



**Avaliação da Segurança e Reabilitação de
uma Ponte de Alvenaria de Pedra
O Caso da Ponte Hintze Ribeiro**

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Karina Felix do Nascimento

Leiria, setembro de 2022



**Avaliação da Segurança e Reabilitação de
uma Ponte de Alvenaria de Pedra
O Caso da Ponte Hintze Ribeiro**

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Karina Felix do Nascimento

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Paulo Alexandre Lopes Fernandes, Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Romain Ribeiro de Sousa, Investigador Auxiliar do Instituto Politécnico de Leiria

Leiria, setembro de 2022

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizada, a saber, Curso de Mestrado em Construções Civas, no ano letivo 2021/2022, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

Em memória do meu querido avô Oswaldo do Nascimento.

Agradecimentos

No final deste trabalho desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de algum modo contribuíram para a realização e concretização dele e em especial:

Ao orientador Professor Paulo Alexandre Lopes Fernandes, pela sua orientação, dedicação, e disponibilidade prestada.

Ao coorientador Doutor Romain Ribeiro de Sousa, pelas oportunas sugestões e pela análise crítica e cuidadosa deste trabalho.

Às colegas de mestrado Isadora, Alana e Verônica pela companhia, amizade e pelas trocas de conhecimentos ao longo do curso.

Aos meus pais, aos meus irmãos e amigos, pelo constante apoio e encorajamento para a realização do mestrado.

Por fim, quero expressar o meu profundo agradecimento ao meu companheiro de jornada, Humberto Dias, por todo o amor, paciência, incentivo e dedicação, durante todos os momentos da realização do mestrado e particularmente deste trabalho.

“Eles me ensinaram que o caminho do progresso não era rápido nem fácil.”
(Marie Curie)

RESUMO

De acordo com o *Guidance on the assessment of masonry arch bridges* (2022), estima-se que existam atualmente em serviço em torno do mundo, cerca de um milhão de vãos de pontes de alvenaria em arco, muitas delas com mais de 100 anos e sujeitas a cargas muito diferentes daquelas para que foram concebidas.

O presente trabalho desenvolve-se em torno de uma dessas pontes, uma ponte de alvenaria de pedra sobre o Rio Lis no centro da cidade de Leiria, identificada como Ponte Hintze Ribeiro, que exhibe algumas patologias que foram reportadas por cidadãos comuns à Câmara Municipal de Leiria.

Foi sobre esta obra-de-arte, num contexto de desconhecimento dos serviços públicos da forma de avaliar e intervir sobre este tipo de construção, que se organizou o presente trabalho, visando estudar as soluções que permitam preservar o valor patrimonial e histórico desta obra-de-arte e prolongar a sua vida útil.

O trabalho compila a partir de uma pesquisa bibliográfica informação sobre o funcionamento e constituição das pontes em arco de alvenaria de pedra, faz um levantamento do objeto de estudo (Ponte Hintze Ribeiro) nas suas características, materiais e patologias a partir de uma inspeção e por fim são apresentadas propostas de intervenção suportadas na avaliação efetuada.

Palavras-chave: “Pontes em arco de alvenaria de pedra”, “Inspeção de pontes”, “Reabilitação”, “Avaliação de segurança”

ABSTRACT

According to the *Guidance on the assessment of masonry arch bridges (2022)*, it is estimated that there are currently in service around the world about a thousand spans of masonry arch bridges, many of them over 100 years old and subjected to loads of different from those for which they were designed.

The present work is developed around one of these bridges, a stone masonry bridge over the river Lis in the center of the city of Leiria, identified as Bridge Hintze Ribeiro, which exhibits some pathologies that were reported by citizens to the Municipality of Leiria.

It was on this bridge, and in the context of lack of knowledge of public services concerning this type of construction, that the present work was organized to study solutions aim to preserve the patrimonial and historical value of this bridge and expand its lifetime.

Based on bibliographic research, this work compiles information about the structure and behavior of stone masonry arch bridges, then a survey is carried out to assess the main characteristics, materials, and pathologies of the bridge Hintze Ribeiro, and finally presents rehabilitation alternatives supported by the assessment made.

Keywords: “Stone masonry arch bridges”, “Bridge assessment”, “Rehabilitation”
“Safety assessment”

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	2
1.1.	Enquadramento.....	2
1.2.	Motivação e Objetivos	3
1.3.	Estrutura da dissertação	4
2.	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	5
2.1.	Introdução.....	5
2.2.	Evolução do arco de pedra como solução estrutural.....	9
3.	CONSTITUIÇÃO DE UMA PONTE EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA	13
3.1.	Introdução.....	13
3.2.	Elementos estruturais e não estruturais de uma ponte em arco de alvenaria de pedra 14	
3.2.1.	Fundações	14
3.2.2.	Pilares e encontros.....	15
3.2.3.	Arcos.....	16
3.2.4.	Muro de tímpano	19
3.2.5.	Talhantes e talha mares	20
3.2.6.	Enchimento	21
3.2.7.	Guarda- corpos e pavimento.....	23
3.2.8.	Orgãos de drenagem	23
3.3.	Materiais	24
3.3.1.	Alvenaria - Pedras naturais	25
3.3.2.	Material de Enchimento.....	28
3.4.	Comportamento estrutural - Mecanismos de transmissão de esforços.....	29
4.	ANOMALIAS, INSPEÇÃO E REABILITAÇÃO DE PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA 32	
4.1.	Introdução.....	32
4.2.	Danos e anomalias comuns em pontes em arco de alvenaria de pedra	33
4.2.1.	Considerações gerais.....	33
4.2.2.	Danos e anomalias estruturais	35
4.2.3.	Danos e anomalias nos materiais.....	41
4.3.	Inspeções.....	50
4.3.1.	Considerações gerais.....	50
4.3.2.	Tipos de inspeção e periodicidade	52
4.4.	Intervenção em Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra	53

4.4.1.	Considerações gerais.....	53
4.4.2.	Trabalhos de prevenção e manutenção.....	54
4.4.3.	Técnicas de Reabilitação mais frequentes	55
5.	ESTUDO DE CASO: A PONTE HINTZE RIBEIRO	59
5.1.	Introdução.....	59
5.2.	Localização da Ponte	60
5.3.	Descrição da Ponte Hintze Ribeiro	61
5.4.	Inspeção visual da Ponte Hintze Ribeiro	67
5.4.1.	Ficha de inspeção	67
5.4.2.	Inspeção Visual.....	68
5.4.3.	Considerações finais.....	82
6.	PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO NA PONTE HINTZE RIBEIRO	84
6.1.	Considerações iniciais	84
6.2.	Propostas de trabalhos de manutenção	84
6.3.	Propostas de reabilitação.....	85
6.3.1.	Proposta 1: Perfis metálicos.....	86
6.3.2.	Proposta 2: Cantoneiras metálicas.....	94
6.4.	Considerações finais.....	96
7.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	98
7.1.	Considerações finais.....	98
7.2.	Desenvolvimentos Futuros.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	ANEXOS	104
	ANEXO A – Ficha de caracterização – Ponte Hintze Ribeiro	104
	ANEXO B – Ficha de inspeção - Ponte Hintze Ribeiro realizada por Ostetto, (2019).....	105
	ANEXO C - Tabelas dos níveis de danos de cada patologia	106
	ANEXO D – Cálculo de momento fletor para pré-dimensionamento da viga.....	111
	ANEXO E – Cálculo de momento fletor para dimensionamento da viga	112
	ANEXO F – Informações utilizadas na simulação dos elementos metálicos	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ponte dos Anjos - Roma – Itália (Wikipedia)	5
Figura 2: Ponte Pietra - Verona – Itália (Wikipedia)	6
Figura 3: Ponte Vecchio – Florença – Itália (Wikipedia)	6
Figura 4: Ponte Carlos - Praga - República Checa (Wikipedia).....	7
Figura 5: Ponte Göltzschthalbrücke – Alemanha (Wikipedia).....	7
Figura 6: Ponte Firth of Forth – Escócia (http://desciclo.pedia.ws/wiki/Ponte_do_Forth#/media/Arquivo:Forth_Bridge.jpg).....	8
Figura 7: Ponte Sandö – Suécia (https://en.advisor.travel/poi/Sando-Bridge-9017)	9
Figura 8: subdivisão de vigas de pedra em elementos únicos (Proske e Gelder, 2009)	9
Figura 9: Tarr Steps, Somerset, Inglaterra (Kühn, 2004 apud Vilarinho 2020)	10
Figura 10: Ponte "Celta" de Castro Laboreiro (Vilarinho, 2020)	10
Figura 11: Pontes de pedra como protagonistas nas notas de Euro (Léon y Goicolea, 2016)	11
Figura 12: Desenvolvimento de formas de pontes maciças ao longo do tempo (Proske e Gelder, 2009).....	12
Figura 13: Representação esquemática dos componentes das pontes em arco de alvenaria de pedra (Álamo, 2001 apud Vilarinho, 2020).....	13
Figura 14: Pormenor de fundação indireta com estacas de madeira (Junior, 2016 apud Vilarinho, 2020).....	15
Figura 15: Esquema estático de pontes em arco (Leonhardt, 1979)	17
Figura 16: Geometrias das pontes em arco de alvenaria (Costa, 2009).....	17
Figura 17: Ponte de Mirandela, Portugal (Wikipedia)	18
Figura 18: Cimbramento da ponte de Vila Fria. (P. Costa, 2007)	18
Figura 19: Início da construção do muro tímpano de montante entre os arcos 1 e 2 (P. Costa, 2007)	19
Figura 20: Talhante e talha-mar (Vilarinho, 2020)	20
Figura 21: Formas dos pilares da ponte do Prado (Ferreira e Serra, 2007, apud Costa, 2009).	21
Figura 22: Enchimento entre muros ponte de Vila Fria (P. Costa, 2007).....	22
Figura 23: Configuração da degradação das forças em função da altura do material de enchimento (Costa, 2009).....	22
Figura 24: Bolbo de pressões de Boussinesq (Narasimha & Venkatramaiah, 2000, apud Vilarinho, 2020).....	23

Figura 25: Tipos de aparelhamento: (a) Irregular com junta preenchida; (b) Irregular com junta	24
Figura 26: Esquema de funcionamento da ponte na direção longitudinal (Álamo, 2001, apud Costa, 2009)	29
Figura 27: Esquema de funcionamento da ponte na direção transversal (Álamo, 2001, apud Costa, 2009)	30
Figura 28: Danos mais frequentes encontrados em pontes em arco (Angeles-Yáñez, 1996 apud Proske e Gelder, 2009)	33
Figura 29: Fendilhação longitudinal e transversal no arco (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)	37
Figura 30: Perda de material (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)	37
Figura 31: Anomalias nos Pilares (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)	38
Figura 32: Tipos de anomalias nos muros de tímpano (Page, 1993 apud, Costa, 2009)	39
Figura 33: Anomalias nos muros de Tímpano (Lopes, 2012)	39
Figura 34: Anomalias nas fundações (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)	40
Figura 35: Anomalias decorrestes de problemas nas fundações (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)	40
Figura 36: Mecanismo de rotura por perda de capacidade das fundações na ponte Vignole (Brencich,	41
Figura 37: Exemplos de vegetação de pequeno e médio porte (Costa, 2009)	44
Figura 38: Exemplos de eflorações (Catalán e Álamo 2006 apud Lopes, 2012) ...	44
Figura 39: Exemplos de manchas de humidade, escorrências e depósitos de água (Costa, 2009)	45
Figura 40: Exemplos de Crostas negras e filmes negros (Catalán e Álamo 2006 apud Lopes, 2012)	46
Figura 41: Exemplo de erosão, dissolução e desagregação da alvenaria de pedra (Lopes, 2012)	47
Figura 42: Exemplo de Alveolização (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)	48
Figura 43: Exemplo de perda de argamassa nas juntas (Costa, 2002)	48
Figura 44: Exemplos de danos resultantes da ação humana (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)	49
Figura 45: Processo de gerenciamento de manutenção de rotina para uma ponte (adaptado de CIRIA, 2022)	51
Figura 46: Ponte Hintze Ribeiro	59
Figura 47: Localização em planta - Ponte Hintze Ribeiro (Google Earth, 2022)	60
Figura 48: Localização à jusante - Ponte Hintze Ribeiro (Google Earth, 2022)	61

Figura 49: Localização à montante - Ponte Hintze Ribeiro (Google Earth, 2022).....	61
Figura 50: Pilar e Fundação – Ponte Hintze Ribeiro	62
Figura 51: Muro de tímpano - Ponte Hintze Ribeiro	63
Figura 52: Pavimento, passeio e guarda-corpos - Ponte Hintze Ribeiro.....	64
Figura 53: Passagem inferior pedonal – Ponte Hintze Ribeiro (Autor, 2022).....	65
Figura 54: Arco e Aduela - Ponte Hintze Ribeiro (Autor, 2022)	66
Figura 55: Alçado da Ponte Hintze Ribeiro	66
Figura 56: Planta - Ponte Hintze Ribeiro	67
Figura 57: Danos no pavimento betuminoso observados em inspeção anterior – Ponte Hintze Ribeiro – (Ostetto, 2019).....	69
Figura 58: Pavimento betuminoso reparado – Ponte Hintze Ribeiro	69
Figura 59: Danos no passeio – Desgaste das pedras - Ponte Hintze Ribeiro	70
Figura 60: Vista da viga longitudinal e consolas curtas - Ponte Hintze Ribeiro	71
Figura 61: Danos no tabuleiro- Armaduras expostas na viga longitudinal e consolas curtas - Ponte Hintze Ribeiro	72
Figura 62: Danos no muro de Tímpano – a) e b) ausência de alvenaria de revestimento, c) manchas negras, d) vegetação - Ponte Hintze Ribeiro	73
Figura 63: Danos no sistema de drenagem – Grelhas obstruídas - Ponte Hintze Ribeiro	73
Figura 64: Danos no intradorso – a), b) e d) presença de agentes biológicos e eflorescência c) ausência de argamassa nas juntas de vedação - Ponte Hintze Ribeiro	75
Figura 65: Danos nas Aduelas - Fissuras e manchas negras - Ponte Hintze Ribeiro ..	76
Figura 66: Danos nos pilares - Ponte Hintze Ribeiro.....	77
Figura 67: Fundações - Ponte Hintze Ribeiro – (Autor, 2022)	79
Figura 68: Danos nos Guarda-corpos - Fissuras e degradações nas pedras - Ponte Hintze Ribeiro	80
Figura 69: Guarda-corpos reparados – a) e b) substituição por muro de blocos de betão com reboco de argamassa, c) reparo pontual com argamassa, d) substituição por pedra do mesmo tipo das originais - Ponte Hintze Ribeiro.....	81
Figura 70: Representação esquemática da proposta nº1 – Vigas metálicas	86
Figura 71: Corte transversal - Elementos de pedra salientes do plano vertical do muro de tímpano.....	86
Figura 72: Representação esquemática para cálculo da reação no apoio	88
Figura 73: Representação esquemática para cálculo do momento da viga transversal	91
Figura 74: Resultado da distribuição de tensões nas vigas.....	93
Figura 75: Resultado da distribuição de tensões na viga transversal	93

Figura 76: Resultado dos deslocamentos ao longo da viga	94
Figura 77: Representação esquemática da proposta nº 2 – Cantoneiras.....	95
Figura 78: Representação esquemática da cantoneira na transversal	95
Figura 79: Resultado da distribuição de tensões nas cantoneiras.....	96
Figura 80: Ficha de caracterização de pontes e Viadutos (Ostetto, 2019)	104
Figura 81: Fichas de inspeção – Ponte Hintze Ribeiro - realizada por Ostetto (2019)	105
Figura 82: Ficha de inspeção – Ponte Hintze Ribeiro - Realizada por Ostetto, (2019)	105
Figura 83: Classificação final - Ponte Hintze (Ostetto, 2019)	105
Figura 84: Tabela dos níveis de danos no pavimento (Ostetto, 2019).....	106
Figura 85: Tabela dos níveis de danos - Tabuleiro (Ostetto, 2019).....	107
Figura 86: Tabela dos níveis de danos - Superestrutura (Ostetto, 2019)	108
Figura 87: Tabela dos níveis de danos - Mesoestrutura (Ostetto, 2019)	109
Figura 88: Tabela dos níveis de danos - Infraestrutura (Ostetto, 2019).....	110
Figura 89: Tabela dos níveis de danos - Segurança (Ostetto, 2019).....	110
Figura 90: Cálculo de momento fletor para pré-dimensionamento da viga realizado em https://clearcalcs.com/freetools/beam-analysis/au	111
Figura 91: Cálculo de momento fletor para dimensionamento da viga realizado em https://clearcalcs.com/freetools/beam-analysis/au	112
Figura 92: Propriedades dos materiais utilizados na simulação dos elementos metálicos no software Solidworks	113
Figura 93: Informações da malha utilizada na simulação	113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades das pedras naturais (Leonhardt,1979).....	27
Tabela 2: Tipos de danos em pontes em arco de organizações ferroviárias e seus....	34
Tabela 3: Tipos de anomalias estruturais localizadas nos componentes das pontes (Lopes,2012)	35
Tabela 4: Causas dos processos de degradação estrutural (Lopes, 2012)	36
Tabela 5:Classificação das ações (Lopes, 2012)	36
Tabela 6: Anomalias frequentes do material (Lopes, 2012)	42
Tabela 7: Processos de deterioração e degradação do material (Lopes, 2012).....	42
Tabela 8: Classificação das ações (Lopes, 2012)	43
Tabela 9: Técnicas de manutenção, podendo ser (i) corrente; (ii) preventiva e (iii) especializada (Morais, 2012) *PAAP: Ponte em arco de alvenaria de Pedra	55
Tabela 10: Principais tipos de intervenções em pontes em arco de alvenaria. (UIC, 2003, apud Costa, 2009)	57
Tabela 11: Ficha de inspeção - Pavimento	70
Tabela 12: Ficha de inspeção – Tabuleiro e Muro de tímpano.....	74
Tabela 13: Ficha de inspeção – Superestrutura.....	76
Tabela 14: Ficha de Inspeção - Mesoestrutura	78
Tabela 15: Ficha de Inspeção - Infraestrutura.....	79
Tabela 16: Ficha de Inspeção - Segurança.....	81
Tabela 17: Classificação final – Ponte Hintze Ribeiro	82
Tabela 18: Classificação final apresentada na inspeção realizada por Ostetto (2019)	82
Tabela 19: Informações da viga selecionada (adaptado do catálogo ArcelorMittal)	90

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

De acordo com CIRIA (2022), estima-se que existam cerca de um milhão de vãos de pontes em arco de alvenaria atualmente em serviço em torno do mundo. A grande maioria tem mais de 100 anos e suporta cargas impostas muito diferentes daquelas previstas por seus construtores, o que comprova sua resiliência e adaptabilidade.

Não há dúvidas de que a pedra natural que constitui as pontes de alvenaria têm demonstrado superior qualidade na resistência ao passar do tempo, integrando-se harmoniosamente na natureza, pelo que é inquestionável a importância que representam para o património arquitetónico e cultural. No entanto, esses tipos de pontes apresentam anomalias próprias para as quais é imprescindível ter a devida atenção.

Com o passar dos anos os materiais constituintes das pontes em arco de alvenaria de pedra começam a sofrer degradação. Sendo que a degradação natural vinculada a ausência de um plano de manutenção e a um aumento das cargas para o qual foram previstas inicialmente, poderá intensificar a degradação e conseqüentemente conduzir a deformações estruturais e por vezes ao seu colapso.

A avaliação do estado de conservação das pontes são temas atuais que nos últimos anos têm despertado particular atenção por parte das entidades gestoras. Neste sentido, a implementação de adequado sistema de gestão das obras de arte existentes, permite otimizar a eficiência das redes rodoviárias e ferroviárias, fundamentais para a segurança e bem-estar dos utilizadores e atender a questões de economia e sustentabilidade.

A gestão do estado de conservação das obras de arte inclui a realização de inspeções periódicas de modo a identificar os danos existentes, e assim, desenvolver um plano de manutenção adequado de forma a aplicar procedimentos que garantam a durabilidade e segurança desse tipo de estrutura e a sua capacidade para desempenhar as funções para as quais foram construídas.

1.2. Motivação e Objetivos

A presente dissertação surge com o propósito de avaliar as condições de segurança de uma ponte de alvenaria de pedra sobre o Rio Lis no centro da cidade de Leiria, conhecida como Ponte Hintze Ribeiro, que exhibe algumas patologias que preocupam alguns utilizadores e a Câmara Municipal de Leira, o que justificou o pedido de intervenção do Politécnico de Leiria para estudar soluções que permitam preservar o valor patrimonial e histórico desta obra-de-arte e prolongar a sua vida útil.

Para o concretizar foi organizado um plano de trabalhos os seguintes pontos:

- Compilar a partir de uma pesquisa bibliográfica um conjunto de informação que permita a compreensão das pontes em arco de alvenaria de pedra;
- Identificar e compreender os elementos constituintes de uma ponte em arco de alvenaria de pedra, bem como seu comportamento estrutural;
- Identificar e compreender as principais patologias que afetam as pontes em arco de alvenaria de pedra, bem como as estratégias de reabilitação e reforço mais adequadas;
- Avaliar a Ponte Hintze Ribeiro através de uma inspeção, nomeadamente quanto a: topologia das dimensões da ponte, caracterização dos materiais, componentes da estrutura, identificação das patologias existentes e avaliação da sua segurança;
- Elaborar uma proposta de intervenção (reabilitação) que permita a sua preservação e prolongar a sua vida útil.

1.3. Estrutura da dissertação

O trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos de acordo com os objetivos supracitados.

No Capítulo 1 são apresentadas as considerações iniciais bem como o seu enquadramento. Também são expostos os objetivos e a motivação da dissertação e a organização escrita do documento.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica onde procura-se reunir informação sobre as características das pontes desde os primórdios da civilização até os dias atuais. Ao longo deste capítulo é dado especial enfoque ao arco como solução estrutural e é analisada a sua evolução ao longo do tempo.

No Capítulo 3 são apresentados os componentes estruturais e não estruturais que integram uma ponte em arco de alvenaria de pedra bem como os materiais que compõe a estrutura. São ainda explanados os mecanismos de transmissão de cargas de uma ponte de alvenaria de pedra.

No Capítulo 4 é explanado sobre as patologias comuns, inspeção e reabilitação de pontes em arco de alvenaria de pedra, bem como os métodos utilizados.

No Capítulo 5 é apresentado o estudo de caso sobre a Ponte Hintze Ribeiro, com as características da ponte quanto aos seus elementos construtivos, geometria, tipologias de materiais, inspeção visual e patologias existentes.

No Capítulo 6 é apresentada uma proposta de intervenção para a reabilitação da Ponte Hintze Ribeiro.

No Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões sobre o estudo realizado, e propostas de desenvolvimentos futuros sobre esta temática.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

2.1. Introdução

Desde a antiguidade encontram-se entre os povos primitivos, pontes de madeira ou de cordas, na forma de vigas, vigas escoradas e vigas armadas simples. Os povos civilizados desde cedo construíam pontes com arte; assim, os chineses venciam vãos de até mais de 18 metros com vigas de granito; os carpinteiros alemães e suíços no século XVIII atingiram um elevado grau de perfeição na construção de pontes de madeira. Os chineses e os romanos construíam abóbadas de pedra, já antes de Cristo. Entre os romanos, a arte da forma (arcos semicirculares de até 30 m de vão) e do trabalho em pedra teve um grande desenvolvimento, temos como exemplos na Figura 1: Ponte dos Anjos - Roma – Itália e na Figura 2: Ponte Pietra - Verona – Itália (Leonhardt,1979).



Figura 1: Ponte dos Anjos - Roma – Itália (Wikipedia)



Figura 2: Ponte Pietra - Verona – Itália (Wikipedia)

Também os turcos construíram desde cedo, pontes de pedra de grandes vãos, embora, em sua maioria, na forma de arco gótico aliviado. Na idade média, as abóbodas começaram a ser abatidas, atingindo vãos de até 50 metros, materializadas em pontes como a Ponte Vecchio em Florença (Figura 3) e a Ponte Carlos em Praga (ver Figura 4).

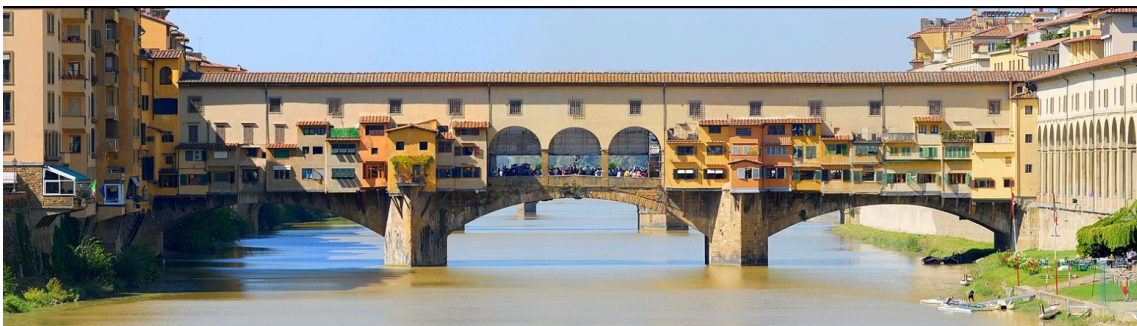


Figura 3: Ponte Vecchio – Florença – Itália (Wikipedia)



Figura 4: Ponte Carlos - Praga - República Checa (Wikipedia)

Com o surgimento das ferrovias, tornaram-se necessárias grandes pontes para suportar cargas pesadas. Impressionantes pontes de pedra venciam vales inteiros como, por exemplo, a ponte Göltzschtalbrücke com 578 m de comprimento e 78 de altura (ver Figura 5).



Figura 5: Ponte Göltzschtalbrücke – Alemanha (Wikipedia)

Como novos materiais de construção surgiram o ferro forjado e o aço. As pontes de ferro fundido em forma de arco, surgiram no fim do século XVIII. Já em 1950, os chineses haviam construído a primeira ponte pênsil com elos. Logo depois, surgiram grandes pontes em treliças metálicas como, em 1850, a ponte sobre o Vístula em Dirschau, com 6 vãos de 124 m cada um. Começaram a surgir as pontes pênséis e as pontes em treliça. Vãos enormes foram vencidos por meio de gigantescas pontes em balanço, como a ponte ferroviária sobre o Firth of Forth, na Escócia, com vãos de 512 m (1883) (ver Figura 6).



Figura 6: Ponte Firth of Forth – Escócia
(http://desciclo.pedia.ws/wiki/Ponte_do_Forth#/media/Arquivo:Forth_Bridge.jpg)

De acordo com Leonhardt (1979), a partir de 1900 começaram a surgir as primeiras pontes com um novo material de construção: o Betão. Executaram-se, de início, arcos triarticulados, nos quais o Betão apenas substituíu a pedra como material de construção. O Betão armado, naquela época denominado “Betão de ferro”, foi inicialmente utilizado para lajes de tabuleiros, logo depois para nervaduras de arcos, etc. Somente em 1912, é que se começou a adotar pontes em viga e pontes em pórtico, mas, no entanto, apenas para vãos de até 30 m. Simultaneamente, as pontes em arco de Betão armado atingiam dimensões cada vez maiores. Em 1941 – 1945 foi construída, na Suécia, a ponte Sandö com 280 m de vão livre (ver Figura 7).



Figura 7: Ponte Sandö – Suécia (<https://en.advisor.travel/poi/Sando-Bridge-9017>)

2.2. Evolução do arco de pedra como solução estrutural

Existem muitas teorias diferentes sobre como esse tipo de estrutura foi inventado. No entanto, a prova final dessas teorias é praticamente impossível. Uma das teorias consideram o refinamento dos elementos de pedra de suporte ou a subdivisão de vigas de pedra em elementos únicos, conforme mostrado na Figura 8 (Proske e Gelder, 2009).

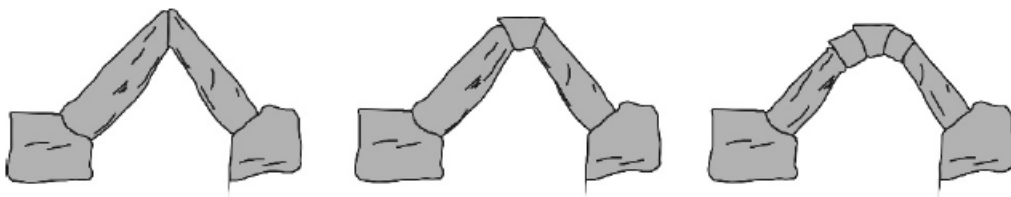


Figura 8: subdivisão de vigas de pedra em elementos únicos (Proske e Gelder, 2009)

Há evidências de estruturas semelhantes a pontes erguidas no período pré-histórico, com o fim de vencer pequenos curso de água. Devido a efemeridade das construções e ao facto de pertencerem a um período histórico longínquo, poucos foram os exemplares que sobreviveram à passagem do tempo. Estas pontes eram estruturas de baixa complexidade constituídas por pedra ou madeira. Na Figura 9 é possível observar uma ponte que remonta ao período pré-histórico construída com lajes de

granito simplesmente apoiadas. As lajes de granito apoiam em dois pilares, constituídos também por pedra granítica, formando um pórtico de baixa altura (Vilarinho, 2020).



