ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 4 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	
<p>8: Possíveis formas de prevenção do(s) dano(s)</p>	
<p>8.1: Subtipo de dano: D7.1</p>	
<p>Seguir um correto plano de manutenção preconizado.</p>	
<p>8.2: Subtipo de dano: D7.3</p>	
<p>Manter ou reforçar a operação de manutenção MP4 de modo a evitar sobrecargas elevadas sobre a ponte.</p>	
<p>9: Possíveis formas de intervenção sob o(s) dano(s)</p>	
<p>Recomenda-se a operação de manutenção MC5 de modo a evitar futura queda e possíveis danos humanos.</p>	
<p>10: Observações</p>	
<p>Na zona mais elevada da ponte no alçado montante o elemento de ligação entre UA não existe no alçado montante. Esta situação não se observa no alçado jusante. Como possível causa refere-se a degradação nos vértices (D10.2) ou esta em conjunto com o movimento do A1 devido à sua deformação (D2.4).</p>	

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro F-5: Secção 5 do Anexo II

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 5 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
--	--

1: Localização	
(i) Distrito: Viseu	(v) Localidade: Mondim da Baixo
(ii) Concelho: Tarouca	
(iii) Freguesia: Mondim da Beira	(vi) Rua: Lugar do Outeiro, na Praça José Fernando
(iv) Curso de água: Rio Barosa	

2: Dano(s) observado(s)	
(i) Tipo de dano: D8	(ii) Localização: D8.1: MT , extradorso do A1 , extradorso do A2 , T e G D8.2: MT , extradorso do A1 , T e G D8.3: Extradorso do A1 , T e G

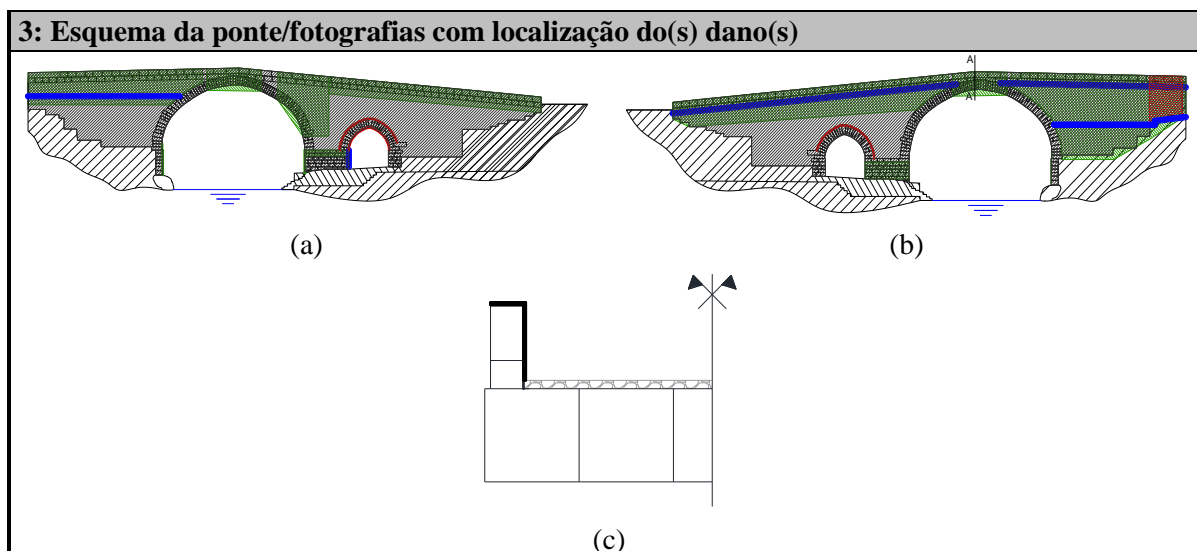

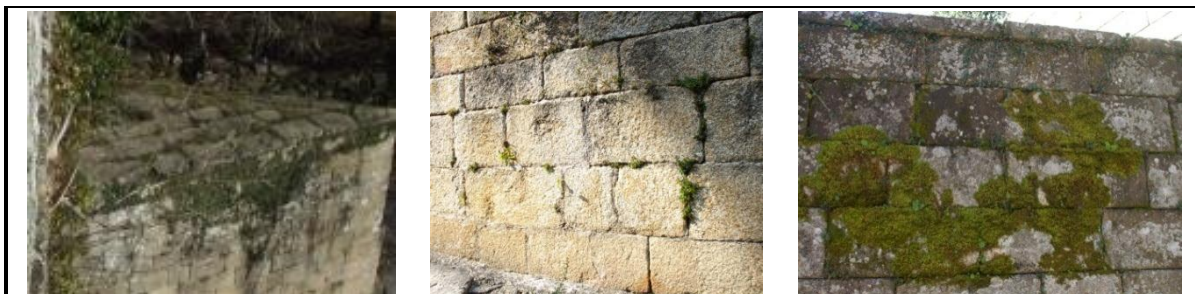


Figura F-8: Esquema da ponte com a localização dos danos D8.1 a verde, D8.2 a azul, D8.3 a cinzento e D8.4 a vermelho no alçado: (a) montante, (b) jusante e (c) corte



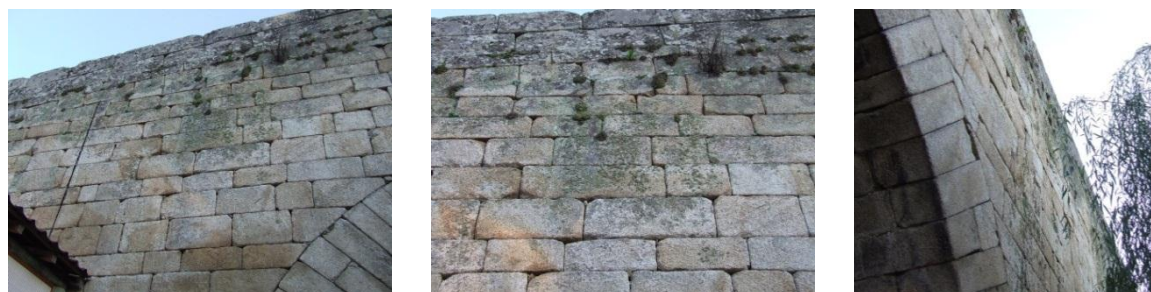
Figura F-9: D8.1 e D8.3 no alçado montante no: (a) **EC1**, no **MT**, nas **G** e nos muros confinantes; (b) intradorso do **A1** e (c) extradorso do **A1**, no **MT**, no **T** e nas **G**

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 5 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>
--	---



(a) (b) (c)

Figura F-10: D8.1 no **T** no: (a) capeamento e (b) no lado SO. (c) D8.2 no **T** no lado NE



(a) (b) (c)

Figura F-11: D8.1 e D8.3 no alçado jusante: (a) entre o extradorso do **A2** e o **MT** e nas **G**, (b) entre os extradorsos dos dois arcos e (c) na ligação **MT/ A1**



(a) (b) (c) (d)

Figura F-12: Alçado jusante: (a) D8.1, D8.3 e D8.4 no **EC1**; (b) D8.1 e D8.2 entre o **MT** e a primeira fiada das **G**; (c) D8.4 nas juntas e **UA** no **EC1**. (d) D8.1 e D8.3 no **T** no lado NE



(a) (b) (c)

Figura F-13: (a) D8.1 entre o **TB** e as **G**; (b) D8.2 nas juntas das **G** e (c) D8.3 nas **G**

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo II – Secção 5 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático



(a)



(b)



(c)

Figura F-14: Existência de lixo nas: (a) juntas das **G**; (b) e (c) aberturas para colocação do cimbreiro no intradorso do **A2**

4: Descrição do(s) dano(s)

4.1: Subtipo de dano: D8.1

(i) Existe uma grande quantidade de vegetação de médio porte (plantas trepadeiras): (a) no intradorso e extradorso do **A1**; (b) no **MT**, sendo visíveis os caules, alguns já secos e com origem nas juntas; (c) no **T**; (d) nas **G** no alçado montante, lado NE e (e) no extradorso do **A1** no alçado jusante junto à aduela de fecho.

(ii) Existe vegetação de diversas espécies de pequeno porte nas juntas de uma forma generalizada por todos os elementos da ponte.

4.2: Subtipo de dano: D8.2

Existem musgos nas zonas mais sombrias da ponte: (i) no **EC1** no alçado jusante junto ao afloramento rochoso e no próprio afloramento; (ii) no **T** do lado NE do e (iii) na zona saliente que liga o **MT** e a primeira fiada das **G** nos dois alçados.

4.3: Subtipo de dano: D8.3

Existem líquenes de um modo generalizado por toda a ponte, ocupando quase totalmente a superfície das **UA**. Encontram-se das variedades incrustante e folhosa e com diferentes tonalidades (branco, amarelo, laranja, verde e cinzento).

4.4: Subtipo de dano: D8.4

(i) Existem depósitos de terra vegetal nas zonas onde se localizam vegetação e musgos: (a) no **EC1** no alçado jusante, lado SO; (b) na zona saliente que liga o **MT** e a primeira fiada das **G** nos dois alçados; (c) no intradorso e extradorso do **A1**; (d) no **MT**; (e) no **T** e nas **G** no alçado montante, lado SE e (f) no extradorso do **A1** no alçado jusante junto à aduela de fecho.

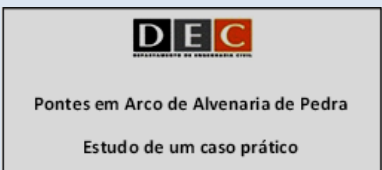
(ii) Existem depósitos de terra: (a) nas **UA** do **EC1** no alçado jusante, lado SO, junto ao afloramento rochoso (possivelmente resultantes do salpicar da água que, durante as chuvas, cai no afloramento e transporta depósitos de terra existentes).

5: Ensaio realizados

Não realizados.

6: Possíveis causas do(s) dano(s)

Os danos D8 podem resultar: (i) da exposição a condições agrestes de temperatura e de humidade; (ii) da presença de água nos paramentos, nas juntas e nas falhas nas **UA** e no **E**; (iii) da falta de limpeza e manutenção ou (iv) da inexistência dos órgãos de drenagem.

