



Avaliação do comportamento estrutural da Ponte Pedonal, Ponte Bairro dos Anjos Leiria

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Guilherme Rodrigues Christo

Leiria, novembro de 2020



Avaliação do comportamento estrutural da Ponte Pedonal, Ponte Bairro dos Anjos Leiria

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas

Guilherme Rodrigues Christo

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor João Paulo Veludo Vieira
Pereira e do Professor Doutor Florindo José Mendes Gaspar

Leiria, novembro de 2020

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 mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cíveis, no ano letivo 2019/2020, 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

A minha família, minha mãe, meu irmão e em especial meu Pai, hoje, para além de amigo e companheiro, colegas de profissão. Ele, que despertou minha curiosidade por conhecimento no segmento da Engenharia, ele, pelo qual possibilitou-me chegar até ao nível de obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Agradecimentos

Primeiramente à Deus pela oportunidade única que a mim foi possibilitada. Aos professores orientadores desta dissertação, aos órgãos públicos de Portugal pela atenção disposta, aos meus colegas de mestrado pelos dois anos de aprendizagem contínua, à equipe de trabalho na qual tive o privilégio de fazer parte.

Arco non è altro che una fortezza causata da due debolezze.

O arco não é outra coisa senão uma fortaleza resultante de duas fraquezas.

Leonardo Da Vinci (1452-1519)

Resumo

A construção em alvenaria é uma das técnicas construtivas mais antigas. A simplicidade de execução e a durabilidade das estruturas em alvenaria tornaram-na num popular material de construção, ainda hoje muito utilizado. Esta é a razão pela qual, de todas as pontes construídas desde os tempos mais remotos, apenas as pontes de pedra sobreviveram. A ponte a ser estudada no presente trabalho de dissertação é constituída por dois arcos semi-circulares, alvenaria de pedra calcária, e, sua construção datada do Século XIX.

No estudo do comportamento estrutural de construções antigas, é importante, antes de qualquer outro desenvolvimento, obter uma visão geral da evolução temporal das construções em alvenaria, caracterizando os seus aspectos estruturais. Este trabalho de dissertação procurou a contextualização do tema, bem como uma análise técnica e prática do comportamento estrutural previsto para uma ponte pedonal constituída em alvenaria de pedra, visando, deste modo, demonstrar as capacidades de carga deste tipo de estrutura. Compreender a sua alta durabilidade (mesmo sem as medidas de conservação dos patrimónios históricos), não obstante as análises patológicas que apresentam.

Será apresentado uma contextualização do histórico e arquitetura da Ponte, passo importante para o desenvolvimento de processos de restauração. Posteriormente, foram obtidos principalmente os valores das deformações e tensões com o software Ansys. Foi verificada a estabilidade do conjunto e desenvolvida uma análise de seu comportamento.

Palavras-chave: Ponte pedonal, alvenaria estrutural, modelação, ponte em arco, ponte em arco de pedra, alvenaria de pedra

Abstract

Masonry construction is one of the oldest construction techniques. The simplicity of execution and the durability of the masonry structures have made it a popular building material, still widely used today. This is the reason why, of all the bridges built since ancient times, only stone bridges have survived. The bridge to be studied in the present dissertation work consists of two semi-circular arches, limestone masonry, and its construction dates from the 19th century.

In the study of the structural behaviour of old constructions, it is important, before any other development, to obtain an overview of the temporal evolution of masonry constructions, characterising their structural aspects. This dissertation sought the contextualization of the subject, as well as a technical and practical analysis of the structural behaviour foreseen for a pedestrian bridge made of stone masonry, thus aiming at demonstrating the load capacities of this type of structure. To understand its high durability (even without the historical heritage conservation measures), despite the pathological analyses they present.

A contextualization of the history and architecture of the Bridge will be presented, an important step for the development of restoration processes. Later on, the values of deformations and tensions were mainly obtained with the Ansys software. The stability of the whole was verified, and an analysis of its behaviour was developed.

Keywords: Footbridge, masonry structure, design, arch bridge, stone arch bridge, stone masonry

Índice

Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	12
Lista de Gráficos	13
1. Introdução	14
1.1. Enquadramento	14
1.2. Objetivos e motivações	17
1.3. Estrutura do trabalho	17
2. Contextualização histórica das estruturas de alvenaria de pedra	19
2.1. Introdução	19
2.2. Idade Antiga	20
2.3. Período Romano	21
2.4. Idade Média	25
2.5. Idade Moderna	27
3. Pontes em arco de alvenaria de pedra	31
3.1. Generalidades	31
3.2. Solução estrutural das pontes em alvenaria de pedra	32
3.2.1. Fundações	33
3.2.2. Pilares e encontros	33
3.2.3. Muro de tímpano e enchimento	33
3.2.4. Talha-mar/Talhante	33
3.2.5. Arcos	34
3.2.6. Guarda-corpos e tabuleiro	35
3.3. Comportamento estrutural	35
3.4. Caracterização geométrica e mecânica	37
3.4.1. Forma do arco	38
3.4.2. Características mecânicas como material estrutural	42
3.5. Ensaio de caracterização mecânica	45
3.5.1. Ensaio não-destrutivo e semi-destrutivo	45

3.5.2.	Ensaio dinâmicos	48
3.6.	Patologias correntes	49
3.6.1.	Anomalias estruturais	50
3.6.1.1.	Assentamento dos apoios	50
3.6.1.2.	Abatimento dos arcos	50
3.6.1.3.	Danos nos muros de tímpano	51
3.6.2.	Anomalias não-estruturais	52
3.6.2.1.	Desagregação do material	52
3.6.2.2.	Eflorescência	52
3.6.2.3.	Vegetação e poluição biológica.....	53
3.7.	Modelos de cargas dinâmicas	54
4.	Caso de Estudo	57
4.1.	Introdução.....	57
4.2.	Recolha de dados históricos.....	57
4.3.	Inspeção visual da Ponte.....	60
4.4.	Levantamento da geometria da Ponte.....	64
4.5.	Modelagem numérica.....	66
4.5.1.	Modelo numérico – Método dos elementos finitos	67
4.5.2.	Condições de fronteira e ações atuantes.....	67
5.	Análise e interpretação de resultados.....	71
5.1.	Introdução.....	71
5.2.	Modelo 3D	71
5.3.	Modelo 2D	76
5.4.	Comparação dos modelos	80
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	84
	Referências Bibliográficas	87

Lista de Figuras

Figura 1. Tarr Steps – “Ponte de clapper” (Engineers, 2014).....	15
Figura 2. Ponte da Barca, sobre o Rio Lima - Viana do Castelo, Portugal.....	15
Figura 3. Partenon, Acropolis em Atenas (Engineers, 2014)	19
Figura 4. "Porta do Leão", em Micenas – Grécia (Engineers, 2014).....	20
Figura 5. Tipos de estruturas dispostas com conceito viga-pilar e arco (Nunes, 2009).....	21
Figura 6. Esquema de uma ensecadeira (Rodrigues, 2014)	23
Figura 7. Arcos de cheia sob pilares e tímpanos (Rodrigues, 2014).....	23
Figura 8. Ponte de Trajano, Portugal (Carvalho, 2017).....	24
Figura 9. Esquema de cimbramento dos arcos e abóbodas de berço (Dos Santos, 2014).....	24
Figura 10. Ponte do Diabo, Martorell, Espanha (Santos, 2008)	25
Figura 11. Ponte medieval de Vilar de Mouros, Minho (Alves, 2009).....	26
Figura 12. Ponte Santa Trinita (Florença, Itália) [esq.] - Adaptado de (Rodrigues, 2014) e Ponte De la Concorde (Paris, França) [dir.] (Da Costa, 2007).....	28
Figura 13. Ponte de Sequeiros em arco central de volta quebrada (Costa de Sousa, 2012).....	28
Figura 14. Modelo de ponte renascentista (Huerta, 2004).....	29
Figura 15. Desenvolvimento das diferentes formas maciças das pontes ao longo do tempo (Proske, et al., 2009).....	30
Figura 16. Representação esquemática dos componentes das pontes em arco de alvenaria de pedra (Costa, 2009).....	32
Figura 17. Ponte Romana com talhantes, talha-mares e arcos de cheia sobre os tímpanos – (a) Ponte de Vila Formosa. (b) Ponte de Remondes (Morais, 2012).....	34
Figura 18. Sistema estrutural de arcos (Cordeiro, 2014)	34
Figura 19. Ponte de Idanha-a-Velha - pavimento da ponte e muros de guarda (Reabilitação de Pontes de Alvenaria, 2002).....	35
Figura 20. Mecanismo de transmissão de cargas (Serra, 2013).....	36
Figura 21. Formas geométricas (Costa de Sousa, 2012).....	36
Figura 22. Ponte em arco superior – (Lazzari, 2008) apud Mattos, 2001, p. 33.....	38
Figura 23. Ponte em arco intermédio – (Lazzari, 2008) apud Mattos, 2001, p. 33.....	38
Figura 24. Esquema estático de pontes em arco (Debs, et al., 2007) apud Leonhardt 1979.....	39

Figura 25. Momentos fletores numa viga simplesmente apoiada sob ação do peso próprio de uma ponte em arco (Costa de Sousa, 2012).....	40
Figura 26. Esquema representativo da força de compressão sobre os apoios dos arcos (Lazzari, 2008) apud Morrissey, 2000	41
Figura 27. Ensaio de macacos planos simples (esquerda) e duplos (direita) (Gregorczyk, et al., 2000).....	47
Figura 28. Representação de um ensaio sónico: a) direto; b) semidireto; c) indireto - (Miranda, 2011)	48
Figura 29. Danos associados ao assentamento da fundação (Santos, 2008): a) nos pilares; b) no arco	50
Figura 30. Abatimento do arco e fendilhação na base (Ramos, et al.)	51
Figura 31. Abaulamento [esq.], destacamento [centro], rotação do muro [dir.] (Lopes, 2012)	51
Figura 32. Desagregação do material pétreo (Ramos, et al.).....	52
Figura 33. Presença de eflorescências e escorrências de água no intradorso da ponte (Rodrigues, 2004).....	53
Figura 34. Vegetação presente nas estruturas de alvenaria de pedra (Rodrigues, 2014).....	53
Figura 35. Registos temporais de um passo em caminhada na direcção vertical, lateral e longitudinal –	55
Figura 36. Função de carga vertical para um peão com $G=700N$ e $f_p=2,0Hz$, de acordo com Bachmann (Alves, 2008).....	56
Figura 37. Função de carga para corrida segundo Bachmann, para $G = 700 N$, e $f_p = 3.0 Hz$ - (Moreira, 2013)	56
Figura 38. Ponte do Bairro dos Anjos	57
Figura 39. Planta de Leiria no século XV (Gonçalves, 2005).....	59
Figura 40. Ponte de Pau (Gonçalves, 2010).....	60
Figura 41. Ponte de Pau (Gonçalves, 2010).....	60
Figura 42. Patologias observadas	62
Figura 43. Anomalias não-estruturais (alçado a montante).....	63
Figura 44. Fissuração do material de revestimento (alçado a montante)	64
Figura 45. Levantamento geométrico.....	65
Figura 46. Corte do alçado a jusante - Câmara Municipal de Leiria.....	66
Figura 47. Refinamento da malha de elemento finitos	67
Figura 48. Condições de contorno e cargas aplicadas	70
Figura 49. Escala de cores com as deformações máximas e mínimas	72
Figura 50. Tensões máximas principais	73
Figura 51. Modelo Bachmann e Ammann com tensões máxima e mínimas.....	74
Figura 52. Deformações máximas devido ao acréscimo da sobrecarga de peões	75

Figura 53. Tensões máximas principais devido ao acréscimo da sobrecarga de peões	75
Figura 54. Tensões de cisalhamento máximas devido ao acréscimo da sobrecarga de peões	76
Figura 55. Tensões cisalhantes ao plano XY devido ao acréscimo da sobrecarga de peões	76
Figura 56. Estrutura com elementos em barras	77
Figura 57. Modelo 2D simplificado e cargas equivalentes	78
Figura 58. Deformada da estrutura em milímetros	79
Figura 59. Diagrama de momentos fletores e reações nos apoios	79
Figura 60. Diagrama de tensões de cisalhamento extraído do Robot dado em MPa	80
Figura 61. Tensões máximas de cisalhamento extraída do Ansys em MPa	81
Figura 62. Tensões de máximas e mínimas de cisalhamento relativas ao XY	81

Lista de Tabelas

Tabela 1. Resistências mecânicas e peso específico das pedras (Huerta, 2004) apud Delbecq (1983)	44
Tabela 2. Características mecânicas dos materiais - Adaptado de (Varum, et al.).....	44
Tabela 3. Anomalias estruturais e não-estruturais.....	61
Tabela 4. Valores levantados da geometria da ponte	65
Tabela 5. Relação entre a altura r do arco e o vão s	66
Tabela 6. Categoria dos arcos em função do vão s	66
Tabela 7. Características estruturais da alvenaria de pedra.....	69
Tabela 8. Cargas aplicadas a estrutura	69
Tabela 9. Resultados extraído do Ansys	71
Tabela 10. Reações nos apoios dos arcos e momentos fletores nas direções X, Y, Z.....	72
Tabela 11. Resultados de máximos e mínimos para os campos de tensões e deformações devido ao acréscimo de sobrecarga de peões.....	76
Tabela 12. Elementos de barras e secções.....	78
Tabela 13. Deflexões máximas das barras	78
Tabela 14. Tensões máximas e mínimas de cisalhamento	79
Tabela 15. Reações nos apoios dos arcos e momentos fletores nas direções X e Z extraídos do Robot.....	81
Tabela 16. Períodos para os primeiros modos de vibração	83

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Tensões x deformações associadas as cargas dinâmicas induzidas por um peão	74
Gráfico 2. Relação entre os modos de vibração x frequências naturais.....	82

1. Introdução

1.1. Enquadramento

As pontes em alvenaria de pedra representam de forma direta a eficácia dos elementos estruturais constituintes deste sistema construtivo, bem como a sua relevância no aprimoramento de técnicas e ferramentas e evolução histórica de metodologias construtivas, fazendo destes elementos parte integrante do patrimônio histórico e cultural da sociedade.

Essas estruturas de pedra são um testemunho silencioso da experiência em construção de pontes de nossos antepassados há milhares de anos. A pedra era o material de construção mais utilizado depois da madeira, principalmente por causa de sua vantagem sobre outros materiais naturais. Embora se tenha verificado um significativo avanço na execução das alvenarias, tanto nos materiais, como nas técnicas construtivas, o princípio de execução de diversos elementos permanece inalterado desde a sua origem. Adequada para a construção, estava sempre disponível e poderia ser modelada com versatilidade. Suas maiores vantagens, no entanto, são a sua resistência e durabilidade.

A alvenaria de pedra é um material compósito, construído pelo homem através da sobreposição de elementos naturais, pedras, aglutinados, ou não, por um ligante que lhe imprime maior coesão. Trata-se por isso de um material cuja qualidade está associada, de modo particular, à competência e à experiência dos operários que o executam (Guedes, et al., 2010).

A Figura 1 apresenta supostamente o que foi a primeira ponte construída por nossos antepassados, encontra-se localizada no sudoeste da Inglaterra. O parque foi criado em cerca de 1190 como uma floresta de caça real para a nobreza normanda, mas estava em uso mesmo antes disso. Há um número significativo de evidências de habitação pré-histórica na região, com monumentos como o *Tarr Steps*. Esta “ponte de clapper”, tem sido potencialmente uma travessia central do rio desde 1000 a.C. A ponte possui 55 metros de comprimento e 17 vãos constituídas em “lajetas” em pedra.



Figura 1. Tarr Steps – “Ponte de clapper” (Engineers, 2014)

A Figura 2 ilustra uma das milhares de pontes erguidas num contexto histórico, as quais ainda hoje mantem-se em funcionamento como parte integrante de redes pedonais, rodoviárias e ferroviárias, mesmo em inúmeras situações com a falta de manutenção.



Figura 2. Ponte da Barca, sobre o Rio Lima - Viana do Castelo, Portugal.

A elegibilidade da utilização das pedras para a construção dos edifícios históricos está associada diretamente à: sua resistência, durabilidade, facilidade de talhar e distância de transporte à obra (Bourg, 2016).

Em Portugal, apenas recentemente se começou a consciencializar o público da necessidade de criar bases para salvaguardar o património arquitetónico e urbano. Infelizmente, o desinteresse ou a inoperância das entidades responsáveis e a falta de estratégia política na

última metade do séc. XX neste domínio conduziu a uma situação de degradação profunda do edificado urbano de um grande número de centros históricos do país. (Varum, et al.)

Paradoxalmente, a alta relevância destas estruturas relativamente à longevidade e elevada capacidade de carga, deveriam ser alvo de atenção e preservação. No entanto, o que se verifica é justamente o oposto, prevalecendo de um modo geral o quase abandono por parte dos órgãos competentes. Impõe-se, assim, que estas pontes sejam alvo de ações de conservação.

Após o acidente da ponte Hintze Ribeiro ocorrido em 2001 as margens de Entre-os-Rios, em Penafiel e Castelo de Paiva sobre o Rio Douro, situ à norte de Portugal, as entidades nacionais sobre cuja jurisdição se encontra uma grande parte das obras de arte em arco de alvenaria - Estradas de Portugal, E. P. E. (EP) e Refer, E. P. E. (REFER) - lançaram uma série de ações com o objetivo de avaliar o estado de conservação das respectivas pontes.

Atualmente, uma significativa parte das pontes em arco de alvenaria encontra-se sob a jurisdição das Câmaras Municipais, não existindo nenhuma ação de inspeção concertada, com objetivos idênticos aos das empresas referidas (Trigo, et al.). Torna-se necessário uma análise das características mecânicas dos materiais constituintes das pontes em alvenaria de pedra, bem como do comportamento estrutural face a importância histórica e de utilização destas obras de artes.

Caracterizadas por sua beleza ímpar e robustez, estas obras de arte chamam a atenção de engenheiros pela responsabilidade da sua reabilitação e conservação. O estudo destas estruturas torna-se de extrema importância pela elevada capacidade de carga dos elementos construtivos e patologias que as afetam dependendo do grau de utilização e em que se encontram.

Segundo Orbán (2007), citado por Ribeiro, et al. (2016), o elevado número de pontes em arcos de alvenaria de pedra em funcionamento na rede ferroviária Europeia justifica a necessidade de implementação de planos de exploração adequados que permitam assegurar as adequadas condições de segurança.

Ao longo das últimas décadas esta necessidade tem vindo a ser cada vez mais premente, sobretudo devido à tendência do aumento das cargas e da velocidade de circulação do tráfego. Além disso, a longevidade, robustez e os reduzidos custos de manutenção que são associados a estas pontes permitem considerá-las bons exemplos de sustentabilidade que

importa preservar. Em Portugal existem cerca de 11750 pontes desta tipologia que representam cerca de 90% do total das pontes ferroviárias. Acresce que 70% destas pontes têm idades compreendidas entre 100 e 150 anos e apresentam vãos tipicamente inferiores a 5 metros (Ribeiro, et al., 2016) apud Orbán, 2007.

1.2. Objetivos e motivações

A razão pela qual as atenções se voltaram para a ponte em estudo, devem-se ao interesse desta construção enquanto património a preservar, neste caso particular pela Câmara Municipal de Leiria.

É pretendido demonstrar através de uma análise numérica de elementos finitos, com a modelação e verificação do comportamento estrutural por meio do software Ansys, a capacidade de carga da Ponte Camilo Castelo Branco, junto ao Bairro dos Anjos – Leiria, sendo sujeita a utilização pedonal em estrutura em arco de alvenaria de pedra situada sobre o Rio Lis. Para tanto, este trabalho foi definido num conjunto de etapas, nomeadamente, a caracterização dos materiais componentes da estrutura, determinação das dimensões da ponte, identificação das patologias existentes, criação do modelo estrutural e por fim avaliação estrutural.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente documento encontra-se subdivido em um conjunto de cinco capítulos, apresentados sequencialmente de forma a ordenar e apresentar as ideias que conduziram o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução sobre a temática da dissertação em causa e justificações para o seu estudo e desenvolvimento.

No Capítulo 2 foi realizada uma revisão bibliográfica, sobre as pontes pedonais e estruturas em alvenaria de pedra, de modo a elaborar uma tomada da contextualização histórica e evolução dos métodos construtivos utilizados para estas construções.

No Capítulo 3 priorizou-se a identificação dos elementos construtivos (estruturais e não-estruturais) para as pontes em arco de alvenaria de pedra, bem como uma análise das disposições construtivas e concepção estrutural dos arcos, caracterizações das ações aos quais estas estão submetidas. Apresenta-se ainda neste capítulo os tipos de ensaios comumente utilizados para investigações e anomalias associadas.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo de caso com as características da ponte quanto aos seus elementos construtivos, geometria, tipologias de materiais, patologias existentes, ações atuantes, modelação da estrutura e, por fim, análise do comportamento estrutural.