Figura 9: Tarr Steps, Somerset, Inglaterra (Kühn, 2004 apud Vilarinho 2020)

Com o tempo, o sistema estrutural das pontes foi sendo alterado. A solução da viga simplesmente apoiada evoluiu até aos vários tipos de arco que hoje conhecemos. Este foi um processo iterativo que, ocorreu ao longo do tempo, de modo a tirar partido do desempenho à compressão da alvenaria.

A ponte “Celta” de Castro Laboreiro, constituída por quatro vãos em alvenaria de pedra em forma de V invertido, é considerado o único exemplar deste género na Europa (Rodrigues, 2008 apud Vilarinho, 2020). Esta solução estrutural difere da viga simplesmente apoiada e caminha na direção do arco. Na Figura 10 é possível observar os vãos compostos por duas pedras planas em forma de V invertido apoiadas em pilares de pedra.



Figura 10: Ponte "Celta" de Castro Laboreiro (Vilarinho, 2020)

Os primeiros arcos foram construídos na zona da Mesopotâmia pelos povos Sumérios e Egípcios, integrados em edifícios e templos. Mais tarde, começaram a ser utilizados como solução estrutural para pontes e aquedutos. As técnicas de utilização do adobe em arcos e abóbadas impulsionaram o desenvolvimento e a complexidade das estruturas em arco (Rodrigues, 2008 apud Vilarinho, 2020).

Contudo, é somente no duradouro Império Romano que os elementos compostos por arcos e semiarcos são exaustivamente utilizados na concepção de diversas tipologias de estruturas, a saber, aquedutos, pontes, edifícios, cúpulas, igrejas, dentre outros. Neste período, houve ainda um significativo avanço tecnológico e construtivo, com a utilização de cimbres e argamassa pozolânica, que garantia maior produtividade da fase construtiva destes componentes estruturais e uma maior rigidez e comportamento homogêneo da estrutura (Christo, 2020).

Na Figura 11 podemos observar as pontes de pedra como protagonistas nas notas de Euro. Da menor à maior quantia, estão representadas as pontes romanas, medievais e modernas.



Figura 11: Pontes de pedra como protagonistas nas notas de Euro (Léon y Goicolea, 2016)

A Figura 12 resume o desenvolvimento das pontes em arco ao longo do tempo. No entanto, as últimas formas já mostram o surgimento de novos materiais de construção: aço e betão armado.

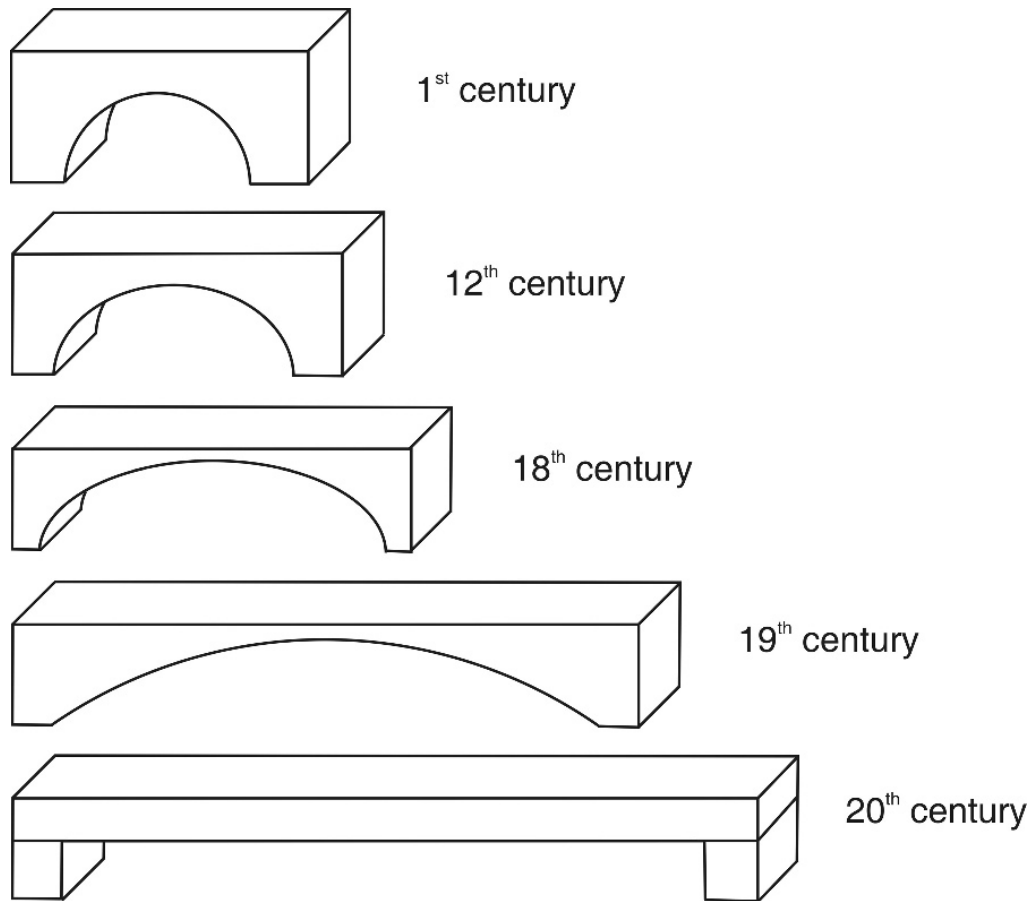


Figura 12: Desenvolvimento de formas de pontes maciças ao longo do tempo (Proske e Gelder, 2009)

3. CONSTITUIÇÃO DE UMA PONTE EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA

3.1. Introdução

O sistema estrutural das pontes em arco de alvenaria de pedra é constituído essencialmente por dois tipos de materiais: a alvenaria e o material de enchimento. Tratam-se de materiais heterogêneos, anisotrópicos, em certos casos contendo descontinuidades, com comportamento complexo, geralmente, com reduzida resistência à tracção. As alvenarias consistem na associação de blocos, ligados por argamassa ou simplesmente interpostos uns sobre os outros e constituem os elementos principais do sistema estrutural deste tipo de pontes (Costa, 2009).

A Figura 13 ilustra um esquema representativo dos elementos de uma ponte em arco de alvenaria de pedra e a seguir será apresentada uma descrição da tipologia e das funções dos principais elementos que constituem este tipo de construção.

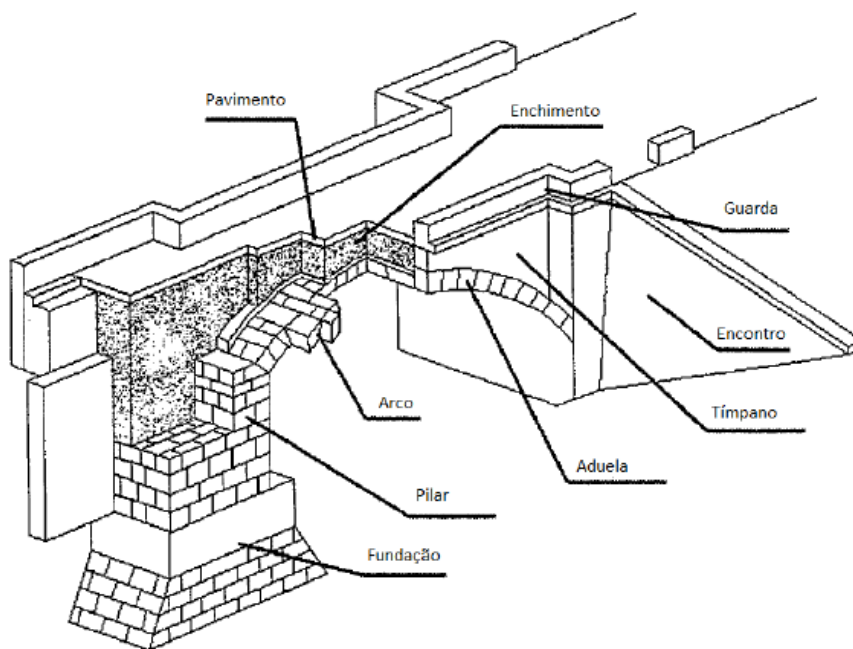


Figura 13: Representação esquemática dos componentes das pontes em arco de alvenaria de pedra (Álamo, 2001 apud Vilarinho, 2020)

A estrutura principal em alvenaria é constituída por fundações, pilares, arcos, muros de tímpanos e encontros. Os arcos desempenham um papel fundamental no sistema estrutural pois suportam a maior parte das cargas aplicadas na estrutura e as encaminham para os pilares que por sua vez as transmitem às fundações.

De acordo com o estudo realizado por Costa (2009), estes elementos funcionam essencialmente por gravidade sendo a geometria uma característica fundamental no seu comportamento e o esforço axial, o esforço interno predominante. Deste modo, na maioria das pontes de pedra existentes, a geometria e a massa são os principais critérios de projeto. Para além dos elementos estruturais referidos no parágrafo anterior, o sistema estrutural é ainda constituído por talhantes e quebrantes, que podem ser considerados elementos secundários e são constituídos por alvenaria e, eventualmente, também por material de enchimento. Finalmente, fazem ainda parte destas construções o pavimento e as guardas laterais que são elementos não estruturais.

3.2. Elementos estruturais e não estruturais de uma ponte em arco de alvenaria de pedra

3.2.1. Fundações

As fundações têm por finalidade receber as cargas provenientes dos arcos ou pilares e distribuí-las para o terreno, geralmente estes elementos possuem uma seção relevante de forma tal dissipar as cargas uniformemente. No entanto, a estabilidade das fundações possui relação direta com a sua geometria, para isso deve-se levar em conta o efeito do escoamento ou fluxo de água.

Os tipos de fundações mais comuns na construção destas pontes são: fundações directas materializadas por sapatas isoladas ou sapatas contínuas, fundações directas do pilar sobre o maciço rochoso e as fundações indirectas materializadas através de poços e pegões (Costa, 2009).

No caso do leito do rio ser composto por material rochoso com resistência suficiente para suportar as cargas da ponte, executam-se fundações directas. No entanto, se o leito for composto por materiais de baixa resistência como solos aluvionares, realizam-se fundações indirectas, semelhantes ao exemplo da Figura 14, com recurso a ensecadeiras. As fundações indirectas recorrem à capacidade resistente de um conjunto de estacas que são solicitadas por atrito lateral e de ponta garantindo uma distribuição de esforços compatíveis com as características do terreno (Vilarinho, 2020).

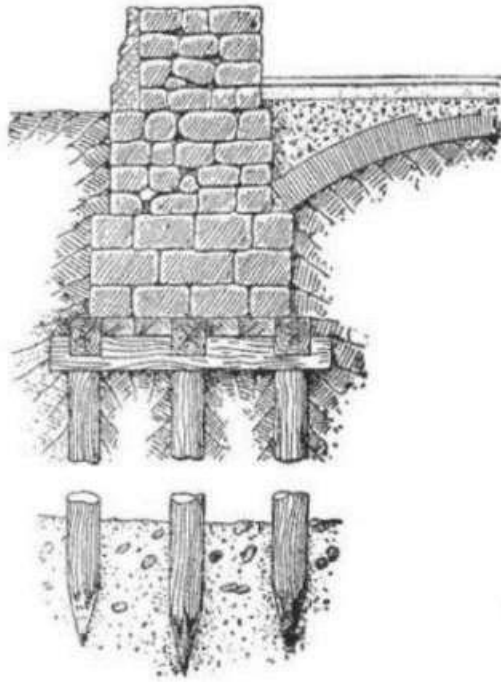


Figura 14: Pormenor de fundação indireta com estacas de madeira (Junior, 2016 apud Vilarinho, 2020)

3.2.2. Pilares e encontros

Os pilares constituem os apoios dos arcos e têm a função de encaminhar as cargas por eles transmitidas, para as fundações e são maioritariamente solicitados por esforços de compressão. Além disso, ainda deve resistir ao vento, sismos e a ação do escoamento do rio.

Em pontes de alvenaria de pedra do período romano e medieval, os pilares eram elementos massivos de baixa esbelteza e ocupavam uma parte razoável do leito do rio. Em pontes mono arco não existem pilares, sendo as cargas encaminhadas do arco para os encontros. Estes elementos, compostos por pedra e material de aterro conferem a estabilidade na direção longitudinal, impedindo-o de abrir ao ser solicitado (Vilarinho, 2020) .

A secção do pilar, geralmente, rectangular é, quase sempre, integralmente constituída por alvenaria com blocos de grandes dimensões para fazer face às acções transmitidas pela estrutura e às acções provenientes do escoamento do rio, onde estão inseridos (Costa, 2009).

A fim de evitar problemas de erosão e diminuir o impulso da água, os pilares fundados nos leitos dos rios são, geralmente, dotados de talhantes e talha-mares, que será explanado no subcapítulo 3.2.5.

3.2.3. Arcos

O arco é o elemento estrutural que mais influencia o desempenho estrutural de uma ponte de alvenaria na direção longitudinal. Este elemento, devido à sua forma e ao peso próprio dos restantes elementos da ponte, é sobretudo solicitado à compressão. Para formar um arco, utilizam-se elementos de pedra talhados com precisão que se designam por aduelas. O material destas tem de garantir um bom desempenho a esforços de compressão e corte, devendo ainda apresentar boas características de durabilidade. É conhecido que a alvenaria tem um bom comportamento a esforços de compressão, porém, quando solicitado à tração ou ao corte a sua capacidade resistente é muito inferior. Assim, para otimizar o comportamento do arco, é importante que as sobrecargas pontuais não sejam significativas quando comparadas com a cargas permanentes e que se mobilizem as reações horizontais nos apoios (Vilarinho, 2020).

De acordo com Leonhardt (1979), o arco, com sua forma curva desenvolvida segundo a linha de pressões, devido ao peso próprio, é o tipo estrutural mais apropriado para os materiais maciços como a pedra e o betão, desde que o terreno de fundação seja resistente e que o impulso do arco possa ser absorvido pela fundação. As pontes em arco, executadas com pedras naturais de boa qualidade possuem uma durabilidade praticamente ilimitada e, via de regra, não necessitam de juntas de dilatação. No caso do betão, entretanto, é preciso levar em consideração as deformações devido à retração, à variação de temperatura e à deformação lenta, o que tem influência na forma do arco e torna necessária a existência de juntas.

O sistema estrutural do arco se torna, então, isostático de forma triarticulados ou então, hiperestáticos de forma biarticulados ou biencastados (ver Figura 15). Os arcos triarticulados são uma estrutura isostática, capaz de absorver mais facilmente esforços acidentais elevados e ocorrência de assentamentos de apoios. Os arcos biencastados, que possuem grau de hiperestaticidade igual a 3, são usados preferencialmente quando se dispõe de condições ideais de encastramento no terreno

de fundação, podendo se apoiar diretamente em rocha ou um encontro dotado de grande rigidez. (Christo, 2020)

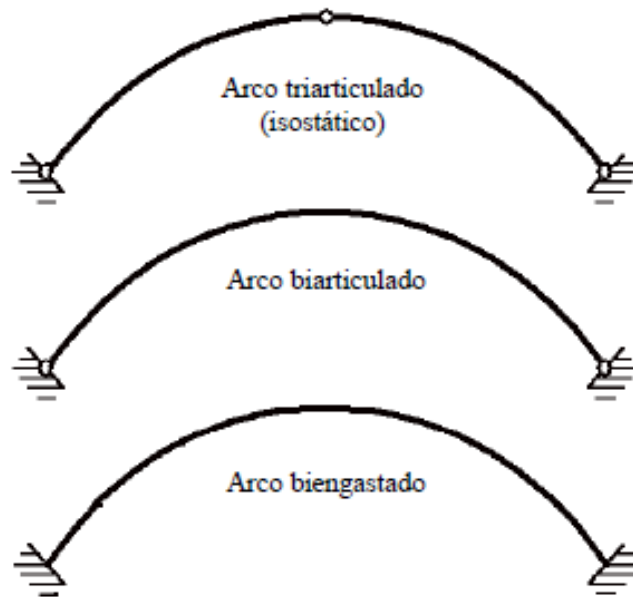


Figura 15: Esquema estático de pontes em arco (Leonhardt, 1979)

A forma dos arcos pode ser variável consoante o vão ou o estilo arquitetónico dominante à data da sua construção. Os arcos podem ter formas diversas sendo as mais frequentes a semi-circular (ou de volta inteira), o arco abatido (ou multi-raio), o segmento de arco (ou segmental) e o arco ogival. (Costa, 2009)

Na Figura 16 encontram-se representados diferentes geometrias de arcos de alvenaria.

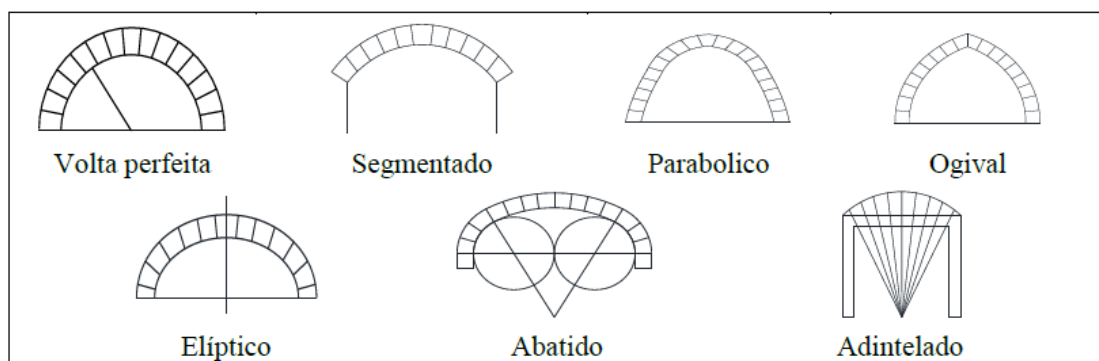


Figura 16: Geometrias das pontes em arco de alvenaria (Costa, 2009)

Na Figura 17 temos um exemplo de uma ponte em que possui diversos formatos e tamanhos de arcos.



Figura 17: Ponte de Mirandela, Portugal (Wikipedia)

Para construir o arco de alvenaria é necessário conceber uma estrutura de suporte provisória (cimbra) usualmente em madeira com a forma do arco a construir. A estrutura de suporte provisória normalmente é apoiada nas cavidades propositadamente concebidas no intradorso do arco ao nível das impostas. (Cordeiro, 2014). A Figura 18 mostra o cimbramento da ponte de Vila Fria.



Figura 18: Cimbramento da ponte de Vila Fria. (P. Costa, 2007)

3.2.4. Muro de tímpano

Os tímpanos são os paramentos verticais exteriores construídos em alvenaria sobre os arcos e pilares. Têm como funções servir de cofragem para o enchimento e pavimento, resistir às ações transmitidas por estes elementos e encaminha-las para os arcos e pilares que lhes dão apoio. (Costa, 2009)

Na Figura 19 é apresentada a construção do muro de tímpano da ponte de Vila Fria.



Figura 19: Início da construção do muro tímpano de montante entre os arcos 1 e 2 (P. Costa, 2007)

O paramento interior destes muros pode ser inclinado em vez de plano por forma a otimizar o seu comportamento estabilizante. Estes elementos estruturais são dotados de grande rigidez e funcionam à semelhança de uma viga lateral alta, que impede deslocamentos verticais.

Na direção longitudinal, os muros de tímpano são responsáveis por estabilizar os arcos através da sua rigidez e do seu peso. Este efeito estabilizante impede a zona do extradorso do arco de realizar deslocamentos e de formar rótulas entre aduelas. Na direção transversal, os muros de tímpano resistem ao impulso ativo gerado pelo enchimento. O impulso ativo é equilibrado através do peso próprio dos muros de tímpano e da ligação entre o muro e o arco. Os muros de tímpano podem possuir olhais (aberturas) que permitem a passagem de água em situações de cheia. Podem ainda ser reduzidos a arcos secundários como forma de aliviar as cargas permanentes nos arcos principais. (Vilarinho, 2020)

Não existem regras específicas para o dimensionamento de tímpanos, para além da sua boa execução, garantia de linearidade e bom assentamento dos blocos para que se garanta uma boa resistência às ações do meio envolvente como vento ou chuva. (Crhisto, 2020)

3.2.5. Talhantes e talha mares

Os talhantes e os talha-mares são estruturas de alvenaria que têm como função encaminhar o escoamento do rio reduzindo a pressão sobre os pilares protegendo contra a erosão e as fundações contra a infraescavação.

Para além de protegerem a zona dos pilares da erosão causada pelo escoamento, estes elementos servem também para aumentar a rigidez desta zona.

(Costa, 2009).

Os talha mares localizam-se na direção de montante e possuem uma forma triangular enquanto que os talhantes se localizam na direção de jusante e possuem uma forma plana. É possível encontrar exemplares de pontes onde a geometria dos talhantes é igual à dos talha-mares, por motivações estéticas. A Figura 20 esquematiza a passagem da água do leito do rio ao encontrar um pilar e a orientação das estruturas anti erosão que o protegem. (Vilarinho, 2020)

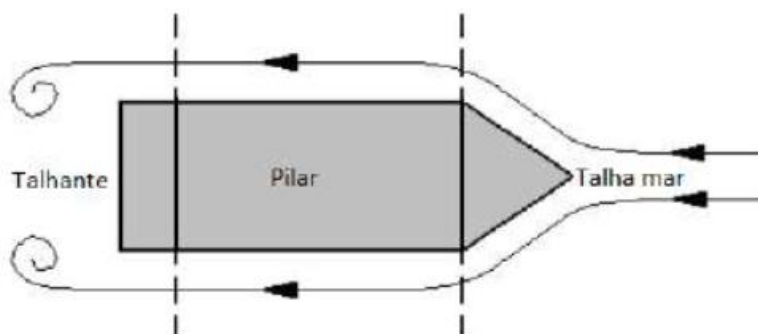


Figura 20: Talhante e talha-mar (Vilarinho, 2020)

Nas pontes construídas mais recentemente é muito comum os talhantes e quebrantes serem construídos com continuidade com os pilares apresentando a forma arredondada. Um exemplo deste tipo de solução pode encontrar-se na ponte do Prado (ver Figura 21) (Costa, 2009).



Figura 21: Formas dos pilares da ponte do Prado (Ferreira e Serra, 2007, apud Costa, 2009).

3.2.6. Enchimento

O enchimento é o elemento responsável por distribuir as cargas aplicadas ao nível do pavimento pelas restantes estruturas de suporte da ponte (arco e muros de tímpano). Normalmente o material de enchimento é um agregado britado de granulometria muito extensa ou um *tout-venant* bem compactado para que possa ser colocada em cima a plataforma, sem que ocorram assentamentos e deformações nesta devido à falta de compactação.

Por exemplo na construção da nova Ponte de Vila Fria, realizou se a seguinte mistura in situ: a uma base de tout-venant foi agregada uma percentagem reduzida de cimento portland, configurando o que é habitualmente designado de “traço seco”, seguida de adição de água para promover a ligação eficaz de todos os materiais. Na Figura 22 pode-se observar o processo de enchimento da ponte supracitada.



Figura 22: Enchimento entre muros ponte de Vila Fria (P. Costa, 2007)

As forças aplicadas no tabuleiro assumem diferentes degradações consoante a profundidade do material de enchimento disponível. Por exemplo, a Figura 23 mostra de uma forma simplificada esse comportamento. (Cordeiro, 2014)

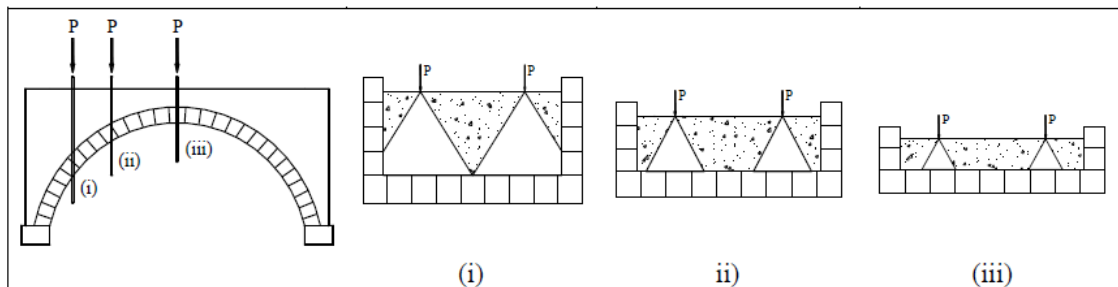


Figura 23: Configuração da degradação das forças em função da altura do material de enchimento (Costa, 2009)

Ao aplicar uma carga pontual no tabuleiro da ponte, a intensidade da mesma vai-se dissipando à medida que se desenvolve um bolbo de pressões em profundidade de acordo com o modelo de Boussinesq representado na Figura 24 (Narasimha & Venkatramaiah, 2000, apud Vilarinho, 2020). As linhas dividem zonas de igual pressão que vão sendo cada vez menores à medida que se aumenta a profundidade.

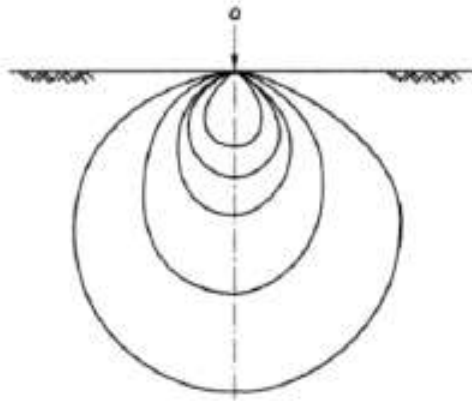


Figura 24: Bolbo de pressões de Boussinesq (Narasimha & Venkatramaiah, 2000, apud Vilarinho, 2020)

3.2.7. Guarda- corpos e pavimento

Os guarda corpos são estruturas de segurança que visam proteger contra a queda e embate de veículos e dos peões. Estes elementos podem ser de pedra, metálicas ou de madeira, sendo mais usual serem construídos com o mesmo tipo de alvenaria utilizada nos arcos e muros de tímpano e possuem uma altura da ordem de um metro em relação ao tabuleiro.

O pavimento constitui o elemento sobre o qual circulam as sobrecargas relativas ao tráfego rodoviário, ferroviário e pedonal. Assim, a sua função é facilitar a circulação dos rodados dos veículos e das pessoas, receber as cargas que nele estão aplicadas directamente e distribuí-las para o enchimento.

Nas pontes antigas o pavimento é geralmente constituído por placas de pedra, que podem encontrar-se dispostas de forma regular ou irregular. Porém, actualmente, é frequente que os pavimentos sejam constituídos por materiais betuminosos. (Costa, 2009)

3.2.8. Orgãos de drenagem

Os órgãos de drenagem visam recolher e remover água ao nível do tabuleiro, encaminhando-a para fora da estrutura. Uma fraqueza das pontes de alvenaria de pedra advém da possibilidade de ocorrerem infiltrações e movimentos de água pelo corpo da estrutura. A passagem da água pode remover material de enchimento, deixando vazios que reduzem a capacidade deste de distribuição de cargas. Além de alterar o enchimento, as infiltrações, podem remover ou enfraquecer a argamassa de assentamento presente entre blocos. (Lopes, 2012)

3.3. Materiais

Em geral a maioria das pontes de alvenaria contém apenas dois tipos de materiais: as unidades de alvenaria e o material de enchimento. Estas unidades de alvenaria podem estar aparelhadas entre si de uma forma regular ou irregular sendo que a interface entre elas pode apresentar-se com ou sem preenchimento de argamassa, dando origem assim a quatro tipos de aparelhamento, como mostra na figura xx. (Cordeiro, 2014)

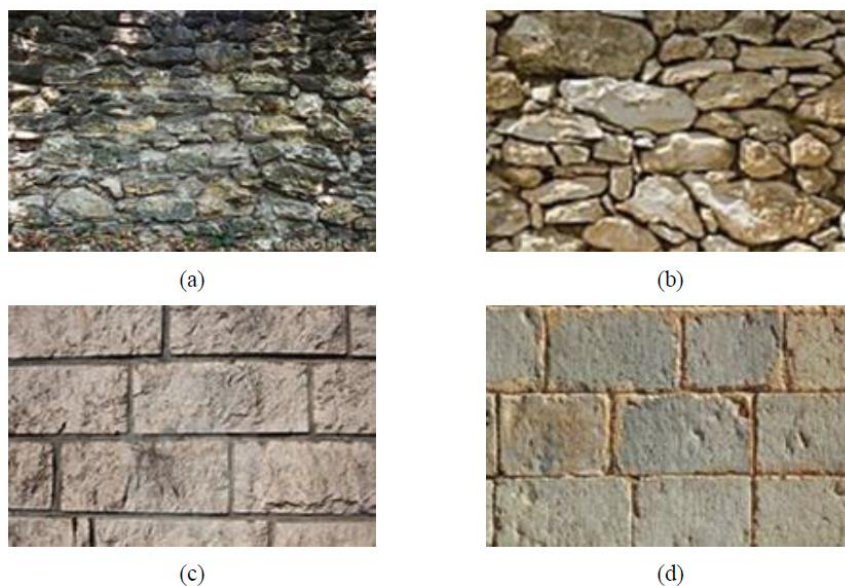


Figura 25: Tipos de aparelhamento: (a) Irregular com junta preenchida; (b) Irregular com junta seca; (c) Regular com junta preenchida; (d) Regular com junta seca. (Cordeiro, 2014)

No caso dos arcos e pilares por norma é utilizado um aparelhamento regular (com ou sem junta de argamassa) pois estes são elementos estruturais de maior importância e estão submetidos a uma força de compressão muito elevada (Morais, 2012)

A alvenaria pode ser composta por blocos cerâmicos ou por blocos de pedra, sendo que em Portugal é mais comum encontrar alvenaria de pedra em estruturas como pontes ou aquedutos. O conjunto formado pelos blocos e pelas juntas pode ser tratado como um material compósito heterogéneo e descontínuo de comportamento anisotrópico. (Vilarinho, 2020)

De acordo com Costa, (2009) a descrição do comportamento mecânico dos materiais, a alvenaria é controlada pelas propriedades mecânicas dos seus constituintes, blocos e argamassa de interposição (se existir) e das interfaces entre os diversos elementos. As juntas constituem planos de descontinuidades e fraqueza da alvenaria onde pode ocorrer abertura/fecho e escorregamento, pelo que, para além dos condicionantes materiais, a sua dimensão, orientação e posição relativa interferem significativamente no comportamento da alvenaria na medida em que afectam a sua anisotropia e heterogeneidade.