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 5 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	
--	---

7: Consequências do(s) dano(s)

- (i) Os danos D8.2, D8.3 e D8.4 originam a produção de agentes degradantes dos materiais (D10.2).
- (ii) A existência do dano D8.1 em grandes quantidades no intradorso do **A1** impede a observação de possíveis danos não estruturais e estruturais.
- (iii) A presença de raízes de plantas nas juntas ou em fendas nas **UA** pode provocar: (a) a desintegração mecânica do material pétreo (D10.2) ou (b) afastamento das **UA** e fendas (D10.2), quando as raízes apresentam grandes dimensões.
- (iv) A existência de depósitos de terra e de excrementos de animais (D8.4) atua como fertilizante da vegetação (D8.1).

8: Possíveis formas de prevenção do(s) dano(s)

Seguir um correto plano de manutenção preconizado.

9: Possíveis formas de intervenção sob o(s) dano(s)


São aconselhadas as operações de manutenção MC1e MC3.

10: Observações

- (i) Aconselha-se cuidado com as árvores de grande porte junto à ponte devido à possibilidade das suas raízes se estenderem até às juntas, podendo causar danos (D10.2 ou D1.1).
- (ii) A presença de líquenes (D8.3) mostra que se está numa zona sem grandes níveis de poluição, contudo, a sua presença contribuiu para a degradação pétreo (D10.2) devido à sua produção de ácidos, facilitando o aparecimento de plantas (D8.1), uma vez que são seres colonizadores primários.
- (iii) Refere-se que algumas juntas e aberturas para o cimbrio do **A2** encontram-se com lixo, e.g., papéis, maços de tabaco e plásticos amarrados, cigarros e latas de refrigerantes. A existência deste lixo pode contribuir para o desenvolvimento de depósitos que se acumulam nas juntas, podendo contribuir para a degradação das **UA** (D10.2), mas sem consequências a nível estrutural.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro F-6: Secção 6 do Anexo II

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 6 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
--	--

1:Localização	
(i) Distrito: Viseu	(v) Localidade: Mondim da Baixo
(ii) Concelho: Tarouca	
(iii) Freguesia: Mondim da Beira	(vi) Rua: Lugar do Outeiro, na Praça José Fernando
(iv) Curso de água: Rio Barosa	

2:Dano observado	
(i) Tipo de dano: D9	(ii) Localização: D9.1: Intradorso do A1 e do A2 , afloramento rochoso sob P e EC2 D9.2: Intradorso do A1 e do A2

3: Esquema da ponte/fotografias com localização do(s) dano(s)

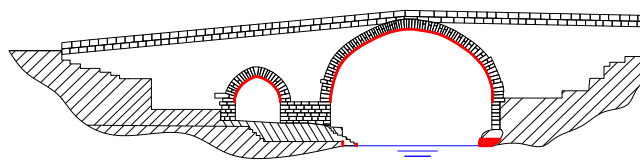


Figura F-15: Esquema da ponte com a localização dos danos D9.1 e D9.2 a vermelho

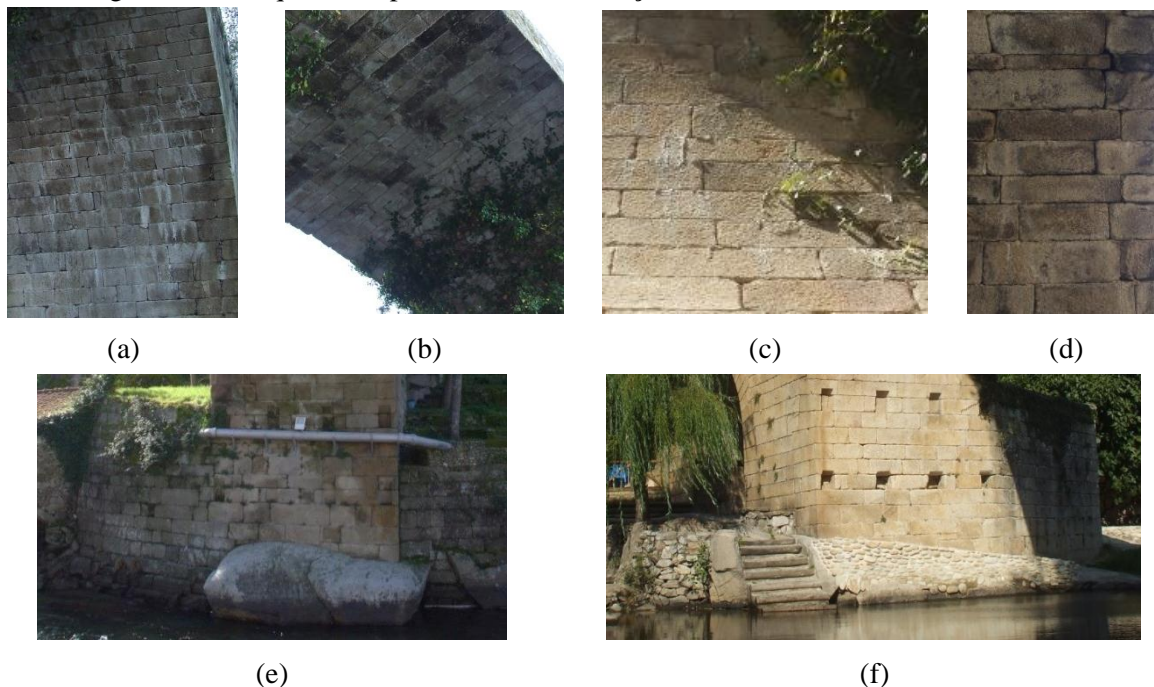



Figura F-16: D9.1e D9.2 no intradorso do **A1**, com grande concentração nas juntas onde se encontra a vegetação (D8.1): (a) e (b). (c) D9.2 no intradorso do **A1**. (d) D9.1 e D9.2 no intradorso do **A2**. D9.1 no afloramento rochoso sob: (e) **EC1**, lado SO e (f) **P**, lado SO

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 6 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>
--	---

4: Descrição
4.1: Subtipo de dano: D2.1
<p>(i) Escorrências no intradorso do A1 e no A2, ainda que em menor quantidade no A2. (ii) Manchas de humidade de tonalidade escura no intradorso do A1 e do A2. (iii) Manchas de humidade de tonalidade escura e verde no afloramento rochoso sob o P do lado SO e sob EC1, lado SO, acima do nível do curso de água.</p>
4.2: Subtipo de dano: D9.2
<p>(i) Eflorescências no intradorso do A1 e em menor quantidade no A2.</p>
5: Ensaios realizados
<p>Não realizados.</p>
6: Possíveis causas do(s) dano(s)
6.1: Subtipo de dano: D9.1
<p>Os danos D9.1 podem ser consequência: (i) da condensação do vapor de água da atmosfera, que se pode infiltrar no E; (ii) da infiltração da água da chuva devido a um ineficiente ou inexistente sistema de impermeabilização ou devido à não existência da rede de drenagem de águas pluviais ou (iii) da absorção por capilaridade da água, que depende (a) da porosidade do material pétreo, (b) da evaporação, (c) da temperatura, (d) de variações cíclicas do nível da água e (e) da falta de limpeza da ponte.</p>
6.2: Subtipo de dano: D9.2
<p>Os danos D9.2 resultam da cristalização de minerais de sais solúveis sobre a superfície das UA e argamassa devido: (i) à ascensão (à superfície das UA) de soluções salinas a partir do solo, (ii) da atmosfera ou (iii) da dissolução do material pétreo.</p>
7: Consequências do(s) dano(s)
<p>(i) Os danos D9.1 promovem o aparecimento de vegetação e organismos biológicos (D8). (ii) Os efeitos dos ciclos de gelo/degelo (devido às variações de temperatura) provocam: (a) variações de volume das UA, que conduzem a pressões internas nos poros, podendo originar uma degradação mecânica (D10.2) e (b) um aumento do volume do E podendo levar a um aumento de esforços e consequentemente ao aparecimento de fendas nos paramentos da ponte (D2.1, D2.2, D2.3 e D3.2). (iii) O movimento da água por percolação no E promove a lavagem da leitada de argamassa nas juntas dos paramentos da ponte, acelerando o processo de degradação pétreo (D10.2). (iv) A presença de água no E promove a lavagem de finos e o surgimento de vazios originando um processo de degradação do material de enchimento (D6).</p>
8: Possíveis formas de prevenção do(s) dano(s)
<p>Seguir um correto plano de manutenção preconizado.</p>

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo II – Secção 6 **Data:** 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático


9: Possíveis formas de intervenção sob o(s) dano(s)

São aconselhadas as operações de manutenção MC1, MP3 (ou a técnica de reabilitação/reforço RC3). Possibilidade de colocação de um sistema de drenagem das águas pluviais de modo a evitar/diminuir infiltrações para o E.

10: Observações

Apesar da colocação do pavimento betuminoso com vista à impermeabilização do TB o intradorso dos dois arcos continua a apresentar manchas de humidade e escorrências (D9.1).