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

2. Contextualização histórica das estruturas de alvenaria de pedra

2.1. Introdução

A raça humana historicamente tenta ultrapassar obstáculos físicos que vão sendo impostos. Para compreender o contexto evolutivo dos meios construtivos sobre as pontes, dever-se-á recorrer a idade antiga até chegarmos à idade contemporânea.

Os primeiros exemplos de construção em alvenaria foram encontrados em escavações arqueológicas realizadas próximo do lago de Hullen, em Israel. Estas construções, realizadas entre 9000 e 8000 anos antes de Cristo, e executadas em alvenaria de pedra mostram que, provavelmente, as primeiras construções em alvenaria foram executadas com pedra. Da mesma época (8000 A.C.) datam as famosas muralhas de Jericó, na Palestina, construídas em pedra de calcário com preenchimento das juntas com terra (Gago, 2004).

Apesar da utilização de alvenaria em pedra como principal elemento construtivo já observado à época para construções de obras de arte, como por exemplo as pirâmides do Egito, que, ao utilizar blocos de pedra de grandes dimensões, permitiu o avanço do conhecimento do comportamento estrutural destas estruturas.

A cultura micênica na Grécia Antiga, sofreu grande influência da cultura Egípcia, face que pouco se modificou a arquitetura das construções entre ambas, ou seja, manteve-se basicamente os elementos estruturais retilíneos. Todavia, há interessantes técnicas usadas para preencher lacunas na cultura Grega, o curto espaçamento entre pilares e vigas bi apoiadas, como o que se verificou na construção do Partenon (ver Figura 3).



Figura 3. Partenon, Acropolis em Atenas (Engineers, 2014)

Outro marco importante é o famoso portão na entrada da cidadela de Micenas, no Peloponeso, conhecido como o “*Portão do Leão*” (Figura 4). Um lintel de pedra com aproximadamente 15 toneladas e medindo 4,5 x 2,0 x 0,8 m³ foi colocado sobre o portão.



Figura 4. "Porta do Leão", em Micenas – Grécia (Engineers, 2014)

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. Não obstante, houve 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.

Deste modo, as soluções encontradas para as construções nas diversas épocas, estão interrelacionadas aos seus respectivos fatos históricos, disposições de materiais, aperfeiçoamento tecnológico, capacidade econômica, crítica quanto ao comportamento estrutural do sistema construtivo dentre outros fatores.

2.2. Idade Antiga

A idade antiga representa toda a época anterior ao séc. I a.C., nesta altura o homem primitivo, vivendo em comunidade, sentiu a necessidade de criar pontes onde fosse possível a passagem sobre cursos de água. Com o tempo e à medida que se ia sedentarizando, foi procurando soluções cada vez mais duradouras, para passagem de animais, de caçadores, de comerciantes e dos guerreiros que tentam expandir o seu território (De Jesus, 2013).

A história das pontes é tão antiga como a história do homem civilizado. Os Sumérios da Mesopotâmia no ano de 3000 a.C. dispuseram pedras de tal modo a formar um arco. Esta sabedoria foi implementada na Europa, pelos povos Etruscos, sendo os primeiros a utilizarem o arco na construção de pontes (Favre, et al., 2001).

A escolha dos materiais com que estas pontes eram construídas, dependia muito dos recursos existentes nas proximidades e, não menos importante, do tipo de ferramentas que possuíam, pois estão diretamente relacionadas com os materiais que podiam trabalhar (De Jesus, 2013).

O sistema primitivo de viga-pilar como pode ser visto na Figura 5, em pedra estava limitado pelos elevados pesos e pela diminuta resistência da pedra aos esforços de flexão e tração bem como a necessidade de ter um elevado número de elementos de suporte. A necessidade de superar estas dificuldades cobrindo espaços maiores levam ao aparecimento da falsa cúpula e do falso arco e, mais tarde, o arco de volta inteira (J. Nunes, 1997).

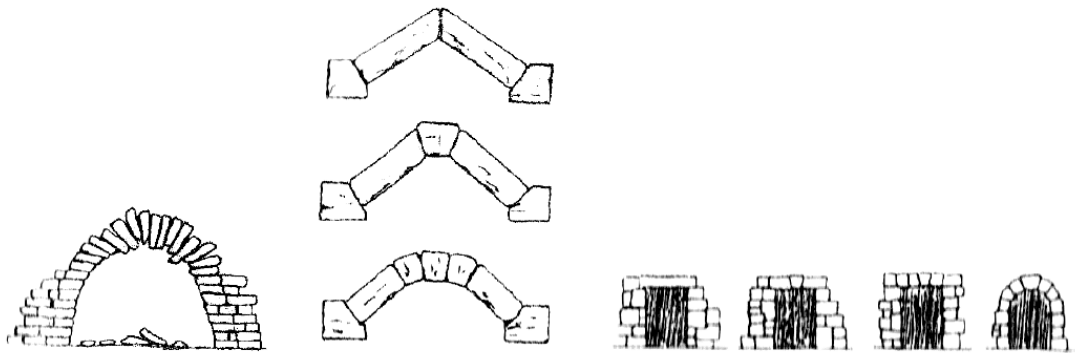


Figura 5. Tipos de estruturas dispostas com conceito viga-pilar e arco (Nunes, 2009)

Os denominados “falsos” arcos caracterizavam-se pelo método construtivo, pois os blocos de pedras eram sobrepostos, deste modo formando fiadas horizontais em balanço, conferindo-lhe ao final uma geometria em caráter em “falso” arco ou ogival. Ao passo que a arquitetura deste tipo de construção, a consolidação dos esforços associados a estes elementos deve-se principalmente ao seu peso próprio e não necessariamente a geometria da construção

2.3. Período Romano

Com o poderio do império Romano e astúcia em conquistar e construir, aproveitando a arte de construir abóbadas transmitida pelos etruscos, os romanos foram os grandes impulsionadores da construção de pontes de alvenaria de pedra (Da Costa, 2007). A reputação e o prestígio de que gozavam estes mestres construtores são facilmente reconhecidos, pois o Papa (a mais alta autoridade na hierarquia da igreja Católica) é ainda hoje denominado de “Pontifex Maximus” ou “Sumo Pontífice”, que significa “o maior construtor de pontes” (entre Deus e os homens).

Roma sempre soube aproveitar as suas conquistas, tirando delas o melhor proveito possível a nível dos conhecimentos detidos. Foi assim que, adquiriu importantes conhecimentos ao nível da arquitetura, especialmente no que toca a construção de grandes vãos, utilizando ora o arco ora a arquivada na construção das suas pontes e aquedutos.

É justamente no período *aposteriori* à Idade Antiga, a saber, durante o extenso período de dominação do Império Romano, entre o séc. I a.C. até ao séc. V d.C., onde se verificou a utilização em larga escala de pontes em alvenaria de pedra, bem como os fundamentos de estruturas em arco e, conseqüentemente o aprimoramento dos métodos construtivos e materiais utilizados.

Os romanos foram audaciosos e alavancaram as tecnologias para sua época. É nesta altura que se propaga o arco de volta perfeita, semicircular e assente em pilares, que será também uma das características do estilo Românico e do Renascimento (De Jesus, 2013).

Foi, no entanto, da época imperial que a arquitetura romana obtém êxito e autonomia quase que absoluto, com a utilização do cimento pozolânico, onde este era composto por areia, cal e cinza pozolânica. Estes componentes em contato com a água eram capazes de formar uma mistura de argamassa mais impermeável, passando a ser utilizados para o assentamento e vedação das paredes do tímpano, assim como para o preenchimento interior da estrutura, garantindo assim maior rigidez e um comportamento mais uniforme.

A pedra portanto deixa de assumir o papel fundamental, e passa a ser utilizada em conjunto com uma argamassa hidráulica extremamente dura (ALVES, 2009). A estrutura dos edifícios passa a ser fundamentalmente constituída por um novo conceito, em que pedra e argamassa se misturam formando um material de extrema solidez estrutural. Esse material era depois revestido com pedra emparelhada, essencialmente por razões estéticas, embora funcionasse também como elemento de proteção, e inculcasse a estrutura um caráter solido e robusto, que o interior de pedra e argamassa não seria capaz de impor.

Segundo Martin, J., referenciado por Silva (2016) para construir os pilares, os romanos recorriam a enscadeiras compostas por 2 anéis de estacas de madeira preenchidas entre si com argila compactada, a partir das quais dragavam o leito do rio até se atingir a profundidade desejada (ver Figura 6).

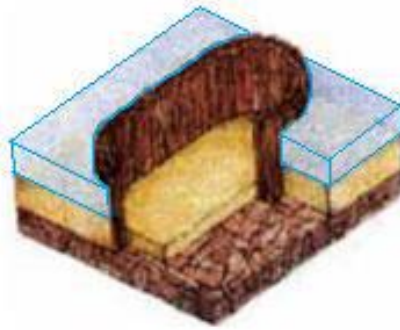


Figura 6. Esquema de uma ensecadeira (Rodrigues, 2014)

Estas obras de artes eram também caracterizadas por terem pequenos arcos na zona dos tímpanos conforme ilustrado na Figura 7. Onde os vãos eram atravessados de um lado ao outro, a fim de servirem como descarga de água em épocas de cheia. A despeito, compreenderam que esta parte da estrutura não contribuía significativamente para a resistência do arco e suporte das cargas, reduzia-se da ponte parte do seu peso próprio. Denominam-se, portanto, arcos de cheia.



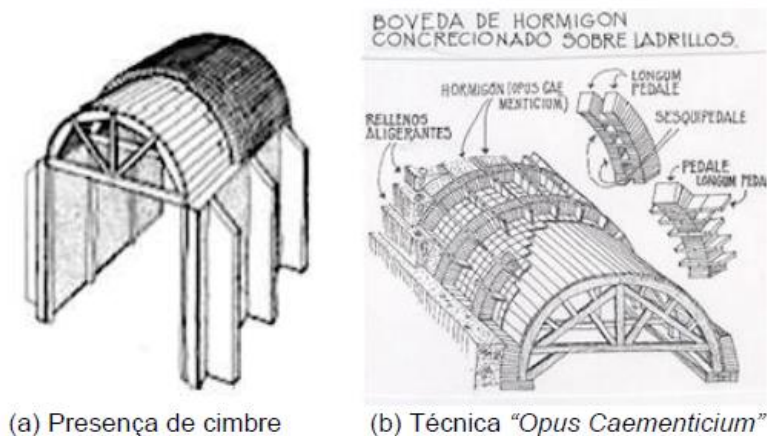
Figura 7. Arcos de cheia sob pilares e tímpanos (Rodrigues, 2014)

Não se pode dizer que as pontes romanas tivessem grandes variações em termos de forma. Tanto na conceção das pontes (ver Figura 8) como de outros elementos, como por exemplo os aquedutos, verifica-se grande uniformidade dos elementos construtivos. Os arcos são de volta perfeita, todos iguais; o tabuleiro reto, para permitir o seu fácil atravessamento e os pilares são geralmente retangulares.



Figura 8. Ponte de Trajano, Portugal (Carvalho, 2017)

O modelo pouco flexível destas construções era levado ao extremo quando as condições geográficas obrigavam a ponte a passar a uma cota mais elevada, casos em que a largura dos arcos pouco ou nada aumentava, compensando-se na altura dos pilares. Esta regularidade no tamanho dos arcos leva a crer que os romanos reutilizariam os cimbres, não só para construir os arcos da mesma ponte, como para construir outras pontes. Mesmo nas situações que o cimbra não fosse o mesmo, utilizavam os mesmos moldes para a construção destas elaboradas peças de madeira, rentabilizando tempo e trabalho. Muitas pontes apresentam saliências e encaixes onde eram apoiados os cimbres para a construção dos arcos (ver Figura 9).



(a) Presença de cimbra

(b) Técnica "Opus Caementicium"

Figura 9. Esquema de cimbramento dos arcos e abóbodas de berço (Dos Santos, 2014)

2.4. Idade Média

Com a queda do império Romano no século V d.C, perdeu-se também a arte de construir pontes, devido à perda do poderio bélico e do controle territorial. É só no início da idade média com a organização da sociedade através do predomínio do clero e da nobreza que se volta a verificar o interesse pela reconstrução de estradas, pontes e outras edificações, como igrejas e catedrais no interior de cidades muralhadas, para o que eram precisos artesãos e artistas. Foi no século VI d.C. que se inicia a idade média, que perduraria até o século XV d.C.

É nesta época muitas das pontes anteriormente construídas caíram em desuso, sendo a arquitetura do início deste período caracterizada por pilares largos e vãos reduzidos (Santos, 2008). Gerando problemas em termos de escoamento dos leitos para além do elevado custo de construção. Houve, no entanto uma grande evolução ao nível da tecnologia das construções de alvenaria, impulsionada pela vasta construção de castelos, igrejas e catedrais. A necessidade de transporte de matéria-prima para os locais de construção impulsionou a criação de uma boa rede de transportes. Surgem então as primeiras pontes com arco quebrado (Figura 10). Esta nova conceção permitiu uma construção mais leve, mais barata e mais eficiente.



Figura 10. Ponte do Diabo, Martorell, Espanha (Santos, 2008)

Do estudo da estrutura das pontes medievais depreende-se que os monges construtores foram grandes mestres que tentaram conservar as magníficas obras romanas, antigas estradas, fortificações, pontes e aquedutos espalhados pela generalidade do Continente Europeu (J. Nunes, 1997).

Ana Alves (2009) refere que em Portugal algumas referências relativas à construção de pontes encontram-se nos testamentos de nobres, que sistematicamente deixam doações para a sua construção ou finalização. Consequência da fragilidade do poder real e da forte organização das comunidades religiosas na idade média, estas tomaram a seu cargo a construção de muitas pontes. Prova disso é a presença de capelas e cruzeiros em grande maioria das pontes deste período.



Figura 11. Ponte medieval de Vilar de Mouros, Minho (Alves, 2009)

Tratando-se de uma época caracterizada pelo grande incremento das trocas comerciais entre comunidades, a construção de pontes medievais dependia das condições económicas e políticas existentes. Assim, surgiram as pontes fortificadas, que albergavam, muitas vezes, lojas, capelas e oficinas. A despreocupação pela simetria e unidade na construção de pontes, bem como a facilidade e rapidez de construção, leva a que os seus arcos sejam geralmente assimétricos (ver Figura 11), diminuindo-se os números de pilares no leito dos rios, passando os tabuleiros a ter um perfil em cavalete (Ramos, et al.). Consequentemente, as pontes medievais configuram-se por ter um maior arco central, e diminuindo os vãos gradativamente à medida em que se aproximam das margens.

As pontes medievais foram construídas praticamente sem recurso a argamassas, onde as técnicas para as dosagens dos ligantes componentes das argamassas desaparecem como consequência da queda do Império Romano. Sem uma argamassa que consolidasse as

estruturas, a par dos arcos mais longos, e a deficiente resistência ao corte, os arcos passam a ser reforçados com pesados contrafortes. Os contrafortes permitiram aumentar a rigidez da estrutura e o reforço dos apoios sobre os arcos.

2.5. Idade Moderna

O movimento artístico que chamamos “Renascimento” nasceu na Itália, em Florença, nas primeiras décadas do século XV. Nessa mesma época, começou a difundir-se pelo resto da Europa, iniciando uma completa revolução artística, cujos efeitos perdurariam, com constantes acontecimentos, durante séculos, até quase o limiar da nossa época. A Idade Moderna ou Renascimento, portanto vai do séc. XV d.C. até ao séc. XVIII d.C., este período é caracterizado pelo nascimento da ciência moderna.

As pontes da Idade Média já diferiam significativamente das estruturas romanas na forma como a pedra era utilizada como o material de construção. As pontes estavam a tornar-se cada vez mais racionais e esbeltas. O desenvolvimento mais rápido da ciência durante a Renascença (com avanços notáveis em campos como a matemática, a estática, a mecânica dos sólidos e geometria) também contribuiu para o desenvolvimento de construção de pontes e a construção de outros arcos ou estruturas abobadadas, tais como cúpulas (Engineers, 2014).

A construção de pontes nesta época aproximava-se à das pontes romanas, isto é, recorria-se à execução de arcos de volta perfeita e arcos abatidos. Tal deveu-se à aplicação de um novo material construtivo, uma argamassa à base de cal hidráulica. Estas estruturas apresentavam soluções mais arrojadas e mais flexíveis, obtendo-se, assim, arcos com maiores vãos e pilares mais esbeltos. A execução destas pontes com arcos idênticos ocorreu devido a preocupações estéticas e a uma melhor adequação do traçado reto ao seu atravessamento (Rodrigues, 2014).

O período renascentista trouxe os primeiros avanços na construção de pontes desde o período romano à medida que os arquitetos e artistas testavam novas formas de alongar os arcos e evitar a implantação de um elevado número pilares no leito dos rios, aumentando assim a secção de vão das pontes (ver Figura 12).



Figura 12. Ponte Santa Trinita (Florença, Itália) [esq.] - Adaptado de (Rodrigues, 2014) e Ponte De la Concorde (Paris, França) [dir.] (Da Costa, 2007)

Desde a Renascença, as diferentes técnicas tornaram-se mais elaboradas e cada vez há mais engenheiros ou arquitetos com um grau de especialização mais elevado, até ao século XVIII quando teve lugar a dissociação institucional das duas profissões (Léon, et al., 2017). É nesta época que é formada, em França, a primeira escola de pontes e estradas “École des ponts et Chaussées”, fundada por Jean-Rodolphe Perronet.

Embora se tenha tratado de um período de grandes avanços e descobertas científicas, a construção evoluiu pouco, seriam precisos dois séculos para que os conhecimentos se divulgassem. O arco medieval de volta quebrada ou gótica (ver Figura 13), por natureza descontinua, volta a dar lugar ao arco de volta perfeita ilustrada na Figura 14.



Figura 13. Ponte de Sequeiros em arco central de volta quebrada (Costa de Sousa, 2012)

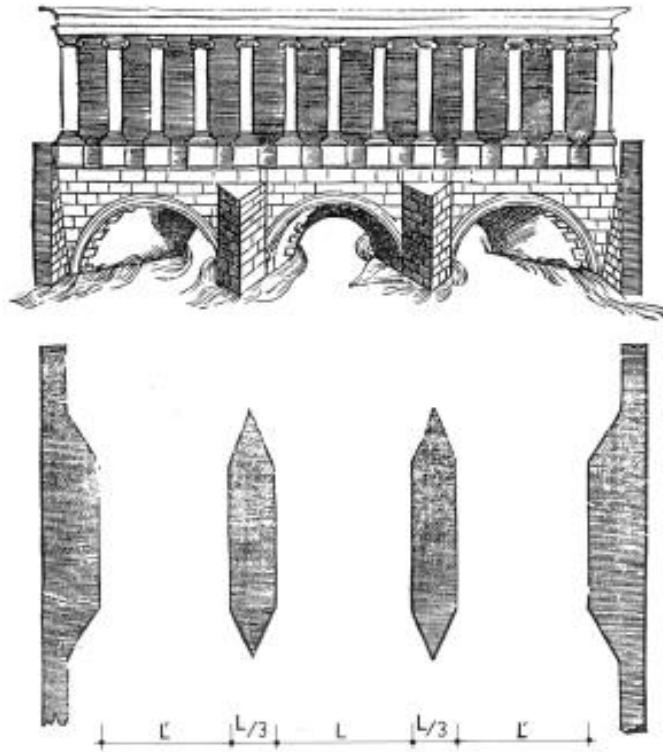


Figura 14. Modelo de ponte renascentista (Huerta, 2004)

A construção das pontes passou a ser mais uma vez com recurso à cal hidráulica e à pedra permitia dois processos construtivos distintos. No primeiro aplicava-se pedra aparelhada na superfície, sendo o interior constituído por uma mistura baseada em argamassa de cal e água. Este processo era executado quando pretendiam dar uma maior resistência e prestígio à construção. No que respeita ao segundo processo, este cingia-se à aplicação de agregados com várias dimensões, todos envolvidos numa argamassa, e de tapumes de madeira, conferidores de forma ao conjunto (Alves, 2009).

Com a chegada da Revolução Industrial (século XIX), inicia-se a utilização de materiais diversos no segmento da engenharia, a saber, o ferro e o aço na construção de pontes mais especificamente. Já para o final do século XIX também se começa a utilizar o betão armado neste tipo de construções. A Figura 15, ilustra a evolução e adaptações que caracterizam o conceito estético e estrutural para construção das pontes em arco ao longo dos tempos.