3.3.1. Alvenaria - Pedras naturais

As pedras naturais resistentes à ação do tempo, tais como granito, pórfiro, diorito, basalto, lava porosa, calcários (como mármore), arenito silicoso, tufo e trentito, foram empregadas na construção de pontes com ótimos resultados em pilares, encontros e abóbadas, em parte estruturalmente, em parte como alvenaria resistente ao congelamento, na execução de paramentos ou como revestimentos. O emprego de pedras naturais em pontes, hoje em dia, tem sido raro, devido ao elevado custo do trabalho de preparação. No entanto, de acordo com com Leonhardt (1979), deve-se ter em consideração as seguintes vantagens no uso da pedra:

- As superfícies constituídas de pedras naturais bem escolhidas (alvenarias ou revestimento de lajes) superam, em muito, do ponto de vista de beleza, as colorações das superfícies de betão aparente, colaborando para uma melhor qualidade estética da obra no meio ambiente paisagístico ou urbano. Para isso, vale a pena o investimento.
- As pedras naturais envelhecem melhor que o betão, isto é, após muitos anos ainda apresentam uma boa aparência (veja-se, por exemplo, as pontes romanas) e têm um melhor comportamento mesmo em atmosferas industriais, desde que tenha sido adotado o tipo de pedra adequada.
- A resistência à abrasão, contra a erosão provocada pela ação da água e da areia, é substancialmente maior do que a do betão, o que é de importância para pilares de pontes fluviais.

As pedras naturais são obtidas de pedreiras e, de acordo com suas jazidas naturais – monolíticas, estratificadas em bancos espessos ou delgados, fendilhadas etc. – são subdivididas ou em grandes blocos (granito) e após serradas em paralelepípedos ou placas ou então extraídas em lamelas. O tipo adequado de tratamento a ser dado posteriormente depende muito das particularidades da jazida.

A alvenaria com pedras de cantaria exige um desenho de disposição, sobre o qual cada pedra é medida e numerada. A superfície do paramento é apicoada, acabada a ponteira, aplainada ou serrada. Este tipo é adequado quando forem grandes as exigências quanto à aparência e para pedras de grande formato.

A *alvenaria em fiadas* é apropriada quando as pedras naturais podem ser dispostas em camadas de aproximadamente a mesma espessura (por camada). A altura de fiada deve ser de 100 a 400 m, devendo-se alternar as fiadas sempre que possível. A superfície do paramento é apicoada, acabada a ponteira ou serrada. Neste tipo de alvenaria os comprimentos das pedras devem ser de 1,3 a 4 vezes a altura da camada e as juntas verticais devem ser defasadas no mínimo de $h/3$.

A *alvenaria de pedra bruta* é executada em camadas com pedras em forma de placa, sem muito trabalho de preparação das faces; com isso, o leito é irregular e as juntas verticais são pouco ou nada trabalhadas. Este tipo de alvenaria exige habilidade manual, não é apropriada para revestimento, e exige aderência com uma camada de betão suficientemente espessa, à qual podem ser misturados pedregulhos.

A *alvenaria ciclópica* é constituída preferencialmente por blocos de pedras de origem glacial e formato irregular (depósitos da era glacial) ou por blocos de pedra bruta diretamente das pedreiras. Os interstícios são preenchidos com lascas, as espessuras das juntas são variáveis. Adequadas para muros de contenção.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das propriedades das pedras naturais.

Tabela 1: Propriedades das pedras naturais (Leonhardt, 1979)

Tipo de rocha	Massa específica aparente (t/m ³)	Resistência cúbica à compressão (MPa = N/mm ²)	Módulo de elasticidade (MPa)
Granito	Valor médio		
muito duro	2,8	120 – 200	3,8 – 7,6 · 10 ⁴
medianamente duro		80 – 120	
pouco duro		45 – 80	
Pórfiro	2,8	50 – 200	2,5 – 6,5 · 10 ⁴
Basalto	3,0	100 – 200	5,8 – 10,3 · 10 ⁴
Lava basáltica	2,3	30 – 150	
Calcáreo	2,2 – 2,8	50 – 180	4,0 – 9,2 · 10 ⁴
Mármore de Carrara	2,6 – 2,9	75 – 200	
Arenito			
muito duro		150 – 200	0,8 – 1,8 · 10 ⁴
duro	2,6	100 – 150	
medianamente duro		60 – 100	
pouco duro		20 – 60	

A caracterização mecânica da alvenaria de pedra pode ser feita a partir de: (i) ensaios laboratoriais, realizados sobre modelos experimentais ou sobre amostras reais e (ii) ensaios in-situ. As paredes de alvenaria têm globalmente um bom comportamento em compressão, induzido geralmente pelas ações gravíticas, e não para esforços de flexão ou tração. A deficiente resistência a esforços de tração deve-se, por um lado às próprias características dos materiais que as compõem, a pedra natural, e quando existe, a argamassa, e sobretudo pela ligação entre os elementos constituintes (Varum, et al., 2005 apud Christo, 2020).

A resistência da alvenaria à tração é relativamente baixa, sendo que a caracterização de amostras de alvenaria à tração é difícil de proceder dada a reduzida resistência que apresentam neste domínio. No estudo realizado por Costa (2002), foram extraídos carotes de granito da Ponte da Lagoncinha e ensaiados por meio do ensaio de compressão diametral revelaram tensões de rotura à tração entre 3,40 e 6,96 MPa. Os valores observados à compressão variam entre 38,78 e 68,80 MPa, apresentando uma relação 10x menor entre a resistência tração e a resistência à compressão.

Os ensaios de caracterização do comportamento à compressão são mais simples de executar que os ensaios de tração quer em amostras de um único material ou representativas da alvenaria (Costa, 2009). A elevada resistência à compressão dos blocos de pedra faz com que a alvenaria de pedra tenha também uma boa resistência

à compressão (Vilarinho, 2020). Sendo que ao contrário da resistência à tração, a resposta da pedra a esforços de compressão pode alcançar tensões da ordem dos 100 Mpa, como pode ser observado na Tabela 1.

De acordo com o estudo realizado por Costa (2009), o comportamento da alvenaria ao corte depende essencialmente da resistência ao corte das suas interfaces. Atendendo à distinção entre os diversos tipos de juntas frequentes nas estruturas de alvenaria, e das pontes em arco em particular, é usual diferenciar o comportamento das juntas secas e das juntas argamassadas. Por sua vez a rugosidade das interfaces e a tensão vertical instalada têm um papel decisivo na evolução do comportamento ao corte, pelo que deve ser considerada a influência destes factores, nomeadamente quando se procede a ensaios de corte de amostras representativas das juntas existentes na alvenaria.

3.3.2. Material de Enchimento

Os materiais utilizados no enchimento das pontes em arco de alvenaria de pedra podem ter natureza diversa, como apresentado no subcapítulo 3.2.6, sendo que pode ser composto por partículas de granulometrias muito diversas a variar desde um solo fino até à grandeza de um cascalho.

A constituição do material de enchimento pode ser diretamente comparada com um solo, dado que o material se encontra sujeito a um estado de tensão triaxial. (Vilarinho, 2020). Neste contexto a cedência por corte traduz-se através dum critério de cedência tipo Mohr-Coulomb, que representa a dependência entre a tensão de corte e a tensão de consolidação em função do ângulo de atrito e da coesão, expresso pela equação (1), e a evolução da cedência plástica é traduzida mediante adequadas leis constitutivas do comportamento. (Costa, 2009).

$$\tau' = c' + \sigma_c' \tan(\phi) \quad (1)$$

A resposta dos materiais granulares a solicitações de corte depende do imbricamento e do atrito entre as partículas. Considera-se que a coesão é nula ($c'=0$) para solos granulares e por isso, caso se trate de um enchimento granular, a expressão (1) é apenas regida pela tensão de consolidação (σ_c') e pelo ângulo de atrito interno (ϕ'). O

ângulo de atrito interno é influenciado pela compacidade do material, pela uniformidade e pelo tamanho das partículas (Vilarinho, 2020).

A existência de ligações cimentícias entre as partículas, características de solos naturais estruturados (Fonseca, 1996 apud Costa, 2009), confere ao material resistência à tração. Neste caso a rotura por corte também está associada a aumento de volume devido à expansão necessária para quebrar aquelas ligações. Portanto neste caso é adequado considerar uma parcela coesiva não nula no critério de Mohr-Coulomb expressa na equação (1).

3.4. Comportamento estrutural - Mecanismos de transmissão de esforços

As pontes em arco de alvenaria de pedra dependem do seu peso próprio para obter estabilidade estrutural. Pelo que, para se compreender o comportamento estrutural de uma ponte de alvenaria de pedra, é necessário avaliar a interação entre os componentes estruturais apresentados em 3.2., tanto na direção longitudinal como transversal. Na Figura 26 apresenta-se o mecanismo de transmissão de cargas verticais pelo sistema estrutural na direção longitudinal da ponte.

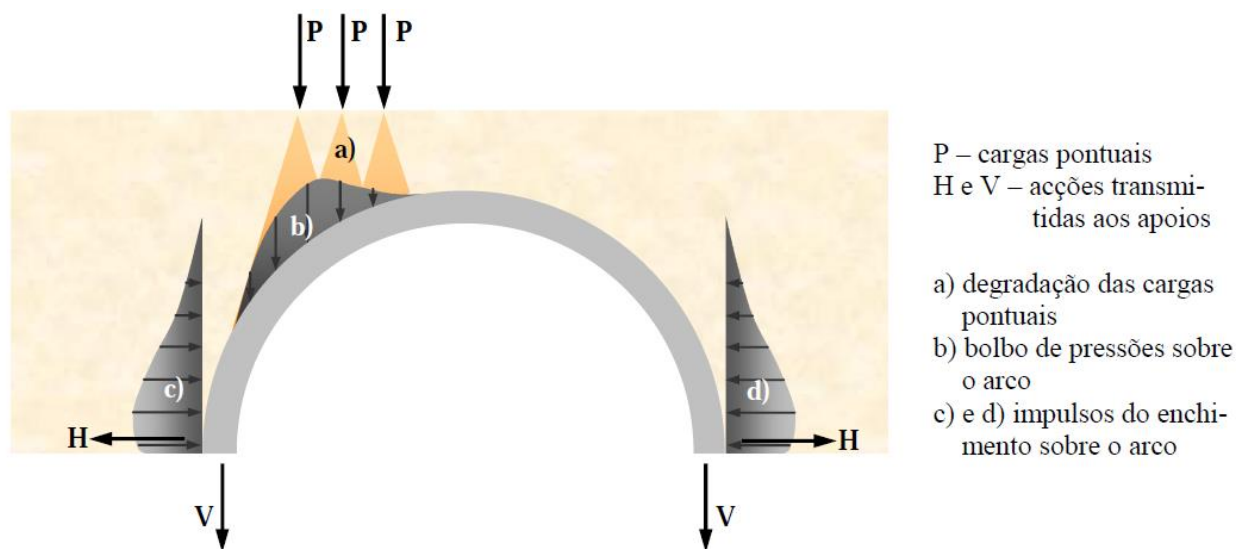


Figura 26: Esquema de funcionamento da ponte na direção longitudinal (Álamo, 2001, apud Costa, 2009)

Na direção longitudinal, o arco é o elemento responsável pelo equilíbrio deste sistema através das reações verticais (V) e dos impulsos horizontais (H). Na Figura 27 pode-se observar o cone de degradação originado pelas sobrecargas pontuais (p) e o efeito estabilizador do enchimento sobre o arco.

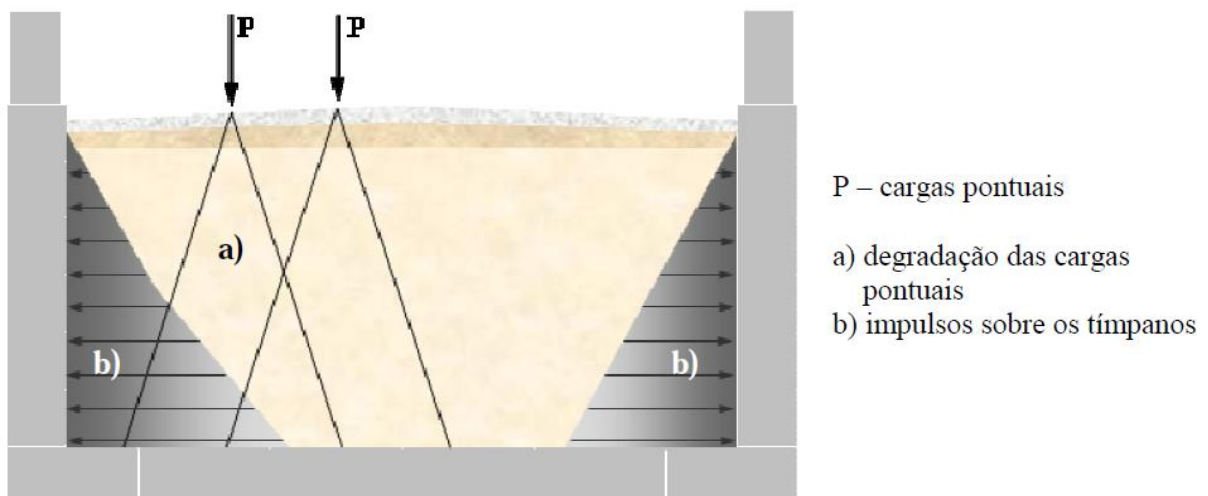


Figura 27: Esquema de funcionamento da ponte na direção transversal (Álamo, 2001, apud Costa, 2009)

Enquanto que, na direção transversal, os muros de tímpano recebem as sobrecargas e o peso próprio da estrutura através de impulsos horizontais que atuam na direção perpendicular ao plano dos tímpanos, como representado na Figura 27. Este mecanismo depende do comportamento dos muros de tímpano, e da interação destes com o enchimento e com o arco.

O arco desempenha um papel primordial no comportamento estrutural, sendo que grande parte das cargas envolvidas é transmitida diretamente sobre este. Por isso, a sua geometria e o material constituinte são escolhidos para que o esforço axial de compressão seja o esforço predominante de forma a garantir uma capacidade portante muito elevada.

A principal função estrutural do enchimento consiste em distribuir as cargas aplicadas no pavimento para os demais elementos da ponte. As pressões transmitidas pelo enchimento ao arco, que resultam das cargas (P) aplicadas sobre o pavimento são representadas pelo bolbo de pressões, tal como representado na imagem xx. Sendo que, de acordo com Costa (2009), para materiais de enchimento granulares o ângulo do cone de degradação de cargas depende do grau de compactação do material e conseqüentemente da sua rigidez.

Na direção transversal as ações transmitidas aos tímpanos pelos enchimentos podem ser quantificadas através da determinação de um coeficiente de impulso ativo com base na teoria de Rankine ou de Coulomb e na direção longitudinal, quando ocorre

deformação do arco no sentido de empurrar o enchimento, são mobilizados sobre o arco impulsos passivos que têm sobre este uma ação estabilizadora. (Costa, 2009)

No sistema estrutural os muros de tímpano podem ser considerados elementos com grande rigidez. Sendo que a elevada rigidez dos mesmos contribuem para estabilizar o arco na longitudinal, de forma a restringir os deslocamentos do extradorso na direção dos tímpanos. Uma vez que, na direção transversal os tímpanos também desempenham um papel fundamental, pelo que têm que resistir aos impulsos ativos transmitidos pelo enchimento e transmiti-los ao arco.

4. ANOMALIAS, INSPEÇÃO E REABILITAÇÃO DE PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA

4.1. Introdução

Neste capítulo, será apresentada uma sistematização de patologias frequentes em pontes em arco de alvenaria. As mesmas serão identificadas de acordo com o tipo, de modo que será descrito o seu aspecto visual e as possíveis causas que lhe originaram, que podem ser ações de natureza mecânica, física, química, biológica e devidas à ação humana ou às ações sísmicas. Sistematizar as patologias mais frequentes em pontes, de acordo com a descrição dos fenômenos envolvidos e a identificação das possíveis causas, possibilitam um caminho mais fácil para o diagnóstico, assim como a prevenção e meios de reparação para determinada patologia.

Neste seguimento, atualmente vários trabalhos tem sido desenvolvidos no contexto da preservação das pontes em arco de alvenaria, tendo como exemplo os trabalhos publicados e desenvolvidos pelo grupo de trabalho CIRIA - Construction Industry Research and Information Association.

De acordo com CIRIA (2022), existem várias características das pontes em arco de alvenaria que requerem consideração especial na gestão de pontes:

- estão entre os elementos mais antigos da infraestrutura de transporte;
- muitas vezes faltam informações sobre seu projeto, construção e estrutura interna;
- o desempenho e capacidade estrutural não são tão bem compreendidos como nas estruturas projetadas à luz dos códigos de dimensionamentos modernos e pode ser mais difícil de avaliar a eficácia dos reparos e alterações e sua provável influência no desempenho a longo prazo;
- a manutenção da estrutura não é bem compreendida (algumas intervenções podem ser prejudiciais).

A inspeção é o princípio base pelo qual se deve reger a política de manutenção das pontes. Sendo que para além de detectar anomalias que exigem ações de intervenção, as inspeções ainda têm a função de indicar, através da monitorização, que determinado dano está estável e ainda o avanço de patologias, sendo ele lento ou

rápido, com a possibilidade de justificar uma intervenção ou não. Portanto, a realização de inspeções periodicamente, a longo prazo resultam em uma economia significativa. Para isso é necessário um plano de manutenção da obra de arte, que indiquem a periodicidade e os tipos de inspeções a se fazer e ainda se é necessária a realização de ensaios.

4.2. Danos e anomalias comuns em pontes em arco de alvenaria de pedra

4.2.1. Considerações gerais

Padrões de danos típicos em pontes em arco foram mostrados por Angeles-Yáñez e Alonso (1996) como apresentado na Figura 28. (Proske e Gelder, 2009)

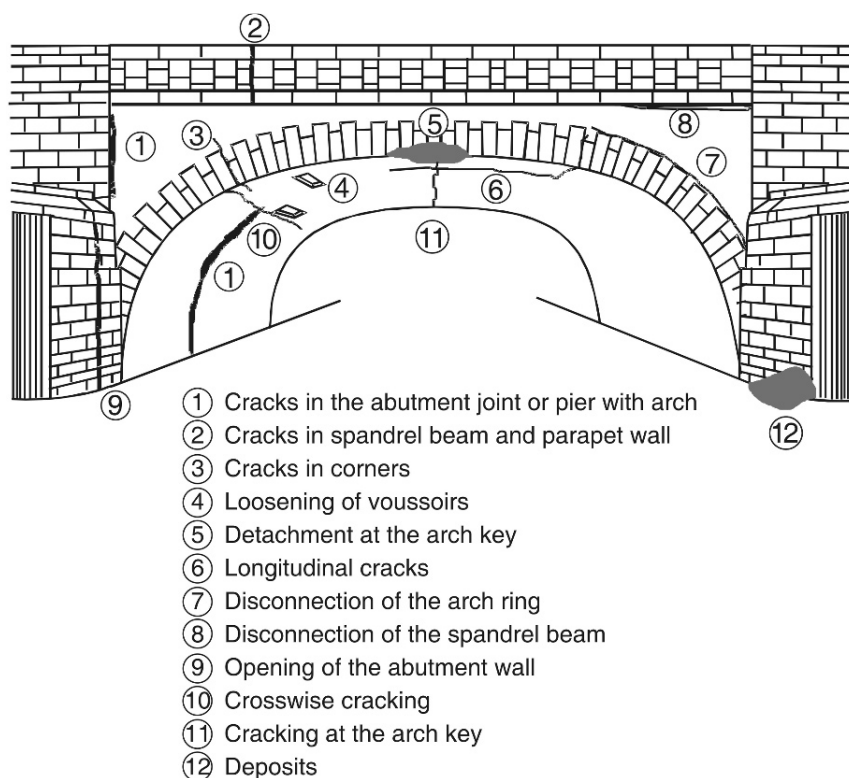


Figura 28: Danos mais frequentes encontrados em pontes em arco (Angeles-Yáñez, 1996 apud Proske e Gelder, 2009)

E ainda, foi resumida na Tabela 2 uma classificação de danos comuns em pontes históricas em arco de pedra realizado pelas organizações ferroviárias europeias.

Tabela 2: Tipos de danos em pontes em arco de organizações ferroviárias e seus frequência (Adaptado de Orbán, 2004)

	<i>Tipo de Dano¹</i>	<i>Frequência²</i>
1	<i>Danos na vedação³</i>	2.1
2	<i>Deterioração do material</i>	2.4
3	<i>Destacamento e movimento do muro de tímpano</i>	3.5
4	<i>Danos em pilares, fundação e arcos</i>	4.0
5	<i>Problemas geométricos da estrutura</i>	4.0
6	<i>Outros problemas⁴</i>	4.0
7	<i>Rachaduras no arco causadas por assentamento</i>	4.2
8	<i>Danos na viga de bordadura</i>	4.3
9	<i>Danos causados por sobrecarga</i>	4.3
10	<i>Deformação do arco</i>	4.4
11	<i>Rachaduras no arco causadas por sobrecarga</i>	4.5
12	<i>Danos devido a cargas concentradas no arco</i>	4.6

- 1 Em muitos casos, a causa dos danos não pode ser indentificada;
- 2 Calculado o valor médio com base nas informações fornecidas por diferentes organizações de ferrovias;
- 3 Muitas pontes históricas em arco foram construídas sem juntas de vedação. Entretanto, danos causados pela água podem ser encontrados nas mesmas. Estas pontes foram, portanto, adicionadas a esta estatística;
- 4 Outros problemas incluem danos causados por vegetação, danos causados por sismos, impactos e falta de manutenção;

Sendo que os números de frequência representam o seguinte:

- 1 = Muito frequente (aproximadamente 50% de todas as pontes)
- 2 = Frequente (aproximadamente 25% de todas as pontes)
- 3 = Occasional (aproximadamente 10% de todas as pontes)
- 4 = Raro (aproximadamente 5% de todas as pontes)
- 5 = Excepcional (menos que 5% de todas as pontes)

De acordo com a classificação apresentada na Tabela 2 , concluiu-se que os principais defeitos resultam de problemas no sistema de vedação/impermeabilização e da deterioração do material causada pelo envelhecimento. Foi ainda verificada uma elevada ocorrência do destacamento e movimento do muro de tímpano. Já os danos do tipo estrutural, nos pilares, fundações e arcos são pouco frequentes.

4.2.2. Danos e anomalias estruturais

Os danos estruturais têm uma localização que pode ser generalizada ou localizada. 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). 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. (Morais, 2012)

Nas Tabela 3 e Tabela 4, é apresentado um resumo de anomalias estruturais e suas causas.

Tabela 3: Tipos de anomalias estruturais localizadas nos componentes das pontes (Lopes,2012)

Anomalias estruturais localizadas nos elementos estruturais	
Anomalias no arco	Fendilhação longitudinal no centro da abóbada
	Fendilhação longitudinal entre os tímpanos e o arco
	Fendilhação diagonal do arco
	Fendilhação transversal no arco
	Perda ou deslocamento de material do arco
Anomalias nos pilares	Falhas mecânicas
	Fendilhação vertical nos pilares
	Fendilhação em escada
Anomalias nos encontros	Fendilhação entre talhantes, quebrantes e pilares
	Fendilhação vertical em encontros
Anomalias nos tímpanos	Fendilhação horizontal em encontros
	Abaulamento dos tímpanos
	Deslizamento dos tímpanos
	Rotação do tímpano
Anomalias nos muros de ala e muros de avenida	Fendilhação em escada nos tímpanos
	Rotação e abaulamento
Anomalias nas fundações	Fissuração vertical na ligação entre o encontro e os muros de ala e avenida
	Perda dos elementos de proteção
	Erosão local dos elementos de fundação
	Abrasão e apodrecimento das estacas de madeira
	Perda de estabilidade da fundação por alterações no leito do rio
	Assentamento diferencial longitudinal em pilares
	Rotação longitudinal da base do pilar
	Rotação transversal do pilar
	Assentamento diferencial transversal do pilar
Assentamento relativo entre extremidades e centro de pilar	

Tabela 4: Causas dos processos de degradação estrutural (Lopes, 2012)

Causas dos processos de degradação estrutural
Comportamento do arco na direção longitudinal da ponte (mecanismo de rótulas no arco)
Comportamento da ponte na direção transversal (transmissão de impulsos pelo enchimento)
Comportamento das pontes enviesadas
Comportamento dinâmico
Utilização excessiva das estruturas
Pressão excessiva do solo
Pressão excessiva do enchimento
Variação de rigidez entre elementos estruturais
Processo de construção
Intervenções anteriores
Ações

Na Tabela 5 é apresentada uma classificação das ações que podem ter influência nos processos de degradação nos elementos estruturais.

Tabela 5: Classificação das ações (Lopes, 2012)

Classificação das Ações
Ações permanentes
Sobrecargas
Ações horizontais devidas à frenagem e às cargas centrífugas
Ação do vento
Ações térmicas e reológicas
Movimentos impostos
Ações dinâmicas

i) Anomalias no Arco

A transmissão dos impulsos horizontais associados ao funcionamento da ponte na direção longitudinal podem desencadear a fendilhação longitudinal entre os tímpanos e o arco conforme pode-se observar na Figura 29a, sendo que para que ocorra a fendilhação longitudinal no centro da abóbada, tal como representada na Figura 29b, pode ser resultante do funcionamento na direção transversal, que também pode estar associada a forças transversais de flexão presentes no arco ou a concentração de cargas em correspondência com a posição das travessas da via arco. Enquanto que, a fendilhação diagonal no arco, representada na Figura 29c, resulta em geral, de assentamentos ou rotações nos pilares e fundações.

Adicionalmente, para que ocorra o colapso do arco sob a aplicação de cargas é necessário que se forme um mecanismo de quatro (Figura 29d) ou cinco rótulas no arco. No caso de pontes com arcos múltiplos podem ainda ocorrer mecanismos de sete (Figura 29e) ou mais rótulas (Catalán e Álamo 2006, apud, Lopes, 2012).