Quadro F-7: Secção 7 do Anexo II

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 7 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático
---	--

1:Localização	
(i) Distrito: Viseu	(v) Localidade: Mondim da Baixo
(ii) Concelho: Tarouca	
(iii) Freguesia: Mondim da Beira	(vi) Rua: Lugar do Outeiro, na Praça José Fernando
(iv) Curso de água: Rio Barosa	

2:Dano(s) observado(s)	
(i) Tipo de dano: D10	(ii) Localização: D10.1: Generalizado (A1; A2; MT; T e G) D10.2: Generalizado (A1; A2; MT; T e G) D10.3: Extradorso do A2; MT (alçado montante)

3: Esquema da ponte/fotografias com localização do(s) dano(s)

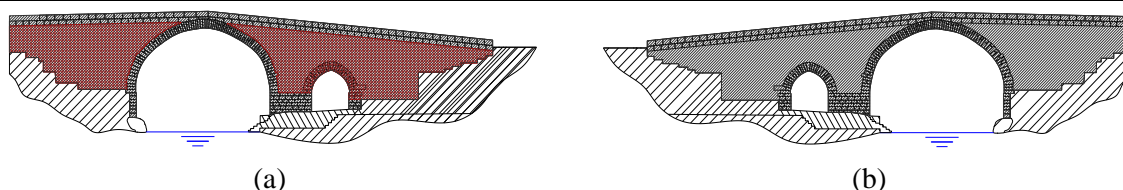


Figura F-17: Esquema da ponte com a localização dos danos D10.1 e D10.2 a cinzento e D10.3 a vermelho no alçado: (a) montante e (b) jusante

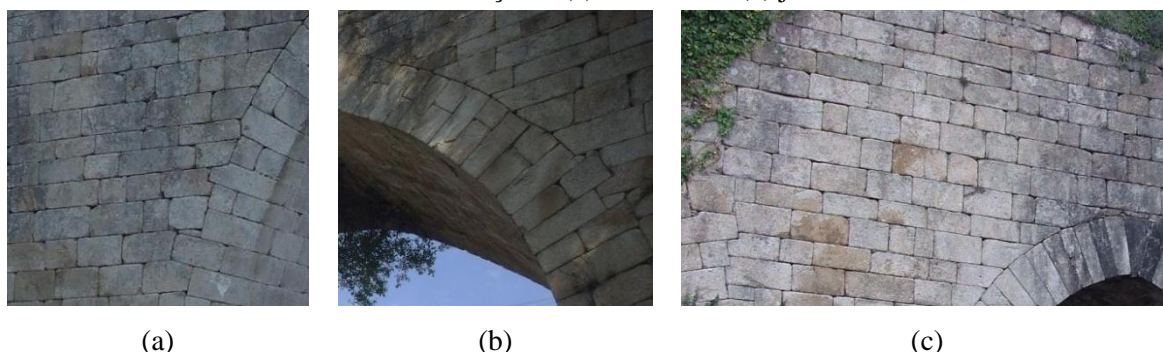


Figura F-18: D10.1 e D10.2 no alçado montante no: (a) e (b) MT/A1 e (c) MT/A2

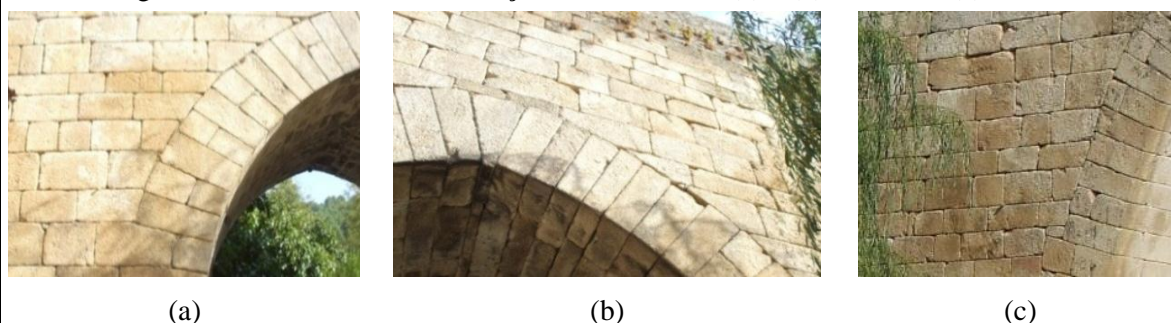


Figura F-19: D10.1 e D10.2 no alçado jusante no: (a) e (b) MT/A2, com visualização da leitada de argamassa de cal esmagada, e (c) muro MT/A1

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo II – Secção 7 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático



(a)

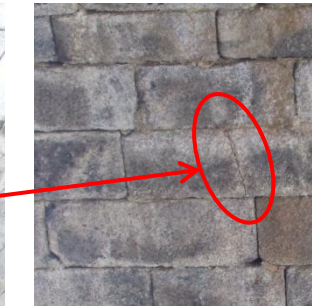
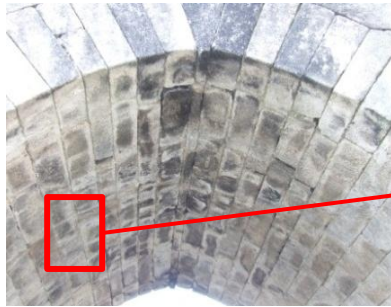


(b)



(c)

Figura F-20: D10.1 e D10.2 no: (a) e (b) intradorso do A1 e (c) EC2



(a)

(b)

(c)

Figura F-21: D10.2 (fendilhação) no A2 no: (a) intradorso (marcado pelo retângulo a vermelho e em pormenor), com visualização da leitada de argamassa de cal esmagada, (b) extradorso e (c) intradorso



(a)



(b)




(c)

Figura F-22: (a) D10.2 (fendilhação) no EC2. D10.1 no T: (b) no vértice e (c) no lado SO



(a)

<p>ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 7 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	 <p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>
--	---

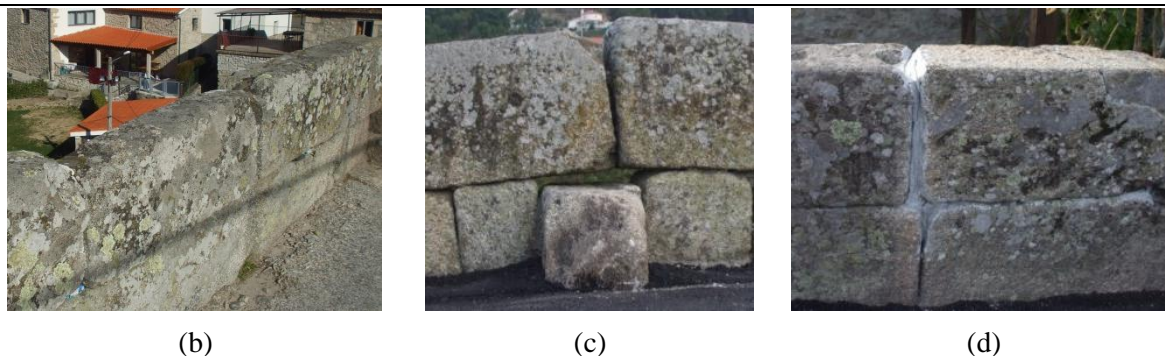


Figura F-23: D10.2 nas **G** vista do: (a) alçado montante, (b) e (c) **TB**. (d) Juntas das **G** preenchidas com argamassa de cimento

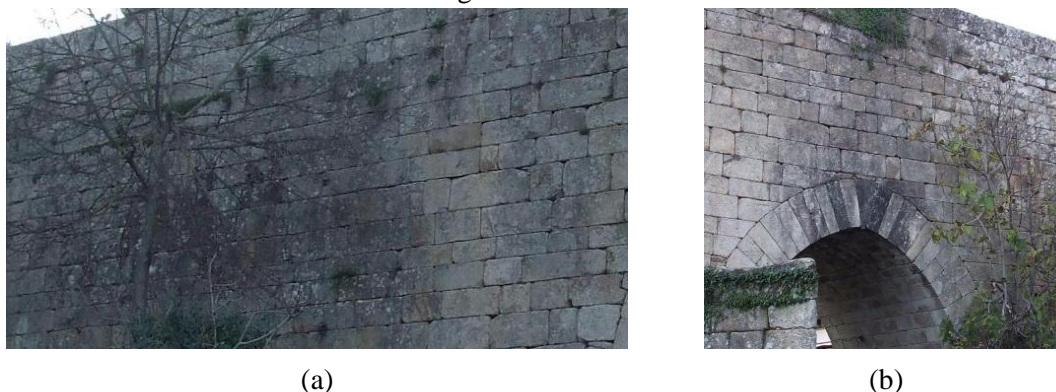


Figura F-24: D10.3 no alçado montante no: (a) **MT** e no **EC1** e (b) no recobrimento do **A2** e no seu extradorso

4: Descrição do(s) dano(s)

4.1: Subtipo de dano: D10.1

(i) De um modo generalizado as **UA** apresentam arredondamento das arestas e vértices; (ii) no centro de algumas **UA** é visível um significativo desgaste; (iii) noutras existem zonas de desgaste que se assemelham a cavidades no centro ou junto aos vértices e (ii) no **T** as **UA** no vértice e no lado **SO** apresentam um acentuado desgaste.

4.2: Subtipo de dano: D10.2

(i) De um modo generalizado na zona não encoberta pelos danos D8 as **UA** apresentam sinais de degradação: (a) apresentam um aspeto rugoso devido à perda de minerais constituintes na sua superfície; (b) em algumas ocorreu destacamento de placas de material pétreo da superfície com posterior queda dessas placas; (c) outras apresentam total ou parcialmente a camada superficial com uma tonalidade acastanhada (as zonas não acastanhadas devem-se ao destacamento e posterior queda dessa placa acastanhada).

(ii) Relativamente a fendas: (a) no **A2** existe uma fenda oblíqua visível no intradorso e no extradorso junto ao **T**, ocupando duas **UA**; (b) no intradorso do **A2** é visível uma fenda ao longo da altura de uma **UA** e (c) no **EC1** no alçado jusante, lado **SO**, existem algumas **UA** com fendas verticais ao longo de toda ou parte da sua altura. A superfície destas fendas apresenta algum

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA

Ponte Românica de Mondim da Beira

Anexo II – Secção 7 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011

Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais



Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

Estudo de um caso prático

desgaste, observando-se o afastamento entre as duas parcelas das **UA**.

4.3: Subtipo de dano: D10.3

Existem crostas e filmes negros em todo o alçado montante da ponte, sendo mais visíveis no: (i) recobrimento e no extradorso do **A2** e (ii) no **EC1**.

5: Ensaios realizados

Não realizados.

6: Possíveis causas do(s) dano(s)

6.1: Subtipo de dano: D10.1

Os danos D10.1 resultam: (i) da ação combinada da chuva e do vento contendo partículas sólidas ou (ii) da ação da água e das partículas que a água transporta no caso do **T**. Esta ação provoca o desgaste contínuo da superfície das **UA**, dependendo os seus efeitos da dureza superficial e da resistência das **UA**.

6.2: Subtipo de dano: D10.2

Os danos D10.2 dependem da natureza das **UA** em conjunto com fenómenos climáticos e biológicos: (i) variações de volume das **UA** com consequentes pressões internas nos poros, podendo conduzir à fraturação e desagregação devido à entrada de água nestes em conjunto com os efeitos dos ciclos de gelo/degelo; (ii) aumento das dimensões de fendas já existentes nas **UA** devido ao crescimento de vegetação nessas fendas ou (iii) alteração dos minerais existentes nas **UA** devido à ocorrência de reações químicas entre os minerais e substâncias existentes na água ou na atmosfera.