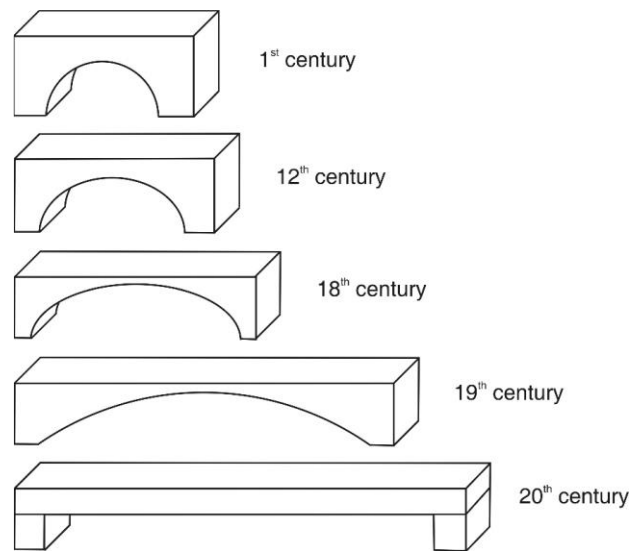


Figura 15. Desenvolvimento das diferentes formas maciças das pontes ao longo do tempo (Proske, et al., 2009)

3. Pontes em arco de alvenaria de pedra

3.1. Generalidades

As pontes de alvenaria em arco são o testemunho do engenho a nível de concepção, método construtivo e estética. Existem inúmeros exemplos de pontes em alvenaria de pedra que atravessaram vários séculos até aos nossos dias, continuando a cumprir as suas funções com um nível de desempenho adequado. Atualmente é rara a construção desta tipologia de pontes. As reconhecidas dificuldades associadas à construção de pontes em arco, agravado pelo surgimento de novos materiais, justificam o declínio desta solução estrutural (Santos, et al., 2008)

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 heterogéneos, anisotrópicos, em certos casos contendo descontinuidades, com comportamento complexo, geralmente, com reduzida resistência à tração (Costa, 2009).

O arco pode ser definido como um elemento estrutural curvo que transmite seu peso próprio e as sobrecargas a dois apoios, por meio apenas ou principalmente de esforços normais simples de compressão (Nunes, 2009).

Atualmente, os principais problemas associados a alvenarias antigas estão, frequentemente, relacionados com a qualidade dos materiais constituintes, nomeadamente as unidades de alvenaria, ou as argamassas usadas como ligante que, em geral, são pobres e evidenciam (Pagaimo, 2004):

- Muito fraca resistência a esforços de tração (materiais quase incoerentes);
- Fraca resistência à compressão (excessiva presença de vazios);
- Fraca resistência ao corte (excessiva presença de vazios e material quase incoerente).

Um outro fator que tem influência no comportamento da alvenaria é a humidade. Estudos realizados com calcários demonstraram que quando submetida à compressão, à tração e o corte, a pedra apresentava uma redução da capacidade resistente de cerca de 50% quando saturada, comparativamente com os resultados obtidos para o estado seco (Saisi, et al., 2001).

Devido à diferença de materiais utilizados, à sua disponibilidade e custos associados, as construções de alvenaria de pedra evidenciam, em geral, grande heterogeneidade, apresentando várias possibilidades de solução, nomeadamente (De Celis, 2017):

- i) construções de alvenaria de pedra seca, insonsa ou mal-argamassada, muito comuns no Norte e Interior do país, sobretudo em zonas rurais. Era uma solução empregue em paredes das habitações e em muros que serviam para vedação de propriedades rurais. As pedras, na grande maioria de granito ou xisto devido à sua abundância nas localidades, eram assentes umas nas outras sem argamassa ou com uma reduzida quantidade;
- ii) construções de alvenaria ordinária ou alvenaria de pedra irregular que, como o próprio nome indica, são construções de alvenaria constituídas por pedras de formas e dimensões irregulares ligadas entre si com argamassa de cal aérea. Em geral, é utilizada a pedra calcária, mais abundante na zona de Lisboa, embora seja habitual a utilização de pedras de diferentes origens, como granito e outras.
- iii) construções de cantaria são constituídas por pedras aparelhadas, geralmente associadas a edifícios monumentais como são os casos do Mosteiro dos Jerónimos, da Sé de Lisboa ou do Mosteiro da Batalha.

3.2. Solução estrutural das pontes em alvenaria de pedra

Para melhor compreensão de alguns aspectos construtivos, nesta secção são descritas as funções dos elementos constituintes desta tipologia de estrutura. Na Figura 16 tem-se em perspectiva os principais elementos estruturais e não estruturais, do tabuleiro às fundações.

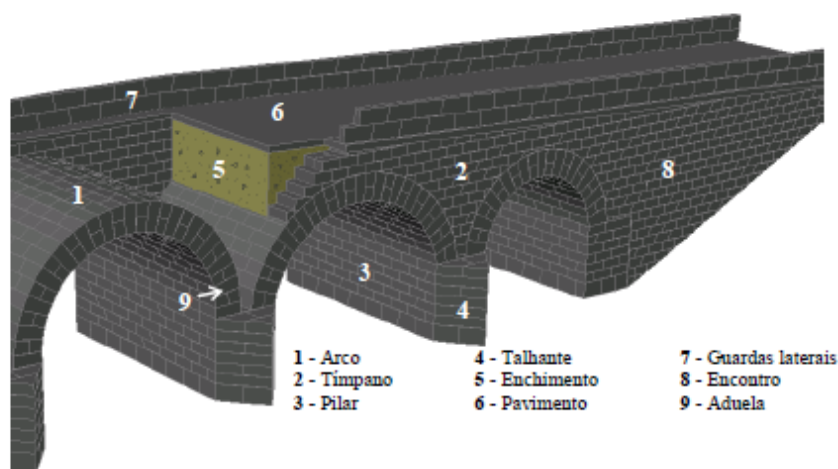


Figura 16. Representação esquemática dos componentes das pontes em arco de alvenaria de pedra (Costa, 2009)

3.2.1. Fundações

As estruturas de fundações têm por finalidade mobilizar todas as cargas provenientes do sistema, geralmente estes elementos possuem uma seção relevante de forma tal dissipar as cargas mais uniformes quanto possível. Portanto, a estabilidade das fundações possui relação direta com a sua geometria, haja vista que se deve considerar o efeito do escoamento ou fluxo de água. Podem ainda ser construídas diretamente sobre o maciço rochoso, ou ainda, indiretamente através de poços de visita.

3.2.2. Pilares e encontros

Os pilares têm como principal função transmitir a totalidade das forças para as fundações e ainda resistir ao vento, sismo, força das correntes de água e ainda impactos de objetos arrastados pela corrente (Cordeiro, 2014).

3.2.3. Muro de tímpano e enchimento

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

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. O enchimento é geralmente composto por um material de granulometria extensa e bem compactado para que possa ser colocada em cima a plataforma, sem que ocorram assentamentos e deformações nesta devido à falta de compactação. Existe a possibilidade de criar aligeiramentos nestes dois elementos construtivos através da criação de vazios. Estes vazios podem situar-se apenas no interior da ponte, ou atravessando toda a largura da ponte. Quando se recorre a este último método geralmente a ponte é denominada de muros abertos ou vazados. Este vazamento pode ser com maior ou menor frequência, geralmente envolvendo elementos arqueados. Alguns destes elementos têm como função secundária servir de escoamento para o caudal de cheia (Santos, 2008).

3.2.4. Talha-mar/Talhante

Estes elementos muito comuns em pontes romanas eram constantemente utilizados, haja vista a esbeltez dos pilares, que causavam um estrangulamento no sentido de escoamento da

água, provocam uma perturbação no percurso natural do leito do rio. Para resistir às correntes de água, evitando a degradação ou destacamento de unidades de alvenaria do pilar, estes componentes proporcionam uma diminuição das pressões nas zonas dos pilares, diminuindo o processo erosivo dos elementos estruturais, assim como controle das vazões.

Desta forma, é construído a montante do pilar um elemento mais baixo, de forma predominantemente triangular para atenuar ou quebrar a força da corrente de água denominado de talha-mar. Não obstante, a fim de evitar o desgaste do pilar devido ao turbilhonamento é construído a jusante do pilar, um elemento mais baixo, de forma retangular ou outra denominada de talhante. A Figura 17 ilustra os componentes supracitados.

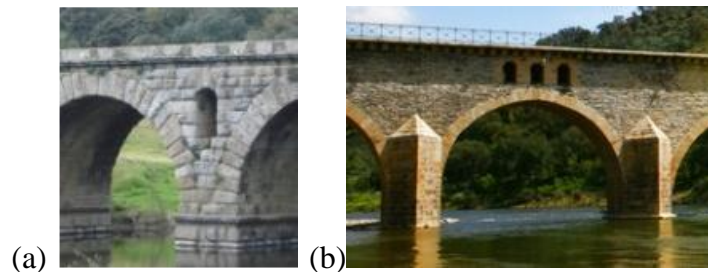


Figura 17. Ponte Romana com talhantes, talha-mares e arcos de cheia sobre os tímpanos – (a) Ponte de Vila Formosa. (b) Ponte de Remondes (Morais, 2012)

3.2.5. Arcos

Os arcos são os elementos que nas pontes materializam os vãos e sobre os quais apoia a estrutura que interliga as duas margens; por conseguinte, têm a função de encaminhar as cargas, precedentes do pavimento, enchimento e tímpanos, para os pilares e fundações e materializar os vãos a vencer entre os pilares (Costa, 2009) (Figura 18).

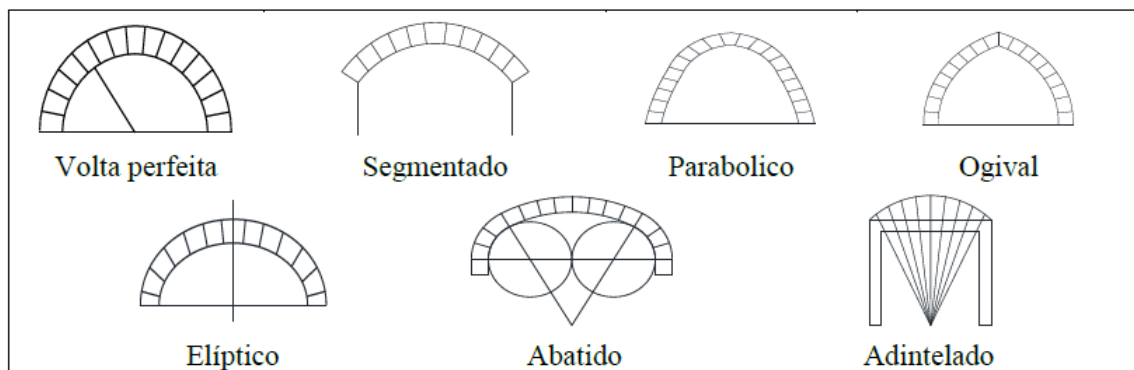


Figura 18. Sistema estrutural de arcos (Cordeiro, 2014)

3.2.6. Guarda-corpos e tabuleiro

A função das guardas é a de proteção de segurança contra a queda e embate de veículos e dos pedestres. Podem ser de alvenaria, conforme a Figura , ou metálicas, sendo as primeiras as mais usuais. Já o tabuleiro é o elemento onde ocorre a circulação de tráfego rodoviário, ferroviário ou pedonal (Figura 19).



Figura 19. Ponte de Idanha-a-Velha - pavimento da ponte e muros de guarda (Reabilitação de Pontes de Alvenaria, 2002)

3.3. Comportamento estrutural

Todos os arcos, quaisquer que sejam suas formas, apresentam nos apoios a tendência de se deslocarem na horizontal, surgindo forças externas reativas e horizontais, denominadas empuxos horizontais.

A Figura 20 trata de demonstrar como funciona o mecanismo resistente para uma ponte em arco, percebe-se os meios de transmissão das cargas ao qual o sistema está submetido (carga permanente e variável) para os encontros que, por sua vez, as transmitem às fundações.

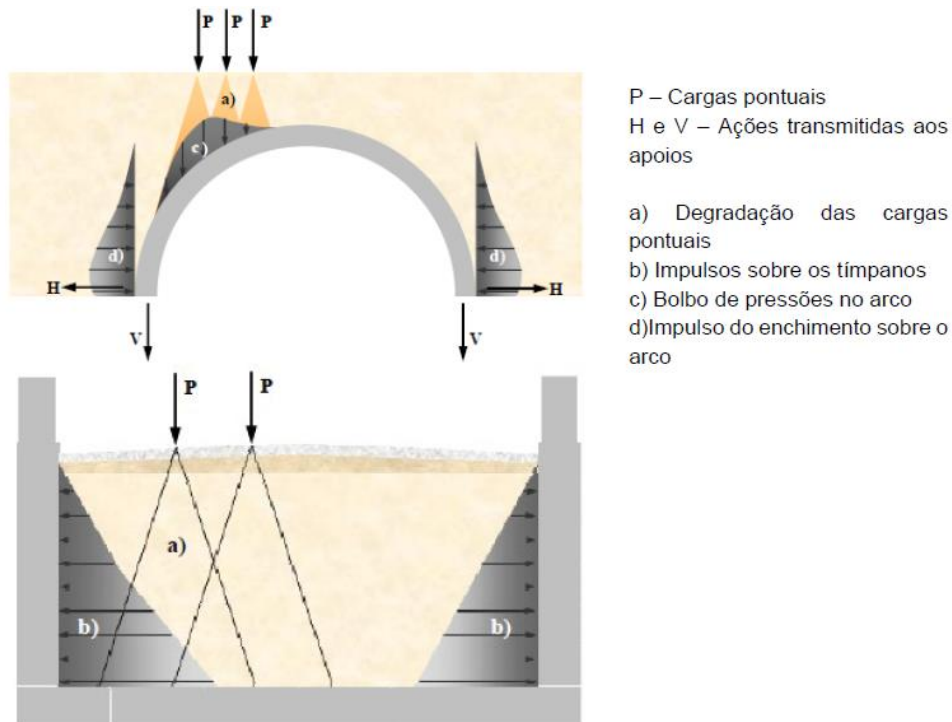


Figura 20. Mecanismo de transmissão de cargas (Serra, 2013)

A forma ideal para conduzir uma força concentrada aos apoios é o triângulo, o funicular da força. Este arco obriga o carregamento a descrever um caminho mais longo, afastado da trajetória ideal. Para tal, a forma do arco tem de coincidir o mais possível com o antifunicular das cargas que atuam permanentemente na estrutura. Para se ter apenas esforços de compressão, a forma do arco deverá ser o inverso do funicular das forças a ele aplicadas (Figura 21).

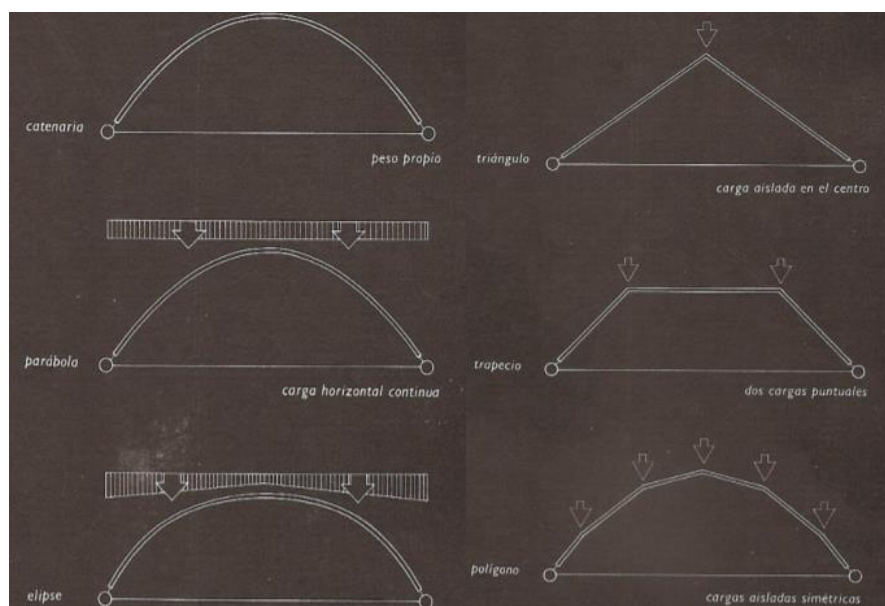


Figura 21. Formas geométricas (Costa de Sousa, 2012)

Os elementos estruturais dividem-se em: elementos principais (corpo principal da estrutura) e elementos secundários. Os elementos principais são constituídos pelas fundações, pilares (ou pegões), encontros, arcos e muros de tímpano (ou paredes de tímpano). Os elementos secundários são os talha-mares e talhantes. Como elementos não estruturais consideram-se: o tabuleiro (ou pavimento) e as guardas (guardas laterais ou guarda corpos) (Morais, 2012)

3.4. Caracterização geométrica e mecânica

Após uma breve análise história, identificação dos elementos e caracterização, descreve-se na presente secção algumas considerações sobre a influência da forma do arco e características das distribuições de cargas e direções, a despeito, resenha sobre a resistências dos materiais componentes integrantes, e salientar o sistema construtivo.

A compreensão completa do comportamento estrutural e das características dos materiais é necessária a qualquer projeto de conservação e restauro. É essencial recolher informação sobre a estrutura no seu estado original, sobre as técnicas e métodos utilizados na sua construção, sobre as alterações posteriores e os fenômenos que ocorreram e, finalmente, sobre o seu estado presente (Costa, 2010).

Comparativamente com as estruturas em betão armado e metálicas, na qual é facilmente verificada a qualidade do produto final através das boas práticas balizadas pelas normas construtivas e de controle tecnológico, não incluindo apenas estes, mas também por meio de quantificação numérica (modelos físicos e matemáticos) e experimental das características dos elementos em betão e/ou aço, elementos estes certificados.

Ao retratarmos o caso das estruturas em alvenaria de pedra, o controle possível para aferição da qualidade atualmente também se encontra relacionado com as medidas impostas pelas normas construtivas, bem como de uma análise visual da face exposta da alvenaria. A caracterização de uma estrutura em alvenaria de pedra está diretamente relacionada com o levantamento da sua geometria e das técnicas de construção supostamente utilizadas (principalmente em construções de séculos passados), nomeadamente dos elementos que a constituem, da sua geometria e distribuição na estrutura.

Ao analisarmos os arcos de alvenaria, podemos subdividi-los em apenas três tipos de equações que podem ser usadas para análise estrutural: equilíbrio (estática); geométricas (compatibilidade) e materiais (tensões). Para estruturas de alvenaria históricas, os primeiros

dois tipos de equações são os mais importantes, uma vez que as tensões possuem normalmente uma ordem de magnitude abaixo da tensão de ruptura da alvenaria. Uma abordagem de estabilidade ou equilíbrio será, portanto, mais valiosa para avaliar a segurança de estruturas de alvenaria, e a análise de limite fornece uma estrutura teórica (Dejong, et al., 2006).

3.4.1. Forma do arco

O arco é um tipo estrutural que tem um comportamento mecânico interessante, pois apresenta a possibilidade de ter os esforços de flexão reduzidos em função da sua forma. Com o avanço tecnológico proporcionado ao longo dos séculos, é facilmente encontrado nas grandes metrópoles pontes com diferentes formas de arcos, por exemplo, pontes em arco superior (ver Figura 22), com tabuleiro inferior suspensos em tirantes ou pendurais, onde estes suportam os empuxos que são transmitidos pelo tabuleiro, neste tipo de estrutura predomina às tensões de tração. E, em arco intermédio (ver Figura 23), neste sistema os arcos são engastados em blocos de fundação de grande rigidez e os empuxos do tabuleiro são absorvidos pelos tirantes que trabalham à tração e pelos montantes que trabalham à compressão, geralmente situados próximos às regiões de acesso.

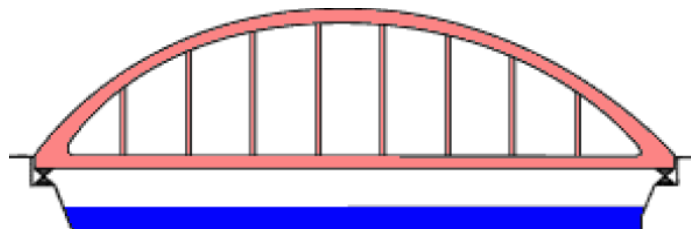


Figura 22. Ponte em arco superior – (Lazzari, 2008) apud Mattos, 2001, p. 33

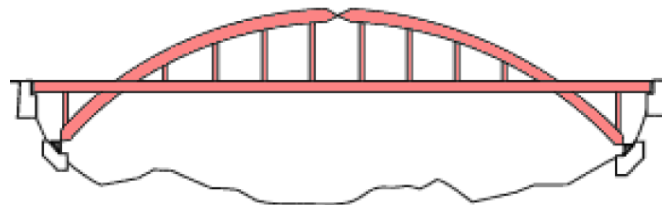


Figura 23. Ponte em arco intermédio – (Lazzari, 2008) apud Mattos, 2001, p. 33

A forma do arco determina como os carregamentos serão distribuídos ao longo de toda a estrutura, portanto, os mecanismos de suporte e comportamento estrutural divergem uns dos outros de maneira a adequar-se a melhor solução para as quais estas foram projetadas. Neste trabalho, dissertaremos sobre um único tipo de arco, a saber, pontes em arco inferior. A

julgar por ser o sistema estrutural mais antigo do mundo, pois, constituiu (como já visto), no passado, a única solução para vencer grandes vãos. A princípio, eram utilizados os arcos de tímpano cheio em alvenaria de pedra, que porventura foram substituídos no período contemporâneo por tímpanos vazados, tendo os empuxos sendo absorvidos por montantes que resistem à compressão.