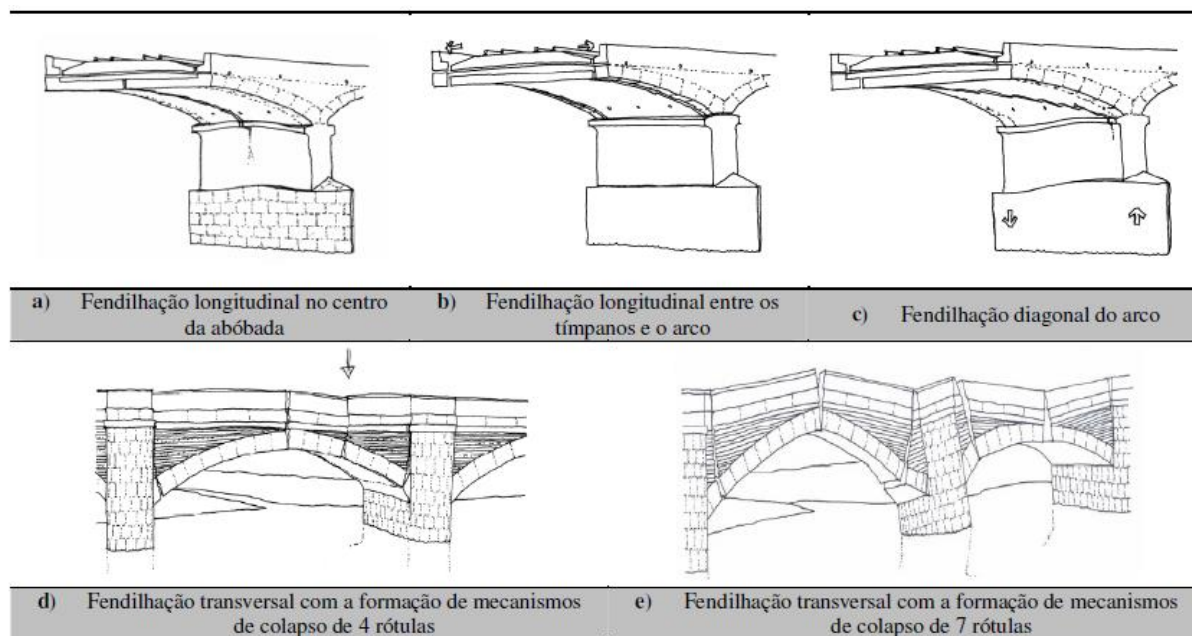


Figura 29: Fendilhação longitudinal e transversal no arco (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)

A perda ou deslocamento de material do arco pode ser devida a cargas dinâmicas excessivas ou problemas relacionados com a durabilidade ou a ambos. Na Figura 30 ilustra-se um exemplo deste dano.

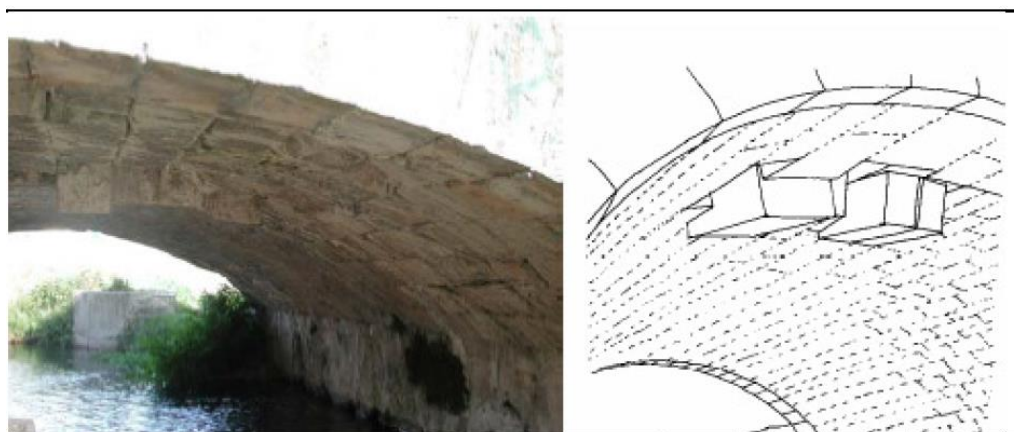


Figura 30: Perda de material (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)

ii) Anomalias nos Pilares

A perda de enchimento no interior do pilar ou alterações na base das fundações e assentamentos podem ocasionar fendilhação vertical nos pilares, tal como representado na figura Figura 31a, visto que este tipo de dano requer atenção imediata, pois trata-se de um aviso de colapso eminente e catastrófico. Na figura Figura 31b é representada a fendilhação em escada, que é associada à rotação da base do pilar quando há uma falha local da fundação. Pelo que as fendas verticais entre talhantes, quebrantes e pilares representada na figura Figura 31c são ocasionadas devido a problemas de fundação ou com o sistema construtivo dos talhantes e quebrantes.

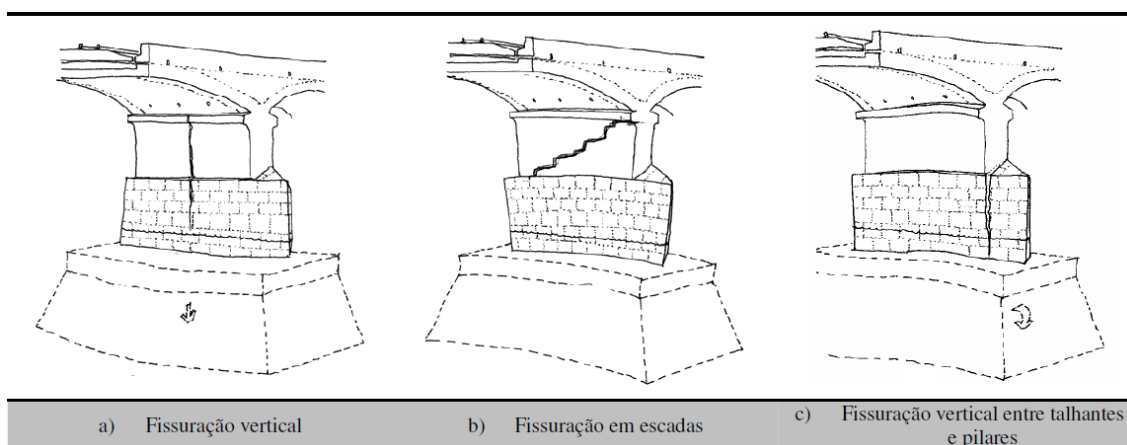


Figura 31: Anomalias nos Pilares (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)

iii) Anomalias nos Muros de Típano

Os impulsos laterais que solicitam os muros de tímpano induzem esforços de flexão e corte que podem ocasionar os seguintes danos:

- Inclinação para fora do plano;
- Abaulamento na zona central do tímpano;
- Escorregamento da base da parede;
- Formação de uma fenda na primeira fiada do arco;
- Separação entre tímpanos e arco.

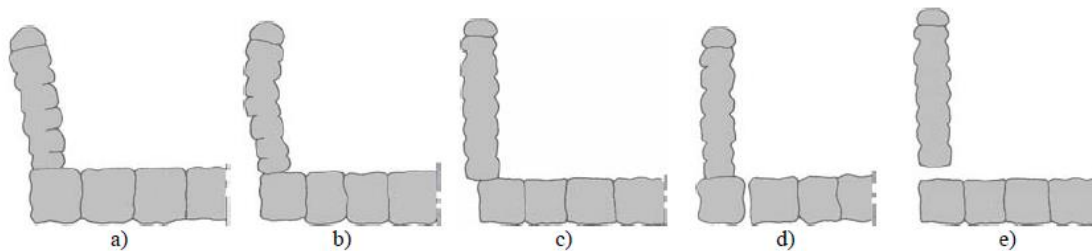


Figura 32: Tipos de anomalias nos muros de tímpano (Page, 1993 apud, Costa, 2009)

De acordo com Costa, (2009) os danos representados nas Figuras Figura 32a e Figura 32b resultam do efeito de flexão nos tímpanos. No primeiro caso a parede exibe um comportamento tipo consola, enquanto, no segundo caso, por efeito de algum imbricamento entre o pavimento e o tímpano, há restrição do deslocamento horizontal na extremidade da parede. Os danos ilustrados na Figuras Figura 32c Figura 32d e Figura 32e estão essencialmente relacionados com o comportamento da ligação entre o tímpano e o arco.



Figura 33: Anomalias nos muros de Tímpano (Lopes, 2012)

Devido às cargas junto ao muro de tímpano, associada a água presente no interior do enchimento e o estado de degradação do material, levam ao agravamento dos danos que afetam os tímpanos, pelo que aumentam o impulso sobre o muro e diminuírem as características de resistência do material.

iv) Anomalias nas fundações

As anomalias estruturais existentes nas pontes em arco de alvenaria, em grande parte está relacionada com problemas ou falhas nas fundações.

Sendo que, entre as anomalias que podem ocorrer nas fundações são frequentes (ver Figura 34):

- a) Perda dos elementos de proteção;
- b) Erosão local dos elementos de fundação;

c) Abrasão e apodrecimento das estacas de madeira.

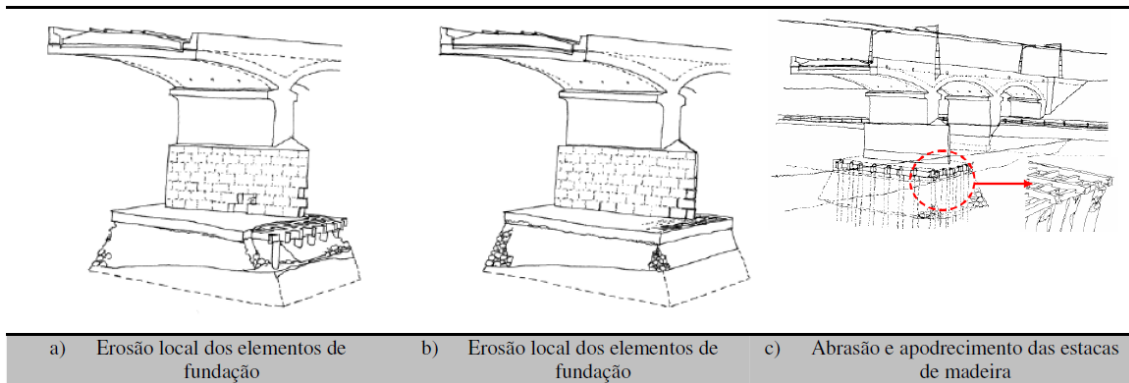


Figura 34: Anomalias nas fundações (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)

As anomalias mais frequentes que decorrem de problemas nas fundações estão ilustradas na Figura 35 e correspondem a:

- a) Assentamento diferencial longitudinal em pilares;
- b) Rotação longitudinal da base do pilar;
- c) Rotação transversal do pilar;
- d) Assentamento diferencial transversal;
- e) Assentamento relativo entre extremidades e o centro de pilar.

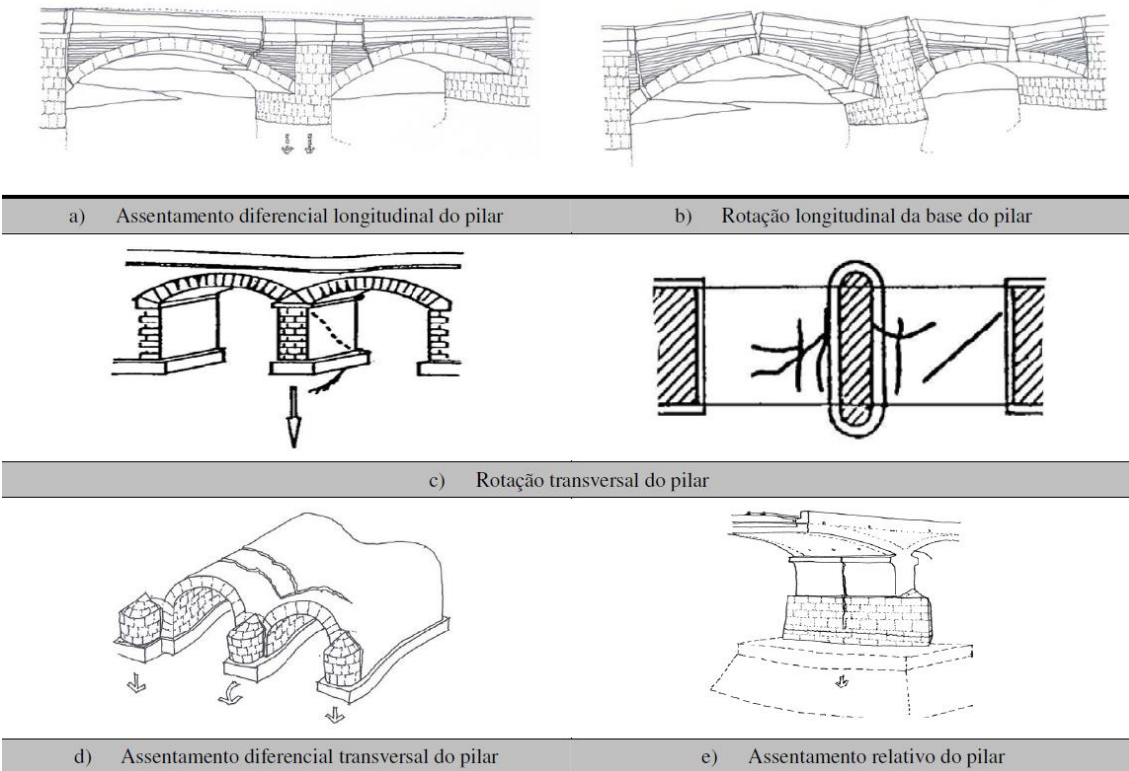


Figura 35: Anomalias decorrestes de problemas nas fundações (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)

Ilustra-se na Figura 36 o exemplo do colapso da ponte de Vignole, onde se verificou a rotação da base do pilar originada por assentamentos, com a formação de um mecanismo de quatro rótulas no arco e uma na base do pilar. (Costa, 2009)



Figura 36: Mecanismo de rotura por perda de capacidade das fundações na ponte Vignole (Brencich, 2007, apud Costa, 2009).

4.2.3. Danos e anomalias nos materiais

Numa ponte em alvenaria de pedra, como em geral no património construído, a deterioração dos materiais aplicados depende de vários fatores que podem ser agrupados de forma genérica em fatores intrínsecos relacionados com o tipo de material; fatores extrínsecos, como o ambiente (microclima e nanoclima) em que a construção se encontra; fatores impostos, como a geometria e orientação geográfica da construção ou o acabamento das superfícies; e fatores antropológicos relacionados com a função da construção ao longo da sua vida, como intervenções e uso desadequados e o vandalismo (Aires-Barros, 2002, Apud Costa, 2009).

Neste contexto, de acordo com Costa (2009), a caracterização de certas propriedades intrínsecas do material pétreo permite avaliar os fatores que podem alterar a estrutura ou a superfície de uma pedra. Sob este ponto de vista, é importante conhecer as características seguintes:

- Composição química, no sentido de identificar os elementos mais vulneráveis a alterações químicas;
- Textura e estrutura da rocha, resistência mecânica, dureza e abrasividade, com o objetivo de avaliar o comportamento da pedra sob agressões físicas;
- Porosidade e estrutura das redes capilares, para avaliar a permeabilidade aos gases e água.

Os danos e degradações mais frequentes dos materiais estão resumidos na Tabela 6

Tabela 6: Anomalias frequentes do material (Lopes, 2012)

Anomalias frequentes do material	
Alterações da superfície	Manchas de humidade, escorrências e depósito de água
	Manchas negras e filmes negros
	Depósitos de origem biológica
	Eflorescência e cripto-eflorescência
	Crostras
Perda de material	Erosão da pedra
	Dissolução da pedra
	Desagregação da pedra
	Alveolização
	Perda de argamassa nas juntas
	Delaminação
	Desalinhamentos e destacamentos de pedras dos paramentos de alvenaria
Rotura por elementos de vegetação	
Danos resultantes da ação humana	Atos de vandalismo
	Intervenções de reabilitação e reforço desadequadas
	Impactos de veículos

Neste caso, os processos de degradação mais frequentes estão indicados na Tabela 7 e as ações que os desencadeiam na Tabela 8.

Tabela 7: Processos de deterioração e degradação do material (Lopes, 2012)

Processos de deterioração e degradação do material
Presença da água
Efeito do vento
Gelo-degelo
Presença de sais solúveis
Gases presentes na atmosfera
Efeitos térmicos
Hidratação (expansão de água)
Vegetação
Carbonatação
Mistura de argila

Tabela 8: Classificação das ações (Lopes, 2012)

Classificação das Ações	
Ambientais	Ações climáticas
	Ações devidas à poluição
Ações biológicas	Bactérias e fungos
	Líquenes
	Algas e musgos
	Vegetação
Ações humanas	Atos de vandalismo
	Acidentes
	Intervenções anteriores

Portanto, os principais agentes agressivos de deterioração dos materiais são nomeadamente a água, sais solúveis, gases presentes na atmosfera, seres vivos, temperatura, vento e gelo, que conseqüentemente induzem às alterações da superfície e a perda de material. Na sequência segue uma breve descrição de cada um dos danos mencionados.

i) Alteração de superfície

Depósitos de origem biológica

A presença de vegetação (ver Figura 37) contribui para a deterioração física e química do material, na medida que, a expansão das suas raízes, principalmente as de grande porte, pode ser causadora de fendas e o dióxido de carbono que soltam, ajudado pela água, origina efeitos químicos destruidores principalmente nas rochas calcárias. (Costa, 2009)

Este tipo de anomalia se agrava principalmente pela ausência de limpeza e manutenção da ponte.



Figura 37: Exemplos de vegetação de pequeno e médio porte (Costa, 2009)

Eflorescências

As eflorescências (ver Figura 38) formam-se devido à cristalização de sais, dissolvidos na água ou presentes no próprio material que depois se dissolve com a água. Isto pode levar à desagregação da rocha, devido às pressões de cristalização, hidratação e expansão térmica, mas nos casos mais comuns surgem apenas como manchas embranquecidas, não sendo muito severas para a estrutura. (Silva, 2016)



Figura 38: Exemplos de eflorescências (Catalán e Álamo 2006 apud Lopes, 2012)

A lavagem natural das chuvas nos paramentos expostos ou a lavagem artificial são, em geral, suficientes para eliminar os efeitos destas eflorescências. Porém, se a evaporação das soluções salinas é muito intensa e rápida a cristalização dos sais pode ocorrer sob a superfície induzindo esforços mecânicos de desagregação da pedra. A repetição deste processo com sucessivas dissoluções e recristalizações dos

mesmos sais, que pode ocorrer unicamente devido a variações de humidade relativa, acaba por degradar a pedra. (Costa,2009)

Manchas de humidade, escorrências e depósito de água

As manifestações de humidade (ver Figura 39) nas superfícies exteriores podem ser diversas, entre elas as mais usuais são a existência de manchas de humidade, escorrências, ou a existência de retenção e depósito de água.



Figura 39: Exemplos de manchas de humidade, escorrências e depósitos de água (Costa, 2009)

De acordo com Silva, (2016) nas zonas mais próximas do leito do rio, a alvenaria encontra-se mais enegrecida, devido à constante presença de água que ascende por capilaridade. No entanto, podem ainda ser observadas manchas de escorrência de água quando não existe drenagem suficiente, ou quando estes drenos lançam a água para zonas da estrutura não protegidas. Quanto maior for a desagregação sofrida, mais permite a passagem e infiltração de água no interior da estrutura.

Crostas negras e filmes negros

As crostas negras são depósitos essencialmente constituídos por cristais de gesso e cinzas volantes ricas em enxofre e cálcio resultantes da queima de combustíveis fósseis que cobrem a superfície da alvenaria sobre qualquer tipo de material. (Costa, 2009)

Já os filmes negros são depósitos superficiais que se distinguem das crostas negras por constituírem uma película de espessura muito reduzida essencialmente rica em ferro cuja principal fonte é a poluição atmosférica e eventual ataque de chuvas ácidas

aos minerais de ferro existentes na superfície das pedras (Teles e Begonha, 2005 Apud, Costa, 2009).



Figura 40: Exemplos de Crostas negras e filmes negros (Catalán e Álamo 2006 apud Lopes, 2012)

ii) Perda de material

Os danos relacionados à perda de material são ligeiramente mais graves pois normalmente apresentam um sinal de um processo de deterioração significativa, sendo que as anomalias mais frequentes correspondem à degradação da pedra por erosão, dissolução e desagregação, alveolização, perda de argamassa nas juntas, delaminação, desalinhamentos e destacamentos de pedras dos paramentos de alvenaria e rotura por elementos de vegetação.

Erosão, Dissolução e Desagregação

A erosão é um fenómeno ocasionado por meio da ação combinada da chuva e vento e de partículas sólidas, causando o desgaste progressivo da superfície da pedra de forma que a pedra passa a ter uma textura lisa e arredondada e ainda pode ocorrer a perda da argamassa das juntas. Entretanto os efeitos da erosão dependem das características da rocha, como a sua resistência e dureza superficial.

Este enfraquecimento da superfície, pode favorecer outras anomalias, já que deixa certas aberturas nos elementos, permitindo por exemplo a infiltração de água.

Além da erosão da pedra, também a dissolução é um problema na alvenaria. Através da entrada de água nas pedras, estas vão ficando cada vez com mais espaços vazios, formando-se assim um ciclo de desgaste. (Silva, 2016)

De acordo com Costa (2009), devido à heterogeneidade do material, as partículas da superfície não apresentam todas igual resposta a este fenómeno. Para além disso, a água penetra em diferentes pontos até diferentes profundidades na pedra. Estas duas condições produzem na pedra uma superfície com saliências que facilmente são destruídas desencadeando um processo de degradação sucessivo.

O fenómeno de desagregação corresponde à perda da coesão e separação dos distintos agregados do material pétreo, originando perda de resistência mecânica e fragmentação da sua estrutura, apresentando um aspecto exterior com pequenas fendas e lascas que se separam na superfície exibindo zonas pulverulentas e com coloração diferenciada.

Este tipo de agressão ocorre sobretudo em pontes localizadas na proximidade de núcleos industrializados de atmosfera contaminada ou que envolvam descargas que contaminam a água do rio assim como nas proximidades do mar, onde também o ar contém cloritos, sulfatos e nitratos. (Costa, 2009)



Figura 41: Exemplo de erosão, dissolução e desagregação da alvenaria de pedra (Lopes, 2012)

Alveolização

A alveolização consiste na deterioração que leva à formação de várias cavidades na pedra e apresentam diversos tamanhos e formas, as quais chamamos de alvéolos, normalmente profundos. Na origem destas cavidades pode estar a degradação por sais. Os alvéolos podem estar interligados ou isolados uns dos outros, estando estas aberturas viradas para o exterior e apresentando uma dimensão sub-centimétrica. (Sousa, 2014)



Figura 42: Exemplo de Alveolização (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)

Perda da Argamassa

De acordo com Silva, (2016) as anomalias mais comuns na argamassa são a sua perda de coesão levando até ao seu desprendimento das pedras. Estas anomalias resultam das ações mecânicas da água, chuva e vento, bem como as outras ações às quais as pedras estão igualmente sujeitas, como vegetação, circulação de água e ação dos seres vivos. A qualidade da argamassa é importante para poder amenizar estes efeitos, devendo ser escolhida a argamassa adequada ao ambiente e ao suporte. Em operações de manutenção deve ainda recorrer-se a argamassas isentas de cimento. As argamassas cimentícias são muito fortes, não permitindo a expansão das juntas, e criando relações muito fortes entre os blocos, podendo levar à sua fendilhação/fratura.



Figura 43: Exemplo de perda de argamassa nas juntas (Costa, 2002)

Vale ressaltar que a degradação das juntas de argamassa pode constituir um fator condicionante do comportamento mecânico da alvenaria, na medida em que a área de contacto nas juntas diminui aumentando a tensão efetiva nos pontos de contato que pode eventualmente ser superior à tensão resistente. (Costa, 2009)

iii) Danos resultantes da ação humana

Os danos mais frequentes decorrentes da ação humana nas pontes em arco de alvenaria de pedra correspondem a atos de vandalismo, impacto de veículos ou intervenções de reforço e reabilitação desadequadas.



Figura 44: Exemplos de danos resultantes da ação humana (Catalán e Álamo, 2006, apud Lopes, 2012)

Relativamente às intervenções de reabilitação e reforço, a utilização de cimento Portland pode levar a ocorrência de danos de natureza físico-química devido a incompatibilidade entre os materiais existentes e o novo material adicionado, pelo que ao serem introduzidos na construção, os sais contidos no cimento desencadeiam fenómenos de dissolução e desagregação, que podem levar a construção a um estado de degradação maior após a intervenção. Portanto, as intervenções em estruturas de pedra devem ser realizadas com argamassas quimicamente compatíveis com os materiais existentes, essencialmente à base de cal e pobres em cimento.

De acordo com Costa (2009), além de quimicamente incompatível, a utilização de argamassa de cimento para refechamento das juntas conduz a uma alteração do funcionamento mecânico da alvenaria, que inicialmente se baseava na existência de interfaces fracas entre blocos (com argamassa de reduzido módulo de elasticidade ou mesmo inexistente) e blocos fortes. Após a intervenção com argamassas com elevado módulo de elasticidade as juntas passam a funcionar como elementos fortes.

4.3. Inspeções

4.3.1. Considerações gerais

Para descrever as causas e os efeitos de um determinado dano ou degradação é necessário proceder à análise detalhada dos fenómenos envolvidos na alteração. Para tal, a utilização de meios complementares de observação e de ferramentas de análise estrutural baseada nos resultados das observações, permite quantificar em que medida a anomalia observada afecta o desempenho da estrutura. Assim é possível reunir informação para estabelecer planos de prevenção e reparação eficazes, que devem todavia ser comprovados adoptando meios complementares de observação e controlo, no sentido de avaliar a eficiência das medidas adoptadas. (Costa, 2009)

De acordo com Órban (2004), vários métodos de inspeção têm sido usados nos últimos anos para investigar a condição ou para determinar a estrutura de pontes em arco de alvenaria. O método mais comum ainda é o puro inspeção visual. Ensaios destrutivos também são usados, embora haja uma tendência nos últimos anos para a utilização de técnicas de ensaio não destrutivas.

Os dados recolhidos durante as inspeções são fundamentais para uma correta caracterização do estado da ponte. Consequentemente é comum (e necessário) que toda a informação relativa às pontes seja documentada (em formato de papel ou, preferencialmente, em ficheiros e bases de dados digitais) em arquivos que pertencem à ponte e a acompanha ao longo da sua vida útil, mesmo em caso de alteração da titularidade. (Lopes, 2012)

Na Figura 45 inclui um fluxograma de decisão: Investigar, identificar a causa provável, avaliar a significância e o requisito para ações preventivas ou corretivas. Este é o ponto no ciclo de gestão de ativos em que a avaliação é introduzida. Além de ser capaz de responder às questões fundamentais sobre se uma ponte é “segura para uso” e “adequado à finalidade”, também é importante entender até que ponto as reservas de capacidade são disponíveis para alcançar a definição fundamental de gestão de ativos aqui estabelecida. (CIRIA, 2022)

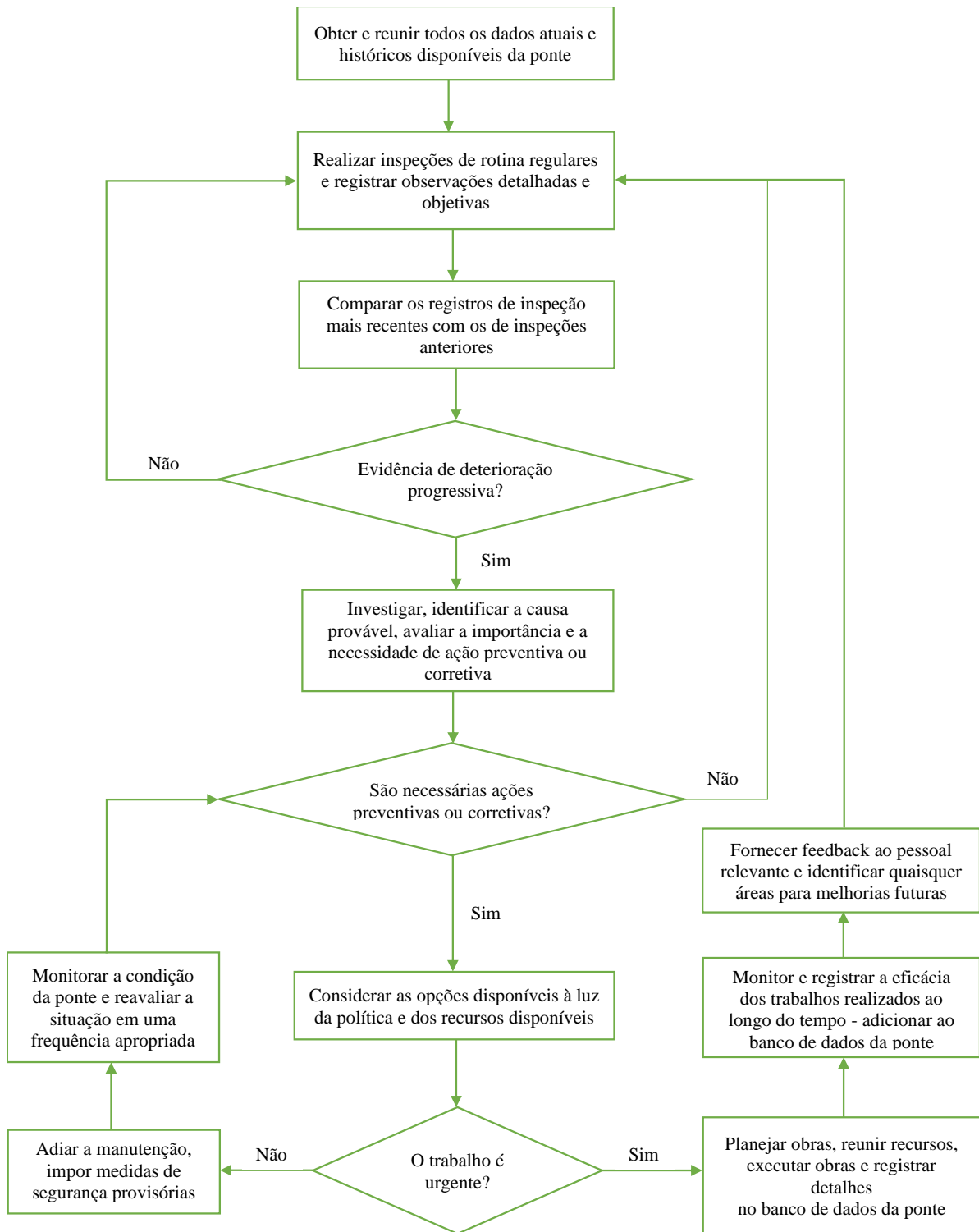


Figura 45: Processo de gerenciamento de manutenção de rotina para uma ponte (adaptado de CIRIA, 2022)

4.3.2. Tipos de inspeção e periodicidade

De acordo com DNIT (2004), as inspeções são classificadas conforme sua periodicidade, definida consoante ao sistema de gestão de obras de arte ou em situações específicas que ocorram incertezas. Portanto apresenta-se as inspeções tradicionais que são: as Inspeções cadastral, rotineira e especial e mais duas outras que são pontuais: a inspeção extraordinária e a intermediária, que serão explanadas a seguir.