6.3: Subtipo de dano: D10.3

(i) As crostas, D10.3a, resultam da queima de combustíveis, e.g., de indústrias, veículos e de alguns seres vivos como fungos e bactérias (D8.3).
(ii) Os filmes negros, D10.3b, estão associados à poluição atmosférica e a eventuais ataques de chuvas ácidas.

7: Consequências do(s) dano(s)

A presença dos danos D10: (i) causa uma alteração ou destruição das **UA** por ataque químico e/ou físico; (ii) conduz a uma perda de secção das **UA** com respetiva redução de resistência e (iii) facilita a ação de outros fenómenos de degradação.

8: Possíveis formas de prevenção do(s) dano(s)

Seguir um correto plano de manutenção preconizado.

9: Possíveis formas de intervenção sob o(s) dano(s)

Recomenda-se a operação manutenção MC1 de modo a remover todos os danos D8 e D10.3. Posteriormente a remoção da argamassa com cimento das juntas das **G** e do **EC1**, no alçado jusante, lado SO, e a sua substituição por uma argamassa compatível com as **UA** (MC5).

<p style="text-align: center;">ANEXO II DO RELATÓRIO DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DA Ponte Românica de Mondim da Beira Anexo II – Secção 7 Data: 11/02/2011 e 23/09/2011 Equipa/Técnico(a): Maria José da Cruz Morais</p>	<p>Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Estudo de um caso prático</p>
--	---

Dado o esmagamento da leitada existente nas juntas e o seu desaparecimento na maioria das juntas, recomenda-se a colocação de uma argamassa compatível de modo a evitar o aumento do desgaste das **UA** (RC1).

10: Observações

- (i) Algumas juntas encontram-se preenchidas com depósitos de terra vegetal.
- (ii) A espessura das juntas é reduzida, não se estando perante juntas com preenchimento de argamassa. Deste modo pressupõe-se a colocação de uma leitada de argamassa de cal de modo a uniformizar o contacto entre as **UA**, uma vez que no **A2** é visível esta leitada esmagada a ocupar as juntas.

APÊNDICE G – Análise numérica da Ponte Românica de Mondim da Beira

No presente Apêndice podem ser encontradas as figuras e os quadros complementares ao capítulo 6.

As Figura G-1 à Figura G-6 são referentes aos mecanismos de colapso dos três modelos para o caso I e para o caso II para as três gamas de valores de rigidez normal.

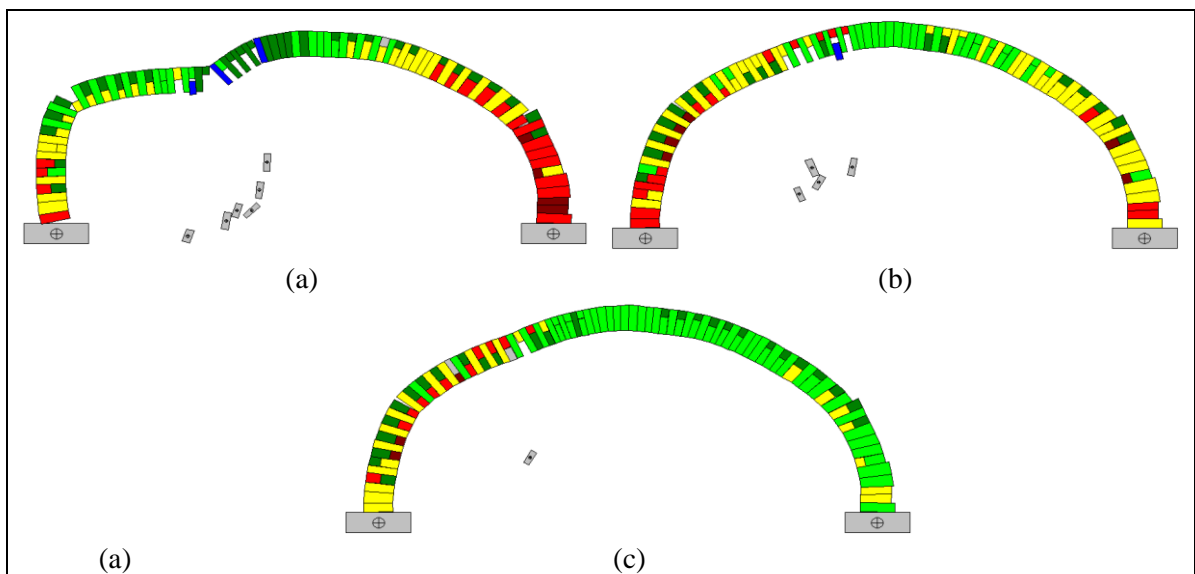


Figura G-1: Mecanismo de colapso – Caso I, Modelo 0: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m

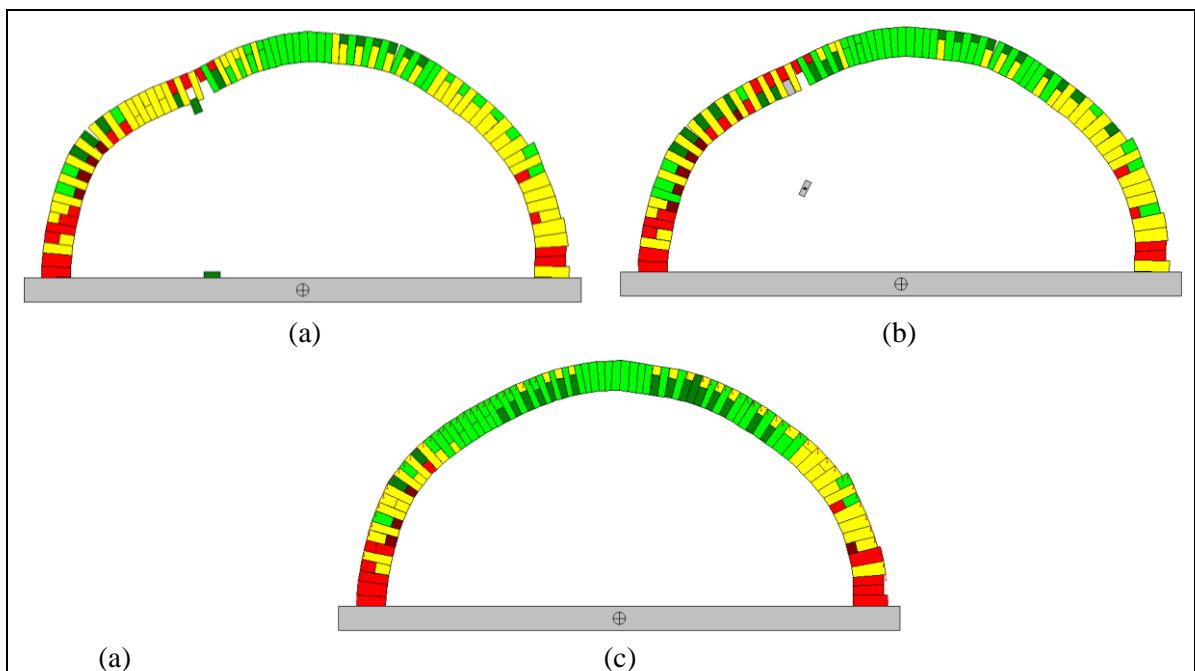


Figura G-2: Mecanismo de colapso – Caso I, Modelo 1: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

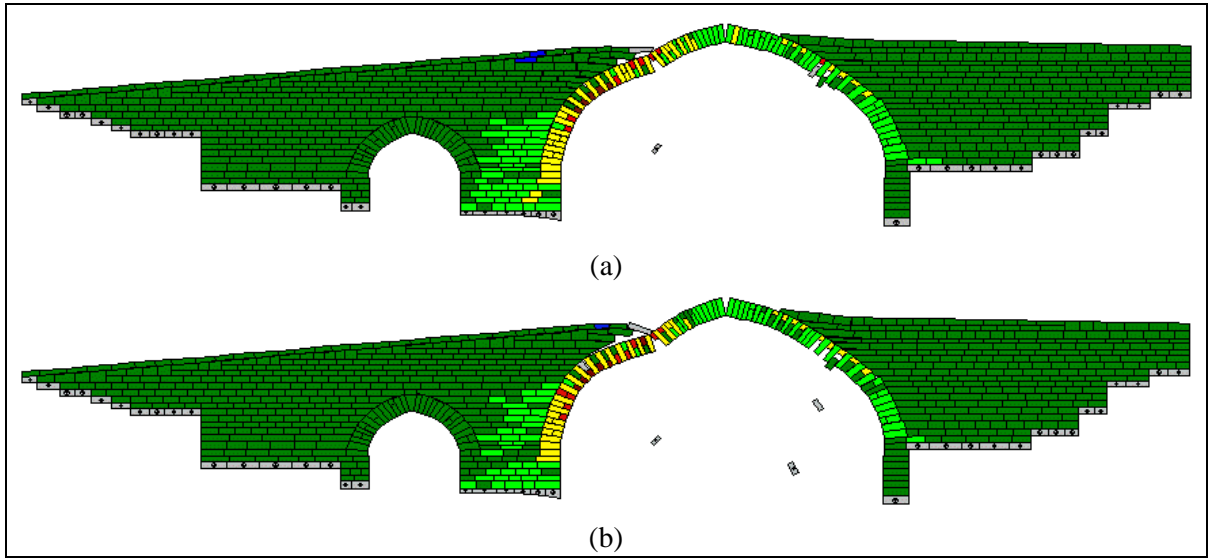


Figura G-3: Mecanismo de colapso – Caso I, Modelo 2: (a) $K_n = 1$ e (b) 10 GPa/m