O sistema estrutural do arco se torna, então, isostático de forma triarticulados ou então, hiperestáticos de forma biarticulados ou bi engastados. Os arcos triarticulados são uma estrutura isostática, otimamente empregada nos casos de esforços acidentais elevados e ocorrência de recalques nos apoios. Os arcos bi engastados, que possuem grau de hiperestaticidade igual a 3, são usados preferencialmente quando se dispõe de condições ideais de engastamento no terreno de fundação, podendo se apoiar diretamente em rocha ou um encontro dotado de grande rigidez (ver Figura 24).

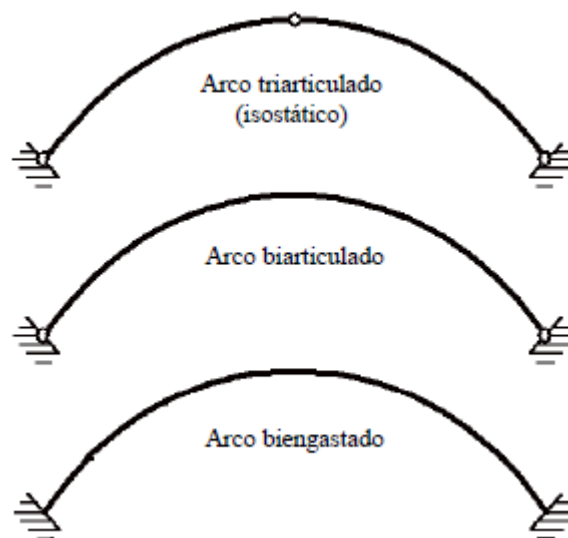


Figura 24. Esquema estático de pontes em arco (Debs, et al., 2007) apud Leonhardt 1979

O arco é um elemento em que as cargas transversais são transmitidas aos apoios principalmente pelas forças axiais que o comprimem (Quadros, 2012). Segundo Leonhardt (1979), o arco com sua forma curva desenvolvida segundo a linha de pressões, é o sistema estrutural apropriado para materiais de construção maciços como alvenaria de pedras, o que possibilita uma durabilidade ilimitada, não necessitando de juntas de dilatação. Se o material utilizado for o concreto armado, é preciso levar em consideração as deformações provenientes da retração, variação de temperatura e deformação lenta, tornando necessária a existência de juntas de dilatação.

A notável intuição estática dos construtores da Antiguidade Clássica, que venceram os grandes vãos com arcos e abóbadas de alvenarias de pedra, evitando, desta forma, os momentos fletores que originariam tensões de tração impossíveis de serem resistidas por aquelas alvenarias, tudo isto desconhecendo os princípios básicos da Estática (Süssenkind, 1981).

Estas obras, como já verificado, apresentam como maior vantagem a predominância dos esforços de compressão ao longo da estrutura principal. A compressão na estrutura reduz os momentos fletores provocados pelo carregamento, resultando em uma pequena ou nula tensão interna de flexão.

Na Figura 25 é ilustrada um dos métodos adequados para determinar uma geometria do arco, de forma a este estar em compressão, consiste em determinar os momentos fletores devidos ao peso próprio do arco e das cargas provenientes do tabuleiro numa viga simplesmente apoiada com o mesmo vão do arco. Fixando o centro e a flecha (f) desejada, a reação horizontal (H) para equilibrar o momento fletor no fecho do arco é (Costa de Sousa, 2012).

$$H = \frac{M_c}{f} \quad (1)$$

Sendo M_c o momento no fecho do arco. Assim a coordenada Y do arco é dado por:

$$Y = \frac{M_y}{H} \quad (2)$$

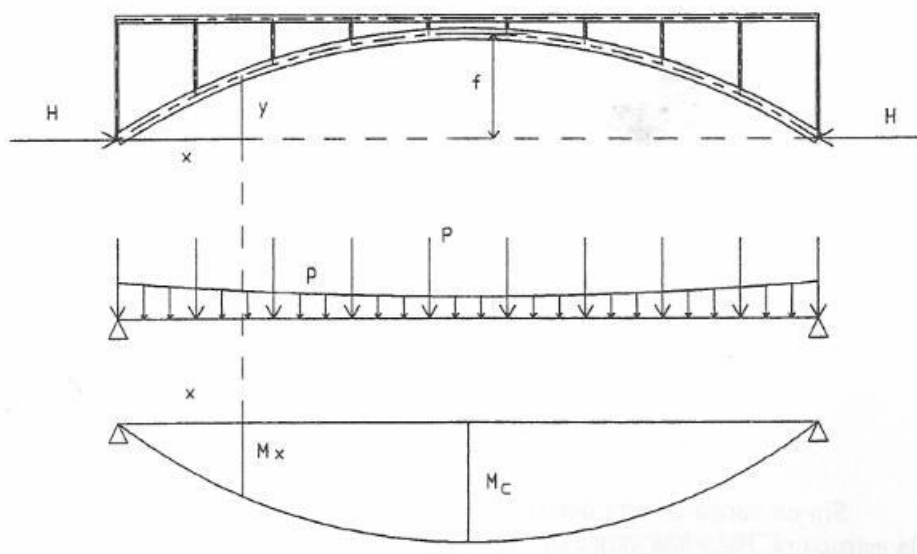


Figura 25. Momentos fletores numa viga simplesmente apoiada sob ação do peso próprio de uma ponte em arco (Costa de Sousa, 2012)

Em resumo, o eixo do arco deve ser projetado de modo que se aproxime ao máximo da configuração da linha de pressões da carga permanente conforme ilustrada na Figura 26, ao passo que a carga produzirá somente esforço de compressão, fazendo valer o bom desempenho das características mecânicas das alvenarias de pedra. No entanto, para as cargas móveis, que produzem tanto tensões de compressão e tração, (sendo que as de tração são consideradas inferiores que as de compressão), o estabelecimento do eixo ideal se torna mais complexo.



Figura 26. Esquema representativo da força de compressão sobre os apoios dos arcos (Lazzari, 2008) apud Morrissey, 2000

Conforme mencionado, o desenvolvimento dos arcos das pontes varia ao decorrer dos contextos históricos aos quais estes estão associados. Desta maneira, a forma de um arco é descrita como uma função do vão (s) e do aumento (r) ou, mais normalmente, da razão aumento para o vão r/s . As pontes de arco romano eram tipicamente semicirculares ($r/s = 1/2$), embora os arcos segmentares ($r/s < 1/2$) também fossem encontrados (Oliveira, et al.).

Durante o período medieval, foi introduzida a forma de arco pontiagudo. Também, a forma semicircular dos arcos romanos foi reintroduzida no início da Renascença, mas a sua funcionalidade restrita em ambientes urbanos deu origem a novas formas de arco, que eram mais rasas do que o arco romano.

Nesta época, o arco tricêntrico (arco de cesta), a elipse e a catenária invertida foram introduzidas, servindo tanto estética como prática exigências. Existe uma relação ideal entre a flecha e vão que nos permite o menor volume e, portanto, um arco mais leve e mais econômico. Essa relação é a seguinte (Rebello, 2000):

$$\frac{1}{10} < \frac{f}{L} < \frac{1}{5} \quad (3)$$

Onde: f = flecha do arco; L = vão do arco.

De forma resumida, e a fim de ratificar as informações supramencionadas, buscou-se enumerar através de tópicos as vantagens e desvantagens na utilização de sistemas em arco para construção de pontes, sejam elas pedonais e/ou viárias.

Aspectos positivos da utilização de pontes em arco (Pfeil, 1983b):

- a) ultrapassagem de grandes vãos: as pontes em arco em concreto armado já ultrapassaram vãos de até 425 m (ponte *Wanxian*, na China, construída em 1997). O principal fator limitante para a construção de pontes em arco com vãos maiores é a resistência das fundações aos esforços horizontais. Quanto maior o vão, maiores serão os esforços que as fundações deverão absorver;
- b) comprovada eficiência estrutural: o concreto e/ou **alvenaria de pedra** é um componente importante que suporta de forma eficaz os esforços predominantes de compressão nas extremidades do arco;
- c) economia no material de construção.

Aspectos negativos da utilização de pontes em arco (Pfeil, 1983b):

- a) elevado custo: tanto em relação a concepção do projeto estrutural, quanto para a construção;
- b) problema construtivo na execução dos arcos: método construtivo adotado exige técnicas mais sofisticadas de execução e, conseqüentemente, mão-de-obra mais especializada.

Obviamente, um tal resumo de prós e contras é sempre subjetivo. Parece que sim, no entanto, como se as vantagens prevalecessem sobre as desvantagens. Que apoiaria a preservação destas estruturas, e com isso, a realização de avaliações de segurança com o objetivo de conservação (Proske, et al., 2009).

3.4.2. Características mecânicas como material estrutural

As propriedades mecânicas das pedras somente se desenvolveram os estudos de forma científica a partir de meados do século XVIII (Huerta, 2004).

Sendo constituída pela associação de diferentes materiais, dispostos e interligados com diferentes níveis de continuidade, e por vezes de geometria desconhecida, a alvenaria de

pedra apresenta um comportamento mecânico cuja caracterização se reveste de particulares dificuldades (Domingues, 2017).

A alvenaria de pedra é um material estrutural com comportamento frágil à tração e alguma ductilidade em compressão. A grande variabilidade das suas propriedades mecânicas resulta, quer do processo construtivo e da sua não standardização, quer da própria variabilidade da geometria e das características mecânicas da pedra e, quando presente, da argamassa da junta. Em particular, ensaios numéricos e experimentais têm evidenciado a importância do imbricamento e posicionamento das pedras no comportamento e na capacidade resistente da alvenaria de pedra à compressão; a deformabilidade da alvenaria é em grande medida controlada pela deformação das juntas, quer por esmagamento ou abertura, quer por deslizamento, donde resulta o rearranjo das pedras e a sua rotura por tração/flexão, de forma pontual e progressiva (Guedes, et al., 2010).

O conhecimento das características físicas e mecânicas dos materiais é fundamental na avaliação do comportamento de qualquer tipo de estrutura quando submetida a solicitações de carácter estático e dinâmico. Contudo, na maioria dos casos, existem muitas incertezas associadas às propriedades destes materiais, devido à idade avançada e consequente degradação destas construções, às técnicas de construção e materiais utilizados, muito diferentes dos utilizados atualmente, à falta de documentação e estudos nestas áreas (Varum, et al., 2005).

Deste modo, a caracterização da alvenaria de pedra, passa obrigatoriamente, pelo levantamento da geometria do material e disposição construtiva (supostamente) aplicadas. Estas suposições de metodologias construtivas naturalmente aproximam-se da realidade ao passo que informações da estrutura em causa encontram-se a disposição em bibliotecas, arquivos técnicos, bem como salvaguardar a experiência do técnico da área.

Busca-se caracterizar dentro de parâmetros ao qual determina-se um padrão comum, ou seja, associam à intervalos de propriedades mecânicas e modelos de comportamento.

De acordo com Huerta (2004), a Tabela 1 a seguir, tomada de Delbecq (1983), traduz uma tabela moderna sobre as propriedades mecânicas das pedras. A característica mais relevante é a elevada resistência à compressão σ_c e a baixa resistência à tração σ_t (entre 1/10 e 1/20 da resistência à compressão).

Os valores da resistência à tração são superiores, por exemplo, aos de trabalhos em muitas abóbodas e cúpulas pré-fabricadas. Não vamos esquecer, no entanto, que outra característica essencial da pedra é seu carácter frágil; um material é frágil quando a energia de ruptura é baixa: pouca energia é necessária para formar uma superfície de ruptura.

Na Tabela 1 estão indicados valores do módulo de Young; que se considerou importante a partir do final do século XIX, pois permite realizar uma análise elástica das construções. Os valores do módulo de Young são orientativos, pois este varia com a tensão e, inclusive, o comportamento é distinto para diferentes pedras da mesma pedreira.

Tabela 1. Resistências mecânicas e peso específico das pedras (Huerta, 2004) apud Delbecq (1983)

	σ_c (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	γ (kN/m ³)
Tiza	2–12	0,1 –1,5	2 –10	14,0
Caliza	7–40	0,5 –5	5 –30	21,0
Caliza compacta	40–100	4–15	30 –60	23,6
Esquistos	15–70	1–10	7 –50	22,2
Granito	60–180	6–15	15 –70	28,5
Cuarcita	80–300	7–20	25 –80	30,6

Para além da Tabela 1 supracitada, Rodrigues, et al. (2005) apresenta também valores para os quais foram utilizados em seus estudos conforme apresentado na Tabela 2, onde tais valores são absolutos, diferentemente da Tabela 1 onde tem-se intervalos a depender do tipo de pedra.

Tabela 2. Características mecânicas dos materiais - Adaptado de (Varum, et al.)

	Módulo de elasticidade – E (GPa)	Coefficiente de Poisson - ν (-)	Peso volúmico - γ (kN/m ³)
Alvenaria de pedra calcária	0,32	0,2	19,60
Blocos de pedra calcária	10,0	0,2	20,00
Pavimentos e cobertura em madeira	9,0	0,20	6,38

Salienta-se que os valores apresentados estão sendo enfatizados sobre as pedras calcárias, dado que será apresentada a ponte que foi o caso de estudo desta dissertação, em que, portanto, refere-se a uma estrutural com predomínio de rocha calcária.

Bourg (2016) refere que geralmente a pedra é anisotrópica em termos de propriedades mecânicas. O peso específico das pedras é determinado através de ensaios e é uma propriedade importante a ser determinada, uma vez que grande parte das cargas gravitacionais, que são as principais tensões nas paredes devido à sua natureza maciça, são influenciadas diretamente pelo seu valor.

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).

Mesmo aceitando que, em serviço, o nível de tensões seja pequeno, a caracterização das tão apreciadas propriedades mecânicas (módulo de deformação longitudinal e Poisson) é difícil devido à grande heterogeneidade das peças estruturais e argamassas e pela própria dificuldade dos ensaios (Léon, et al., 2017).

3.5. Ensaios de caracterização mecânica

Para efeitos de definição das propriedades mecânicas e morfológicas dos materiais constituintes do sistema, e, visando a contextualização do tema em causa, apresenta-se breve resenha sobre os principais meios de ensaios que visam definir tais propriedades, assim como meios de execução e interpretação dos resultados.

Para este objetivo, são geralmente efetuadas campanhas experimentais nas pontes envolvendo normalmente ensaios não destrutivos e que possibilitam a caracterização das características mecânicas dos materiais, em particular da alvenaria, das juntas e dos enchimentos, além de ensaios dinâmicos que permitem estimar os parâmetros modais globais, em particular as frequências naturais e os modos de vibração (Ribeiro, et al., 2016).

3.5.1. Ensaios não-destrutivos e semi-destrutivos

Os ensaios não destrutivos são diversos, aos quais possuem uma grande vantagem, pois permitem a obtenção de informação relevante, são simples, fácil aplicação, e geralmente associados a procedimentos *in-situ*. Recomenda-se ainda que, de modo a aumentar a precisão

das avaliações é conveniente a utilização de mais do que um ensaio para quantificar a mesma propriedade mecânica. Os ensaios mais comuns aplicáveis a estruturas em alvenaria de pedra são, a saber:

- i. Ensaio de macacos planos (semi-destrutivos) ilustrada na Figura 27 – Um dos métodos mais utilizados para determinação das propriedades mecânicas fundamentais de alvenarias (nomeadamente, a resistência e o módulo de elasticidade em compressão) consiste no ensaio de macacos planos, estes ensaios permitem estimar características importantes da alvenaria: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson em situação confinada e caracterizar o estado de tensão instalado nas paredes. Existem as aplicações com macacos planos simples ou duplos.

Os ensaios simples permitem aferir a tensão *in situ* da alvenaria, na qual se faz um corte na superfície da parede a analisar, através do corte realizado há a ocorrência da liberação de tensões na estrutura. Em seguida é inserido o macaco no corte realizado, onde o macaco é pressurizado até que a alvenaria deforme e recupere e volte a sua geometria original. No entanto, o ensaio duplo pode ser realizado em sequência, haja vista que se faz um novo corte de mesma seção, paralelo, horizontal e com distância definidas de afastamento entre os macacos de acordo com parâmetros a serem seguidos para realização do ensaio.

Estes dois macacos definem uma área da parede que estará sujeita à compressão simples devido a pressurização dos macacos, por conseguinte as distâncias entre os pares de pontos fixados diminuem. E, com os ciclos de carga/descarga, com incremento e decréscimo de pressões sucessivas aos macacos realizados com auxílio de um sistema hidráulico, induzem deformações que são registadas por sensores de deslocamento e que possibilitam a construção de um gráfico com conhecimento das curvas de deformabilidade do material permitindo estimar o módulo de elasticidade e, através de medições de deformações horizontais, o coeficiente de Poisson;

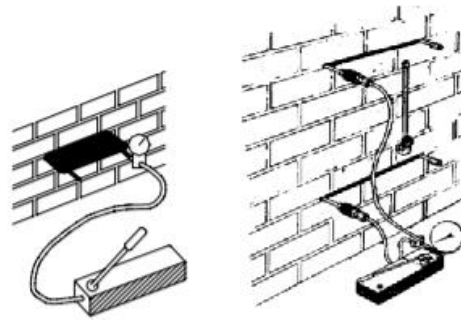


Figura 27. Ensaio de macacos planos simples (esquerda) e duplos (direita) (Gregorczyk, et al., 2000)

- ii. Ensaios com propagação de ondas sonoras (não-destrutivos) ilustrada na Figura 28 – O objetivo deste ensaio é detectar defeitos ou vazios em elementos de alvenaria, ou avaliar a sua uniformidade através de impulsos produzidos por percussão de um martelo instrumentado. Para além do martelo, há um acelerómetro receptor e um dispositivo que regista o impulso inicial e a onda recebida (Alves, 2009).
- Através do impacto causado pelo martelo sobre uma chapa metálica instalada na superfície do paramento, é possível aferir a velocidade da propagação da onda, que através de equipamentos de sensoramento se obtém mapas das velocidades sônicas medidas. A aplicação do ensaio sônico na caracterização das alvenarias de pedra aparece mais recentemente, assumindo um papel preponderantemente qualitativo, sendo utilizado, fundamentalmente com os seguintes objetivos (Guedes, et al., 2010):
- a. avaliação das características mecânicas;
 - b. detecção de alterações nas características mecânicas;
 - c. detecção de vazios;
 - d. controlo de reparações por injeção.

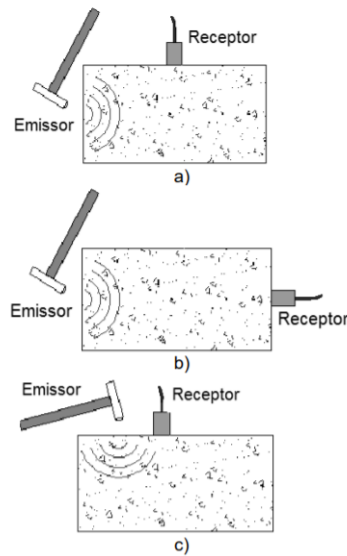


Figura 28. Representação de um ensaio sónico: a) direto; b) semidireto; c) indireto - (Miranda, 2011)

3.5.2. Ensaio dinâmicos

Com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas da estrutura, se costuma recorrer a uma campanha de ensaios dinâmicos de vibração. Estes ensaios permitem avaliar a resposta dinâmica da estrutura em causa nas condições reais *in situ*, detectar singularidades no seu comportamento e, sobretudo, determinar o módulo de elasticidade médio dos elementos estruturais principais, permitindo assim, avaliar as características mecânicas globais. Os ensaios dinâmicos podem ser divididos em:

- i. Vibração ambiental – Este método de ensaio associa-se a vibrações não forçadas, ou seja, são excitações causadas aleatoriamente pelo ambiente envolvente, como vento, correntes marítimas/riachos, tráfego de veículos e/ou pedestres, ou proveniente do tipo de utilização ao qual a estrutura está submetida. Portanto, o ensaio de vibração ambiental permite conhecer os parâmetros modais de uma estrutura, tais como as frequências naturais e os seus modos de vibração;
- ii. Vibração forçada – Este tipo de ensaio consiste essencialmente na aplicação controlada duma excitação, num ou em vários pontos da estrutura, e na medição da resposta (normalmente em aceleração) em vários pontos dessa mesma estrutura (Eça Guimarães, 2017). Os ensaios de vibração forçada exigem a utilização de equipamentos adequados para a aplicação das forças de excitação, tais como geradores de vibrações servo-hidráulicos, ou mecânicos de massas excêntricas, ou ainda equipamentos de aplicação de impulsos. As forças de excitação que são utilizadas podem ser de diversos tipos, nomeadamente, excitações de variação

harmónica, ou com características de ruído branco numa determinada gama de frequências, ou ainda de tipo impulsivo (Rodrigues, 2004).

- iii. Vibrações livre – Os ensaios de vibração livre a estrutura é sujeita a um esforço, ou seja, uma deformação inicial, e, posteriormente esta força deixa de ser aplicada e a estrutura é liberada em regime de vibração livre. Como de pressuposto, para além dos mesmos parâmetros que são identificados em regime de vibração ambiental, este tipo de ensaio consiste principalmente na obtenção dos coeficientes de amortecimento.