- **Inspeção Cadastral**

A Inspeção Cadastral é a primeira inspeção da obra e deve ser efetuada imediatamente após sua conclusão ou assim que ela se incorpora no sistema viário; é também a inspeção que deve ser feita quando há uma alteração sensível na configuração da obra, tais como alargamentos, acréscimos de comprimentos, reforços, mudança no sistema estrutural. A Inspeção Cadastral é uma inspeção amplamente documentada, não só pelos próprios dados da inspeção, mas também pelo projeto completo e por todos os informes construtivos disponíveis e deve ser registrada em amplo documentário fotográfico e com o preenchimento da ficha cadastral.

- *Inspeção Rotineira*

A Inspeção Rotineira é uma inspeção programada, com intervalos adequados, em geral de um a dois anos, e destinada a coletar observações e/ou medições para identificar qualquer anomalia em desenvolvimento ou qualquer alteração em relação à Inspeção Cadastral ou à Inspeção Rotineira anterior.

Este tipo de inspeção é visual, efetuada a partir do estrado, do terreno, do nível d'água ou de plataformas e caminhos permanentes, se existentes; equipamentos especiais somente serão necessários quando se constituírem no único meio de inspecionar os trechos de interesse.

- *Inspeção Especial*

A Inspeção Especial deverá ser efetuada em intervalos máximos de cinco anos, em todas as pontes consideradas excepcionais, pelo seu porte, pelo seu sistema estrutural ou pelo seu comportamento problemático, ou sempre que julgado necessário por uma Inspeção Rotineira, em qualquer obra.

Relatórios e Documentário Fotográfico são atípicos, mas minuciosos e amplos, e ficarão a critério do Inspetor, mas sempre obedecendo à estrutura básica das fichas padronizadas da Inspeção Rotineira.

- *Inspeção Extraordinária*

A Inspeção Extraordinária é uma inspeção não programada, que deve ser efetuada quando ocorrem danos estruturais repentinos, provocados pelo homem ou pelo meio ambiente. A equipa desta Inspeção deve ter discernimento, competência e autoridade para avaliar a gravidade dos danos, limitar as cargas de tráfego ou mesmo, interromper e restabelecer o tráfego, bem como solicitar uma Inspeção Especial.

- *Inspeção Intermediária*

A Inspeção Intermediária é recomendada para monitorar uma anormalidade já suspeitada ou já detectada, tal como um pequeno recalque de fundação, uma erosão incipiente, um encontro parcialmente descalçado, o estado de um determinado elemento estrutural, etc.

4.4. Intervenção em Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra

4.4.1. Considerações gerais

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; (3) os danos existentes e as suas causas; (4) o conhecimento das consequências da intervenção escolhida sobre o comportamento estrutural; (5) os aspetos de ordem social e financeira; (6) período de intervenção e (7) aspetos estéticos. (Morais, 2012)

Sendo que, o reforço pode envolver uma intervenção direta sobre os elementos estruturais de pedra, restabelecendo-lhes ou melhorando as suas capacidades resistentes, ou então prever uma introdução de outros elementos estruturais que promovam os desvios de cargas ou efeitos para os quais os elementos de pedra não se encontram aptos a resistir. Esta última opção, não sendo necessariamente uma intervenção de reforço sobre o material (alvenaria ou cantaria de pedra), não deixa de ser um reforço sobre a estrutura global. (Aredê et al., 2008)

Neste contexto, de acordo com Costa (2009), as intervenções devem ser pouco intrusivas (princípio da intervenção mínima) e as características dos materiais utilizados na reabilitação/ reforço devem assegurar:

- i) Compatibilidade mecânico-estrutural no sentido de minimizar as alterações das características de rigidez e do funcionamento estrutural original;
- ii) Compatibilidade físico-química, para evitar o aparecimento de novas patologias;
- iii) Durabilidade
- iv) Reversibilidade no sentido de se poderem remover os novos elementos resultantes da intervenção, no fim da sua vida útil ou no caso de revelarem sinais de inadequabilidade, sem provocar danos nos materiais originais.

E ainda, de acordo com Órban (2004), uma das causas mais frequentes de danos em pontes de alvenaria é a drenagem inadequada da água, assim as estratégias de reparo devem sempre incluir a restauração da impermeabilização e drenagem sistemas.

4.4.2. Trabalhos de prevenção e manutenção

Os trabalhos de manutenção asseguram a longevidade reduzindo significativamente o desenvolvimento de danos mais graves que podem por em causa a eficiência das pontes de alvenaria de pedra e obrigar a intervenções mais elaboradas e dispendiosas. Sendo que, optar pelos trabalhos de manutenção podem agregar os seguintes benefícios:

- i) Garantem a integridade e a segurança estrutural;
- ii) Asseguram a funcionalidade;
- iii) Preservam o valor patrimonial das Pontes em Alvenaria de Pedra

Consoante o tipo de trabalhos envolvidos consideram-se três tipos de manutenção: (i) manutenção corrente; (ii) manutenção preventiva; e (iii) manutenção especializada. (Morais, 2012). A Tabela 9 apresenta as principais técnicas existentes identificadas pelo tipo de operação de manutenção supracitadas.

Tabela 9: Técnicas de manutenção, podendo ser (i) corrente; (ii) preventiva e (iii) especializada (Morais, 2012) *PAAP: Ponte em arco de alvenaria de Pedra

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

4.4.3. Técnicas de Reabilitação mais frequentes

Neste seguimento, de acordo com o trabalho realizado por Aredê et al. (2008), abaixo estão listadas as técnicas tradicionais ou modernas de reforço passivo ou ativo, ao qual se destacam:

- i) Desmonte e reconstrução pontual de zonas degradadas de alvenaria (ou cantaria), com eventual substituição de elementos em piores condições.
- ii) Refechamento de juntas, removendo e substituindo parcialmente a argamassa que esteja degradada, eventualmente incluindo armadura de reforço na argamassa de substituição das juntas horizontais.
- iii) Injecção de caldas ou resinas fluídas para preencher vazios interiores ou selagem de fissuras de paredes de alvenaria ou outros elementos de características similares.
- iv) Rebocos armados ou encamisamento de paredes de alvenaria, que são técnicas afins, constituindo essencialmente na execução de camadas resistentes à superfície das paredes, dotadas de uma malha de material resistente à tracção (aço, metal distendido, fibra de vidro, polímeros, etc), pregadas à parede e eventualmente ligadas transversalmente de uma face da parede à outra.

- v) Pregagens transversais, destinadas a ligar as diferentes folhas de uma parede composta através de tirantes instalados em furos previamente abertos, eventualmente preenchidos depois com uma argamassa selante, e ancorados nas faces opostas das paredes.
- vi) Aplicação de pré-esforço (externo ou interno) de certos elementos estruturais ou da estrutura como um todo.
- vii) Reforço com materiais compósitos, colados com resinas apropriadas à superfície do elemento a reforçar, seguindo uma ideia muito semelhante à dos rebocos armados.
- viii) Acopolamento de elementos metálicos ou de madeira adicionais, destinados a melhorar a resistência à compressão e ao corte, nomeadamente através dum maior confinamento dos elementos de alvenaria.
- ix) Execução de novos elementos estruturais (metálicos, de madeira, de betão ou mistos) que aliviem os efeitos nefastos sobre a alvenaria ou cantaria de pedra.

Naturalmente que as técnicas referidas podem ser usadas isoladamente ou em conjunto, dependendo da adequabilidade ao caso em apreço.

Em complemento as soluções de reforço mais usadas, são apresentados na Tabela 10 pela UIC (International Union of Railways), cujos resultados foram obtidos mediante a resposta a um inquérito por parte das principais entidades gestoras da rede ferroviária na Europa.

Tabela 10: Principais tipos de intervenções em pontes em arco de alvenaria. (UIC, 2003, apud Costa, 2009)

Técnica de reforço	Frequência de utilização
Refechamento das juntas	Frequente
Reposição de alvenaria	Ocasional
Amarração do arco com barras de aço	Ocasional
Injecções no arco com argamassa à base de cimento/cal	Frequente
Injecções no arco com argamassa à base de resina ou gel	Rara
Impermeabilização do extradorso do arco com injecções à base de cimento/cal	Ocasional
Impermeabilização do extradorso do arco com injecções à base de resina ou gel	Ocasional
Instalação de um novo sistema de drenagem	Ocasional
Betão projectado – camada fina para conservação	Rara
Betão projectado – camada espessa para consolidação	Ocasional
Betão projectado – camada fina e flexível de betão armado ou betão reforçado com fibras para estabilização	Rara
Laje de betão sobre o extradorso do arco para reforço e impermeabilização	Ocasional
Laje de betão plana sobre o arco para degradação das cargas e impermeabilização	Ocasional
Colocação de um elemento de betão sob a ponte	Rara
Estabilização das paredes de tímpanos e dos encontros com tirantes e placas de ancoragem	Ocasional
Pré-esforço transversal com barras de aço	Rara
Injecções nas fundações, encontros (consolidação)	Ocasional
Micro-estacas sob as fundações (estabilização)	Ocasional
Injecção do solo sob as fundações (estabilização)	Rara
Protecção do leito das pontes	Ocasional
Outros (selagem de fendas, telas impermeabilizantes, costura das aduelas de volta ao arco)	Ocasional

Na sequência das respostas obtidas no inquérito foram ainda apresentadas no relatório UIC (2003) as seguintes conclusões:

- São preferidas as estratégias de manutenção e reparação que preservam e exploram a capacidade resistente existente.
- Os trabalhos de consolidação que não têm em consideração os modos fundamentais do comportamento estrutural não são benéficos.

- As principais fontes de problemas nas pontes advêm de inadequado sistemas de drenagem, pelo que as estratégias de reabilitação devem ter especial ênfase na reparação do sistema de impermeabilização e drenagem.
- Os danos mais graves verificados nos arcos são relacionados com problemas nas fundações pelo que estas devem ser alvo de medidas de manutenção e reparação adequadas.
- O restabelecimento da integridade tridimensional da estrutura é um elemento indispensável da reabilitação da ponte de alvenaria uma vez que tem muita influência no comportamento estrutural.
- Os serviços responsáveis pela administração das infra-estruturas ferroviárias necessitam de mais informação sobre técnicas de reparação e consolidação dos arcos bem como de procedimentos para avaliar a sua eficiência.
- Os procedimentos de avaliação do estado das pontes de alvenaria devem permitir responder às seguintes questões: Qual é o efeito da intervenção de reparação e consolidação na capacidade de carga e na durabilidade das estruturas?
- As técnicas de reparação e consolidação devem garantir resistência contra cargas e efeitos futuros (aumento de cargas permanentes, velocidade, efeitos dinâmicos, outros efeitos físico-químicos, etc.).
- As administrações ferroviárias devem recolher informações baseadas em observações ao longo do tempo das estruturas intervencionadas.
- As estratégias de manutenção de pontes em arco de alvenaria devem otimizar o custo do ciclo de vida.

5. ESTUDO DE CASO: A PONTE HINTZE RIBEIRO EM LEIRIA

5.1. Introdução

O estudo de caso que aqui se apresenta é uma ponte de alvenaria de pedra sobre o Rio Lis no centro da cidade de Leiria, conhecida como Ponte Hintze Ribeiro (Figura 46), que exhibe algumas patologias que preocupam alguns utilizadores e a Câmara Municipal de Leiria, entidade responsável pela sua manutenção e conservação.



Figura 46: Ponte Hintze Ribeiro

Apresenta-se nas seções seguintes uma descrição da Ponte Hintze Ribeiro baseada numa ficha de inspeção visual, preenchida aquando da visita, caracterizando os dados

gerais, a sua constituição e geometria, as intervenções e alterações que sofreu ao longo do e as principais patologias. As informações apresentadas neste capítulo suportarão a proposta de reabilitação da Ponte Hintze Ribeiro.

5.2. Localização da Ponte

A Ponte Hintze Ribeiro está localizada sobre o Rio Lis no centro urbano da cidade de Leiria. Trata-se de uma ponte em arco de alvenaria de pedra construída em 1904 sob o comando da Direção das Obras Públicas como consta inscrito na ponte através de uma placa presente com informações.

Na Figura 47 está representada a localização da ponte Hintze Ribeiro, em planta, na Figura 48 e Figura 49 em vista aérea de montante e jusante.



Figura 47: Localização em planta - Ponte Hintze Ribeiro (Google Earth, 2022)



Figura 48: Localização à jusante - Ponte Hintze Ribeiro (Google Earth, 2022)

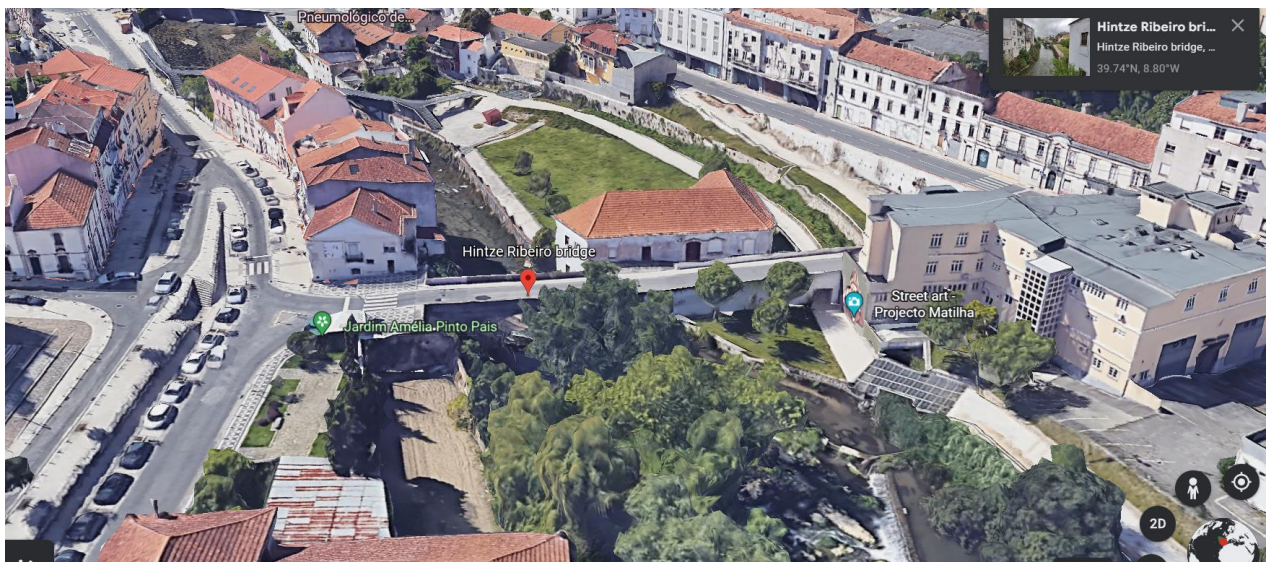


Figura 49: Localização à montante - Ponte Hintze Ribeiro (Google Earth, 2022)

5.3. Descrição da Ponte Hintze Ribeiro

A ponte em estudo é uma ponte construída no início do século XX, tem uma tipologia em arco com estrutura em alvenaria de pedra. Possui um arco de forma segmentada constituído por aduelas de pedra e juntas não preenchidas.

O pilar tem forma retangular com dimensões de 3,60 x 7,00m aproximadamente. A sua fundação é composta por maciço rochoso no leito maior do Rio, como mostra a Figura 50.



Figura 50: Pilar e Fundação – Ponte Hintze Ribeiro

O muro de tímpano é revestido com alvenaria de pedra com as juntas preenchidas como é demonstrado na Figura 51.

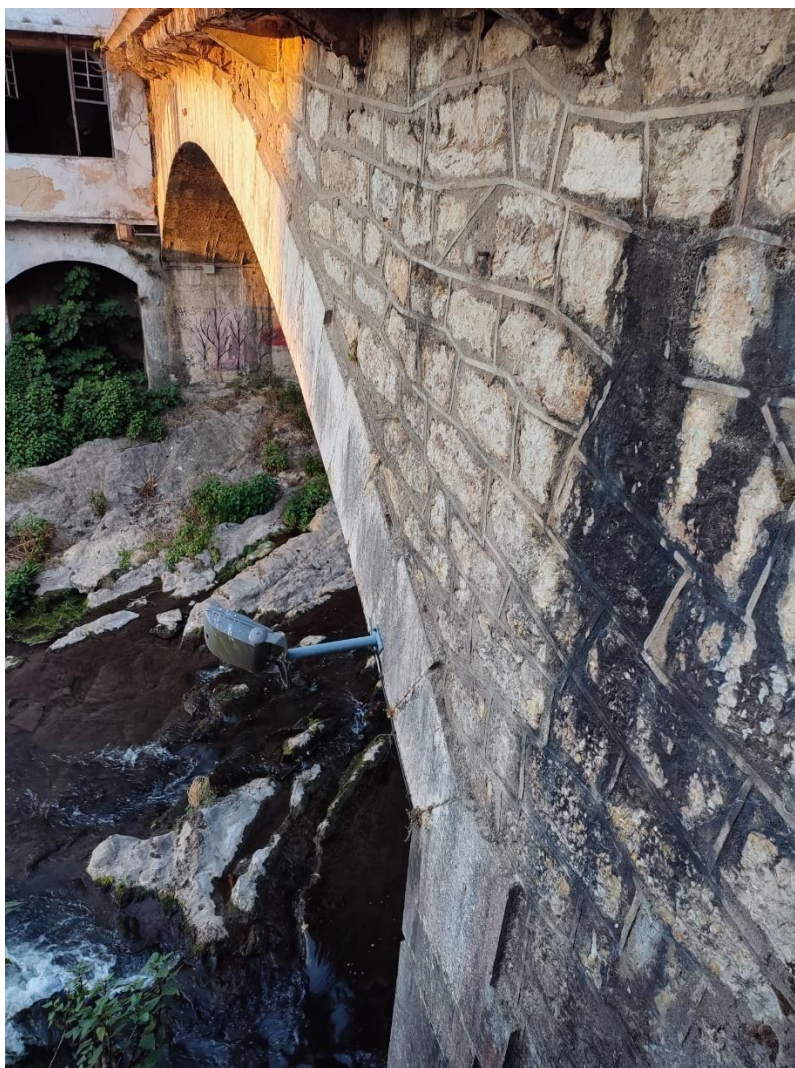


Figura 51: Muro de tímpano - Ponte Hintze Ribeiro

Na parte superior há uma via rodoviária, com uma faixa de rodagem em apenas um sentido. O pavimento é betuminoso com 3,70 metros de largura e aproximadamente 71,60 metros de extensão, sendo que sobre o arco a extensão é 20,60 metros. Possui guarda-corpos em pedra com uma altura de 1,00 metro e uma espessura de 0,25 metros. O pavimento do passeio é composto por duas tipologias de pedra, calçada portuguesa e lajetas de pedra, conforme pode ser observado na Figura 52.

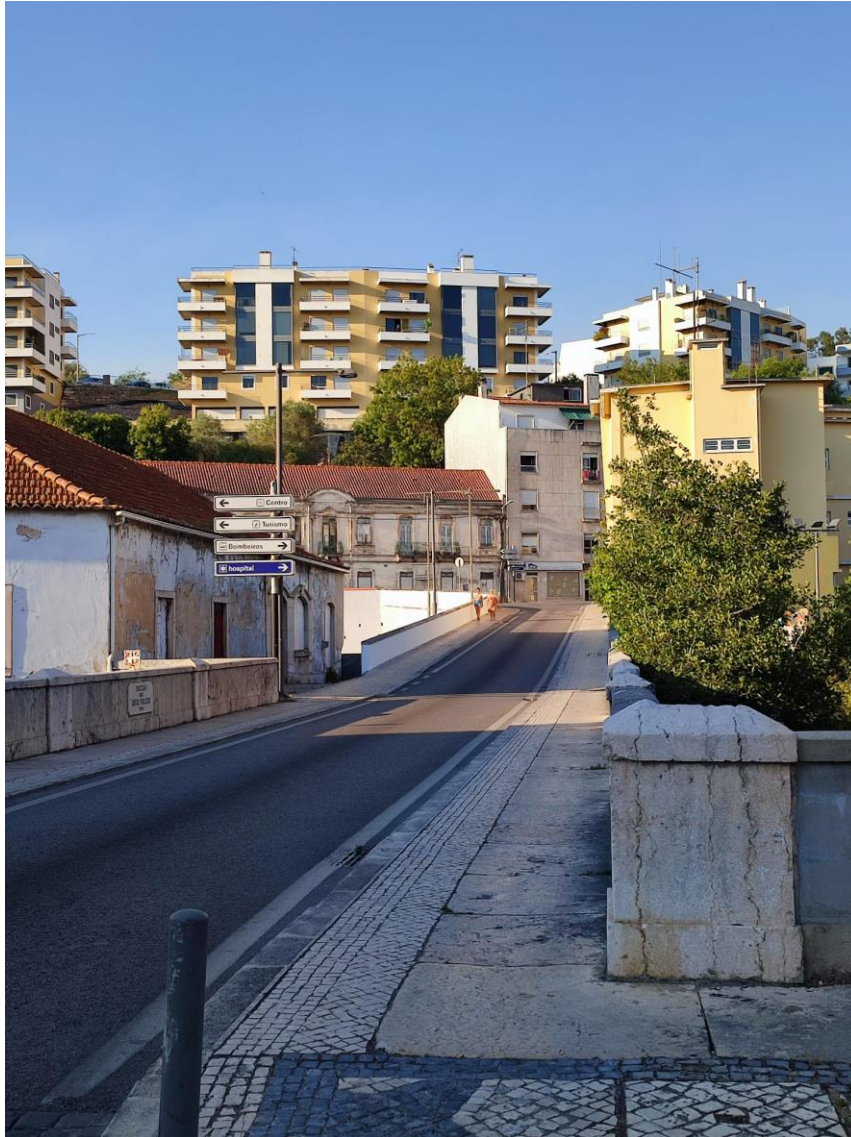


Figura 52: Pavimento, passeio e guarda-corpos - Ponte Hintze Ribeiro

A ponte também possui uma passagem inferior pedonal que faz parte do percurso Lis, a passagem fica localizada no extremo da via, após habitação que pode ser observada na Figura 53.



Figura 53: Passagem inferior pedonal – Ponte Hintze Ribeiro (Autor, 2022)

O arco tem um vão de 16,0 metros e a sua altura máxima (meio vão) é de aproximadamente 6,3 metros, sendo que a flecha tem 2,70 metros. Cada aduela do arco tem uma dimensão média de 0,6 x 1,2 metros.

Para além dos elementos convencionais que constituem uma ponte em arco de alvenaria de pedra, também podemos observar a presença de uma viga de betão armado na longitudinal e de consolas curtas na transversal da ponte, localizadas na parte inferior ao guarda-corpos, como mostra a Figura 54. Estes elementos terão sido incluídos posteriormente aquando de uma intervenção na ponte, onde se procedeu ao alargamento do passeio pedonal.



Figura 54: Arco e Aduela - Ponte Hintze Ribeiro (Autor, 2022)

Na Figura 55 é apresentado o alçado e na Figura 56 a planta da ponte Hintze Ribeiro com as principais dimensões.

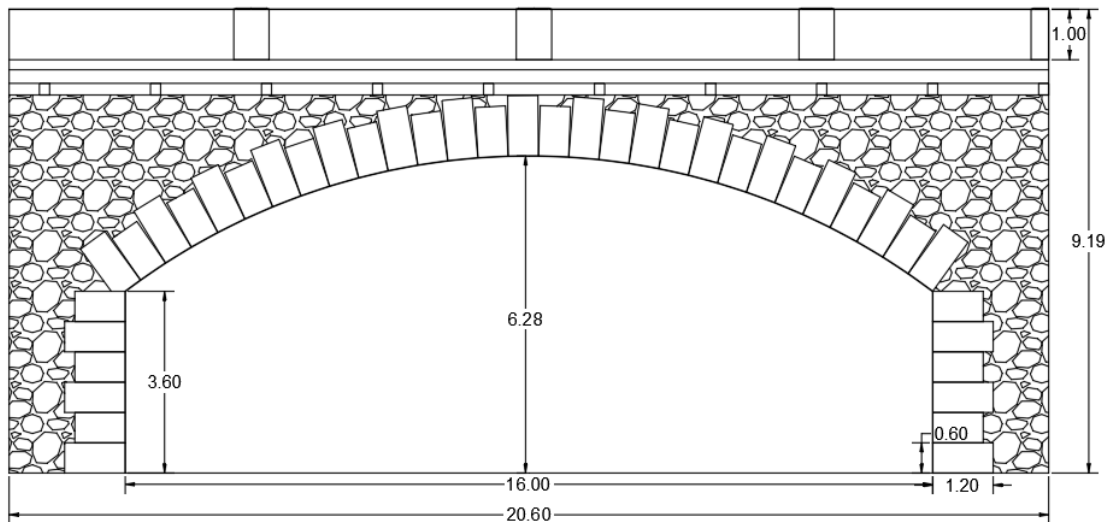


Figura 55: Alçado da Ponte Hintze Ribeiro

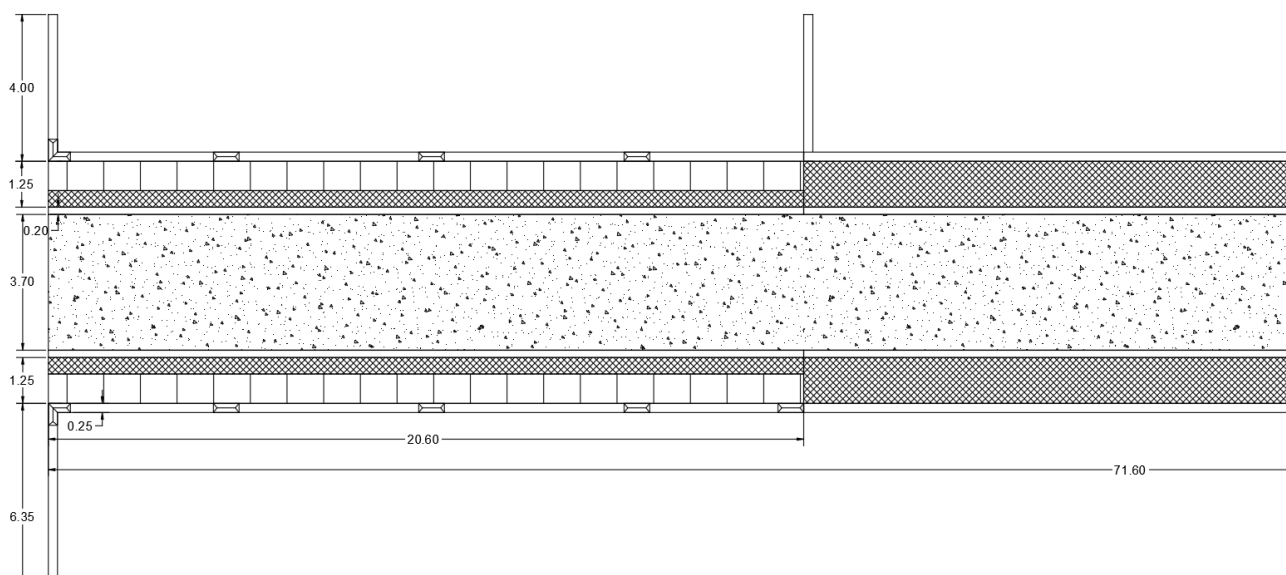


Figura 56: Planta - Ponte Hintze Ribeiro

5.4. Inspeção visual da Ponte Hintze Ribeiro

5.4.1. Ficha de inspeção

O registo da inspeção visual foi realizado através da ficha proposta no “Guião de caracterização e inspeção de Obras de Arte - Estudo de caso aplicado a Leiria” realizado por Ostetto, (2019). Em cada um dos itens analisados classificaram-se os níveis de conservação, numa escala entre 0 e 3, significando respetivamente, sem danos, nível leve, médio e grave de dano, com o objetivo de quantificar a gravidade dos problemas existentes para suportar a decisão da necessidade de intervenção em manutenção.