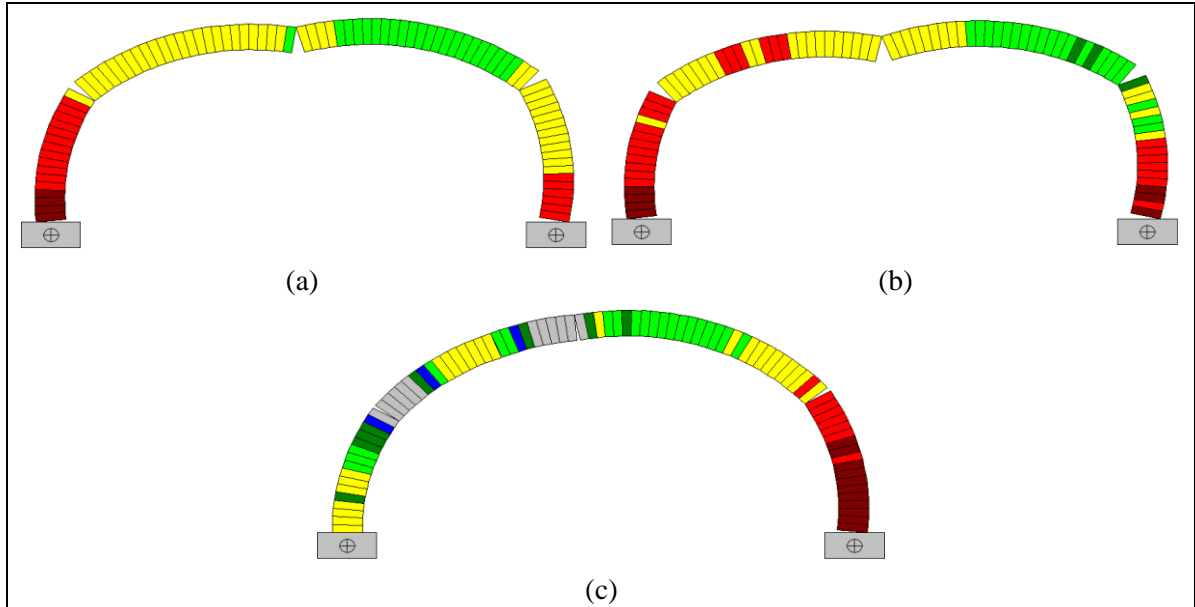


Figura G-4: Mecanismo de colapso – Caso II, Modelo 0: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m

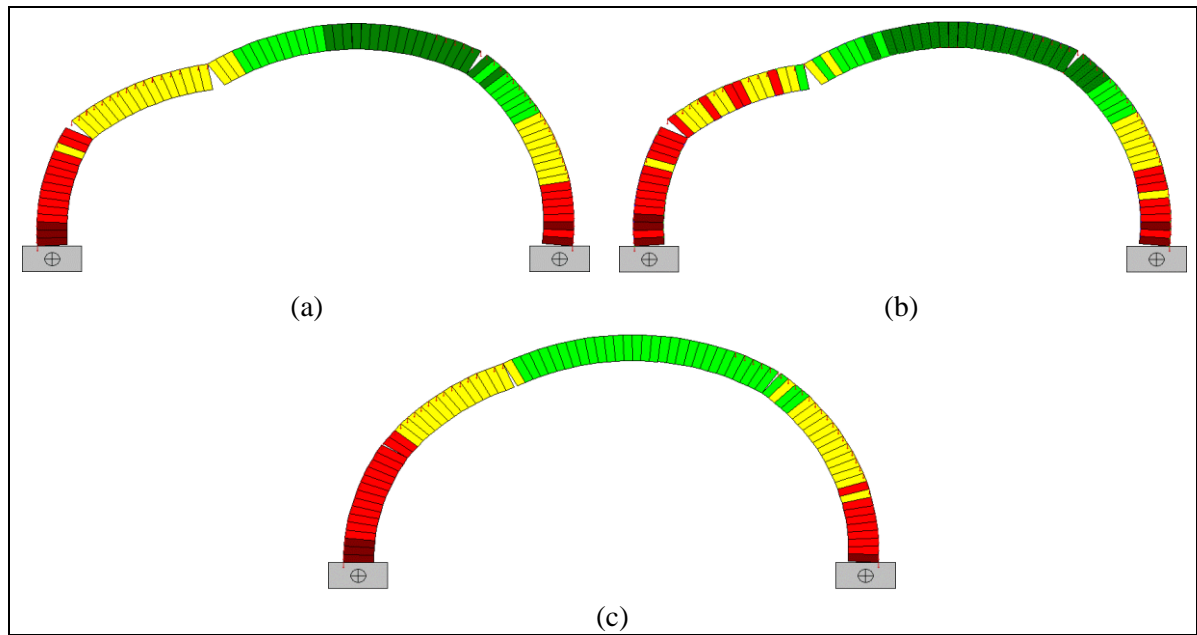


Figura G-5: Mecanismo de colapso – Caso II, Modelo 1: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m

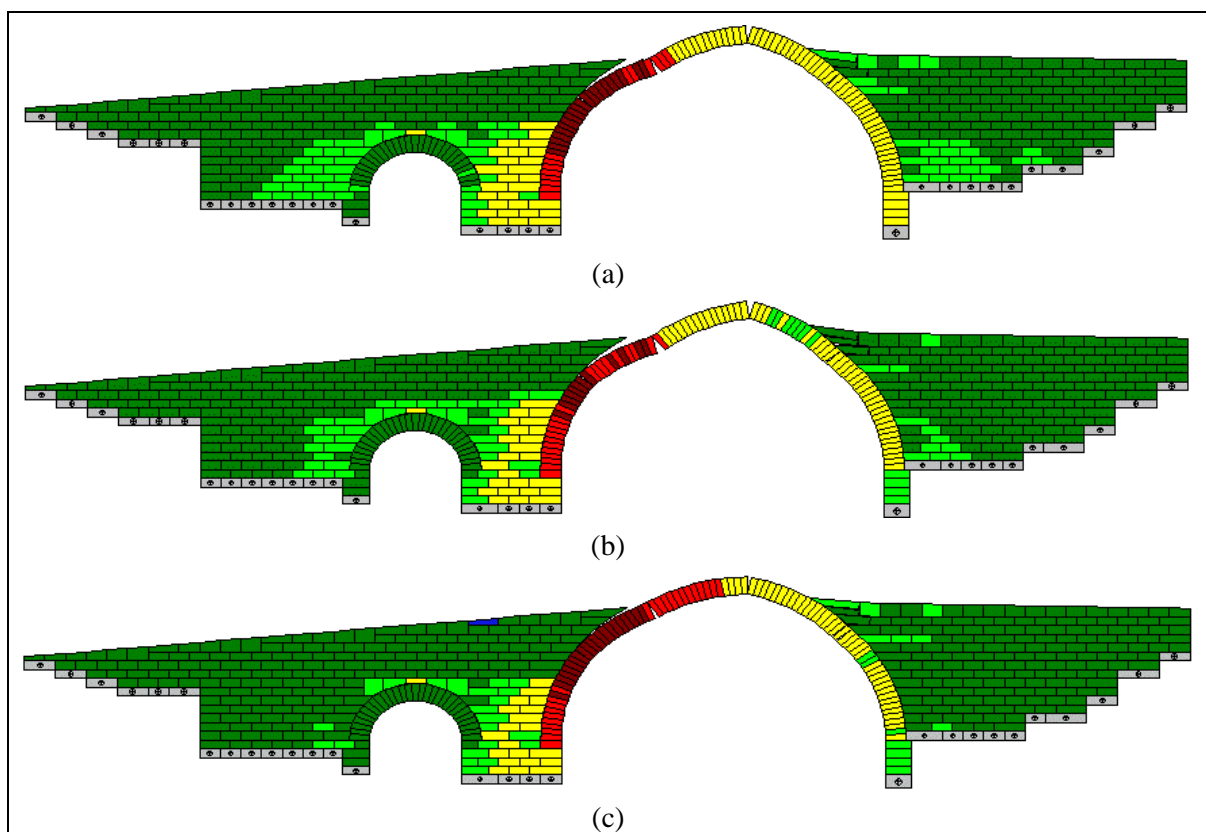


Figura G-6: Mecanismo de colapso – Caso II, Modelo 2: (a) $K_n = 1$; (b) 10 e (c) 100 GPa/m

As Figura G-7 à Figura G-9 são referentes à relação carga deslocamento para os três modelos para o caso I e para o caso II para as três gamas de valores de rigidez normal.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