No caso de estruturas históricas com considerável valor patrimonial, apesar de se manterem fundamentadas essencialmente em resultados de observações visuais, a realização de ensaios destrutivos é normalmente desaconselhável, impondo-se a realização de procedimentos semi ou não-destrutivos, e de outros meios auxiliares de diagnóstico que permitam obter, com o mínimo de dano possível, os dados a utilizar nos modelos de análise estrutural para aferição da segurança.

3.6. Patologias correntes

Esta secção descreve as principais patologias correntemente identificadas em pontes de alvenaria de pedra e principais causas às quais podem estar associadas. As anomalias podem ser divididas em dois grupos: estruturais e não-estruturais.

As anomalias estruturais que poderão colocar em risco a segurança estrutural da ponte. Estas anomalias estão correntemente relacionadas com o assentamento dos apoios (fundação), abatimento e fendilhação dos arcos e desaprumo dos muros de tímpanos.

As anomalias não-estruturais associam-se àquelas nas quais não causam risco a segurança estrutural, todavia se não forem colmatadas em tempo útil, podem causar a longo prazo danos que podem prejudicar graditivamente a funcionalidade da estrutura. As anomalias mais recorrentes estão relacionadas com a presença de vegetação, colonização biológica, perda de argamassa nas juntas, presença de humidade e eflorescência, bem como a degradação dos materiais.

Para compreender os fenómenos patológicos, torna-se necessário interpretar as respectivas causas e a maneira com que avançam para o quadro patológico diagnosticado. Ratificando o que no parágrafo anterior, as patologias frequentemente ocorrem em cadeia, ou seja, a

presença ou surgimento de uma anomalia pode acarretar em outras, podendo de fato comprometer a segurança estrutural.

3.6.1. Anomalias estruturais

3.6.1.1. Assentamento dos apoios

Relativamente ao caso específico das fundações, existe um conjunto de anomalias que ocorrem mais comumente e as suas causas vão desde as características do próprio terreno e condições de fundação à intervenção humana (Silva, 2016).

O assentamento dos apoios ocorre nos pilares quando existe excesso de tensão aplicada sobre o solo em que estão fundados ou eventual remoção de solo junto dos apoios alterações nas condições de escoamento das linhas de água, que escava e arrasta o material, resultante da erosão hidráulica. Bem como agravamento da sobrecarga sobre a ponte, para a qual esta não foi dimensionada.

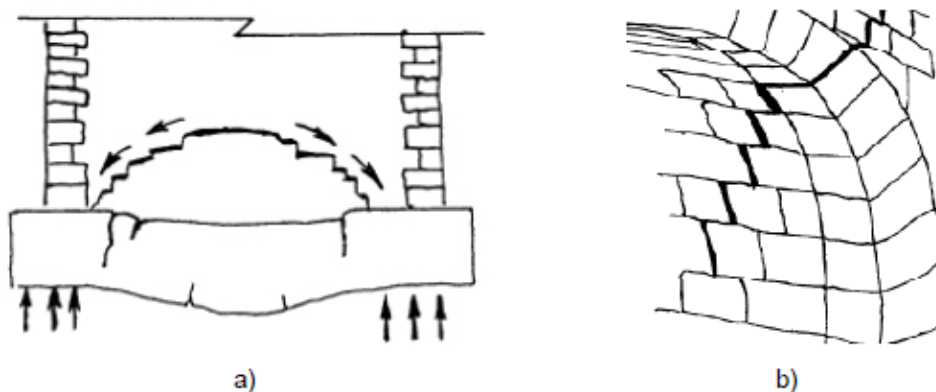


Figura 29. Danos associados ao assentamento da fundação (Santos, 2008): a) nos pilares; b) no arco

3.6.1.2. Abatimento dos arcos

O abatimento dos arcos deve-se à ocorrência de assentamentos diferenciais dos apoios que ocorrem ou devido ao excesso de vibrações e à degradação do material de enchimento. Estes abatimentos acarretam fendilhações que podem ser longitudinais ou transversais.

O movimento dos apoios de uma estrutura conduz a uma redistribuição de esforços, que poderá provocar fendilhação nos seus elementos. Torna-se relevante a compreensão destes fatores que provocam esta anomalia, devido às consequências que poderão ocorrer (Rodrigues, 2014). Segundo Silva (2016), a fendilhação longitudinal do arco pode concentrar-se junto à face, localizada ou distribuída na zona central ou ainda na base do arco.



Figura 30. Abatimento do arco e fendilhação na base (Ramos, et al.)

3.6.1.3. Danos nos muros de tímpano

O colapso dos tímpanos é um dos graves problemas de instabilidade de uma ponte de alvenaria. A existência de forças laterais que empurram os muros de dentro para fora (ver Figura 31), como por exemplo o excesso de carga sobre a ponte que através do enchimento é também transformado em forças perpendiculares aos tímpanos (Santos, 2008). Rodrigues (2014) completa dizendo que as principais causas, na origem deste fenómeno, encontram-se associadas também a uma má drenagem superficial do tabuleiro e do enchimento, ao uso impróprio de materiais de enchimento.

Com os impulsos laterais impostos pelo enchimento, os tímpanos podem sofrer diversas anomalias, como escorregamento, embarrigamento, inclinação para fora do plano e abertura de junta entre o tímpano e o arco (Silva, 2016).



Figura 31. Abaulamento [esq.], destacamento [centro], rotação do muro [dir.] (Lopes, 2012)

3.6.2. Anomalias não-estruturais

3.6.2.1. Desagregação do material

Os principais agentes agressivos de deterioração dos materiais são: água, sais solúveis, gases presentes na atmosfera, seres vivos, temperatura, vento e gelo. Estes agentes conduzem a alterações da superfície do material. Lopes (2012) refere que, trata-se de danos de natureza físico-química, mecânica e erosiva que resultam essencialmente da passagem do tempo e da falta de planos de manutenção e intervenções de reabilitação adequados (ver Figura 32).



Figura 32. Desagregação do material pétreo (Ramos, et al.)

Devido ainda à ação dos ciclos de gelo/degelo, cristalização/dissolução de sais e dilatações diferenciais causadas por variações térmicas, pode ocorrer a desagregação da pedra, originando perda de resistência da estrutura, podendo originar assim anomalias de caráter estrutural, com a perda e destacamento de blocos (Silva, 2016).

3.6.2.2. Eflorescência

A presença de água e humidade manifesta-se nos componentes das pontes de alvenaria de pedra (e.g., arcos, pilares, encontros, muros, talha-mares e talhantes), através de escorrências/depósitos de água, manchas de humidade e eflorescências conforme ilustra a Figura 33 (Morais, 2012).

Segundo Léon, et al. (2017) o próprio escoamento representa um fluxo capaz de arrastar materiais soltos na pedra que são depositados nas áreas de remanso. Nesses locais, além disso, os sais se acumulam quando a água evapora. Desse modo, nas áreas expostas das cornijas e nas projeções se perde relevo, os detritos são lavados pelo escoamento e nas partes

abrigadas, pois sob esses elementos da topografia crescem biocolônias, acumulam-se sais e são mais sensíveis à geada, pois permanecem úmidos por mais tempo.



Figura 33. Presença de eflorescências e escorrências de água no intradorso da ponte (Rodrigues, 2004)

3.6.2.3. Vegetação e poluição biológica

Aquando de grandes quantidades, o desenvolvimento de vegetação de pequeno e médio porte poderá esconder a existência de danos estruturais e aumentar a carga sob a estrutura. Por sua vez, a presença de raízes de plantas poderá ser responsável pela origem de ações mecânicas, provocando fendilhação na estrutura. A Figura 34 apresenta um exemplo de vegetação em pontes de alvenaria de pedra (Morais, 2012).

A ocorrência destas anomalias está comumente relacionado à ausência de manutenção da ponte. Ainda devido a falta de manutenção, estes efeitos podem desenvolver-se e causar efeitos na estabilidade da ponte, principalmente da expansão de raízes de dentro para fora da estrutura e desagregação do material pétreo.



Figura 34. Vegetação presente nas estruturas de alvenaria de pedra (Rodrigues, 2014)

3.7. Modelos de cargas dinâmicas

As cargas dinâmicas estão relacionadas com o tempo e podem ser agrupadas em quatro categorias (Krus, 2012):

- cargas harmónicas ou sinusoidais;
- cargas periódicas;
- cargas aleatórias com variações arbitrárias de tempo, intensidade ou direção;
- cargas instantâneas, ou de duração muito breve.

De um modo geral a ação pedonal é variável no tempo e pode ser classificada de carga periódica. Devido à sua baixa intensidade, esta carga não provoca vibrações significativas quando é aplicada em estruturas muito rígidas.

De modo simplificado, as forças verticais e horizontais registradas em função do tempo ao caminhar de um peão pode ser expresso pela Figura 35. As curvas representadas, denominadas funções de carga, são características de determinado tipo de andamento, e a sua configuração exata depende dum número elevado de parâmetros de natureza mais ou menos complexa e que variam de indivíduo para indivíduo (Alves, 2008).

É perceptível a diferença entre as ações vertical, lateral e longitudinal, donde este valor pode chegar até 20 vezes maior conforme ilustrado a seguir. Portanto, para efeitos de modelação e aplicação de cargas transientes no modelo que será apresentado no próximo capítulo, fez-se uso somente das cargas verticais.

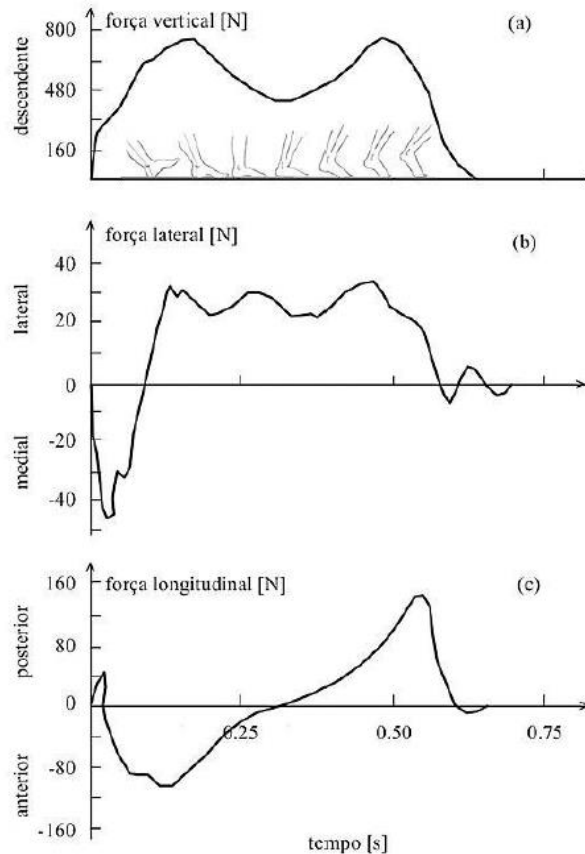


Figura 35. Registos temporais de um passo em caminhada na direcção vertical, lateral e longitudinal – (Moreira, 2013)

Existem alguns modelos de carga para ações induzidas por peões individuais definidos por diferentes autores, a saber:

- Modelo de carga da BS 5400
- Modelos de carga Bachmann e Ammann
- Modelo de carga de Young
- Modelos de carga de Sétra
- Modelos de carga do Synpex

Por questões de simplificação e por não fazer parte do intuito do presente trabalho a pormenorização dos modelos de carga supracitado, definiu-se pelo o modelo de carga Bachmann e Ammann. Segundo este princípio, as ações induzidas por peões individualmente tendem a seguir um padrão. Os estudos realizados configuram um gráfico de carga em função do tempo conforme pode ser notado na Figura 36 a seguir. As considerações do modelo de carga são validas para um peão com peso de $G = 700\text{N}$ e frequência de $2,0\text{ Hz}$.

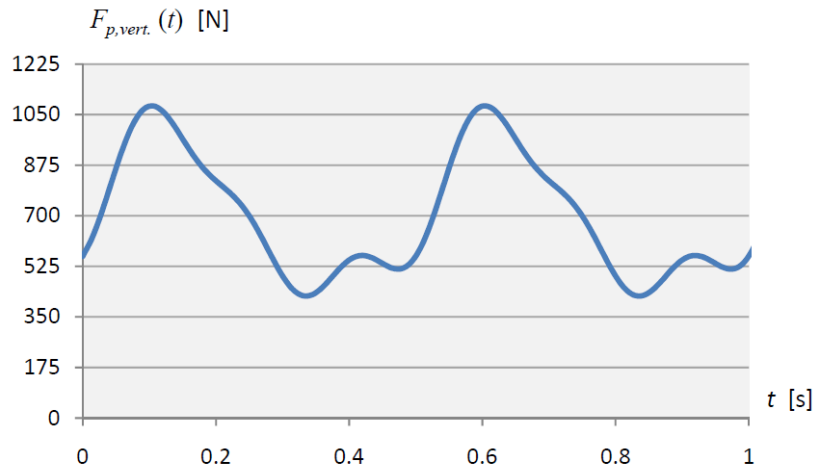


Figura 36. Função de carga vertical para um peão com $G=700\text{N}$ e $f_p=2,0\text{Hz}$, de acordo com Bachmann (Alves, 2008)

Da mesma forma que para o trem-tipo de um peão a caminhar definido pelo modelo de Bachmann e Ammann, a função de carga para a ação da corrida, é em geral caracterizada por um único valor máximo, e pode-se expressar por uma sequência de impulsos semi-sinusoidais espaçados em função da frequência de passada, e do tempo de contato com o pavimento (Alves, 2008).

A Figura 37 ilustra um exemplo da função de carga em corrida formulada por Bachmann e Ammann, para um peão de peso igual a 700N e uma frequência de passada de $3,0\text{Hz}$.

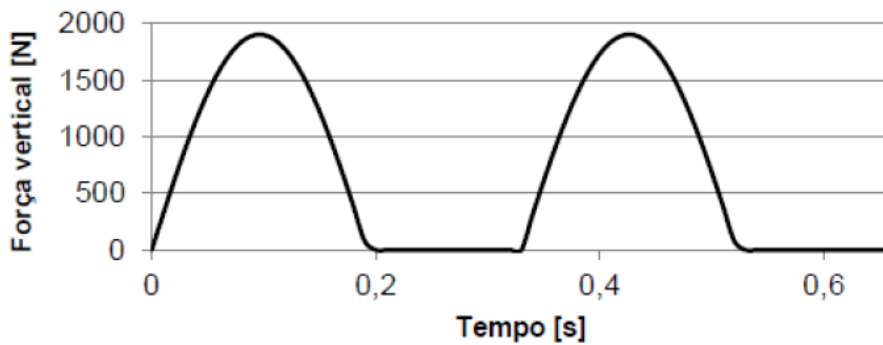


Figura 37. Função de carga para corrida segundo Bachmann, para $G = 700\text{ N}$, e $f_p = 3.0\text{ Hz}$ - (Moreira, 2013)

4. Caso de Estudo

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado o Caso de Estudo. O caso de estudo objeto deste trabalho é a Ponte Bairro dos Anjos sobre o Largo Camilo Castelo Branco, ponte com dois arcos de alvenaria de pedra construída na segunda metade do século XIX (ver Figura 38).



Figura 38. Ponte do Bairro dos Anjos

A ponte é composta por dois arcos com desenvolvimento semicircular, um pilar intermédio na qual conecta os arcos, apresenta estruturas de tímpano cheios, ou seja, preenchidos e não vazados, bem como talhantes a jusante e talha-mares a montante em forma triangular com geometrias iguais, tabuleiro revestido com piso cerâmico e guarda-corpos em aço a cor verde.

Será apresentada a informação relevante da pesquisa sobre dados históricos, a inspeção visual, a metodologia adotada para a definição da geometria da ponte e dos seus elementos estruturais, quantificação de ações, modelação e calibração do modelo, e por fim, apresentação dos resultados obtidos (esforços e campos de tensões).

4.2. Recolha de dados históricos

A ponte, conforme cita Gonçalves (2010) parece ter sido construída no Séc. XIX, conforme se infere da deliberação camarária de 29 de Julho de 1862: “A vereação resolveu fazer uma

ponte de pedra no sítio onde está uma de madeira em grande ruína”... “junto do Passeio do Rossio, e que dá passagem para o Bairro dos Anjos...”, bem como do Livro de Receitas e Despesas da Câmara Municipal de Leiria (pagamento em 2-9-1862). Estabelece a ligação entre o Largo Camilo Castelo Branco e a Alameda Dr. José Lopes Vieira. Por deliberação camarária de 16-12-2002, foi-lhe atribuído o topónimo PONTE BAIRRO DOS ANJOS, nome porque era conhecida.

A referida ponte de madeira havia sido arrematada por Portaria nº 43, de 20 de julho de 1841 (L. ° de Receitas e Despesas da Câmara Municipal de Leiria.)

Sabe-se que a ponte foi alvo de restauração (não-estrutural) realizada, conforme informação do Arquivo Técnico de Leiria que pode ser verificado através do processo nº T-423/84 pela empresa de Construção Civil Virgílio Sousa Leal, bem como perfil com a ponte sobre os elementos do Estudo Hidrológico/Hidráulico do Rio Lis, na Zona de intervenção do Programa Polis na Cidade de Leiria, documento este disponibilizado pelo Departamento de Planeamento e Gestão Urbanística do Município de Leiria.

Ao longo da fase de levantamento e apuração de dados relevantes para uma compreensão histórica dos fatos, este infelizmente ficou sem maiores informações com dados mais concretos sobre a ponte.

Contudo, e, face à similaridade à Ponte dos Três Arcos como poderá ser observado, tomou-se esta como referência pois foi possível obter mais informações quanto as características da citada ponte, seja quanto da concepção estrutural e dos materiais componentes.

Lendo o trabalho de Luciano Coelho Cristino (in JORNADAS SOBRE PORTUGAL MEDIEVAL – Leiria/1983, em “A Vila de Leiria em 1385”, Pág. 206 e 207), somos levados à conclusão de que a Ponte dos Três Arcos existiria já no Séc. XIV ilustrada através da Figura 39 (Gonçalves, 2010). Pode-se notar a “P.Nova” como sendo a ponte supramencionada.

ponte provisória de madeira, conhecida por Ponte de Pau (ver Figura 40), onde foi concluída já em 1903.



Figura 40. Ponte de Pau (Gonçalves, 2010)

Após a ponte ter sido construída e aberta ao público, hoje designada por Ponte Afonso Zúquete procedeu-se à demolição da Ponte de Pau (ver Figura 41) e, a seguir, à demolição das referidas escadas de acesso



Figura 41. Ponte de Pau (Gonçalves, 2010)

4.3. Inspeção visual da Ponte

Os parâmetros não-geométricos analisados foram o material de construção, o local e a data de construção. As imagens dispostas ao decorrer desta secção foram tiradas na cota superior do Rio Lis (+32.36), não sendo possível devido à falta de acessibilidade a visita por debaixo da ponte.

Quanto ao material de construção, constatou-se que a ponte é composta maioritariamente por pedras calcárias dispostas de forma justaposta semelhante com junta argamassada, definida como aparelhada tendo como ponto de vista a regularidade das faces das pedras.

Ao longo da inspeção visual, foram identificadas patologias funcionais na estrutura. O resultado da inspeção visual dos elementos estruturais da ponte Bairro dos Anjos e a pesquisa/considerações já referidas no item predecessor, sobre a evolução da estrutura ao longo do tempo permitiu proceder a uma avaliação preliminar sobre o estado atual deste monumento histórico.

Destaca-se a existência de anomalias, essencialmente relacionadas com: deficiente manutenção, evidenciada pela presença de poluição biológica e humidade no interior da estrutura, em detrimento do mal funcionamento de sistema de drenagem da água das chuvas; perda de argamassa nas juntas e degradação do material.

As anomalias podem ser divididas como já referido em secções anteriores em estruturais e não-estruturais, conforme resumido na Tabela 3. Ao passo que face para a inspeção realizada, observou-se apenas a presença de anomalias não-estruturais, que se encontram destacadas em **negrito** também na referida tabela. As anomalias não-estruturais afetam sobretudo os revestimentos. Estas anomalias podem agravar-se e avançar em profundidade na parede, atingindo, portanto, a própria alvenaria e, assim, a segurança estrutural.

Tabela 3. Anomalias estruturais e não-estruturais

Anomalias Estruturais	Anomalias não estruturais
Fendilhação	Desagregação de substrato
Deformação / abaulamento	Fissuração superficial
Esmagamento	Manchas
Deformação dos pisos	Eflorescências
Alterações estruturais deficientes	Fungos
	Vegetação parasita

As patologias encontradas no intradorso à margem direita, (Figura 42) pertencem ao grupo de eflorescências. Onde ocorre devido a dissolução dos sais das argamassas e do material pétreo que se depositam à superfície quando a água evapora.