As planilhas apresentadas por Ostetto, (2019) estão divididas por itens que representam os elementos da estrutura, cada elemento está descrito por um conjunto de patologias possíveis de ocorrer. Três aspetos mais importante de cada patologia devem ser inseridos na ficha, referentes ao seu nível de dano na estrutura, o local onde a anomalia se encontra ou alguma referência breve que ajude a identificar o dano e por fim o peso de importância relativa que essa patologia possui para o elemento, esse peso é definido com a colaboração de profissionais com experiência em inspeções e estruturas.

A metodologia proposta por Ostetto, (2019) apresenta quatro estados para o nível de dano, que estão associados por cores, por ordem crescente do verde, azul, amarelo ao vermelho respetivamente sem danos, dano leve, dano moderado e dano grave. A classificação do grau de conservação do elemento é depois obtida em função do enquadramento de cada anomalia, através da fórmula:

$$G = \frac{\Sigma(N \times P)}{\Sigma P}$$

Em que G se refere ao grau de conservação do elemento, N ao nível da patologia classificada e P o peso desta patologia em relação ao elemento observado.

A autora ainda salienta que caso o elemento em análise tenha dois níveis graves em patologias individuais o seu grau de conservação é automaticamente considerado (pelo menos) no nível de dano médio, porque quando o elemento apresenta nível médio a grave já é considerado como se o mesmo necessite de manutenção e uma atenção especial.

O objetivo desta inspeção é ter um indicador relativamente sobre o estado de conservação e manutenção da ponte, permitindo, a partir da inspeção visual, obter uma visão geral da condição da estrutura e sua respetiva conservação.

No seguimento da inspeção visual e preenchimento da ficha foi realizado um comparativo com a inspeção apresentada por Ostetto em 2019 para a ponte Ponte Hintze Ribeiro.

5.4.2. Inspeção Visual

De forma a avaliar o estado de conservação da Ponte Hintze Ribeiro no geral e em particular de cada um dos seus elementos, foi realizada uma observação minuciosa à ponte e preenchida a ficha de inspeção apresentada no subcapítulo 5.4.1. A seguir serão apresentadas as fichas bem como a descrição das anomalias detetadas aquando da inspeção. Para se obter uma comparação do estado de conservação da ponte Hintze Ribeiro nos últimos anos foi utilizada como base a inspeção realizada por Ostetto em 2019, que se encontra nos anexos do presente trabalho. A ficha de caracterização da ponte também se encontra no anexo A.

- **Pavimento**

O primeiro item a ser inspecionado foi o pavimento. De acordo com a inspeção realizada por Ostetto (2019) (ver Figura 57), podemos observar que o pavimento da Ponte Hintze Ribeiro foi reparado nos últimos dois anos, pois na presente inspeção (ver Figura 58) não apresenta os danos reportados pela autora em 2019.



Figura 57: Danos no pavimento betuminoso observados em inspeção anterior – Ponte Hintze Ribeiro – (Ostetto, 2019)



Figura 58: Pavimento betuminoso reparado – Ponte Hintze Ribeiro

Relativamente ao passeio, este apresenta degradações de nível médio, devido ao desgaste das pedras que compõe o pavimento como pode ser observado na Figura 59. O resultado da inspeção realizada ao pavimento é apresentado na Tabela 11.



Figura 59: Danos no passeio – Desgaste das pedras - Ponte Hintze Ribeiro

Tabela 11: Ficha de inspeção - Pavimento

GUIA DE INSPEÇÃO DE PONTES E VIADUTOS ALVENARIA DE PEDRA

Equipa técnica:

DATA: 21/08/2022

Legenda: Níveis ■ 0 - Sem dano ■ 1 - Leve ■ 2 - Médio ■ 3 - Grave

1 - PAVIMENTO	CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DOS DANOS		Importância Relativa (PESO)
	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	Variação: 0 - 1
Fendilhamento	0		0.2
Fissuras	0		0.1
Exsudação	0		0.1
Desagregação/Desgaste	0		0.15
Delaminação/Destacamento	0		0.1
Deficiência da Junta de Dilatação	0		0.15
Manchas/Subida dos finos	0		0.1
Deformação	0		0.15
Passeios	2	Desgaste das pedras e irregularidades	0.1
Acesso a obra	0		0.05
Grau de conservação do elemento			0.17

De acordo com os dados apontados na presente ficha de inspeção o grau de conservação desse elemento é 0,17, sendo que em 2019 o grau apresentado por Ostetto foi de 1,33, reflexo das intervenções realizadas neste intervalo de tempo.

- **Tabuleiro e Muro de Tímpano**

A inspeção desses itens procedeu-se pela parte inferior da ponte onde pode-se verificar que no tabuleiro há presença de betão armado pelo fato de se observar uma viga longitudinal e consolas curtas, logo abaixo do passeio com as armaduras expostas. Esses elementos apresentam estado grave de conservação, pois foi constatado a perda de recobrimento das armaduras e conseqüentemente corrosão das mesmas como pode ser observado na Figura 60 e na Figura 61.



Figura 60: Vista da viga longitudinal e consolas curtas - Ponte Hintze Ribeiro



Figura 61: Danos no tabuleiro- Armaduras expostas na viga longitudinal e consolas curtas - Ponte Hintze Ribeiro

No muro de tímpano pode-se observar alguns danos como perda de argamassa de vedação na alvenaria de pedra, manchas negras, vegetação e erosão (ver Figura 62c e 62d). Também se observou junto ao encontro, a ausência de alvenaria de pedra que foi reparada com argamassa sem reposição das pedras, como é mostrado na Figura 62a e 62b.



Figura 62: Danos no muro de Tímpano – a) e b) ausência de alvenaria de revestimento, c) manchas negras, d) vegetação - Ponte Hintze Ribeiro

O sistema de drenagem conta com grelhas no pavimento, sendo que elas estão obstruídas com a presença de vegetação e lixo (ver Figura 63).



Figura 63: Danos no sistema de drenagem – Grelhas obstruídas - Ponte Hintze Ribeiro

Tabela 12: Ficha de inspeção – Tabuleiro e Muro de tímpano

2 - TABULEIRO e Tímpano	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	PESO
Fendilhação/Perda de Argamassa	1	Perda de Argamassa	0.2
Fissuras	0		0.15
Delaminação	3	Destacamento do betão ao lado esquerdo	0.15
Erosão/Desagregação da Pedra	1	Erosão	0.2
Deslocamento pedras/Escolregamento do tímpano	1	Ausência de alvenaria de pedras no muro de tímpano lado esquerdo	0.2
Armadura exposta	3	Grande exposição da armadura visível no lado esquerdo	0.15
Manchas/Eflorescência	2	Manchas escuras	0.05
Deficiência da Junta de Dilatação Estrutural	0		0.15
Vegetações/Colonização biológica	2	Vegetações	0.05
Deficiência no Recobrimento	2	Perda parcial do recobrimento das armaduras	0.05
Deficiência do Sistema de drenagem	2	Detritos e vegetações obstruindo as grelhas de pavimento	0.1
Danos devido ao impacto	0		0.05
Grau de conservação do elemento			1.33

Na presente inspeção esse elemento apresenta grau de conservação de 1,33, sendo que em 2019 Ostetto apresentou 0,83. A diferença entre os resultados evidencia a ausência de manutenção nos elementos supracitados.

- **Superestrutura - Intradorso e Aduelas**

Relativamente ao intradorso da ponte observou-se a ausência de argamassa nas juntas de vedação de alguns pontos, bem como a presença de agentes biológicos e eflorescência (ver Figura 64).



Figura 64: Danos no intradorso – a), b) e d) presença de agentes biológicos e eflorescência c) ausência de argamassa nas juntas de vedação - Ponte Hintze Ribeiro

Nas aduelas foi detectado algumas fissuras e manchas negras como é demonstrado na Figura 65.



Figura 65: Danos nas Aduelas - Fissuras e manchas negras - Ponte Hintze Ribeiro

Tabela 13: Ficha de inspeção – Superestrutura

3 -SUPERESTRUTURA (Intradorso e Aduelas)	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	PESO
Fendilhação/Perda de Argamassa	1	Ausência de argamassa de vedação no intradroso e Fissuras nas Aduelas	0.2
Delaminação	0		0.15
Erosão/Desagregação da Pedra	0		0.2
Deslocamento das Pedras/Deformação	0		0.2
Manchas/ Eflorescência	2	Manchas em grande quantidade	0.1
Vegetações/Colonização biológica	1	Colonização biológica no intradorso	0.1
Danos devido ao impacto	0		0.05
Grau de conservação do elemento			0.50

Esse elemento apresenta grau de conservação 0,50 na presente inspeção, e foi apresentado 0,40 na inspeção realizada por Ostetto em 2019. O grau de conservação desse elemento manteve-se quase igual em relação à inspeção realizada em 2019, a constatar que o nível de degradação das pedras não é acelerado.

- **Mesoestrutura – Pilares**

Relativamente à mesoestrutura nomeadamente os pilares pode-se observar danos na base como o descalçamento que pode ser observado na Figura 66c. Além disso, ainda observou-se que o lado onde constam pinturas do tipo “grafites” (ver Figura 66d), possui uma camada de argamassa sobre a alvenaria de pedra, sendo que o outro pilar mantém-se o revestimento original, no qual detetou-se a presença de manchas negras e colonização biológica (ver Figura 66a e 66b).



Figura 66: Danos nos pilares - Ponte Hintze Ribeiro

Tabela 14: Ficha de Inspeção - Mesoestrutura

4 - MESOESTRUTURA (Pilares)	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	PESO
Fendilhação/Perda de Argamassa	0		0.15
Delaminação	0		0.1
Erosão/Desagregação da Pedra	1	Erosão	0.15
Deslocamento das Pedras/Deformação	0		0.1
Manchas/Eflorescência	2	Manchas negras e pichações	0.05
Vegetações/Colonização biológica	2	Vegetações e colonização biológica	0.05
Deficiência nos Encontros	0		0.1
Assentamento	0		0.15
Descalçamento/Acúmulo de detritos/Escoamento	2	Descalçamento	0.1
Danos devido ao impacto	0		0.05
Grau de conservação do elemento			0.55

Esse elemento apresenta grau de conservação 0,55 na presente inspeção, sendo que também foi apresentado 0,55 na inspeção realizada por Ostetto em 2019. O grau de conservação desse elemento não houve alteração em comparação com inspeção realizada em 2019, portanto constatou-se que não houveram reparações nesse período, bem como os danos não se agravaram.

- **Infraestrutura**

Ao nível das fundações não foi possível observar danos por meio da inspeção visual, visto que as fundações são em maciço rochoso e visualmente não apresenta deficiências como pode-se observar na Figura 67.



Figura 67: Fundações - Ponte Hintze Ribeiro – (Autor, 2022)

Tabela 15: Ficha de Inspeção - Infraestrutura

5 - INFRAESTRUTURA	CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DOS DANOS		Importância Relativa (PESO)
	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	Variação: 0 - 1
Deslocamento de Fundação	0		0.4
Erosão Terreno de Fundação	0		0.3
Estacas Desenterradas	0		0.3
Grau de conservação do elemento			0.00

Esse elemento apresenta grau de conservação 0,00. Na inspeção realizada por Ostetto em 2019 obteve-se o mesmo resultado.

- **Segurança**

No item segurança nomeadamente os guarda-corpos os danos detetados são de nível grave, pois apresentam fissuras e degradações de grande porte como é apresentado na Figura 68.



Figura 68: Danos nos Guarda-corpos - Fissuras e degradações nas pedras - Ponte Hintze Ribeiro

Vale a pena salientar que em algumas localizações observou-se que as pedras foram substituídas por peças de pedra do mesmo tipo das originais e em outros substituídas por muro de blocos de betão com reboco de argamassa. Ainda em outros casos apenas reparadas pontualmente com argamassa como pode ser observado na Figura 69.



Figura 69: Guarda-corpos reparados – a) e b) substituição por muro de blocos de betão com reboco de argamassa, c) reparo pontual com argamassa, d) substituição por pedra do mesmo tipo das originais - Ponte Hintze Ribeiro

Tabela 16: Ficha de Inspeção - Segurança

6 - SEGURANÇA	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	PESO
Deficiência no Guarda-corpo	2	Fissuras, desagregações e manchas	0.35
Deficiência na Defesa	0		0.2
Deficiência de Iluminação	0		0.15
Deficiência de Sinalização	0		0.15
Marcas de Acidentes na via	0		0.15
Grau de conservação do elemento			0.70

Esse elemento apresenta grau de conservação 0,70 na presente inspeção, e foi também apresentado 0,70 na inspeção realizada por Ostetto em 2019. Esse elemento apresenta mesmo grau de conservação da inspeção anterior.

5.4.3. Considerações finais

De acordo com os resultados obtidos de cada elemento nas fichas de inspeção foi realizada uma classificação geral do grau de conservação que pode ser observado na Tabela 17.

Tabela 17: Classificação final – Ponte Hintze Ribeiro

Conservação final: Alv. De Pedra		
Item	Grau	Grau final
1	0.17	0.49
2	1.33	
3	0.50	
4	0.55	
5	0.00	
6	0.70	
7	0.00	

Os itens de cor amarela merecem uma atenção especial, pois apontam um nível de dano médio considerado como um alerta para manutenção, reparações e inspeções mais específicas nos elementos e patologias identificados (Ostetto, 2019).

Na Tabela 18 é apresentada a classificação final da inspeção realizada por Ostetto em 2019.

Tabela 18: Classificação final apresentada na inspeção realizada por Ostetto (2019)

Conservação final: Alv. De Pedra		
Item	Grau	Grau final
1	1.33	0.57
2	0.83	
3	0.40	
4	0.55	
5	0.00	
6	0.70	
7	0.00	

Num panorama geral a ponte apresenta nível de dano médio, sendo que em termos de comparação em 2019 foi apresentado um nível de dano leve, como pode ser observado na Tabela 18. Pelo que podemos observar o único elemento reparado foi o pavimento betuminoso, sendo que no que diz respeito aos demais elementos não houveram reparações, portanto o nível de danos agravou-se ao longo do tempo entre uma inspeção e outra.

A ter em conta que o nível de danos atual é médio, este pode ser considerado como um indicativo de alerta, pois põe em causa principalmente a segurança dos utilizadores do passeio pedonal. Portanto é indicado que esses elementos sejam sujeitos a manutenções e reparações a curto prazo para que se possa minimizar os danos futuros e garantir o bom funcionamento para todos os utilizadores.

6. PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO NA PONTE HINTZE RIBEIRO

6.1. Considerações iniciais

No seguimento dos resultados apresentados na inspeção visual, neste subcapítulo serão propostas soluções de intervenção para as anomalias detetadas, com atenção principal para as que apresentam maior grau de degradação.

Os danos observados na ponte denotam a falta de um plano de manutenção e inspeção associado às ações degradantes. Recomenda-se assim, seguir um adequado plano de manutenção para pontes de alvenaria de pedra.

As soluções a serem apresentadas foram pensadas de modo a priorizar a aplicação de métodos menos invasivos, de forma que não se altere o aspeto da obra de arte e a serem economicamente viáveis.

6.2. Propostas de trabalhos de manutenção

Pavimento

- i- Reparação e limpeza dos elementos de pedra que constituem a calçada do passeio pedonal.

Tabuleiro e muro de tímpano

- i- Limpeza dos elementos de alvenaria de modo a remover a vegetação e raízes; as eflorescências e manchas de humidade e as crostas negras e os filmes negros.
- ii- Limpeza do sistema de drenagem de águas pluviais, de modo a desobstruir as grelhas do pavimento e de forma a prevenir a infiltração de água no muro de tímpano e evitar o aparecimento de novas manchas de humidade, eflorescências, crostas negras e filmes negros.
- iii- Recomenda-se a reposição das unidades de alvenaria destacadas no muro de tímpano.

- iv- Reposição de argamassa nas juntas de vedação em determinadas zonas do intradorso.

Pilares

- i- Limpeza/Pintura dos pilares de forma a remover as pinturas existentes, manchas de humidade, crostas negras e filmes negros.

Guarda-corpos

- i- Recomenda-se substituir os elementos de pedra que se encontram muito degradados, com fissuras ou lascados.

6.3. Propostas de reabilitação

Tal como verificado na inspeção visual, na parte inferior do tabuleiro da ponte Hintze Ribeiro apresenta anomalias nas vigas que sustentam o guarda-corpos. Portanto, como forma de sanar o problema, propõe-se duas soluções de reforço:

- 1- Substituição da viga na longitudinal e das consolas curtas por perfis metálicos;
- 2- Substituição da viga na longitudinal e das consolas curtas por cantoneiras metálicas.

Para o dimensionamento das soluções apresentadas as ações consideradas foram: o peso próprio da estrutura metálica e o peso dos elementos de pedra que estão sobre esta estrutura e salientes relativamente ao plano vertical dos tímpanos. Para o cálculo não foram consideradas sobrecargas explícitas. Tratando-se apenas de parte do passeio pedonal e do guarda-corpos, e dada a margem de segurança admitida para as soluções (ver secções seguintes), o peso dos utilizadores têm um impacto irrelevante no contexto geral.

6.3.1. Proposta 1: Perfis metálicos

Foi considerada uma viga longitudinal de 20,60 metros e 10 apoios na transversal com espaçamento de 2 metros entre os mesmos. Na Figura 70 é apresentada uma representação esquemática da proposta.

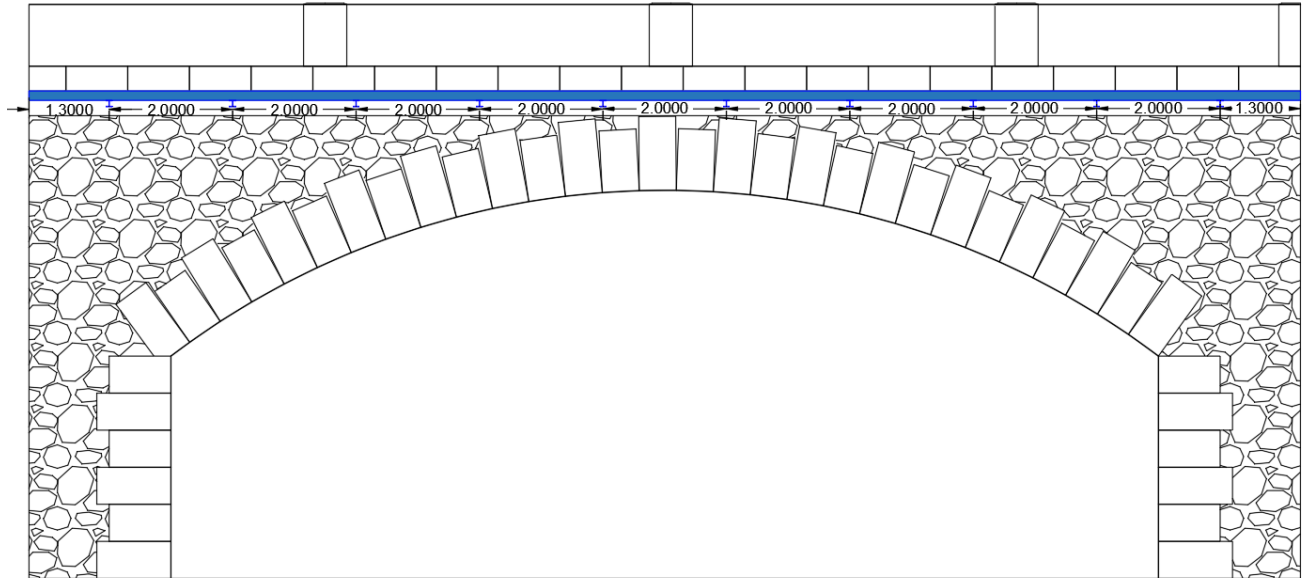


Figura 70: Representação esquemática da proposta nº1 – Vigas metálicas

Na Figura 71 é representado o corte transversal dos elementos de pedra, nomeadamente, guarda-corpos e lajeta, que estão salientes do plano vertical do muro de tímpano.

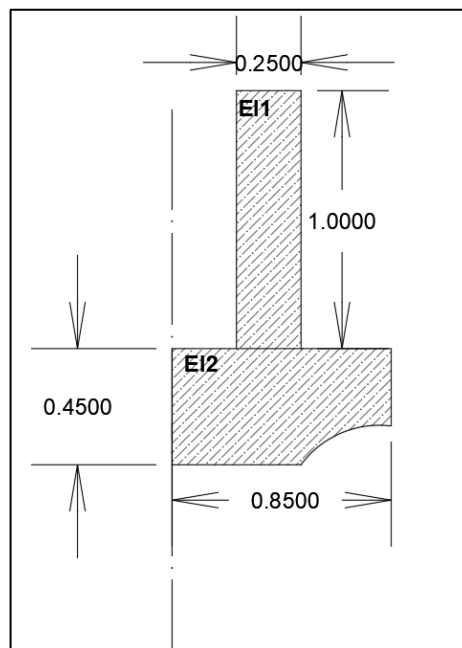


Figura 71: Corte transversal - Elementos de pedra salientes do plano vertical do muro de tímpano

- *Pré-dimensionamento da viga longitudinal*

Para o pré-dimensionamento da viga, inicialmente calculou-se as ações relativas aos elementos de pedra indicados na Figura 71 como E11 e E12, através da expressão:

$$G = a \times b \times \gamma$$

Em que:

G: ações

a e *b*: dimensões dos elementos;

γ: peso específico do material.

Portanto, calculou-se as ações *G* para *E11* e *E12*, respectivamente:

$$GE11 = 1 \times 0,25 \times 26,5 = 6,625 \text{ kN/m}$$

$$GE12 = 0,45 \times 0,85 \times 26,5 = 10,13 \text{ kN/m}$$

De seguida, calculou-se a força de reação *R*_I, que será assegurada pela viga longitudinal no elemento de pedra.

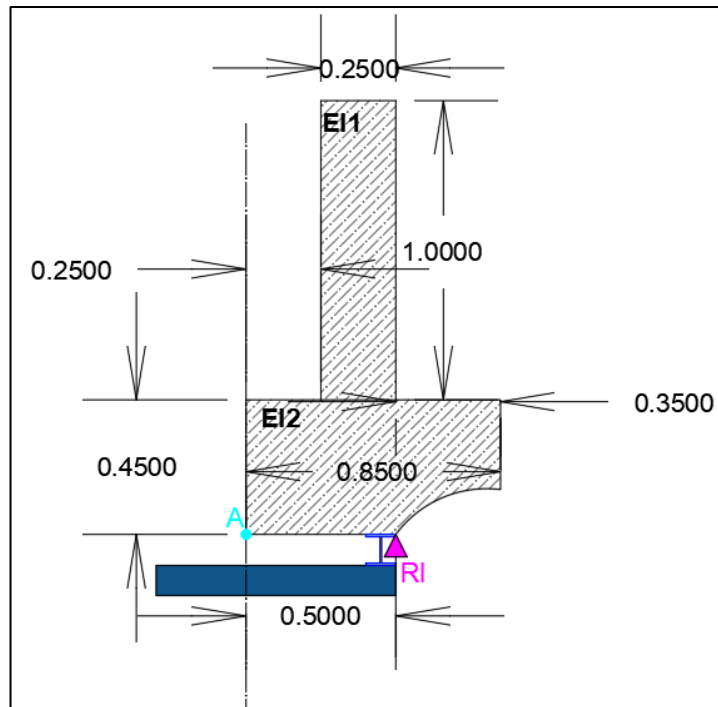


Figura 72: Representação esquemática para cálculo da reação no apoio

Através do cálculo do momento em relação ao ponto A, indicado na Figura 72, assumindo o sentido anti-horário como positivo, obtemos a reação RI .

$$D \times RI - (GEI1 \times d1 + GEI2 \times d2) = 0$$

Em que:

D : Distância de RI até o ponto A;

RI : Força de reação dos apoios na viga longitudinal;

$GEI1$ e $GEI2$: Ações

$d1$ e $d2$: Distância do centro dos elementos $EI1$ e $EI2$, respectivamente, até o ponto A.

Portanto calculou-se:

$$RI = \frac{(6,625 \times 0,375 + 10,13 \times 0,425)}{0,5} = 13,60 \text{ KN/m}$$

Sendo RI a força de reação ao peso do elementos de pedra sobre a viga longitudinal e a força sobre a viga é dada pelo mesmo valor em módulo atuando em sentido contrário.

Portanto, essa força foi utilizada no cálculo dos momentos que atuam sobre a viga longitudinal, ao qual foi considerado encastramento nas extremidades e dez apoios com espaçamento de 2 metros ao longo da viga. O cálculo encontra-se no anexo D, do presente trabalho, onde se registou um momento máximo de:

$$M_{\text{máx}}: -4,79 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Antes de proceder ao cálculo do módulo de flexão da viga, foi calculada a tensão limite para o aço S355 com base nos fatores de segurança recomendados pelo Eurocódigo 3.

Sendo assim temos:

$$F_{yd} = \frac{F_{yk}}{\gamma_s}$$

Em que:

F_{yk}: Valor da tensão característica do aço

γ_s: Fator de segurança do aço

F_{yd}: Valor da tensão de cedência do aço

$$F_{yd} = \frac{355}{1,15} = 308,7 \text{ Mpa}$$

Por fim, foi calculado o módulo de flexão, que pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

Em que:

W – módulo de flexão

M – Momento máximo

σ – Tensão limite

$$308,7 = \frac{4,79}{W}$$

$$W = 15,51 \text{ cm}^3$$

Com esse valor obtido, foi selecionado no catálogo da Arcelor Mittal a Viga HE 100 AA. Nota-se que esta viga supera substancialmente os requisitos de resistência. No entanto optou-se por esta solução para garantir alguma compatibilidade arquitectónica com a estrutura existente. Na Tabela 19 é apresentado um resumo das informações mais relevantes da viga selecionada.

Tabela 19: Informações da viga selecionada (adaptado do catálogo ArcelorMittal)

VIGA HE 100 AA				
G (kg/m)	h (mm)	b (mm)	A (cm ²)	W _{el} (cm ³)
12,2	91,0	100,0	15,6	51,97

Portanto, a soma das ações nomeadamente peso dos elementos de pedra e peso próprio da viga é igual a:

$$Gt = 13,60 + 0,122 = 13,72 \text{ kN/m.}$$

Com o valor das ações acrescido do peso da viga, os cálculos dos momentos que atuam sobre a viga foi repetido (ver anexo E), tendo-se obtido um momento máximo:

$$M_{\text{máx}} = -4,83 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Finalmente, calculou-se o W através do valor obtido de momento máximo e do valor de tensão máximo para o material obtido anteriormente:

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

$$308,7 = \frac{4,83}{W}$$

$$W = 15,64 \text{ cm}^3$$

Portanto, sendo W_{ef} da viga selecionado igual a $51,97 \text{ cm}^3$, sendo maior que o valor do módulo de flexão que necessitamos, portanto a viga longitudinal selecionada (HE 100 AA) satisfaz as condições necessárias para ser utilizada.

- *Pré-dimensionamento das vigas transversais*

Para o cálculo das vigas transversais utilizou-se o mesmo procedimento descrito anteriormente.

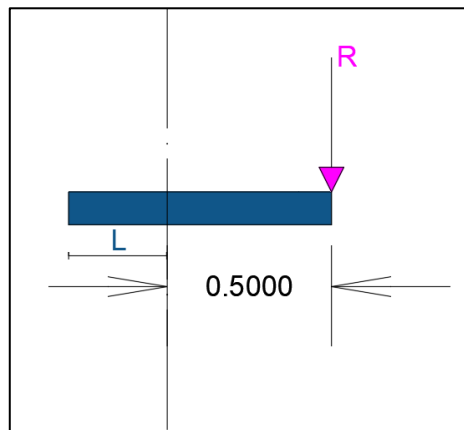


Figura 73: Representação esquemática para cálculo do momento da viga transversal

Portanto, o momento máximo é igual a:

$$M_{\text{máx}} = 13,72 \times 0,5 = -6,86 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Então, neste caso o W é igual a:

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

$$308,7 = \frac{6,86}{W}$$

$$W = 22,2 \text{ cm}^3$$

Com esse valor obtido, foi selecionado o mesmo perfil que será utilizado na longitudinal, o HE 100 AA.

Tal como calculado anteriormente, o módulo de flexão da viga selecionada é igual a $W_{ef} = 51,97 \text{ cm}^3$, sendo maior que o valor do módulo de flexão que necessitamos,

portanto a viga transversal selecionada (HE 100AA) satisfaz as condições necessárias para ser utilizada.