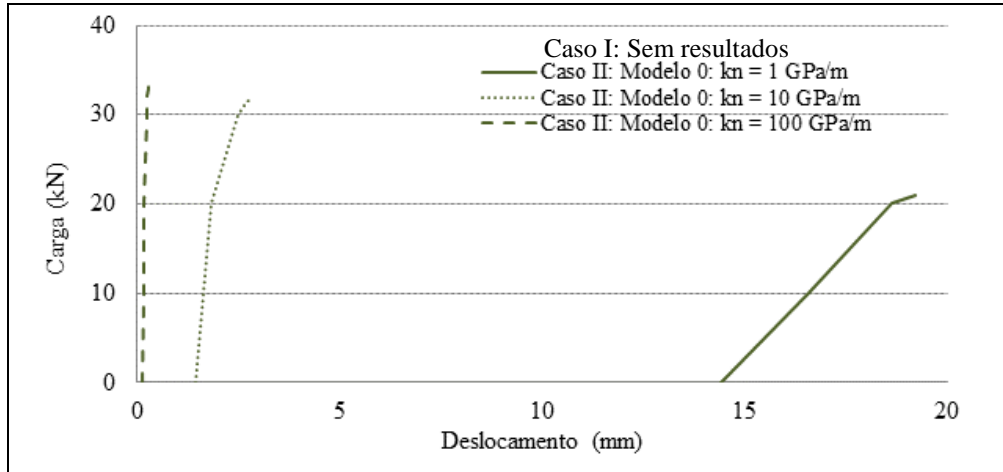


Figura G-7: Relação carga-deslocamento – Caso I e II, Modelo 0

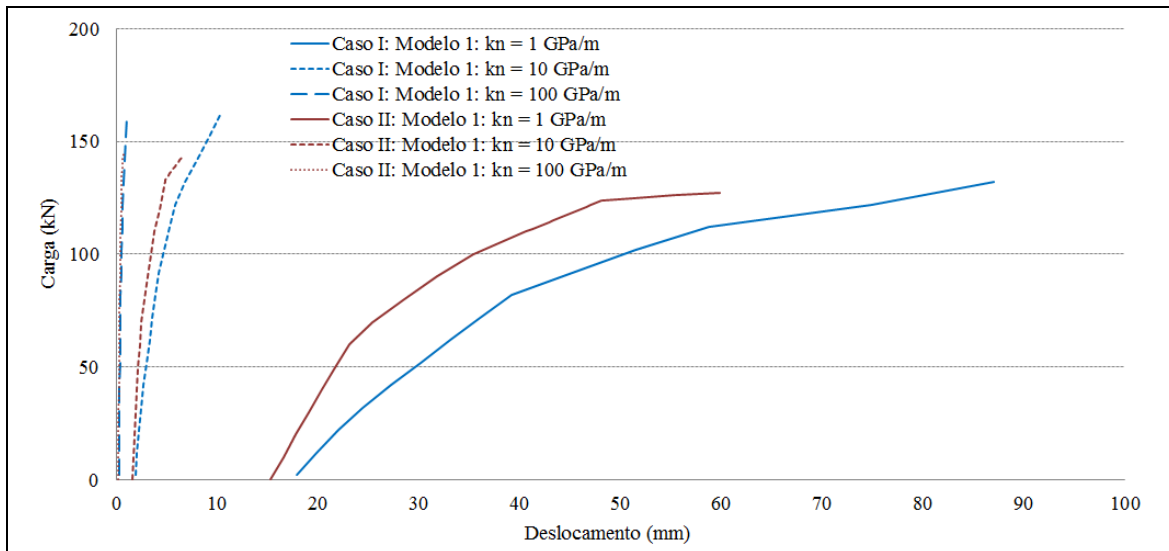


Figura G-8: Relação carga-deslocamento – Caso I e II, Modelo 1

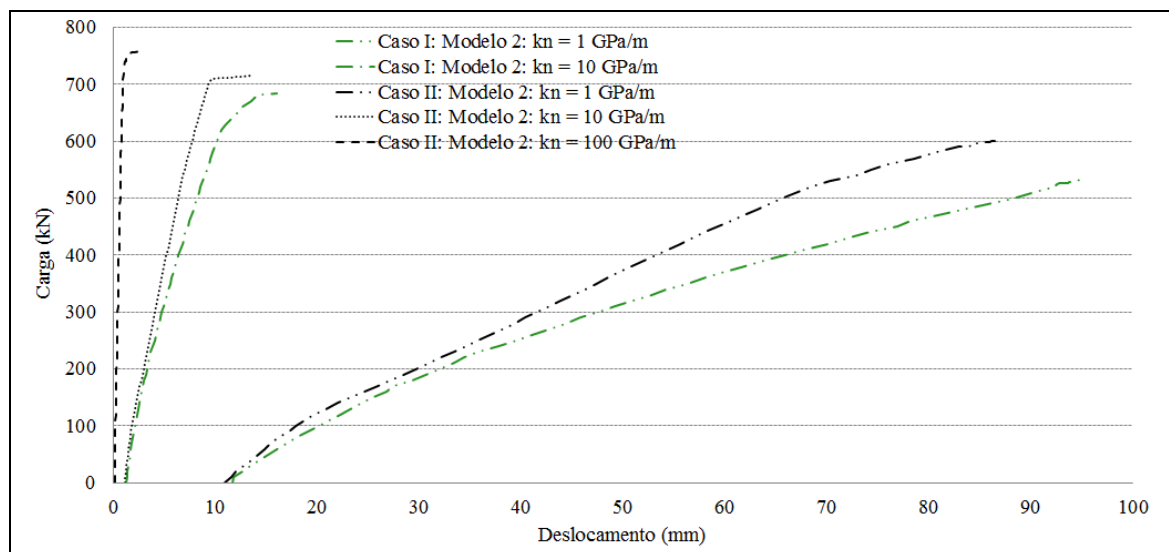


Figura G-9: Relação carga-deslocamento – Caso I e II, Modelo 2

Os Quadro G-1 ao Quadro G-3 englobam informação sobre o valor da capacidade de carga dos três modelos para o caso I e para o caso II para as três gamas de valores de rigidez normal.

Quadro G-1: Valor da capacidade de carga – Caso I e II, Modelo 0

Kn (GPa/m)	Caso I		Caso II	
	Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)
1	0,00	---	21,00	19,22
10	0,00	---	32,00	2,83
100	0,00	---	34,00	0,29

Quadro G-2: Valor da capacidade de carga – Caso I e II, Modelo 1

Kn (GPa/m)	Caso I		Caso II	
	Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)
1	132,00	87,01	127,00	59,82
10	162,00	10,28	143,00	6,40
100	162,00	1,02	144,00	0,64

Quadro G-3: Valor da capacidade de carga – Caso I e II, Modelo 2

Kn (GPa/m)	Caso I		Caso II	
	Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)
1	535,00	95,31	601,00	86,39
10	684,00	16,04	715,00	13,43
100	---	---	760,00	2,53

ANEXO A – Protocolo de colaboração

No presente Anexo encontram-se o Protocolo entre a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu e a Câmara Municipal de Tarouca para a realização do presente trabalho e o “Anexo D” do Regulamento específico do Mestrado em Construção e Reabilitação - 2ª Edição 2010/2012 referente às tarefas a realizar.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO



**Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
Departamento de Engenharia Civil**

Maria José Moraes

PROTOCOLO DE COLABORAÇÃO

Preâmbulo

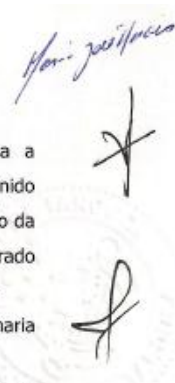
O presente protocolo de colaboração regula as relações entre a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) do Instituto Politécnico de Viseu (IPV), daqui por diante designada por primeiro outorgante e representada pelo seu Presidente, e a empresa/instituição Câmara Municipal de Tarouca, com sede em Av. Dr. Alexandre Taveira Cardoso, 3610-128 Tarouca, representada por MÁRIO CAETANO FERREIRA na qualidade de Presidente, daqui por diante designada por segundo outorgante, tendo em vista operacionalizar a realização da unidade curricular de Dissertação / Projecto / Estágio, daqui em diante designado por Projecto a realizar por MARIA JOSÉ DA CRUZ MORAIS, adiante designada por mestranda, no âmbito do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação, leccionado no Departamento de Engenharia Civil da ESTGV.

O presente protocolo tem por objectivo estabelecer entre os outorgantes o compromisso de promover, desenvolver e realizar formas de cooperação de comum acordo, com vista à realização do Projecto intitulado "Pontes em Arco de Alvenaria - Estudo de um caso prático", subordinando-se às cláusulas seguintes:

Cláusula Primeira

Organização

1. O principal propósito do Projecto é oferecer um contexto de experimentação e desenvolvimento que permita aos alunos do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação pôr em prática os conhecimentos e metodologias adquiridos durante a parte lectiva do curso.

- 
2. O Projecto compreende o desenvolvimento de um trabalho de natureza prática a desenvolver na ESTGV ou num contexto empresarial, na área da Engenharia Civil, definido de acordo com o preceituado no Regulamento dos Cursos de Mestrado e Pós-Graduação da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu e no Regulamento Específico do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação e acordado em comum pelos outorgantes.
 3. O Projecto tem a duração definida no Regulamento Específico do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação.
 4. O Projecto, enquanto Unidade Curricular integrante do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação, tem associado um processo de avaliação. Este processo consistirá numa defesa pública do trabalho realizado perante um júri, formado de acordo com o disposto no Regulamento dos Cursos de Mestrado e Pós-Graduação da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Cláusula Segunda

Funcionamento

1. O segundo outorgante aceita a mestranda MARIA JOSÉ DA CRUZ MORAIS do Departamento de Engenharia Civil da ESTGV, para a realização do Projecto.
2. O Projecto tem como orientador designado pela ESTGV, o docente GILBERTO ANTUNES FERREIRA ROUXINOL, sendo o monitor designado pela instituição do segundo outorgante, PAULO JORGE RIBEIRO PIMENTA, que, conjuntamente, zelarão pela sua boa realização e gestão.
3. O segundo outorgante observará os mecanismos de avaliação e selecção definidos no Regulamento Específico do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação ou outros, desde que acordados entre os outorgantes e definidos em documento próprio.
4. O segundo outorgante deverá assegurar à mestranda o acesso aos recursos materiais e humanos necessários à realização do Projecto.
5. O Projecto decorre no período de 18 de Outubro de 2010 a 5 de Julho de 2011, podendo prolongar-se atendendo ao estipulado no número três da cláusula primeira.
6. No início do Projecto deve ser realizada uma reunião na ESTGV entre o orientador do Departamento de Engenharia Civil, o monitor e a mestranda. Esta reunião visa a definição do plano de trabalhos, incluindo o estabelecimento de um calendário de reuniões destinadas ao respectivo acompanhamento.
7. Qualquer dificuldade ou anomalia que ponha em causa o normal decorrer do Projecto deve ser alvo de comunicação entre orientador, monitor e mestranda e deve resultar em medidas no sentido da sua atempada superação.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Cláusula Terceira

Propriedade intelectual, confidencialidade, divulgação e validação

1. O segundo outorgante ficará com o direito exclusivo da propriedade industrial resultante do(s) produto(s) do Projecto, assim como o direito exclusivo para a sua exploração comercial. No entanto, os direitos de autor associados ao documento final de Projecto pertencem à mestranda e ao primeiro outorgante, nomeadamente permitindo a disponibilização de cópias para efeitos de avaliação e arquivo.
2. O segundo outorgante reconhece a necessidade da divulgação pública de informação relacionada com o Projecto, nomeadamente aquando de apresentações públicas do Projecto, resumos estendidos, póster e material necessário à defesa final do mesmo.
3. O segundo outorgante deverá identificar, de forma explícita e por escrito, as matérias confidenciais do Projecto em desenvolvimento, informando atempadamente à mestranda e o orientador do Departamento de Engenharia Civil. Por omissão, consideram-se públicas e passíveis de discussão pública as matérias não identificadas.
4. Nas situações em que haja necessidade de confidencialidade de informação e, simultaneamente, necessidade de divulgação pública devido aos requisitos académicos, ambas as entidades deverão reger-se pelo princípio da razoabilidade, não comprometendo o sucesso académico dos mestrandos.
5. Ao primeiro outorgante reserva-se o direito de poder escrever e publicar artigos científicos com base no trabalho desenvolvido no Projecto, salvaguardando sempre a informação confidencial do segundo outorgante, os seus produtos, serviços e actividades.
6. A validação dos produtos resultantes da realização do Projecto é da responsabilidade do segundo outorgante.