Estas são mais perceptíveis em caminhos de percolação da água, principalmente sobre as juntas argamassadas. Na mesma figura, percebe-se a presença de manchas também no intradorso devido às infiltrações e ao escoamento. O próprio escoamento representa um fluxo capaz de arrastar materiais soltos na pedra que são depositados nas áreas de remanso.

A falta de impermeabilização e/ou sistema de drenagem, está causando a filtração da água acompanhada de sais com as correspondentes lesões nos materiais (vista pelo alçado a montante).



Figura 42. Patologias observadas

As demais anomalias como a presença de fungos e vegetação parasita pode ser identificado em inúmeros pontos conforme ilustrado na Figura 43. A presença dos fungos constitui um ataque químico, principalmente em paramentos de materiais porosos e húmidos que provocam alterações de coloração e de aspecto, retenção de água, aparecimento de bolores e libertação de substâncias químicas que levam à erosão química dos paramentos (processos bioquímicos).

Igualmente a presença de vegetação parasita está relacionada, assim como os fungos, a presença de humidade na estrutura, ao passo que pode acarretar a criação de pressões intersticiais nas argamassas e nos elementos de alvenaria de pedra, causando subsequentemente a desagregação do material.



Figura 43. Anomalias não-estruturais (alçado a montante)

Por fim, destaca-se na Figura 44 as anomalias do grupo fissuração. A ocorrência desta patologia nas estruturas está relacionada muitas das vezes devido a retração dos materiais de revestimento.



Figura 44. Fissuração do material de revestimento (alçado a montante)

A relação entre as anomalias e as suas origens é uma questão complexa, devido à diversidade de origens e à inter-relação dos diversos elementos agressores. O aparecimento de patologias está geralmente associado a um conjunto de causas que podem ser de natureza física / mecânica, química ou biológica. A ausência de manutenção e reparação agrava as anomalias existentes, por conseguinte, frequentemente os fenómenos patológicos ocorrem em cadeia, originando inevitavelmente o aparecimento de outras.

4.4. Levantamento da geometria da Ponte

A caracterização geométrica da ponte ilustrada na Figura 45 foi realizada com o auxílio do equipamento laser scanner Leica BLK360 que é capaz de realizar um levantamento topográfico planialtimétrico, ou seja, tem como resultado uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) da área mapeada.



Figura 45. Levantamento geométrico

Após a recolha das informações *in situ*, faz-se uso do software Recap da Autodesk para leitura e geração das nuvens de pontos, e, posteriormente extraídos para AutoCAD e modelado em 3D no Ansys. Ao analisar o levantamento geométrico, não se verificou abatimento das abóbodas dos arcos, bem como quaisquer desvios em planta (alinhamento do tabuleiro).

Os parâmetros geométricos obtidos foram o número de vãos (s) e a altura (r) do arco, a espessura (t) no coroamento do arco, e a largura (W) e altura (H) dos pilares como ilustrada pela Figura 46. Os valores aqui apresentados para a geometria da ponte estão indicados pelo alçado a jusante e iniciando da margem esquerda à direita.

Tabela 4. Valores levantados da geometria da ponte

Nº de vãos	Vão (s_1) [m]	Vão (s_2) [m]	Altura do arco (r_1) [m]	Altura do arco (r_2) [m]	Largura da ponte (W) [m]	Altura dos pilares (H) [m]
2	9.77	9.69	3.76	5.18	2.75	5.74

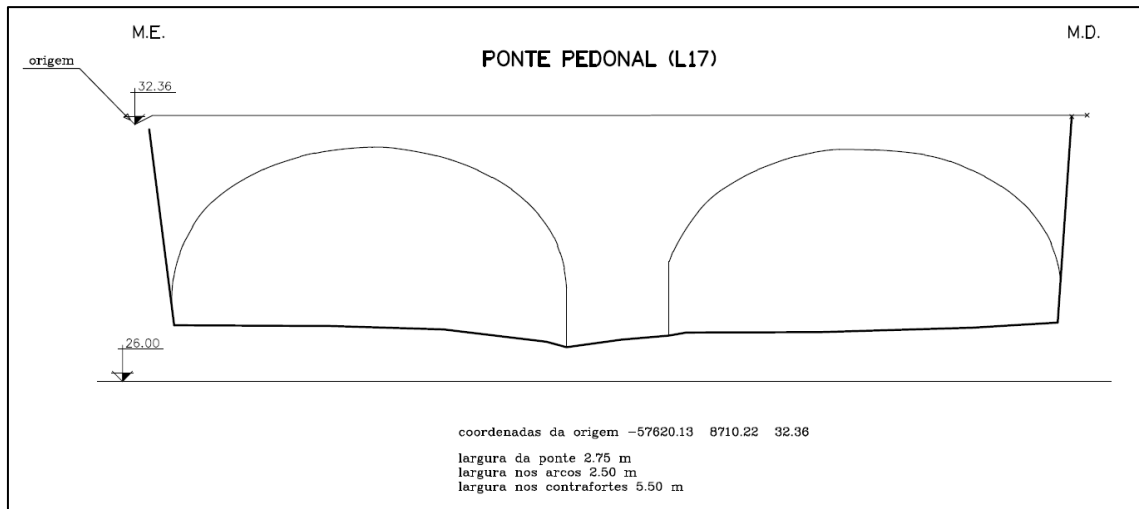


Figura 46. Corte do alçado a jusante - Câmara Municipal de Leiria

Foram consideradas três classes para a definição da profundidade relativa (ver Tabela 5), bem como os arcos foram também agrupados em função do vão conforme Tabela 6, em três categorias (ASCP’2011 – 2º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes, 2011):

Tabela 5. Relação entre a altura r do arco e o vão s

Arco abatido	$0,00 < r/s \leq 0,25$
Arco semi-abatido	$0,25 < r/s \leq 0,40$
Arco profundo	$0,40 < r/s$

Tabela 6. Categoria dos arcos em função do vão s

Arco de pequeno vão	$0,00 < s \leq 7,50$ (m)
Arco de médio vão	$7,50 < s \leq 15,00$ (m)
Arco de grande vão	$15,00 < s$ (m)

Portanto, de acordo com as tabelas acima, a ponte enquadra-se como arco semi-abatido e de médio vão.

4.5. Modelagem numérica

Nesta secção, são abordados alguns detalhes da modelagem computacional realizada no Ansys, sendo eles os elementos finitos utilizados e os procedimentos adotados para implementação do comportamento dos materiais. É apresentada, também, a malha elaborada para as análises e suas respectivas condições de contorno e carregamento, bem como é analisada a condição de equilíbrio da estrutura em secção posterior.

O pacote de software de análise estrutural da Ansys possibilita o estudo de diversos problemas de engenharia, com ferramentas de análise de elementos finitos, tornando possível personalizar e automatizar simulações para problemas que envolvem mecânica estrutural. Proporcionando ainda maior realismo na previsão do comportamento e desempenho de projetos complexos.

A estratégia usada nesta análise consistiu em descrever a geometria através de elementos finitos tridimensionais de modo a representar o modelo contínuo. A caracterização das propriedades elásticas dos materiais baseou-se em valores encontrados na bibliografia tendo em conta o tipo de material e outros valores usados em estudos precedentes que recorreram a metodologias de análise semelhantes.

No modelo estrutural desenvolvido foi considerado apenas um material-tipo, admitindo um comportamento elástico, linear e isotrópico. Logo, para a definição do modelo a ser estudada nesta dissertação foi tomada em conta a geometria da estrutura, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e as solicitações associadas.

4.5.1. Modelo numérico – Método dos elementos finitos

A discretização da malha adotada é ilustrada na Figura 47 contendo 28.073 nós e 17.954 elementos. A estrutura estudada está delimitada pelo uso da versão estudantil disponível do software, assim sendo, buscou-se o maior refinamento da malha quanto possível balizado nas limitações do Ansys.

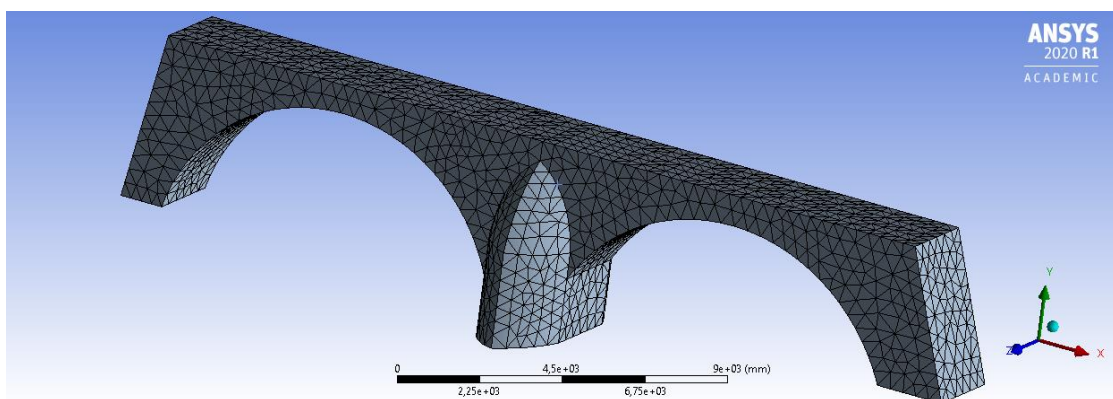


Figura 47. Refinamento da malha de elemento finitos

4.5.2. Condições de fronteira e ações atuantes

De acordo com o Regulamento de Segurança e Ações (Decreto de Lei nº 235/83 de 31 de maio de 1983), havia a necessidade de atualizar a regulamentação portuguesa relativamente

a estruturas de edifícios e pontes. O decreto traz diretrizes normativas para verificação dos regulamentos face à segurança estrutural, bem como construtiva.

Para efeitos de análise e consideração das cargas a aplicar sobre a estrutura, considerou-se as informações constantes no Capítulo X do presente decreto consoante às estruturas de passadiços, bem como os Capítulos I, II, III e V complementares quando necessários.

Da pesquisa bibliográfica realizada foram adotados para as propriedades dos materiais os valores resumidos na Tabela 2. As cargas permanentes aplicadas à estrutura referem-se ao seu peso próprio, calculado através do peso volúmico da alvenaria e enchimento. As sobrecargas associadas a tipologia da estrutura são apenas devidas ao tipo de pavimento, guarda-corpos e circulações de peões, este último como carga dinâmica provocando excitações como será visto nas próximas secções ao retratar a análise modal e transiente.

Os valores utilizados para as sobrecargas constantes no Capítulo X, Artigos nº 47 e 48 respectivamente, são valores característicos. Portanto, tais cargas não sofreram minoração conforme consta nos presentes artigos tendo em vista que o interesse principal para a estrutura é avaliar o Estados Limite Último. A análise de Estados Limite de Serviço estará associada ao tipo de utilização da ponte, relacionando-se as condições de conforto por parte do usuário/peão.

O peso específico do solo utilizado foi 20kN/m^3 , conforme afirma Pinto (2006) em que, o peso específico natural não varia muito entre os diferentes solos. Situa-se em torno de 19 a 20kN/m^3 e, por isto, quando não conhecido, é estimado como igual a 20kN/m^3 . A Tabela 7 e Tabela 8 resumem as propriedades dos materiais utilizadas para modelagem numérica no Ansys, bem como as cargas utilizadas.

Tabela 7. Características estruturais da alvenaria de pedra

Limestone	
Density	1,9986e-06 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	32000 MPa
Poisson's Ratio	0,20000
Bulk Modulus	17778 MPa
Shear Modulus	13333 MPa
▼ Yield Surface	
Initial Inner Friction Angle	0,60000 degree
Initial Cohesion	88,000 MPa
Dilatancy Angle	0,60000 degree
Residual Inner Friction Angle	0,30000 degree
Residual Cohesion	40,000 MPa

Tabela 8. Cargas aplicadas a estrutura

Tipo de Carga	Módulo de elasticidade – E	Coefficiente de Poisson - ν	Carga atuante
Permanente - peso próprio da alvenaria de pedra	0,32	0,2	19.60 kN/m ³
Sobrecarga – Pavimento	-	-	4.00 kN/m ²
Sobrecarga - Guardas	-	-	1.50 kN/m
Peso específico do solo	-	-	20.00 kN/m ³

Relativamente aos apoios, considerou-se rígidos em todos os pontos da base da estrutura, de forma que se impeça quaisquer tipos de deslocamentos em nenhuma direção, assim como, também as rotações da base em torno de um eixo horizontal. Também a implementação de dois apoios elásticos nas superfícies laterais em contacto com o solo na qual permitem modelar os efeitos de rigidez das fundações, face as forças de impulso passivo no contato solo/estrutura.

A Figura 48 a seguir apresenta a modelagem da ponte, os apoios, as cargas aplicadas e respectivas orientações com eixos globais.

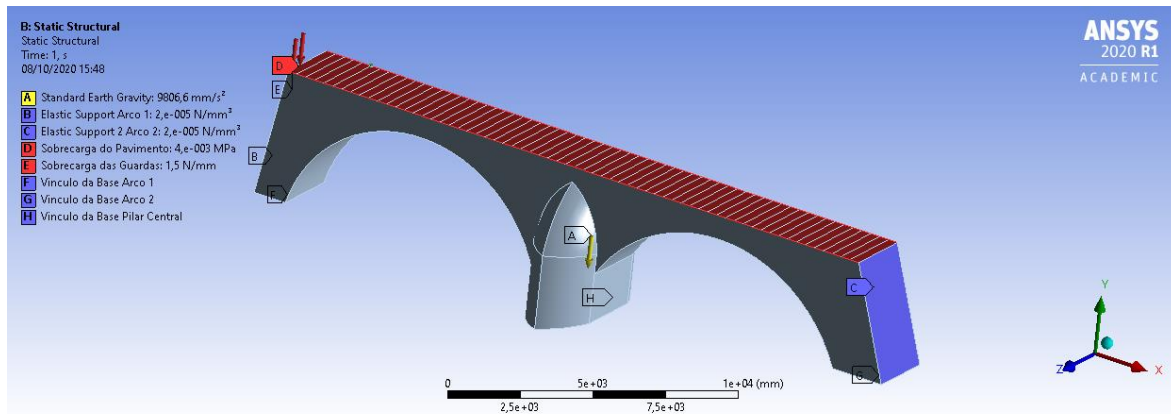


Figura 48. Condições de contorno e cargas aplicadas

Para os efeitos das ações induzidas por peões individuais ao caminhar e ao correr, (cargas dinâmicas associadas à transação/fluxo pedonal), será abordada mais adiante, no entanto vale ressaltar que para as considerações destas, foram utilizados os modelos de carga Bachmann e Ammann.

As cargas de vento, pressão hidrostática, sísmica e impactos provenientes de materiais correntes do Rio Lis (por exemplo, troncos de árvores) não foram consideradas em nenhuma das simulações estáticas e dinâmicas, razão pela qual os efeitos causados na estrutura são de baixa relevância.

Para efeitos elucidativos, ao analisarmos a ação do vento sobre a estrutura, tem-se que o valor característico da pressão dinâmica w_k em kN/m^2 estaria entre 0 a 1, para a Zona A e rugosidade do tipo I apresentado no Capítulo V conforme Decreto de Lei nº 235/83. Por este valor ser de baixa magnitude face à estrutura, este é a principal motivo pelo qual estas cargas foram desconsideradas na modelagem numérica.

À semelhança das razões ora apresentadas para as ações do vento, a mesma análise foi feita para a pressão hidrostática e forças de impactos aleatórias. Relativamente a ação sísmica, esta foi desconsiderada pois as frequências naturais da estrutura conforme será apresentado na análise de resultados é bastante significativa, portanto, não fazendo razão para uma análise mais criteriosa as ações dos sismos.

5. Análise e interpretação de resultados

5.1. Introdução

Nesta secção é realizada uma análise detalhada do comportamento estrutural da ponte, e que, face ao objeto do trabalho de dissertação, procura ilustrar o comportamento estrutural da ponte.

As análises de tensões e deformações, bem como reações de apoio e momento fletores estão dispostas nas subsecções a seguir apresentadas para cada um dos modelos 3D e 2D, respectivamente.

5.2. Modelo 3D

A Tabela 9 a seguir resume os valores extraídos do software que serão discutidos na sequência.

Tabela 9. Resultados extraído do Ansys

Resultados	Mínimo	Máximo	Unidade
Deformação total	0,0000	0,0776	mm
Tensão principal máxima	-0,0525	0,1183	MPa
Tensão de cisalhamento máxima	0,0012	0,2380	MPa

Numa primeira análise, verifica-se que as deformações obtidas são muito reduzidas, haja vista a alta resistência dos materiais consoante à Tabela 7 e Tabela 8 já apresentadas. Assim como, devido as condições de utilização da estrutura, pois esta apresenta baixos valores de sobrecargas para as magnitudes de capacidades de carregamento.

Ao analisar as deformações máximas e mínimas, percebe-se as respectivas zonas de compressão onde a estrutura está mais solicitada às deformações máximas, conforme ilustrada na Figura 49 com o gradiente de cores em que a zona com maior e menor deformação destacam-se em vermelho e azul, respectivamente.

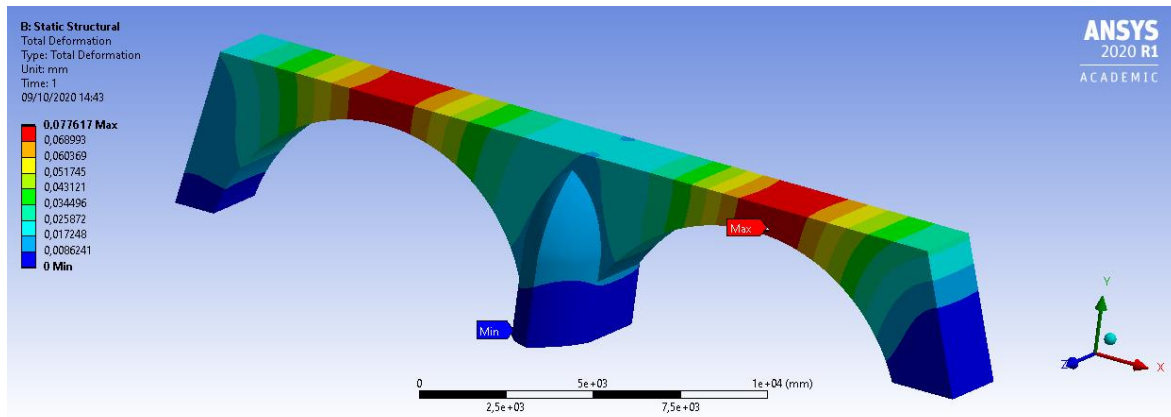


Figura 49. Escala de cores com as deformações máximas e mínimas

Verifica-se ainda que as deformações derivam da secção geométrica de cada elemento estrutural a despeito da maior variação da inércia dos elementos da estrutura encontrar-se nas proximidades das abóbodas com flecha máxima dos arcos. E, o oposto ocorrer nas zonas de arranque dos pilares.

Deste modo, temos uma relação direta entre a inércia e momento fletor como poderemos verificar a seguir, onde quanto maior a carga proveniente dos momentos fletores, menor a inércia, por conseguinte maior deformação.

As tensões principais máximas apresentadas na Tabela 9 ratificam o mesmo argumento, pois os valores tendem a zero ou negativo (elemento comprimido), portanto, fazendo valer as teorias apresentadas ao decorrer da dissertação pois presume-se que a estrutura estudada se encontra majoritariamente funcionando à compressão.

Para as reações de apoio e momentos fletores atuantes, verificou-se que as reações são máximas em Y, bem como os momentos nas bases tendem a girar em relação ao eixo Z. A Tabela 10 apresenta de forma resumida as magnitudes das reações para análise estrutural estática do modelo 3D. Os valores dos momentos e forças de reação referem-se respectivamente aos apoios F, G e H, onde H é o apoio do pilar central, F e G os apoios dos extremos conforme ilustrado na Figura 48.

Tabela 10. Reações nos apoios dos arcos e momentos fletores nas direções X, Y, Z

Reações	Magnitude [em x]	Magnitude [em y]	Magnitude [em z]	Total	Unidades
Momento fletor no apoio F	0,0136	-0,0194	-41,3000	41,30	kN·m
Momento fletor no apoio G	-0,0209	-0,0272	-271,1000	271,10	kN·m

Momento fletor no apoio H	0,0273	-0,0554	-92,4280	92,42	kN·m
Força de reação no apoio F	291,4400	718,1000	0,0024	774,98	kN
Força de reação no apoio G	-297,3400	750,0200	-0,0061	806,81	kN
Força de reação no apoio H	5,8954	2.018,8000	0,0037	2.018,80	kN

É possível identificar ainda pela Figura 50 os pontos máximos e mínimos e os campos de tensões ao longo de toda a estrutura. Como presumível, as tensões máximas de compressão encontram-se nas bases dos apoios dos pilares, bem como as tensões máximas à tração (quando ocorrem) referem-se as zonas do tabuleiro próximo ao centro da estrutura, localizadas entre as faixas de maior deformação pelos mesmos motivos já justificados para a análise de deformações.