Relativamente ao comprimento que deve ser encastrado no muro de tímpano, foi considerado 2x o valor da altura. Este valor permite mobilizar o momento necessário na zona de ligação com a ponte, mas pode ser aumentado em função das condições que forem encontradas na ponte durante as operações de montagem. Portanto:

$$l = 2 \times 0,091 = 0,180 \text{ m}$$

- *Simulação numérica das vigas dimensionadas*

Na sequência do dimensionamento das vigas propostas como medidas de intervenção para a reabilitação da ponte Hintze Ribeiro, foi feita uma simulação numérica utilizando o software *Solidworks*, como forma de sustentar e validar os cálculos apresentados anteriormente.

O modelo utilizado foi do tipo Linear Elastic Isotropic (Solid), com o material Aço S355N e módulo de elasticidade $2,10 \times 10^{11}$, sendo que a descrição completa das propriedades do material está no Anexo F.

As ações consideradas foram os elementos de pedra salientes do plano vertical do muro tímpano e o peso próprio da viga: $Gt = 13,60 + 0,122 = 13,72 \text{ kN/m}$

A viga longitudinal foi considerada encastrada nas extremidades e apoiada nas 10 vigas transversais com espaçamento de 2 metros. Sendo que, as vigas transversais estão escastradas no plano vertical.

Na Figura 74 é apresentado os resultados da distribuição de tensões nas vigas.

Model name: Montagem_Lateral
Study name: Static 2(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1

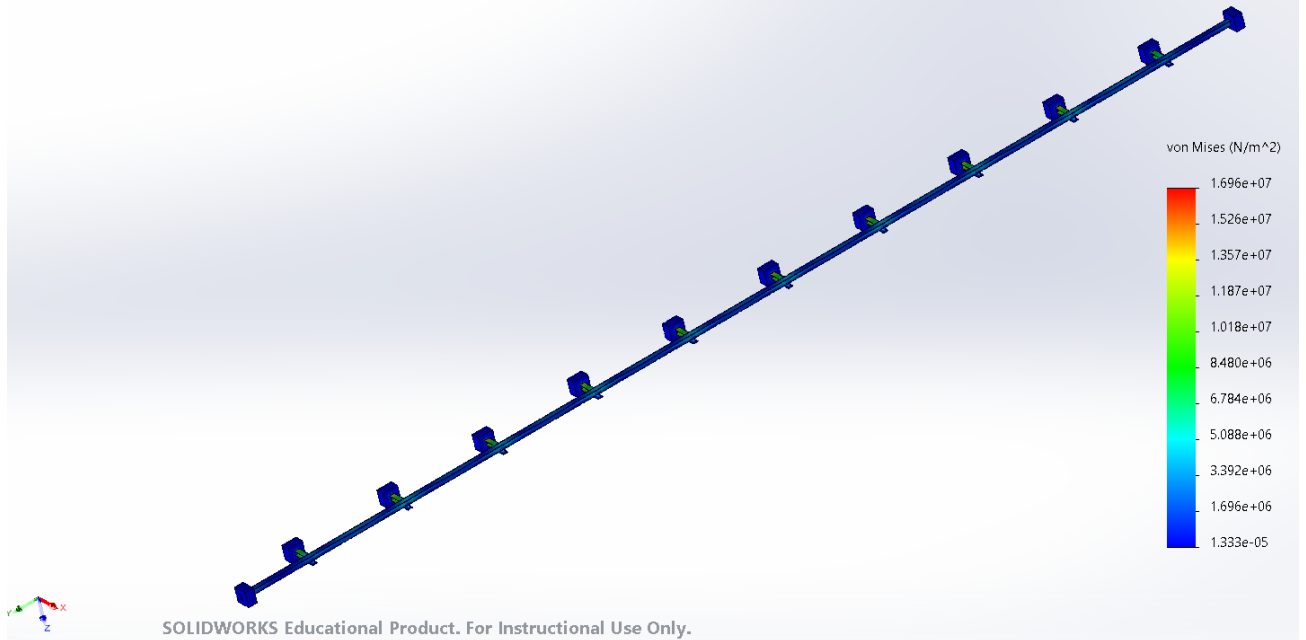


Figura 74: Resultado da distribuição de tensões nas vigas

Os pontos mais críticos, são apresentados nas vigas transversais, em que a máxima tensão que ocorre é $16,9 \text{ Mpa}$, bastante inferior à tensão admissível do material igual a $308,7 \text{ Mpa}$, o que garante que a viga selecionada cumpre os requisitos do projeto com margem de segurança.

Model name: Montagem_Lateral
Study name: Static 2(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1

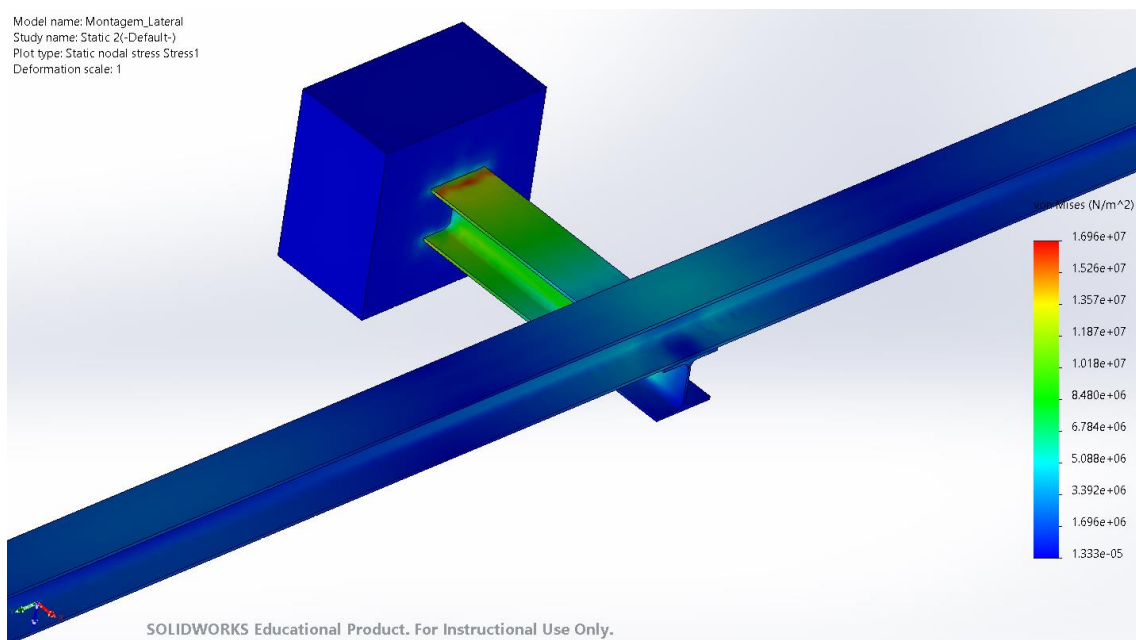


Figura 75: Resultado da distribuição de tensões na viga transversal

Na Figura 76 são apresentados os resultados dos deslocamentos verticais ao longo da viga, sendo o máximo deslocamento observado igual a 0.249 mm, e portanto bastante inferior a $L/500$ (4mm), assegurando a estabilidade dos elementos de pedra existentes.

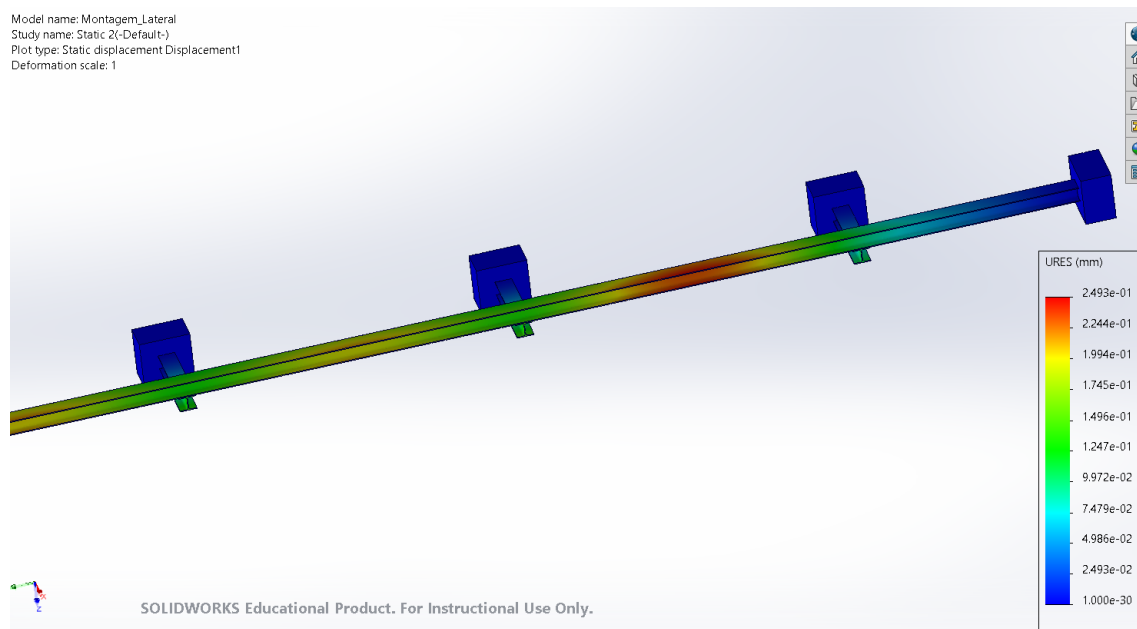


Figura 76: Resultado dos deslocamentos ao longo da viga

6.3.2. Proposta 2: Cantoneiras metálicas

Para essa proposta foi considerada uma cantoneira com lagura de 12,5 cm, com 4 furos para fixação no muro de tímpano. A disposição das cantoneiras ficará com um espaçamento de 40 cm, de forma a assegurar que cada lajeta de pedra com 1 metro, terá pelo menos 2 apoios. Na Figura 77 é apresentada uma representação esquemática da proposta supracitada.

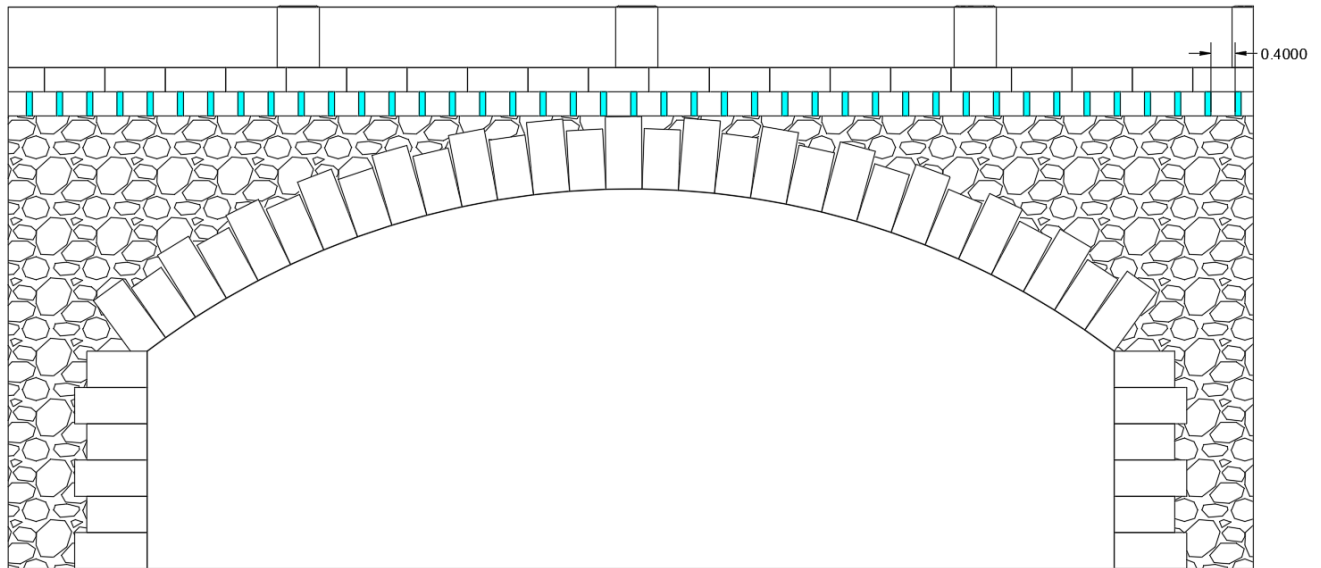


Figura 77: Representação esquemática da proposta nº 2 – Cantoneiras

Na Figura 78 é apresentada uma representação do perfil transversal da cantoneira com as dimensões consideradas.

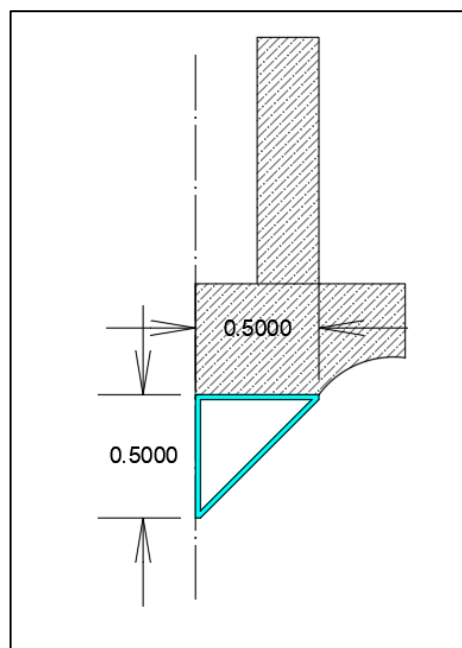


Figura 78: Representação esquemática da cantoneira na transversal

Entretanto, foi realizada uma simulação numérica utilizando o software *Solidworks*, de forma a validar o esquema de disposição das cantoneiras, bem como as dimensões e o material proposto.

Neste caso, foi considerada as mesmas informações utilizadas na simulação das vigas (proposta 1), nomeadamente no que diz respeito ao peso dos elementos de pedra e as propriedades do aço.

Na Figura 79 é apresentado o resultado das tensões nas cantoneiras.

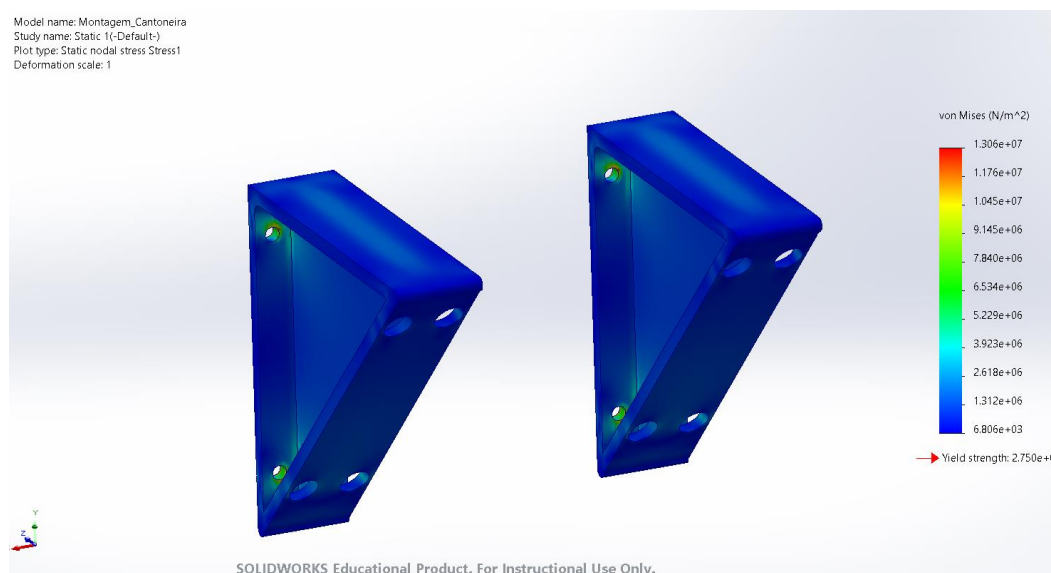


Figura 79: Resultado da distribuição de tensões nas cantoneiras

De acordo com a simulação realizada os pontos mais críticos apresentam uma tensão máxima de 13,06 *Mpa*, bastante inferior à tensão admissível do material é igual a 308,7 *Mpa*, o que garante que a cantoneira selecionada cumpre os requisitos do projeto com elevada margem de segurança.

6.4. Considerações finais

Relativamente às propostas de reabilitação apresentadas, é importante salientar as vantagens e desvantagens em cada opção, para que se tenha um panorama mais completo diante da escolha.

1º opção – Vigas metálicas

Vantagens

- Pouca interferência na estética atual da ponte;

- Serão utilizadas as mesmas localizações das consolas curtas de betão armado existentes para a substituição das vigas transversal;

Desvantagens

- É necessário escoramento dos elementos salientes do plano vertical do muro de tímpano para realizar a substituição, uma vez que nesse caso, não é possível se fazer por trechos;
- Mais custosa em relação a 2º opção.

2º opção – Cantoneiras metálicas

Vantagens

- É possível realizar os trabalhos por trechos, pelo que são peças individuais e facilita a aplicação das mesmas;
- Economicamente mais viável em relação a 1º opção;

Desvantagens

- Gera mudanças na estética original da ponte;

Portanto, cabe à entidade responsável pela gestão da ponte Hintze Ribeiro avaliar qual das opções supracitadas se enquadra melhor dentro do propósito que se pretende alcançar.

Adicionalmente, vale ressaltar a importância dos trabalhos de manutenção listados no subcapítulo 6.2, de forma a evitar o agravamento das patologias identificadas e consequentemente danos mais severos que podem gerar gastos mais elevados para reparação e ainda riscos aos utilizadores.

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. Considerações finais

No seguimento do término da presente dissertação, acerca do caso de estudo da ponte em arco de alvenaria de pedra Hintze Ribeiro em Leiria, é possível concluir que é particularmente importante implementar um sistema de gestão de obras de arte, que garanta um plano de inspeção, manutenção e reabilitação, no sentido de minimizar os danos e custos a longo prazo e acima de tudo garantir a segurança para os utilizadores. Sendo que, é indispensável colocar a manutenção em primeiro plano, como pilar fundamental num sistema de gestão de obras de arte.

No caso de estudo em questão a identificação das patologias foi obtida através de inspeção visual. Dentre os tipos de inspeções apresentados no presente trabalho, destaca-se a inspeção rotineira, pois trata-se de uma inspeção de menor custo por ser visual e se obtém maior quantidade de informação relevante, de forma que este é o tipo de inspeção mais utilizado.

Em geral, a realização de inspeções deve ser precedida, entre outras coisas, da existência de um inventário atualizado com inspeções anteriores, sendo uma condição importante para o processo. No presente estudo, foi possível identificar uma lacuna relativamente às informações relevantes da ponte como: projeto inicial, intervenções ao longo do tempo, inspeções anteriores, pelo que, não foi possível encontrar tais registos nas entidades responsáveis. Portanto, neste caso, foi utilizado como base de comparação a inspeção realizada no Guião de caracterização e inspeção de Obras de Arte - Estudo de caso aplicado a Leiria” - realizado por Ostetto, (2019). Ao qual pode-se concluir o seguinte:

- A única intervenção observada foi ao nível do pavimento betuminoso, que foi reparado nesse intervalo de tempo entre uma inspeção e outra;
- Ao nível dos elementos de pedra que constituem a ponte, foi possível constatar que os danos não se agravaram em ritmo acelerado, comprovando que a pedra é um excelente material construtivo no que diz respeito à resistência ao longo do tempo;

- Relativamente aos elementos estruturais, como o arco, pilares e fundações não foi observado nenhum dano de origem estrutural. Tanto na presente inspeção, como na anterior as patologias observadas foram semelhantes, nomeadamente: agentes biológicos, eflorescência, vegetação, manchas negras. Sendo que, não se observou nenhuma intervenção no sentido de manutenção relativa às patologias identificadas;
- O maior problema observado foi relativamente às vigas de betão armado que estão localizadas abaixo do guarda-corpos saliente do plano vertical do muro de tímpano. Esse item recebeu maior atenção, pois as armaduras estão expostas e conseqüentemente corroídas, sendo que esse tipo de patologia se agrava mais rapidamente ao longo do tempo.

É importante salientar que, quando se faz necessário intervenções de reabilitação e reforço é fundamental lembrar que a maioria das pontes de alvenaria de pedra foram construídas em várias épocas e conseqüentemente com diferentes técnicas construtivas. Portanto, esse tipo de estrutura exige precaução quando se trata de propôr medidas de intervenção, a fim de se garantir o respeito pelo existente e evitar o agravamento de danos no património histórico e cultural. Portanto, o conhecimento científico e técnico se faz essencial para sustentar estratégias de intervenção.

Neste caso, foi proposto duas alternativas de reabilitação, de forma a intervir minimamente no aspeto visual da ponte e a constituir uma solução duradoura e economicamente viável.

7.2. Desenvolvimentos Futuros

No âmbito de desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar um estudo comparativo de viabilidade econômica de projetos de reabilitação, a levar em conta as diversas técnicas construtivas, de forma a comparar as estruturas em elementos de betão armado, aço e/ou madeira, relativamente ao consumo dos materiais, desperdícios, tempo de execução e equipamentos necessários;

- Desenvolver um inventário onde constem informações relevantes da ponte que podem ser encontradas no presente trabalho como: dimensões, levantamento do estado atual da ponte e inspeções. Com uma base de dados mais completa e oficial seria mais fácil obter estes valores, visto que muitas vezes é difícil encontrar tais informações nas entidades responsáveis;
- Atualizar os arquivos da Câmara Municipal de Leiria de forma a otimizar a gestão das suas obras;
- Realizar inspeções e ensaios específicos nos elementos classificados em nível médio afim de obter informações mais específicas para justificar a realização de reabilitação desses itens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ArcelorMittal – Sections and Merchant Bars – Catalog, 2020.

Alves, A. S. C. - *Reabilitação e Reforço de Pontes de Alvenaria* - Dissertação de Mestrado - Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

Arêde, A.; Costa, A.; Guedes, J.; Paupério, E. - *Reforço de Estruturas de Alvenaria de Pedra Contribuições do Ncrep* - FEUP - Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro - Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes, 2008.

Christo, G. R. - *Avaliação do comportamento estrutural da Ponte Pedonal, Ponte Bairro dos Anjos Leiria* - Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Leiria, 2020.

CIRIA - Gilbert, M; Cole, G; Smith, C; Melbourne, C - *Guidance on the assessment of masonry arch bridges* - Londres - UK, 2022.

Cordeiro, P. - *Pontes de Pedra - Estudo de um Caso Prático* - Dissertação de Mestrado - Instituto Politecnico de Viseu, 2014.

Costa, P. M. Q. M. - *Análise da Construção e do Comportamento duma Ponte de Pedra*, Universidade do Porto - Dissertação de Mestrado, 2007.

Costa, C. M. R. – *Análise do Comportamento da Ponte da Lagoncinha sob a Ação do tráfego Rodoviário* - Dissertação de Mestrado - Universidade do Porto, 2002.

Costa, C. M. R. - *Análise numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra* - Dissertação de Doutorado Universidade do Porto, 2009.

Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - *Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias* - Rio de Janeiro, 2ª edição, 2004.

Leonhardt, F. – *Construções de Concreto Vol. 6: Princípios Básicos da Construção de Pontes de Concreto* – Rio De Janeiro, Interciência, 1979.

Léon, J.; Goicolea, J. M. - *Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño* - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (UPM), 2016.

Lopes, N. A. dos S. - *Inspeção de Pontes Ferroviárias em Arcos de Alvenaria* - Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Tomar, 2012.

Matos, A. J. A. V. de - *Inspeção de Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra Baseada no Risco* - Dissertação de Mestrado - Universidade do Minho, 2017.

Morais, M. J. da C. - *Pontes em Arco de Alvenaria - Estudo de um Caso Prático* - Dissertação de Mestrado - Instituto Politecnico de Viseu, 2012.

Orbán, Z. - *Assessment, Reliability And Maintenance Of Masonry Arch Railway Bridges In Europe* – 2004 disponível em: <https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/Assessment,%20Reliability%20and%20Maintenance%20of%20Masonry%20Arch%20Railway%20Bridges%20in%20Europe.pdf>

Ostetto, L. S. - *Guião de caracterização e inspeção de Obras de Arte. Estudo de caso aplicado a Leiria* - Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Leiria, 2019.

Proske, D. and Gelder, P. - *Safety of Historical Stone Arch Bridges* - Springer-Verlag Berlin - Heidelberg, 2009.

Silva, C. A. R. - *Reabilitação de Pontes de Alvenaria de Pedra Estudo Aplicado A Pontes do Concelho de Paredes de Coura* - Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 2016.

Sousa, G. N. A. C. - *Estudo do Comportamento Estrutural de Uma Ponte em Arco* - Dissertação de Mestrado - Universidade do Porto, 2012.

Sousa, R. M. L. de A. e – *Técnicas de reabilitação, conservação e restauro em paramentos de alvenaria de pedra* – Aplicação ao alçado principal da igreja do Carmo de Coimbra - Dissertação de Mestrado - Universidade de Coimbra, 2014.

Vares, R. J. V. - *Avaliação de Segurança de Pontes Existentes de Alvenaria de Pedra com Recurso a Métodos Simplificados - Contribuição para Sistematização de Processos* - Dissertação de Mestrado - Universidade do Porto, 2009.