Cláusula Quarta

Seguro e compensação económica

1. Durante o período de realização do Projecto a mestranda mantém a qualidade de estudante da ESTGV, ficando sujeito aos deveres e regalias inerentes à sua condição, nomeadamente no que se refere ao seguro escolar.
2. O seguro escolar, da responsabilidade do primeiro outorgante, cobre os riscos inerentes ao desenvolvimento da actividade relacionada com a execução do Projecto bem como os riscos inerentes às deslocações da mestranda, nomeadamente no que concerne à condução de viaturas, acompanhamento de colaboradores do segundo outorgante em deslocações e despesas de saúde resultantes de acidentes de viação.
3. Sempre que a mestranda acumula a condição de aluna com a de funcionário da segunda outorgante, prevalece a condição de funcionário, nomeadamente no que concerne ao seguro de acidentes de trabalho e outros deveres ou regalias.

4. O Projecto será realizado sem o pagamento de qualquer compensação económica ao primeiro outorgante e à mestranda por parte do segundo outorgante, sem prejuízo das situações em que a mestranda é simultaneamente funcionária da empresa, sem prejuízo das situações definidas no Regulamento Específico do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação.
5. O segundo outorgante não fica veiculado a futuras colaborações.

As situações não previstas no presente protocolo deverão ser resolvidas por acordo entre as partes.

ESTG Viseu, 3 de Novembro de 2010

Primeiro outorgante



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Fosco', is written over a horizontal line. A large, faint circular stamp is visible in the background behind the signature.

Segundo outorgante



A complex, handwritten signature in black ink is written over a horizontal line. A large, faint circular stamp is visible in the background behind the signature.

A mestranda



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Maria José da Cruz Morais', is written over a horizontal line.

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DE VISEU
INSTITUTO POLITÉCNICO DE VISEU

2.ª Edição do Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação
Registo do Tema de Projecto
Ano Lectivo: 2010 / 2011

Aluno: Maria José da Cruz Morais

N.º:10964

Orientador: Gilberto Rouxinol

TÍTULO

Pontes em Arco de Alvenaria – Estudo de um caso prático

SUMÁRIO

As pontes em arco de alvenaria muito utilizadas no passado para vencer rios e vales são hoje descuradas face às novas tecnologias, nomeadamente, o betão armado, o betão armado pré-esforçado e o aço, que permitem vencer vãos cada vez maiores. Porém, muitas das pontes em arco de alvenaria, por um lado, continuam em pleno serviço e, por outro, adquiriram importância patrimonial. Pretende-se assim com este trabalho estudar as pontes em arco de alvenaria, designadamente, o comportamento estrutural, identificar os danos normalmente presentes neste tipo de estruturas e através de um modelo matemático, o método dos elementos discretos mistos 2D, determinar a causa de alguns dos danos visíveis e respectiva capacidade de carga. Para o estudo é considerada uma ponte em arco de alvenaria: a Ponte Romana de Mondim da Beira existente no Município de Tarouca.

1. Área de especialização

Mecânica Estrutural

2. Objectivos

Pretende-se com este trabalho apresentar um estudo sobre pontes em arco de alvenaria. Para o efeito e de um modo genérico, numa primeira fase é apresentado o comportamento estrutural dos arcos em alvenaria e posteriormente são apresentados os danos normalmente presentes neste tipo de estruturas e são apresentadas fichas tipo para a inspecção visual das pontes. Numa terceira e última fase e para o estudo da Ponte Romana de Mondim da Beira existente no Município de Tarouca, são registados, nas fichas tipo, os danos e através de um programa computacional baseado no método dos elementos discretos mistos 2D são determinadas as causas das anomalias assinaladas e de uma forma qualitativa é avaliada a capacidade de carga da ponte.

3. Programa de trabalhos

O projecto consistirá nas actividades e respectivas tarefas constantes no Quadro I.

Quadro I – Programa de trabalhos

Tarefa	Título	Matérias Tratadas
T1	Comportamento de pontes em arco de alvenaria	Métodos antigos de dimensionamento, relações espessura/vão. Avaliação dos esforços predominantes. Determinação da posição da linha de impulso. Determinação do colapso. Propriedades dos materiais. Escrever as respectivas notas.
T2	Danos tipo	Apresentar os danos normalmente existentes neste tipo de estruturas. Apresentar soluções de correcção. Escrever as respectivas notas.
T3	Fichas tipo	Apresentar as fichas tipo existentes e/ou apresentar fichas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DE VISEU
INSTITUTO POLITÉCNICO DE VISEU

		tipo para a realização de uma rigorosa inspeção visual. Escrever as respectivas notas.
T4	Ponte Romana de Mondim da Beira	Visita da ponte. Inspeção visual - registo dos danos. Contactar o topógrafo da Câmara Municipal de Tarouca para efectuar o levantamento topográfico da ponte.
T5	Geometria da Ponte	Determinação da geometria da ponte. Determinação da malha de elementos discretos.
T6	Estudo do MEDM a 2D	Estudo do método dos elementos discretos misto bidimensional. Escrever as respectivas notas.
T7	Modelação danos	Com base na bibliografia especializada utilizada na Tarefa 1 (para admitir as propriedades dos materiais) e na inspeção visual (Tarefa 4) determinar a origem dos danos através da utilização do MEDM 2D. Escrever as respectivas notas.
T8	Avaliação da capacidade de carga	Determinar a capacidade de carga das pontes em estudo através da utilização do MEDM 2D. Escrever as respectivas notas.
T9	Soluções	Apresentar algumas soluções para a correcção das anomalias verificadas. Escrever as respectivas notas.
T10	Conclusões	Apresentar as conclusões referentes aos principais assuntos tratados neste trabalho.
T11	Auto-Avaliação	Criticar o trabalho apresentado.

4. Calendarização das tarefas

As tarefas acima descritas, incluindo os testes de validação de cada tarefa serão executadas de acordo com a calendarização constante no Quadro II.

Quadro II - Plano de escalonamento dos trabalhos

Tarefa	Meses											
	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN			
T1												
T2												
T3												
T4												
T5												
T6												
T7												
T8												
T9												
T10												
T11												
Metas	INI	M1		M2	M3	MA	M4		M5	M6	M7	M8

Legenda:

INI	Início dos trabalhos a 18 de Outubro de 2010
M1 (7 Semanas)	Tarefas T1 e T2 terminadas; início da Tarefa T10
M2 (2 Semana)	Tarefa T3 terminada, continuação da Tarefa T10
M3 (12 Semanas)	Tarefas T4 e T5 terminadas
M4 (4 Semanas)	Tarefa T6 terminada
M5 (8 Semanas)	Tarefa T7 terminada
M6 (4 Semanas)	Tarefa T8 terminada
M7 (2 Semanas)	Tarefa T9 terminada
M8 (6 Semanas)	Tarefas T10 e T11 terminadas no dia 5 de Julho de 2011

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO




DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DE VISEU
INSTITUTO POLITÉCNICO DE VISEU

MA Apresentação pública referente ao trabalho realizado no 1.º semestre em data oportunamente afixada.

5. Local de trabalho

Todos os trabalhos são realizados nas instalações da ESTGV à excepção óbvia das visitas à Ponte Romana de Mondim da Beira - Município de Tarouca.

ESTG, Viseu, 6 de Outubro de 2010
O Orientador

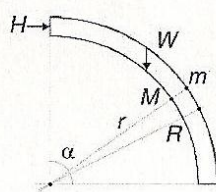
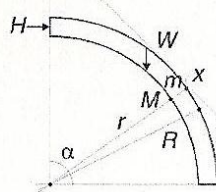
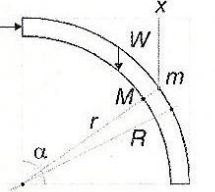
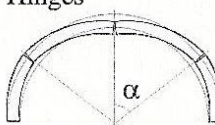
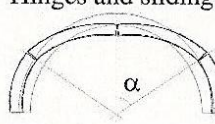
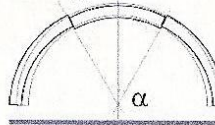


(Prof. Doutor Gilberto Rouxinol)

ANEXO B – Fórmulas empíricas

No presente Anexo, são expostos do Quadro BB-1 ao Quadro BB-3 algumas fórmulas empíricas segundo Corradi e outros autores.

Quadro BB-1: Tipos de colapso. Extraído de (Corradi and Filemio, 2004 cit. por Proske e Gelder 2009)

Types of failure	Without backfill	Declining backfill $\beta=45^\circ$	Horizontal backfill
			
Hinges 	$\mu \geq 0.395$ $K_{crit} = 1.1136$ $\alpha = 54^\circ$	$\mu \geq 0.511$ $K_{crit} = 1.184$ $\alpha = 50^\circ$	$\mu \geq 0.258$ $K_{crit} = 1.044$ $\alpha = 68^\circ$
Hinges and sliding 	$0.309 \leq \mu < 0.395$ $1.2205 \leq K_{crit} < 1.1136$ $29^\circ \leq \alpha < 54^\circ$	$0.406 \leq \mu < 0.511$ $1.264 \leq K_{crit} < 1.184$ $20^\circ \leq \alpha < 50^\circ$	$0.236 \leq \mu < 0.258$ $1.1138 \leq K_{crit} < 1.044$ $44^\circ \leq \alpha < 68^\circ$
Sliding 	$\mu < 0.309$ $K_{crit} = 1.2205$ $\alpha = 29^\circ$	$\mu < 0.406$ $K_{crit} = 1.264$ $\alpha = 20^\circ$	$\mu < 0.236$ $K_{crit} = 1.1138$ $\alpha = 44^\circ$
$R =$ Radius extrados, $r =$ Radius intrados, $\mu =$ Coefficient of friction, $\alpha =$ Angle collapse point, $H =$ Normal force at crown, $W =$ Self weight			
$K_{crit} = \frac{R}{r}$			