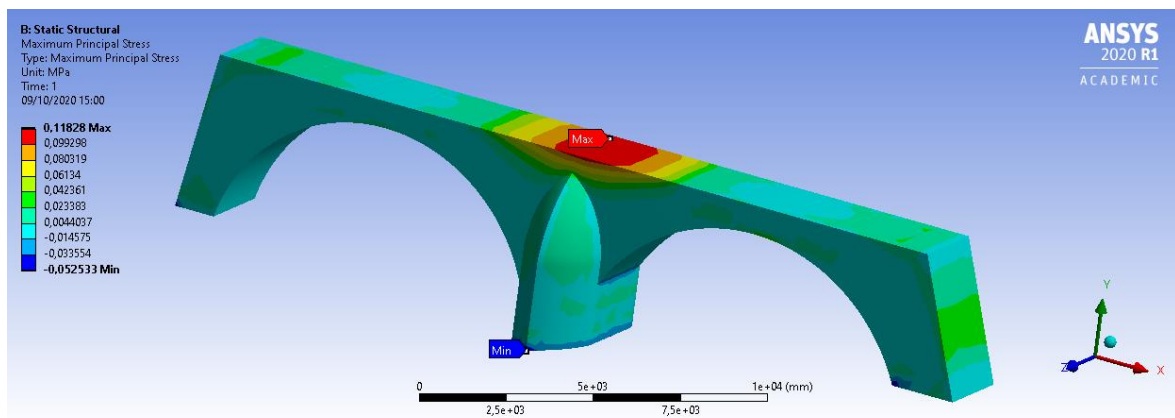
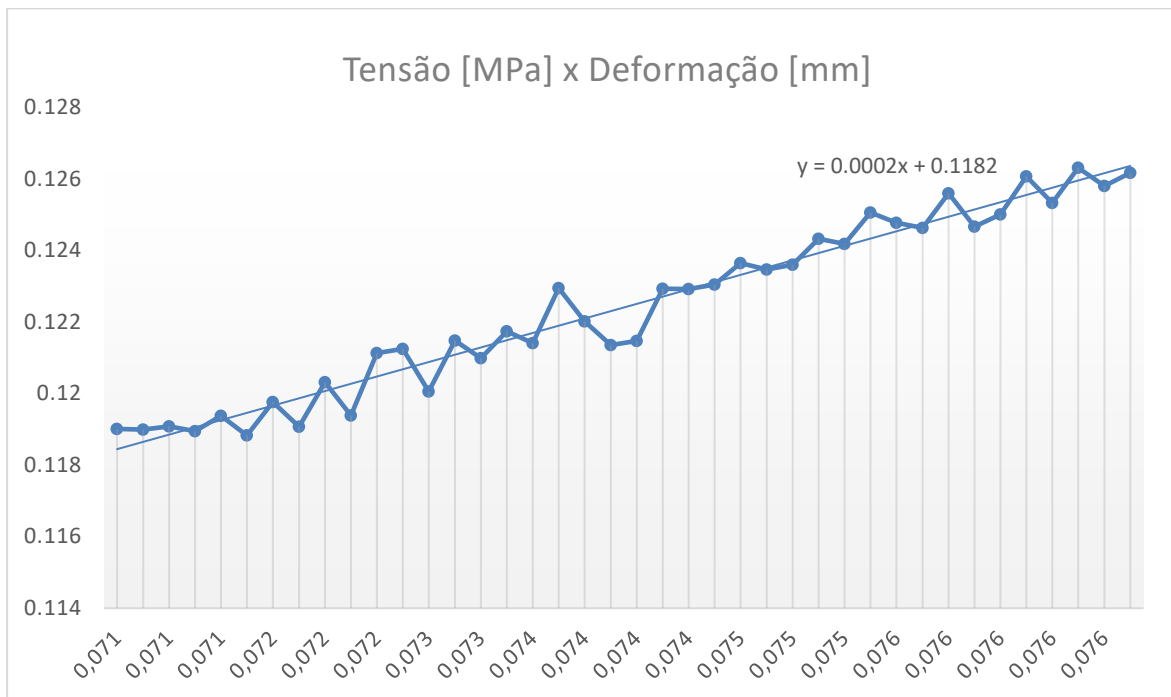


Figura 50. Tensões máximas principais

Para a análise das cargas dinâmicas, utilizou-se os critérios de avaliação os modelos de carga Bachmann e Ammann para trânsito de peões individuais ao caminhar e ao correr, respectivamente por apresentarem modelos mais simplificados e trem-tipo definidos para o caminhar de um peão com 700N e 2,0 Hz de frequência.

As tensões foram extraídas do Ansys e compilados em excel para elaboração do Gráfico 1 que apresenta as tensões e deformações em função da ação dinâmica induzidas por um peão individualmente ao longo de toda a extensão da ponte.

Gráfico 1. Tensões x deformações associadas as cargas dinâmicas induzidas por um peão



Ao analisar as tensões verificadas no gráfico quando comparadas as características de compressibilidade do material estudado, conclui-se que a circulação de um peão individualmente ao caminhar sobre a ponte, em nada altera as características mecânicas/estruturais, seja devido à sobrecarga ou vibrações (ver Figura 51).

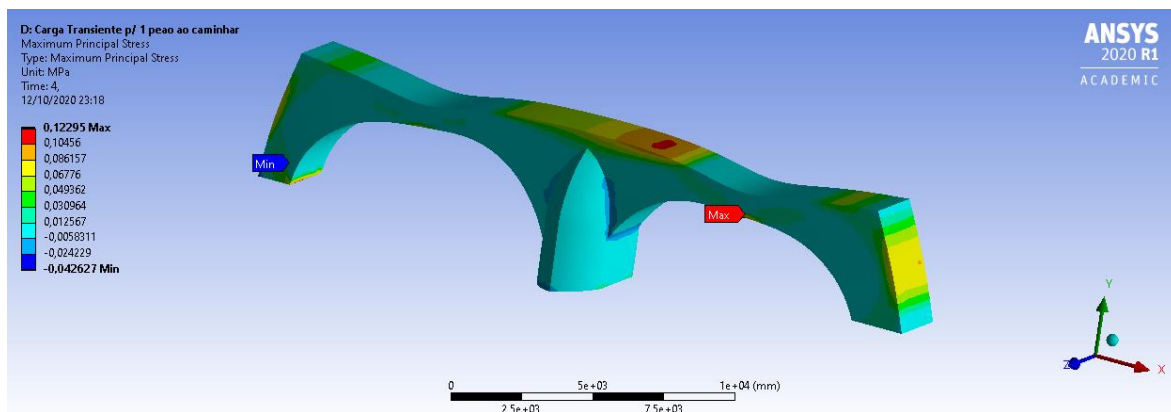


Figura 51. Modelo Bachmann e Ammann com tensões máxima e mínimas

Quando o peão se desloca em corrida sobre a ponte, a ação introduzida é de um tipo distinto da caminhada. De fato, neste caso, o contato dos pés com o pavimento apresenta um carácter descontínuo, o que resulta numa maior amplitude da carga aplicada.

O mesmo procedimento foi realizado para ação de peão em corrida com os parâmetros segundo Bachmann e Ammann, no entanto as ações provenientes das cargas dinâmicas

induzidas por um peão ao correr encontram-se muito próximas dos resultados obtidos para análise anterior.

Para uma última análise, considerou-se que em sua totalidade a estrutura está sujeita a uma sobrecarga estacionária devido ao peso de peões padronizados como 0,7kN e considerou-se a utilização como muito densa, neste caso 8 peões para cada metro quadrado.

Esta análise foi-se útil devido a ocorrência de eventos no Rio Lis, onde a ponte de fato poderá estar sujeita a tais sobrecargas. Os resultados encontram-se apresentados abaixo através da Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55 e resumidas na Tabela 11 com as deformações máximas, tensões máximas principais, tensões de cisalhamento máximas, e, tensões de cisalhamento ao plano XY.

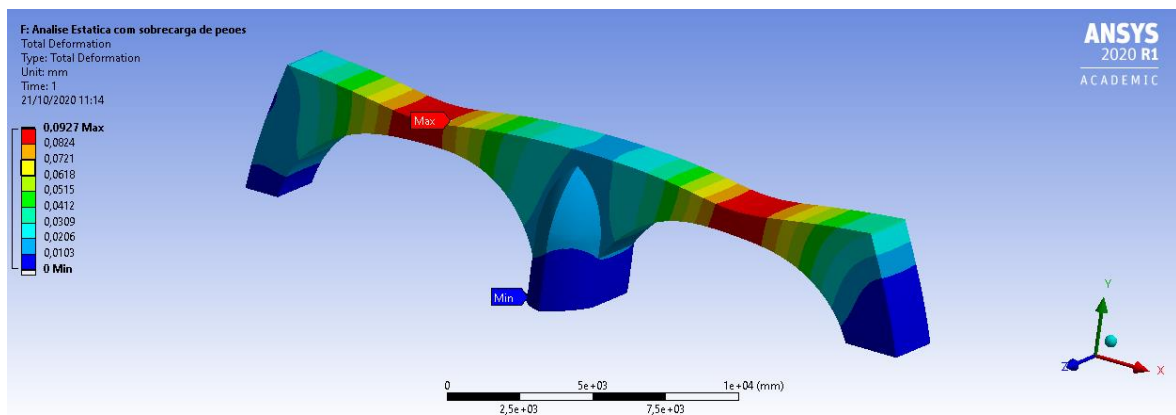


Figura 52. Deformações máximas devido ao acréscimo da sobrecarga de peões

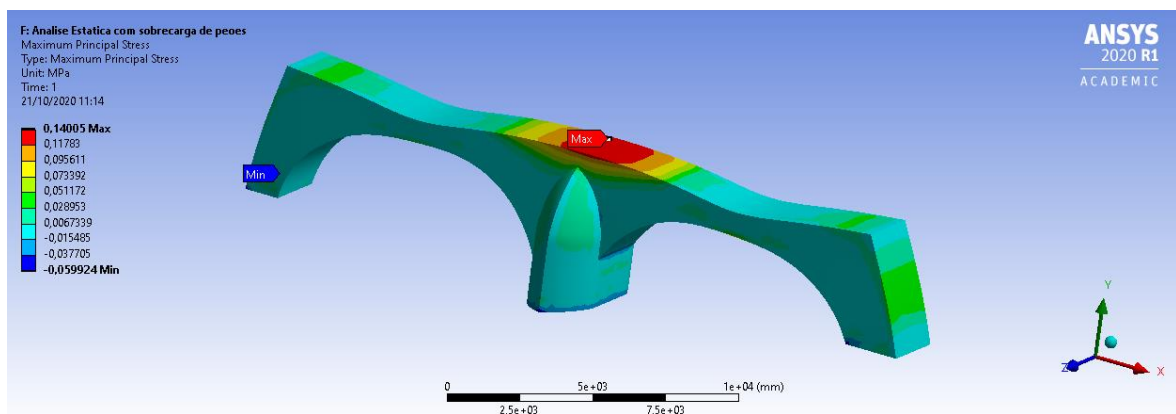


Figura 53. Tensões máximas principais devido ao acréscimo da sobrecarga de peões

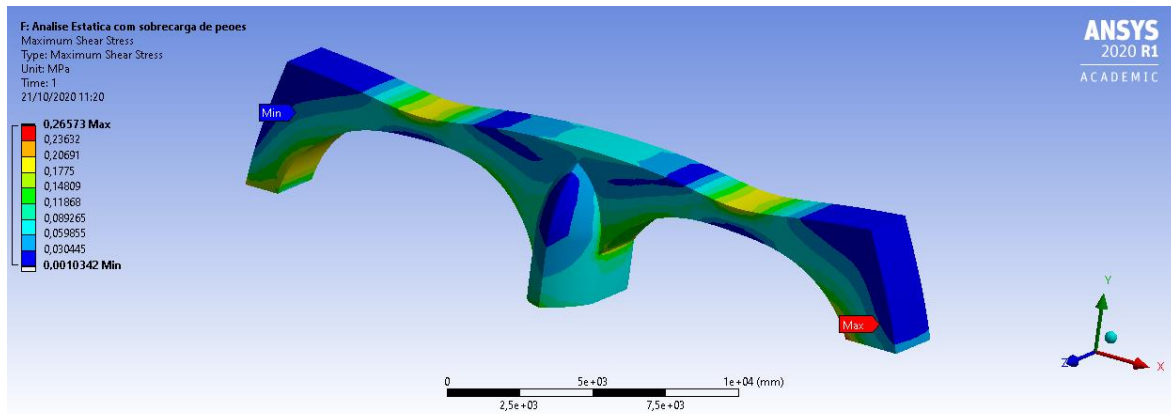


Figura 54. Tensões de cisalhamento máximas devido ao acréscimo da sobrecarga de peões

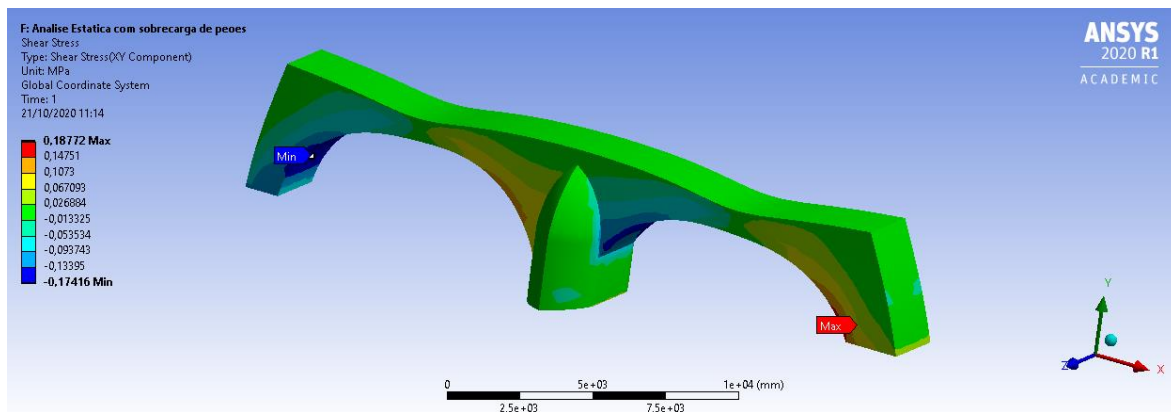


Figura 55. Tensões cisalhantes ao plano XY devido ao acréscimo da sobrecarga de peões

Tabela 11. Resultados de máximos e mínimos para os campos de tensões e deformações devido ao acréscimo de sobrecarga de peões

Reações	Mínimo	Máximo	Unidades	Time (s)
Deformação total	0,0000	0,0927	mm	1
Tensão máxima principal	-0,0599	0,1401	MPa	1
Tensão de cisalhamento máxima	0,0010	0,2657	MPa	1
Tensão de cisalhamento – plano XY	-0,1742	0,1877	MPa	1

De fato, houve um acréscimo em todas as verificações supracitadas, conforme esperado. No entanto, ainda nada significativo face as propriedades do material em causa, tendo em vista que apesar do valor considerado a mais para as sobrecargas, a capacidade de resistência da alvenaria de pedra suprime estes esforços.

5.3. Modelo 2D

Adicionalmente aos estudos ora apresentados e visando a compreensão dos mecanismos e comportamento para pontes em alvenaria de pedra e para validação do modelo e resultados

extraídos do software Ansys, realizou-se uma modelação simplificada do modelo em 2D utilizando as mesmas características dos materiais como, módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento e cargas equivalentes para o modelo 2D. Assim como as condições de fronteira no Robot Structure Analysis versão educacional disponibilizada pelo Autodesk.

Para a modelação foram considerados elementos em barras rígidas e totalmente engastadas nos apoios formando uma estrutura em pórtico com carregamento linearmente distribuído tanto para os valores das sobrecargas, assim como para o impulso passivo. Deste modo, o objetivo da compatibilização do modelo é ratificar se os resultados obtidos no Ansys estão propriamente coerentes com o expectável.

Assim como feito para identificar as quantidades e discretizar os elementos para o Ansys, o mesmo procedimento foi realizado para o modelo do Robot, onde a estrutura modelada é composta por 5 elementos em barras e 6 nós conforme ilustrado na Figura 56 a seguir em vista frontal da estrutura porticada.

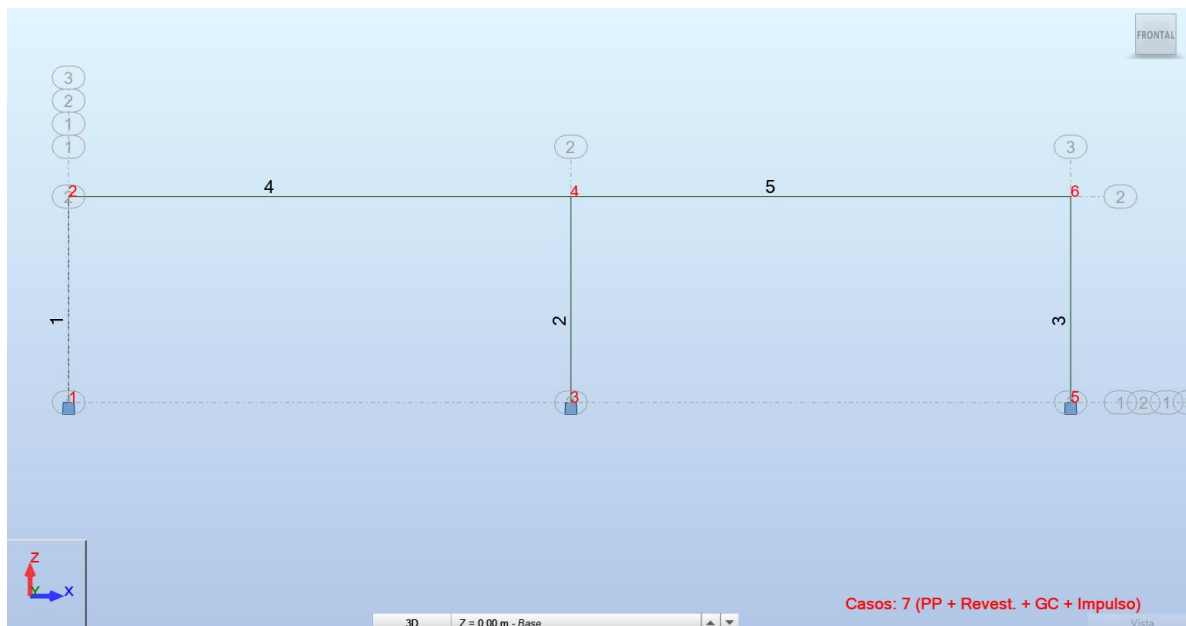


Figura 56. Estrutura com elementos em barras

A Tabela 12 resume as respectivas secções geométricas para cada elemento utilizado para a modelação no Robot, em que as barras 1, 2 e 3 representam os pilares e as barras 4 e 5 as vigas de suporte dos carregamentos solicitantes proveniente das guardas, revestimentos, sobrecarga e peso próprio (ver Figura 57).

Tabela 12. Elementos de barras e secções

Elementos	Nº da barra	Secção	Unidade
Pilar – Arco 1	1	250 x 127	cm
Pilar Central	2	545 x 247	cm
Pilar – Arco 2	3	250 x 199	cm
Viga do tabuleiro	4	250 x 86	cm
Viga do tabuleiro	5	250 x 86	cm

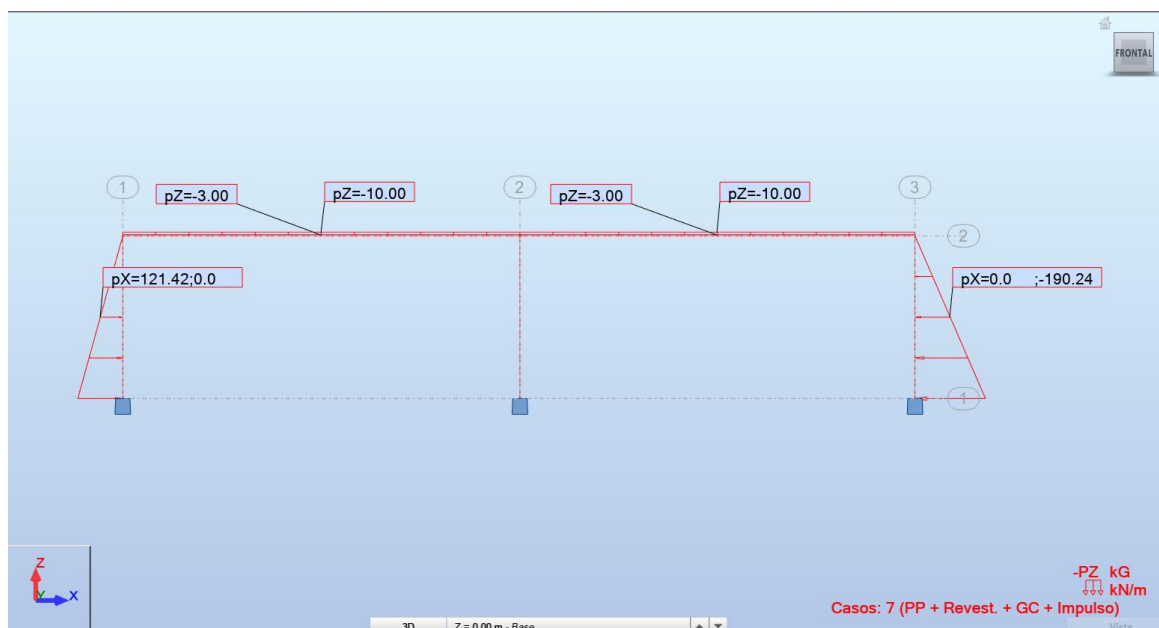


Figura 57. Modelo 2D simplificado e cargas equivalentes

A Tabela 13 e Tabela 14 a seguir apresentam as deflexões máximas e tensões máximas e mínimas de cisalhamento das barras nas direções X e Z, respectivamente, bem como Figura 58 e Figura 59.