Vilarinho, B. C. - *Análise Numérica de Pontes de Alvenaria de Pedra: Caso de Estudo da Ponte da Pedra sobre o Rio Tuela* - Dissertação de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa, 2020.

https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Vecchio

https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Carlos

https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_de_Santo_%C3%82ngelo

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ponte_Pietra_\(Verona\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ponte_Pietra_(Verona))

<https://pt.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6tzschthalbr%C3%BCcke>

<https://en.advisor.travel/poi/Sando-Bridge-9017>

http://desciclo.pedia.ws/wiki/Ponte_do_Forth#/media/Arquivo:Forth_Bridge.jpg

ANEXOS

ANEXO A – Ficha de caracterização – Ponte Hintze Ribeiro

FICHA DE CARACTERIZAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS

DATA: 21/08/2022

1- DADOS BÁSICOS	
IDENTIFICAÇÃO/LOCALIZAÇÃO	
Código da Obra: _____	
Nome (Ponte/Viaduto): Ponte Hintze Ribeiro.	
Freguesia: Leiria	Lugar: Ao lado do Jardim da Vala Real.
Entidade Responsável: Câmara Municipal de Leiria Atravessamento: Rio Lis	
Função: Rodoviária	
Possui Projeto: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não Projetista: _____ Arquivo: _____	

2- DADOS SOBRE O TIPO DE ESTRUTURA E MATERIAIS	
Tipologia de ponte: Ponte em arco de alvenaria de pedra	
Tabuleiro: _____	Estrutura: Betão Armado Revestimento: Betuminoso
Superestrutura: Alvenaria de Pedra (Abóbadas)	
Mesoestrutura: _____	Pilares: Alvenaria de Pedra Encontros: Alvenaria de Pedra
Infraestrutura: _____	Fundação: Maciço de Pedra Muro ala: _____

3- DADOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS E ESTRUTURAIIS		
Características da Pista		
Comprimento total (m): 71,60	Espessura da laje: _____	
Largura total da pista (m): 3,70	Largura da faixa de rodagem (m): 3,70	
Vias: 1 Sentidos: 1	Aparelhos de apoio: _____	
Berma: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	Passeio: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Revest.: Calçada Pt. e Lajetas de Pedra.
Largura Berma (m): _____	Passeio (m): 1,45	Material: Pedra.
Drenos: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Guarda Corpo: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Material: _____
Pingadeira <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Defensas: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	Material: _____
Pré-esforço <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	Tipo: <input type="checkbox"/> Pré <input type="checkbox"/> Pós	Observação: _____

Número total de juntas: 2	
Tipo de vedação: <input type="checkbox"/> Nenhuma <input checked="" type="checkbox"/> Tipo: Fechada	
Número de tramos: 1 Tramo 1 (m): 27,0 Tramo 2 (m): _____ Tramo 3 (m): _____ Tramo 4 (m): _____	
Tramo 5 (m): _____ Tramo 6 (m): _____ Tramo 7 (m): _____ Tramo 8 (m): _____	
Extremidades: <input checked="" type="checkbox"/> Encontro <input type="checkbox"/> Balanço <input type="checkbox"/> Laje de aproximação	
Estrutura em contato com a água: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Tipo: <input checked="" type="checkbox"/> Doce <input type="checkbox"/> Salgada

4- OBSERVAÇÕES			
IDADE/SERVIÇO (ano)		INSPEÇÕES (data)	
Construção: 1904	Reparação: _____	Rotina: _____	Especial: _____
Reforço: _____	Reconstrução: _____	Principal: _____	Frequência (anos): _____
Ampliação: _____	Evento Extremo: _____	Sem informação <input checked="" type="checkbox"/>	
CARGAS			
Projeto tipo _____: _____ (_____)		Ponte condicionada: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	
Frequências (Hz)		Ponte fechada: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	
Modos de vibração: 1: _____ 2: _____ 3: _____			

Observações: Monumento na ponte: Direção das Obras Públicas 1904

Figura 80: Ficha de caracterização de pontes e Viadutos (Ostetto, 2019)

ANEXO B – Ficha de inspeção - Ponte Hintze Ribeiro realizada por Ostetto, (2019)

GUIA DE INSPEÇÃO DE PONTES E VIADUTOS ALVENARIA DE PEDRA			
Equipa técnica:		DATA: 01/08/2019	
Legenda: Níveis ■ 0 - Sem dano ■ 1 - Leve ■ 2 - Médio ■ 3 - Grave			
1 - PAVIMENTO	CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DOS DANOS		Importância Relativa (PESO)
	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	Variação: 0 - 1
Fendilhamento	3	Pele de Crocodilo	0.2
Fissuras	0		0.1
Exsudação	0		0.1
Desagregação/Desgaste	2	Desgaste do betuminoso pela via	0.15
Delaminação/Destacamento	2	Peladas	0.1
Deficiência da Junta de Dilatação	0		0.15
Manchas/Subida dos finos	0		0.1
Deformação	2	Rodeiras, ao longo da passagem dos rodados	0.15
Passaios	2	Desagregações e irregularidades	0.1
Acesso a obra	0		0.05
Grau de conservação do elemento			1.33
2 - TABULEIRO e Típano	CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DOS DANOS		Importância Relativa (PESO)
	NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA	PESO
Fendilhação/Perda de Argamassa	1	Perda de Argamassa	0.2
Fissuras	0		0.15
Delaminação	2	Destacamento do betão ao lado esquerdo	0.15
Erosão/Desagregação da Pedra	1	Erosão	0.2
Deslocamento pedras/Escurregamento do tímpano	0		0.2
Armadura exposta	2	Grande exposição ao lado esquerdo	0.15
Manchas/Eflorescência	2	Manchas escuras	0.05
Deficiência da Junta de Dilatação Estrutural	0		0.15
Vegetações/Colonização biológica	1	Vegetações	0.05
Deficiência no Recobrimento	0		0.05
Deficiência do Sistema de drenagem	1	Detritos e vegetações obstruindo as duas drenagens existentes	0.1
Danos devido ao impacto	0		0.05
Grau de conservação do elemento			0.83
3 - SUPERESTRUTURA (Abóbadas)			
NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA		PESO
1	Fendilhações finas		0.2
0			0.15
0			0.2
0			0.2
2	Manchas em grande quantidade		0.1
0			0.1
0			0.05
Grau de conservação do elemento			0.40
4 - MESOESTRUTURA (Pilares e Quebra)			
NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA		PESO
0			0.15
0			0.1
1	Erosão		0.15
0			0.1
2	Manchas e pichações		0.05
2	Vegetações presentes consideráveis		0.05
0			0.1
0			0.15
2	Descaimento		0.1
0			0.05
Grau de conservação do elemento			0.55
6 - SEGURANÇA			
NÍVEL	LOCAL/REFERÊNCIA		PESO
2	Fissuras, desagregações e manchas		0.35
0			0.2
0			0.15
0			0.15
0			0.15
Grau de conservação do elemento			0.70

Figura 81: Fichas de inspeção – Ponte Hintze Ribeiro - realizada por Ostetto (2019)

Item	Grau	Grau final
1	1,33	0,57
2	0,83	
3	0,40	
4	0,55	
5	0,00	
6	0,70	
7	0,00	

Figura 83: Classificação final - Ponte Hintze (Ostetto, 2019)

ANEXO C - Tabelas dos níveis de danos de cada patologia

Elemento: Pavimento

Descrição: Todos os pavimentos em camadas betuminosas

PATOLOGIAS	NÍVEIS DO ESTADO DOS DANOS			
	0 SEM DANO	1 LEVE	2 MÉDIO	3 GRAVE
Fendilhamento	Nenhuma.	Fenda inferior a 2 mm. Malha superior a 20 cm.	Fenda entre 2 e 4 mm. Malha inferior a 20 cm e fenda menores 2 mm; fenda entre 2 e 4 mm para qualquer malha; fenda superior a 4 mm e malha superior a 40 cm.	Fendas graves, de grande dimensão, ramificada com perda de material acompanhada com deformações e desagregações. Malha inferior 40 cm e fendas maiores a 4 mm.
Exsudação	Nenhuma.	Exsudação com largura inferior a 30 cm.	Exsudação com largura entre 30 cm a 100 cm.	Exsudação com largura superior a 100 cm.
Desagregação/ Desgaste/ Peladas	Nenhuma.	Desagregação com largura inferior a 30cm.	Desagregação com largura entre 30cm e 100cm.	Desagregação com largura superior a 100cm.
Deficiência da junta de dilatação	Nenhuma.	Um quarto das juntas sem selagem. Desagregação dos bordos das juntas, afetando um quarto ou com largura inferior a 10cm.	Metade das juntas sem selagem ou com produto envelhecido separado dos bordos. Desagregação em metade da junta ou numa largura entre 10 e 20 cm.	Totalidade das juntas sem selagem ou com produto envelhecido separado dos bordos e com fendas. Desagregação na totalidade da junta ou numa largura superior a 20 cm.
Manchas/Subida dos finos	Nenhuma.	Finos apenas presentes nos bordos das fendas existentes.	Finos abrangendo a zona de passagem dos rodados dos veículos.	Finos abrangendo mais de 75% da largura da via afetada.
Deformação	Nenhuma.	Diferença de nível inferior a 10 mm.	Diferença de nível compreendida entre 10mm e 30mm.	Diferença de nível superior a 30 mm.
Passeios	Boas condições.	Pavimento levemente degradado, com condição de passagem.	Pavimento degradado, com condição de passagem.	Totalmente degradado, com condições de passagem deficiente ou sem condição de passagem.
Acesso a obra	Boa condição, sem desconforto.	Desfasamento perceptível. Desnível inferior a 0,5 cm.	Desfasamento incómodo. Desnível entre 0,5 cm e 1 cm.	Desfasamento muito incómodo. Desnível superior a 1 cm.

Figura 84: Tabela dos níveis de danos no pavimento (Ostetto, 2019)

Elemento: Tabuleiro

Descrição: Tabuleiros em Betão Armado e/ou pré-esforçados.

PATOLOGIAS	NÍVEIS DO ESTADO DOS DANOS			
	0 SEM DANO	1 LEVE	2 MÉDIO	3 GRAVE
Fissuras	Nenhuma ou insignificantes.	Fissuras de largura moderada sem vedação. Fissuras de 0,3 a 1,3 mm de largura. Para elemento pré-esforçado fissuras entre 0,1 a 0,2 mm de largura.	Fissuras largas ou consideradas de padrão pesado. Fissuras maiores que 1,3 mm de largura. Para elemento pré-esforçados fissuras maiores que 0,2 mm de largura.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Desagregação/ Desgaste	Nenhuma.	Quando o agregado grosso é exposto, mas o agregado permanece seguro no betão.	O agregado grosso está solto ou saiu da matriz de concreto devido a abrasão ou desgaste.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Delaminação/ Destacamento	Nenhuma.	Presença de delaminação, com lascas inferiores ou iguais a 25 mm de profundidade, ou ainda, com diâmetro inferior ou igual a 15 cm. Área remendada está sólida.	Lascas maiores do que 25 mm de profundidade ou maior que 15 cm de diâmetro. Área remendada com alguma deterioração. Não requer avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Armadura Exposta/Cabos expostos	Nenhuma.	Presente sem perda de seção mensurável.	Presente com perda de seção mensurável, mas não requer avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Manchas/ Eflorescências	Nenhuma.	Presença de manchas. Superfície branca sem acúmulo ou lixiviação. Sem manchas de ferrugem.	Manchas em grande quantidade. Acúmulo pesado com manchas de ferrugem.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Junta de dilatação Estrutural	Nenhuma deficiência.	Operante, porém, com alguns sinais de deterioração.	Com funcionamento parcial.	Juntas inoperante, podendo comprometer a estrutura. A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre o elemento ou ponte.
Vegetações/ Colonização biológica	Nenhuma.	Há presença de vegetação e agentes biológicos, mas não impedem o elemento de sua eficácia.	Há grande presença de vegetação e agentes biológicos, impedem parcialmente a eficiência do elemento.	Presença de vegetação e agentes biológicos em totalidade, impedindo a eficiência do elemento.
Deficiência do Recobrimento	Nenhuma.	Recobrimento de espessura inferior ao mínimo admissível.	Armadura parcialmente visível.	Armadura totalmente exposta. Sem recobrimento.
Deficiência do Sistema de drenagem	Nenhuma.	Funcionando, porém, com melhorias a serem realizadas para uma melhor eficiência.	Funcionando parcialmente. Requer limpeza ou ajustes.	Totalmente inoperante. Deve-se realizar urgente uma manutenção ou troca.
Danos devido ao impacto	Não aplicável.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição leve sob a entrada de defeito de material apropriada.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição médio sob a entrada de defeito de material apropriada.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição grave sob a entrada de defeito de material apropriada.

Figura 85: Tabela dos níveis de danos - Tabuleiro (Ostetto, 2019)

Elemento: Superestrutura

Descrição: Elemento em Alvenaria de Pedra, principal tipo Abóbadas.

PATOLOGIAS	NÍVEIS DO ESTADO DOS DANOS			
	0	1	2	3
	SEM DANO	LEVE	MÉDIO	GRAVE
Fendilhação/ Perda de Argamassa	Nenhuma.	Fendas ou vazios em menos de 10% das juntas. As fendas podem ser no sentido longitudinal ou transversal.	Fendas ou vazios em 10% ou mais das juntas. As fendas podem ser no sentido longitudinal ou transversal.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Delaminação	Nenhuma.	Quando possui delaminação, algumas pedras lascadas, porém sem deslocamentos.	Quando possui pedras lascadas, com delaminação, mas com deslocamentos. Não justifica uma avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Erosão/ Desagregação da Pedra	Nenhuma.	Quando ocorre a erosão e a desagregação das partículas da pedra, porém é superficial.	Com esses danos nas partículas da pedra acabam causando uma textura lisa na pedra ou/e a pedra torna-se com mais espaços vazios, ou seja, menos resistente. Porém não requer avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Deslocamento das pedras/ Deformações	Nenhuma.	Pedras deslocadas ligeiramente. Fora de alinhamento.	Pedras deslocadas significativamente, fora de alinhamento ou está faltando. Mas não requer avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Manchas/ Eflorescências	Nenhuma.	Presença de manchas. Superfície branca sem acúmulo ou lixiviação.	Manchas em grande quantidade. Acúmulo pesado.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Vegetações/ Colonização biológica	Nenhuma	Há presença de vegetação e agentes biológicos, mas não impedem o elemento de sua eficácia.	Há grande presença de vegetação e agentes biológicos, impedem parcialmente a eficiência do elemento.	Presença de vegetação e agentes biológicos em totalidade, impedindo a eficiência do elemento.
Danos devido ao impacto	Não aplicável.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição leve sob a entrada de defeito de material apropriada.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição médio sob a entrada de defeito de material apropriada.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição grave sob a entrada de defeito de material apropriada.

Figura 86: Tabela dos níveis de danos - Superestrutura (Ostetto, 2019)

Elemento: Mesoestrutura

Descrição: Elemento em Alvenaria de Pedra, compreendido por pilares e quebra-mares.

PATOLOGIAS	NÍVEIS DO ESTADO DOS DANOS			
	0	1	2	3
	SEM DANO	LEVE	MÉDIO	GRAVE
Fendilhação/ Perda de Argamassa	Nenhuma.	Fendas ou vazios em menos de 10% das juntas. As fendas podem ser no sentido longitudinal ou transversal.	Fendas ou vazios em 10% ou mais das juntas. As fendas podem ser no sentido longitudinal ou transversal.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Delaminação	Nenhuma.	Quando possui delaminação, algumas pedras lascadas, porém sem deslocamentos.	Quando possui pedras lascadas, com delaminação, mas com deslocamentos. Não justifica uma avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Erosão/ Desagregação da Pedra	Nenhuma.	Quando ocorre a erosão e a desagregação das partículas da pedra, porém é superficial.	Com esses danos nas partículas da pedra acabam causando uma textura lisa na pedra ou/e a pedra torna-se com mais espaços vazios, ou seja, menos resistente. Porém não requer avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Deslocamento das pedras/ Deformações	Nenhuma.	Pedras deslocadas ligeiramente. Fora de alinhamento.	Pedras deslocadas significativamente, fora de alinhamento ou está faltando. Mas não requer avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Manchas/ Eflorescências	Nenhuma.	Presença de manchas. Superfície branca sem acúmulo ou lixiviação.	Manchas em grande quantidade. Acúmulo pesado.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Vegetações/ Colonização biológica	Nenhuma	Há presença de vegetação e agentes biológicos, mas não impedem o elemento de sua eficácia.	Há grande presença de vegetação e agentes biológicos, impedem parcialmente a eficiência do elemento.	Presença de vegetação e agentes biológicos em totalidade, impedindo a eficiência do elemento.
Deficiência nos encontros	Nenhuma.	Pouco deteriorado, encaixe correto, porém com melhorias a serem realizadas para uma melhor eficiência.	Degradado significativamente. Mas não requer avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Assentamento	Nenhuma.	Existe dentro de limites toleráveis ou detido sem qualquer esforço estrutural observado.	Excede os limites toleráveis, mas não justifica avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Descalçamento/ Acúmulo de detritos/ Escoamento	Boas condições. Nenhuma.	Existe dentro de limites toleráveis ou foi preso com contramedidas eficazes.	Excede os limites toleráveis, mas seja inferior aos limites críticos determinados pela avaliação do escoamento e não requer uma avaliação estrutural.	A condição garante uma avaliação estrutural para determinar o efeito sobre a resistência ou a capacidade de manutenção do elemento ou ponte.
Danos devido ao impacto	Não aplicável.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição leve sob a entrada de defeito de material apropriada.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição médio sob a entrada de defeito de material apropriada.	O elemento tem dano de impacto. Os danos específicos causados pelo impacto foram capturados no Estado de Condição grave sob a entrada de defeito de material apropriada.

Figura 87: Tabela dos níveis de danos - Mesoestrutura (Ostetto, 2019)

Elemento: Infraestrutura

Descrição: Todos as tipologias de infraestruturas, o sistema de fundação em geral.

PATOLOGIAS	NÍVEIS DO ESTADO DOS DANOS			
	0 SEM DANO	1 LEVE	2 MÉDIO	3 GRAVE
Assentamento de Fundação	Nenhum.	Há deslocamento da fundação, porém não há sinais de que esteja gerando insuficiência estrutural ou comprometendo a estabilidade.	Fundação deslocada significativamente, porém sem impacto visível no restante da estrutura.	Com consequências no restante da estrutura.
Erosão Terreno de Fundação	Nenhuma.	Terreno parcialmente erodido. Mas não há sinais de que esteja gerando insuficiência estrutural.	Terreno com grande erosão, mas sem impactos visíveis para o restante da estrutura.	Com consequências no restante da estrutura.
Estacas Desenterradas	Nenhuma.	Estacas parcialmente visíveis, sem sinais de deterioração.	Estacas desenterradas, visíveis com deterioração. Porém sem impactos visíveis no restante da estrutura.	Com consequências no restante da estrutura.

Figura 88: Tabela dos níveis de danos - Infraestrutura (Ostetto, 2019)

Elemento: Segurança

Descrição: Todos os itens referentes ao sistema de segurança da ponte ou viaduto.

PATOLOGIAS	NÍVEIS DO ESTADO DOS DANOS			
	0 SEM DANO	1 LEVE	2 MÉDIO	3 GRAVE
Deficiência no Guarda-corpo	Nenhuma.	Início ou degradação iniciada. Quando metálico com corrosão iniciada, ligação um pouco solta ou com ferrugem sem alteração.	Degradação significativa ou quebra. Quando metálica, corrosão presente, faltando parafusos, soldas quebradas, ligações soltas, ferrugem com alteração na seção.	Guarda-corpo inoperante, totalmente degradado ou obra com necessidade, porém, sem este sistema de segurança.
Deficiência na Defesa	Nenhuma ou sem necessidade de defesa neste tipo de via.	Início ou degradação iniciada.	Degradação significativa ou quebra.	Defesa inoperante ou via com necessidade, porém sem este sistema de segurança.
Deficiência de Iluminação	Nenhuma.	Com sistema de iluminação presente, porém com partes deterioradas.	Com parte do sistema de iluminação em falta ou necessitando de manutenção urgente.	Iluminação insuficiente.
Deficiência de Sinalização	Nenhuma.	Com sistema de sinalização presente, porém com faixas ou placas deterioradas.	Com parte do sistema de sinalização em falta ou necessitando de manutenção urgente.	Sinalização insuficiente.
Marcas de Acidentes na via	Nenhuma. Sem informação.	Sinais de acidentes na via, porém com pouca degradação.	Marcas evidentes de acidentes, com degradações, porém sem problemas de estabilidade ou estrutural.	Excessivas marcas de acidentes, via muito degradada. Com problemas relevantes, necessidade de manutenção urgente.

Figura 89: Tabela dos níveis de danos - Segurança (Ostetto, 2019)

ANEXO D – Cálculo de momento fletor para pré-dimensionamento da viga

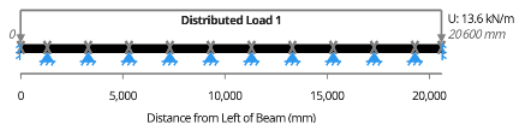
Key Properties

- ▶ Length of Beam $L = 20\,600$ mm
- ▶ Young's Modulus $E = 200\,000$ MPa
- ▶ Area of Cross Section $A = 1560$ mm²
- ▶ Second Moment of Area (Moment of Inertia) $I_x = 2\,365\,000$ mm⁴
- ▶ Position of Supports from Left $r =$

Support Type	Position x (mm)
Fixed	0
Pinned	1300
Pinned	3300
Pinned	5300
Pinned	7300
Pinned	9300
Pinned	11300
Pinned	13300
Pinned	15300
Pinned	17300
Pinned	19300
Fixed	20600

Spring Supports, Continuous Supports, and Inclined Roller Supports

Simple Loads



▶ Distributed Loads $w =$

Label	Start Magnitude w_s (kN/m)	End Magnitude w_e (kN/m)	Start Location x_s (mm)	End Location x_e (mm)
Distributed Load 1	13.6	13.6	0	20600

Summary

- ▶ Moment Demand $M^* = -4.79$ kN · m
- ▶ Shear Demand $V^* = 14.2$ kN
- ▶ Deflection $\delta = -1.56$ mm

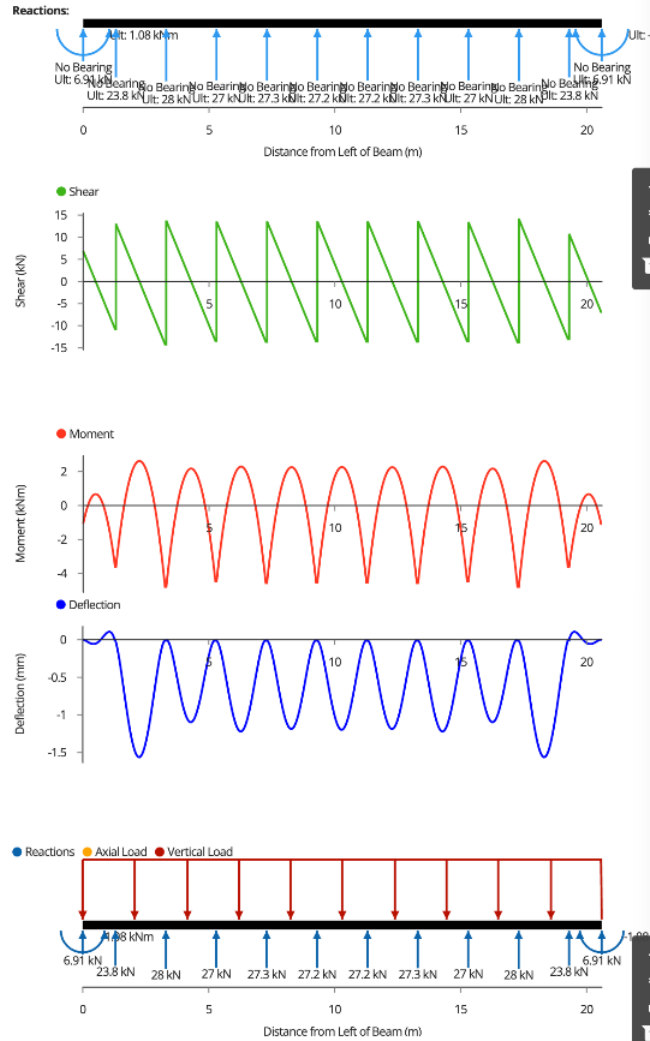


Figura 90: Cálculo de momento fletor para pré-dimensionamento da viga realizado em <https://clearcalcs.com/freetools/beam-analysis/au>

ANEXO E – Cálculo de momento fletor para dimensionamento da viga

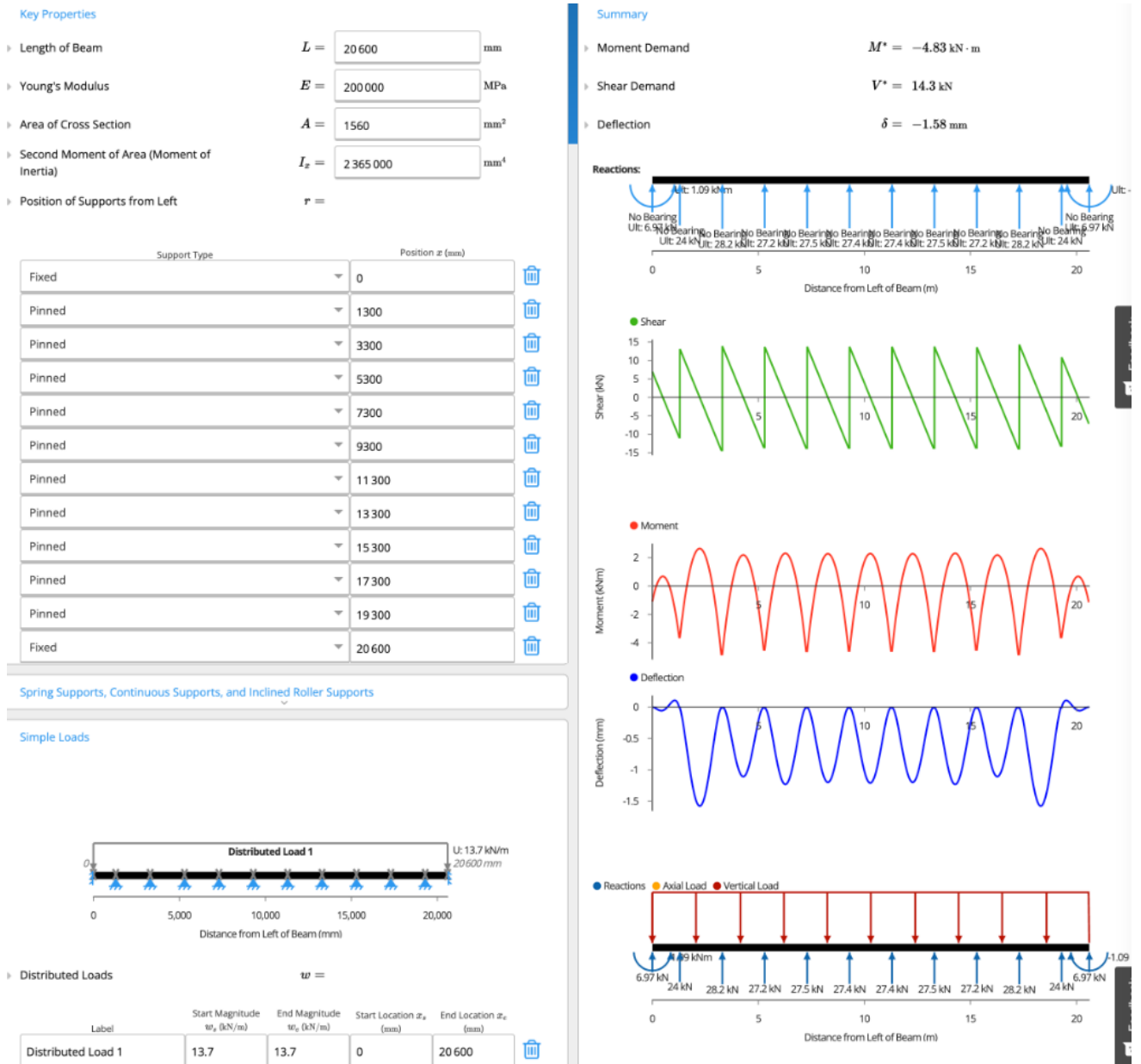


Figura 91: Cálculo de momento fletor para dimensionamento da viga realizado em <https://clearcalcs.com/freetools/beam-analysis/au>

ANEXO F – Informações utilizadas na simulação dos elementos metálicos

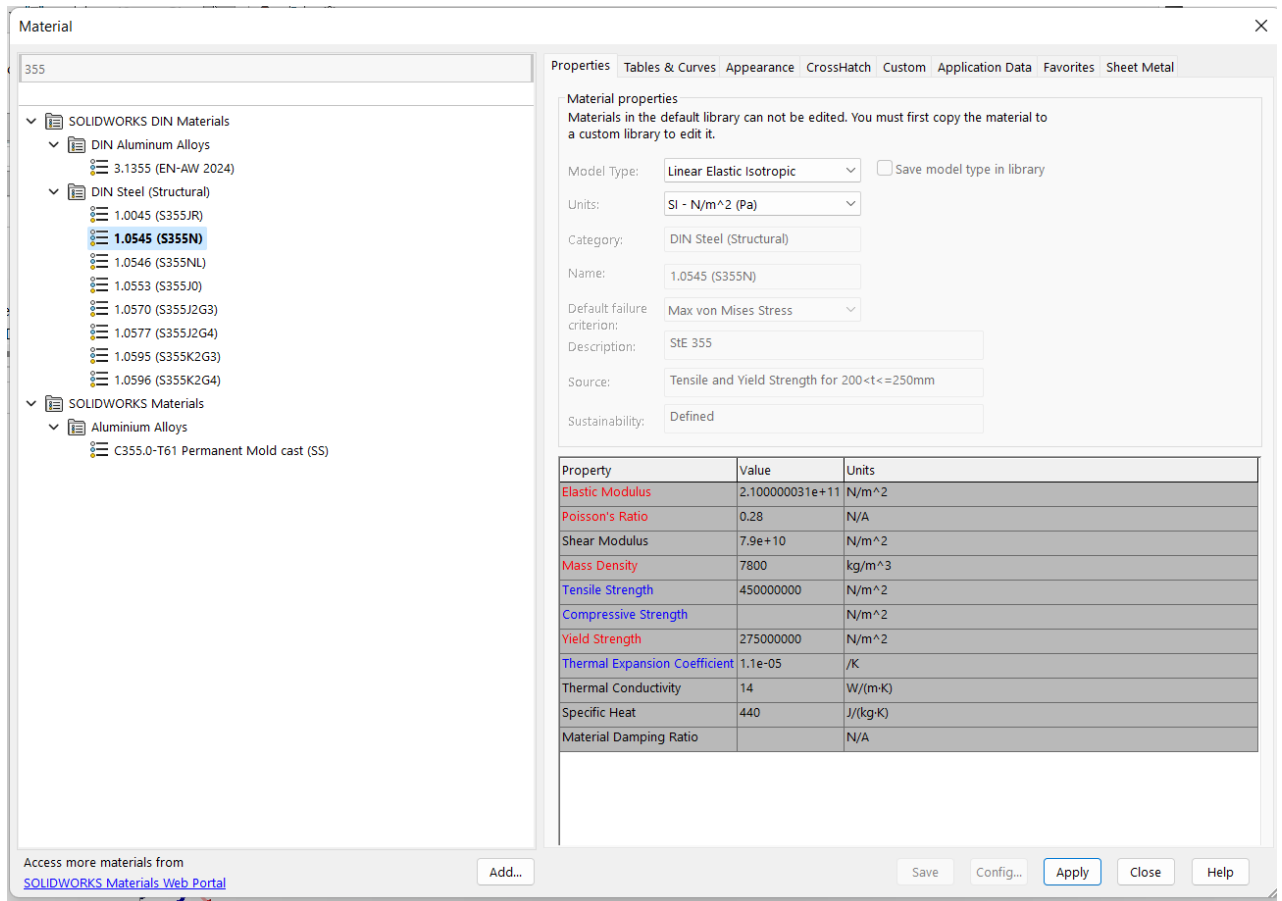


Figura 92: Propriedades dos materiais utilizados na simulação dos elementos metálicos no software Solidworks

Mesh Details	
Study name	Static 2* (-Default-)
DetailsMesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	211.754 mm
Min Element Size	10.5877 mm
Mesh quality	High
Total nodes	525821
Total elements	277122
Maximum Aspect Ratio	16.726
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	47.6
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.563
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Remesh failed parts independently	Off
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:37

Figura 93: Informações da malha utilizada na simulação