PONTES EM ARCO DE ALVENARIA – ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO

Quadro BB-2: Fórmulas empíricas para obtenção da espessura de arcos. Extraído de (Corradi and Filemio, 2004 e Corradi, 1998 cit. por Proske e Gelder 2009)

Dupuit for segmental arches	$e = 0.15 \cdot l^{0.5}$
Dupuit for semi-circular arches	$e = 0.20 \cdot l^{0.5}$
Rankine	$e = 0.191 \cdot R^{0.5}$
Gautier for semi-circular arches	$e = 0.32 + 1/15 \cdot l$
Perronet for semi-circular arches	$e = 0.325 + (1/24 - 1/144) \cdot l$
Lesguillier for semi-circular arches	$e = 0.10 + 0.20$
Dejardin for semi-circular arches	$e = 0.30 + 0.045 \cdot l$
Dejardin for circular arches	$e = 0.30 + 0.025 \cdot l$
Dejardin for elliptical arches	$e = 0.30 + 0.014 \cdot l$
Further equation	$e = 0.2 \cdot l$
German and Russian engineers for segmental arches	$e = 0.43 + 0.1 \cdot \rho$
Perronet	$e = 0.325 + 0.0694 \cdot \rho$
Perronet for semi-circular arches	$e = 0.325 + 0.035 \cdot l$
Lesguillier for segmental arches	$e = 0.10 + 0.20 \cdot l^{0.5}$
L'Eveillé for segmental arches	$e = 0.33 + 0.033 \cdot l$
German and Russian engineers for semi-circular arches	$e = 0.43 + 0.05 \cdot l$
Gauthey for semi-circular arches	$e = 0.33, l < 2 \text{ m}$
Gauthey for semi-circular arches	$e = 0.33 + 0.020833 \cdot l,$ $2 \text{ m} < l < 16 \text{ m}$
Gauthey for semi-circular arches	$e = 0.0416 \cdot l,$ $16 \text{ m} < l < 32 \text{ m}$
Gauthey for semi-circular arches	$e = 1.33 + 0.020833 \cdot (l - 32\text{m}),$ $l > 32 \text{ m}$
E. Roy for semi-circular arches	$e = 0.30 + 0.04 \cdot l$
Michon for semi-circular arches	$e = 0.40 + 0.04 \cdot l$

R – radius of the circle passing through the crown joint and the intrados springing in metre, l – span in metre, e – key stone thickness in metre and ρ as curvature radius,

for segmental arch bridges, $\rho = \frac{l}{2}$,

for full circular arch bridges, $\rho = \frac{l^2}{8 \cdot f} + \frac{f}{2}$

and for elliptical arch bridges, $\rho = \frac{l^2}{4 \cdot f}$

Quadro BB-3: Fórmulas para determinação da largura dos pilares. Extraído de (Corradi, 1998 cit. por Proske e Gelder 2009)

Author	Equation
Semicircular arch Lesguillier	$S_s = (0.60 + 0.04 \cdot h) \cdot \sqrt{l}$
L'Éveillé	$S_s = (0.60 + 0.162 \cdot l) \cdot \sqrt{\frac{0.865 \cdot l \cdot (h + 0.25 \cdot l)}{H \cdot (0.25 \cdot l + e)}}$
German and Russian engineers	$S_s = 0.305 + \frac{5}{24} \cdot l + \frac{h}{6} + \frac{h_1}{12}$
Segmental arch bridges Lesguillier	$S_s = \left[0.60 + 1.10 \cdot \left(\frac{l}{f} - 2 \right) + 0.04 \cdot h \right] \cdot \sqrt{l}$
L'Éveillé	$S_s = (0.33 + 0.212 \cdot l) \cdot \sqrt{\frac{l \cdot h}{H \cdot (f + e)}}$
German engineers	$S_s = 0.305 + 0.125 \cdot l \cdot \left(\frac{3 \cdot l - f}{l + f} \right) + \frac{2 \cdot h + h_1}{12}$
Italian engineers	$S_s = 0.05 \cdot h + 0.20 \cdot l + \left(\frac{10 + 0.5 \cdot l}{100} \right) \cdot \left(\frac{l}{f} \right)$
Semi-elliptical arches Lesguillier	$S_s = \left[0.60 + 0.05 \cdot \left(\frac{l}{f} - 2 \right) + 0.04 \cdot h \right] \cdot \sqrt{l}$
L'Éveillé	$S_s = (0.43 + 0.154 \cdot l) \cdot \sqrt{\left(\frac{h + 0.54 \cdot f}{H} \right) \cdot \left(\frac{0.84 \cdot l}{0.65 \cdot f + e} \right)}$
German engineers	$S_s = 0.05 \cdot h + 0.20 \cdot l + \left(\frac{10 + 0.5 \cdot l}{100} \right) \cdot \left(\frac{l}{f} \right)$
Manuale del'Ingenere	$S_s = \sqrt{l} \cdot \left(0.42 + \frac{0.17 \cdot l}{2 \cdot f} + 0.44 \cdot h \right)$ bei $h_1 < 1.50$ m $S_s = \sqrt{l} \cdot \left(0.42 + \frac{0.17 \cdot l}{2 \cdot f} + 0.44 \cdot h \right) + 0.0185 \cdot H \cdot \sqrt{h_1}$ bei $h_1 \geq 1.50$ m und mit $H = h + f + e$
Author	Equation
Hütte	$S_s = \frac{l}{8} \cdot \left(\frac{3 \cdot l - f}{f + l} \right) + 1.00 + \frac{h}{6}$ and for semi-circular arches $S_s = \frac{5}{24} \cdot l + 1.00 + \frac{h}{6}$
Croizette-Desnoyers	$S_s = 0.33 + 0.212 \cdot l \cdot \left(\frac{l \cdot h}{H \cdot (f + e)} \right)$
Italian railway engineers	$S_s = 0.20 + 0.030 \cdot (\rho + 2 \cdot e) + 0.10 \cdot h$

ANEXO C – Informação sobre a ponte românica Mondim da Beira

No presente Anexo são apresentadas na Figura CC-1, as imagens complementares ao capítulo 5 fornecidas pelo SIPA (IHRU) e disponibilizadas no endereço de internet da entidade.

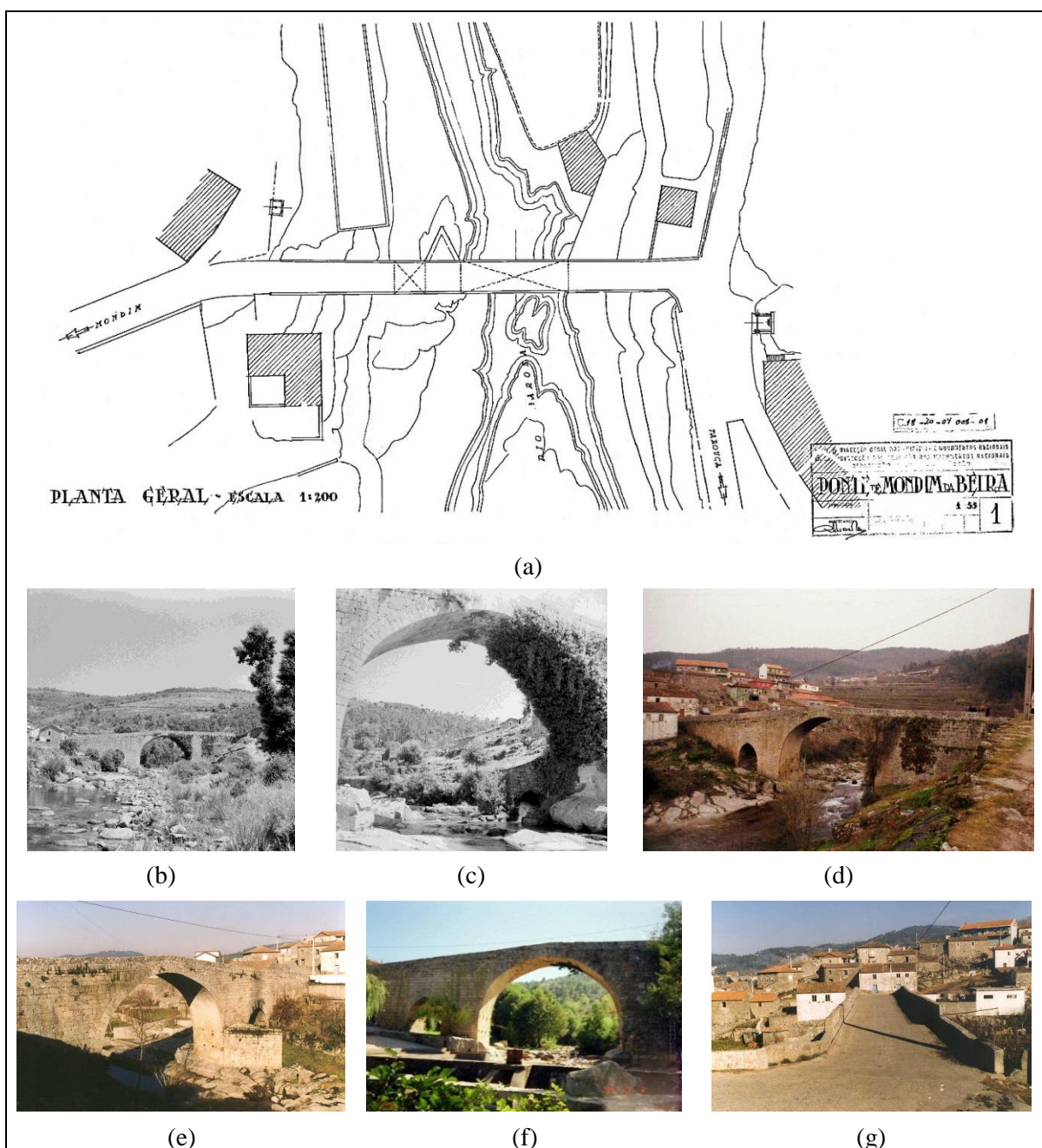


Figura CC-1: (a) Planta geral da Ponte Românica de Mondim da Beira. Alçado montante: (b) e (e). Alçado jusante: (c), (d) e (f). (g) Acesso SO à ponte. Extraídas de (Portugal, SIPA)