Tabela 13. Deflexões máximas das barras

Resultados	UX	UZ	Unidades
Barra 1	0,001784	0,029618	mm
Barra 2	0,001788	-0,00052	mm
Barra 3	0,001784	-0,01146	mm
Barra 4	0	-0,71464	mm
Barra 5	0	-0,65595	mm

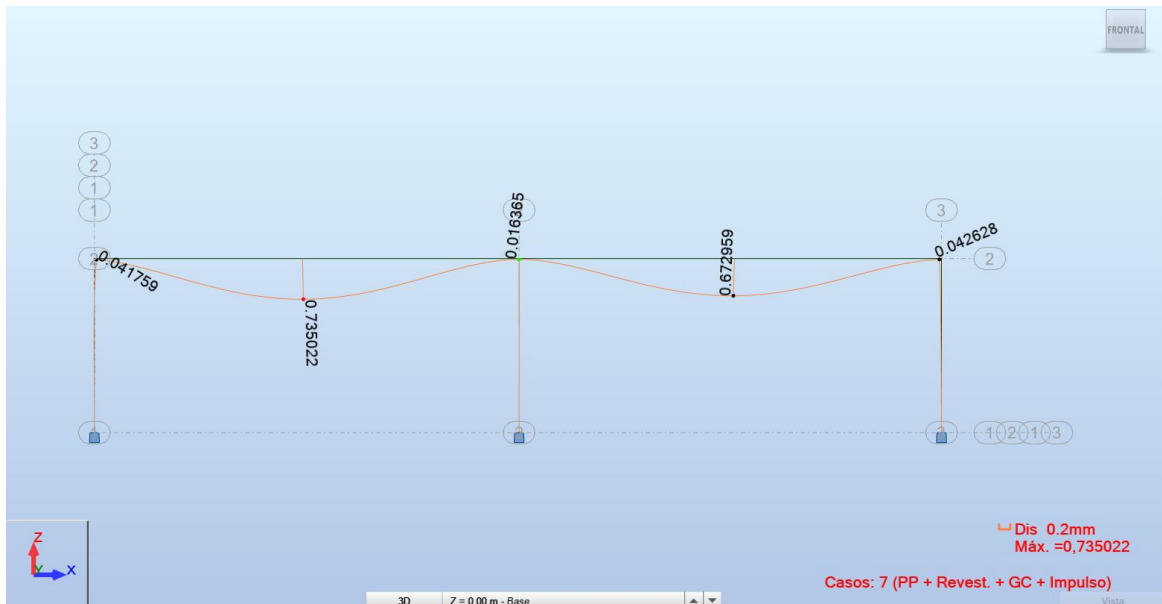


Figura 58. Deformada da estrutura em milímetros

Tabela 14. Tensões máximas e mínimas de cisalhamento

Resultados	Mínimo	Máximo	Unidades
Barra 1	-0.10	0.03	MPa
Barra 2	-0.00	-0.00	Mpa
Barra 3	-0.07	0.07	MPa
Barra 4	-0.23	0.22	MPa
Barra 5	-0.22	0.23	MPa

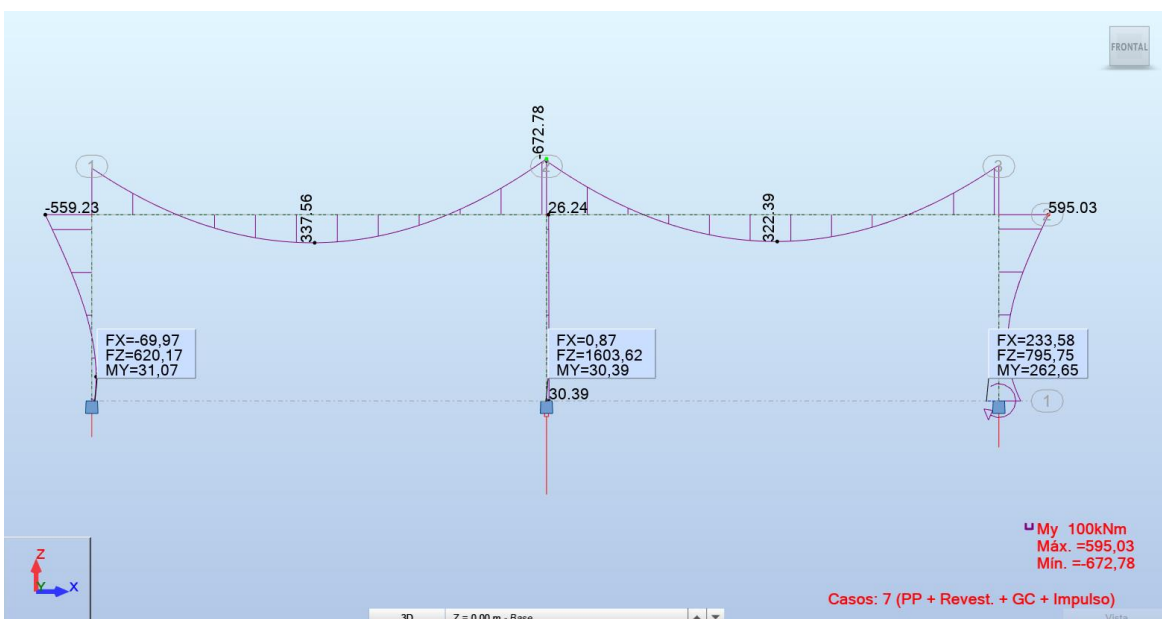


Figura 59. Diagrama de momentos fletores e reações nos apoios

5.4. Comparação dos modelos

Inicialmente foram verificar as deformações das barras e estados de tensões máximas ao cisalhamento. Posteriormente, fez-se também um comparativo nos valores obtidos para análise modal com as frequências naturais para os primeiros modos de vibração, bem como relação das reações de apoio e momentos fletores entre ambos os modelos.

Ao analisar os dados extraídos do Robot e por tratar-se de uma estrutura em 2D, ressalva-se que as coordenadas globais diferencem das do Ansys, portanto os valores da componente “Z” apresentadas a seguir serão comparadas as componentes em “Y” do modelo 3D.

Os valores apresentados na Tabela 13, quando comparadas as deformações máximas aproximadamente a meio vão e mínimas nas proximidades dos apoios como pode ser observado na Figura 49 e Tabela 9, o modelo em barras resulta em valores na ordem de 10 vezes superior devido as simplificações consideradas na modelagem em 2D.

As deformadas para barras ainda assim são irrisórias, pois os valores absolutos não chegam à ordem de 1mm de deflexão das barras, configurando deste modo bons resultados face a simplificação do modelo numérico conforme ilustrado na Figura 58.

Aplicando a mesma metodologia para as tensões de cisalhamento, ratifica-se as conclusões ora apresentadas para os valores ilustrados na secção anterior e respectivo diagrama de tensões para barras constante na Figura 60, quando comparadas às tensões extraídas do Ansys que podem ser verificadas nas Figura 61, Figura 62 e Tabela 9.

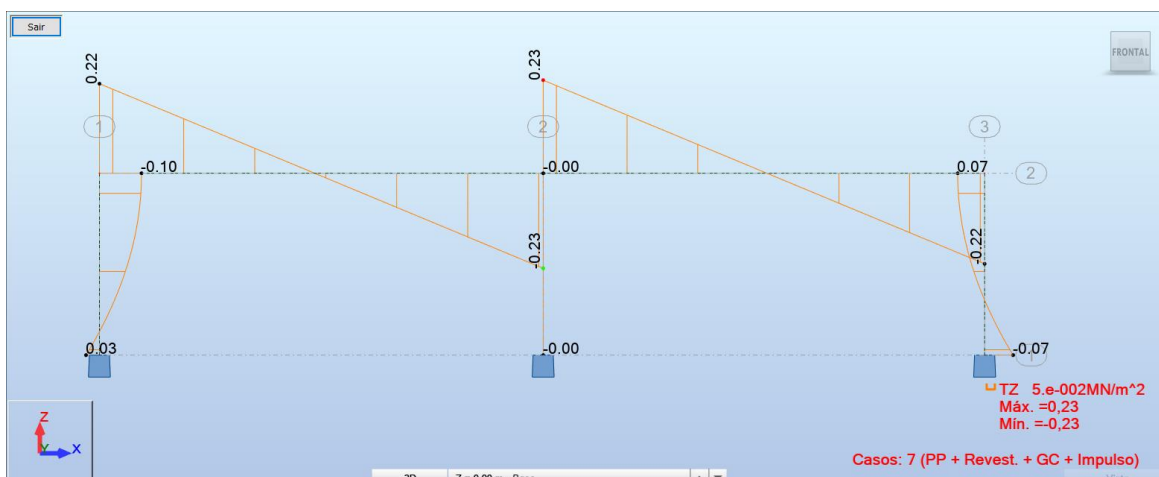


Figura 60. Diagrama de tensões de cisalhamento extraído do Robot dado em MPa

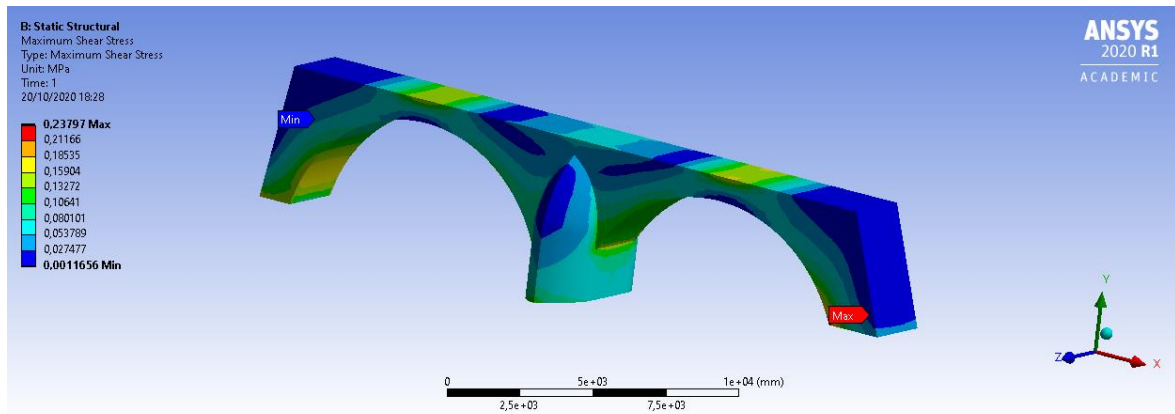


Figura 61. Tensões máximas de cisalhamento extraída do Ansys em MPa

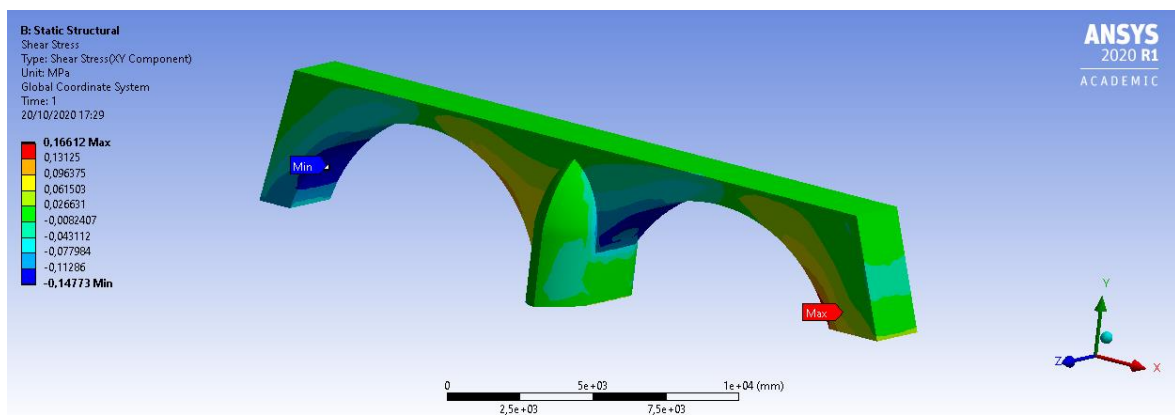


Figura 62. Tensões de máximas e mínimas de cisalhamento relativas ao XY

Se tomarmos para análise as barras 1, 2 e 3, que representam os pilares, verifica-se uma ligeira variação entre os resultados obtidos entre ambos os softwares, no entanto próximos. A tensão mínima para barra 1 varia do Robot de -0.10MPa para -0.14MPa no Ansys, para a barra 2 em que no Robot apresenta tensão nula, no Ansys tem-se a tensão na ordem de 0 a 0.05MPa, e, pôr fim a barra 3 em que a tensão máxima se encontra em ambos na ordem de 0.23MPa.

Face as análises e estudos comparativos entres ambos os softwares para as deformações e tensões cisalhantes, os valores com as reações de apoios e momentos fletores para o modelo 2D encontra-se descriminado na

Tabela 15, bem como as percentagens relativas entre ambos os resultados.

Tabela 15. Reações nos apoios dos arcos e momentos fletores nas direções X e Z extraídos do Robot

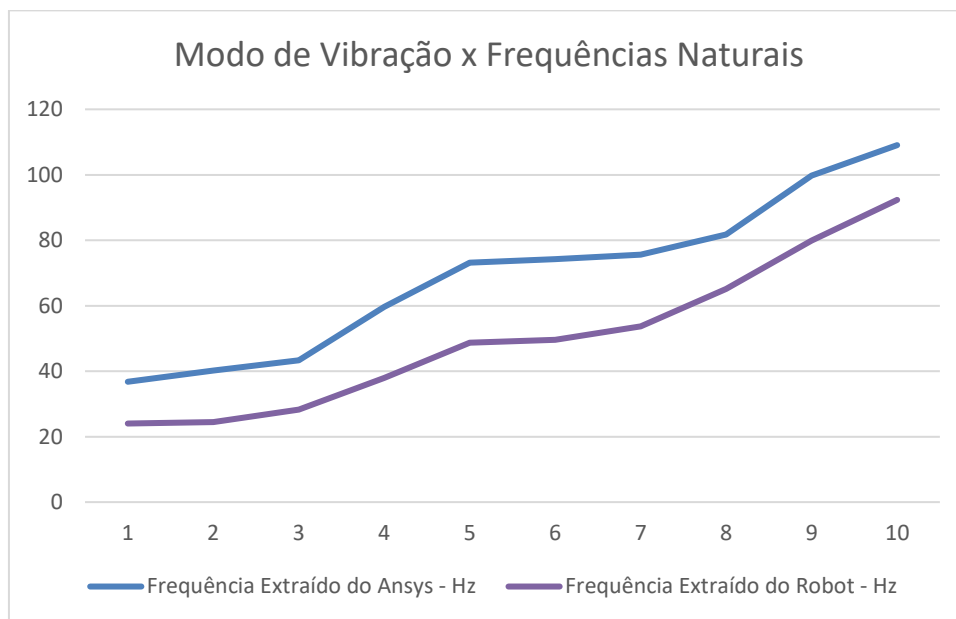
Reações	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)	% Relat. FX	% Relat. FZ	% Relat. Momento
---------	------------	------------	-------------	-------------------	-------------------	---------------------

Apoio F / Nó 1	-69,97	620,17	31,07	24%	86%	75%
Apoio H / Nó 3	0,87	1603,62	30,39	15%	79%	33%
Apoio G / Nó 5	233,58	795,75	262,65	79%	106%	97%

Ao estudar a análise modal, diagnosticou-se as altas frequências naturais da estrutura. Os resultados facultam uma interpretação dos dados esperados, haja vista as condições de fronteiras anteriormente referidas, bem como a robustez e a hiperstaticidade da estrutura em causa.

A fim de ratificar que a análise modal aqui apresentada e as demais estão coerentes e dentro das interpretações dos dados possíveis de serem verificadas, fez-se mais uma comparação com o modelo de pórtico 2D, e verificou-se ainda um desvio padrão médio de aproximadamente 18Hz entre os gráficos.

Gráfico 2. Relação entre os modos de vibração x frequências naturais



Como referido inicialmente nas considerações iniciais para avaliação comportamental da estrutura, verifica-se deste modo o motivo pelo qual não se fez necessário uma análise mais criteriosa as ações sísmicas, fato este devido as altíssimas frequências naturais da estrutura exemplificado no Gráfico 2.

A despeito à robustez da estrutura, esta pode ser considerada como uma estrutura de pequeno porte, e que, portanto, tem o período na ordem de 0.50 segundos. Se fizermos a razão do período T em segundos que é inversamente proporcional aos valores das frequências, temos a Tabela 16 que ratifica o comportamento da estrutura quanto da análise modal.

Tabela 16. Períodos para os primeiros modos de vibração

Período para valores do Ansys (s)	Período para valores do Robot (s)
0,027196	0,041649
0,024902	0,040933
0,023092	0,035348
0,016762	0,026337
0,013665	0,020551
0,013463	0,020161
0,013224	0,018608
0,012236	0,015342
0,010021	0,012514
0,009169	0,010831

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

As estruturas em alvenaria de pedra elucidam historicamente o avanço da engenharia. Os conhecimentos dos materiais e respectivas características mecânicas, técnicas construtivas, desenvolvimento de ferramentas, sistemas de içamento e manuseio dos materiais, todos esses avanços tecnológicos impulsionaram substancialmente as práticas utilizadas atualmente e a diversificação dos materiais construtivos para tornar as estruturais mais económicas, seja do ponto de vista do consumo dos insumos necessários ao empreendimento ou na eficácia e rapidez na sua execução.

As estruturas em pedra ainda se encontram em utilização, de forma adaptada, atualmente pouco se faz uso em aquedutos ou pontes, no entanto, existem outras obras contemporâneas que aproveitam com sucesso as características mecânicas da pedra, não numa, mas num grande número de soluções diferentes que são um bom exemplo das possibilidades presentes e futuras da utilização da pedra como material resistente, ainda bastante utilizado como estruturas de contenção como muros de arrimo e gabiões, onde é do tipo “por gravidade” o qual terá esforços de flexão mínimos.

A simulação computacional é uma parte integrante do desenvolvimento científico e tecnológico, a par da teoria e da experimentação. O que a décadas atrás não seria possível devido a limitações tecnológicas do período, atualmente é uma das áreas da engenharia em destaque.

As obras de alvenaria ainda existentes em larga escala como património histórico, foi feito de uma maneira quase empírica, apesar dos estudos e desenvolvimentos construtivos apresentados, não se tendo verificado para esse campo o desenvolvimento que se observa para as estruturas convencionais em betão armado, por exemplo. A importância da modelação deve-se justamente a este fato quando comparados a outros elementos construtivos mais recorrentes na engenharia civil, visando o aprimoramento dos estudos e compreensão dos mecanismos de funcionamento para estes elementos.

Para a Ponte Bairro dos Anjos sobre o Largo Camilo Castelo Branco, estudo de caso da presente dissertação, os resultados comparativos entre ambos os softwares, bem como os mecanismos de funcionamento da estrutura e em conformidade com as referências

bibliográficas, podem-se perceber que de uma forma geral, que os resultados indicaram que a ponte é estruturalmente segura em relação à legislação aplicável.

Os valores das deformações máximas em relação ao eixo vertical são de 0,0776mm e 0,7146mm para os modelos 3D e 2D, respectivamente. Há neste caso uma diferença em valores absolutos, no entanto muito pequeno quando considerada as características mecânicas no material de alvenaria.

Em termos de capacidade de carga, é de suma importância ter em consideração a espessura e a geometria do arco, as seções dos pilares e as propriedades físicas do material de enchimento. As tensões máximas de cisalhamento encontrada nos modelos 3D e 2D foi de 0,23MPa e 0,22MPa nas zonas dos pilares, resultados baixíssimos para as condições de capacidade de carregamento da estrutura.

Os momentos fletores máximos encontrados para um mesmo apoio (G e nó 5 nos modelos 3D e 2D, respectivamente) convergiram 97%, com valores absolutos de 271,10kNm e 262,6kNm. Apesar do valor ser relativamente alto, ainda assim compatível com as resistências mecânicas da ponte. Porém, ao verificar os demais momentos fletores nas regiões dos outros apoios para ambos os modelos, estes são de baixa magnitude com valores abaixo de 100kNm. Há neste caso uma divergência dos resultados encontrados devido a maior rigidez, discretização e precisão do modelo 3D.

De fato, para o entendimento dos mecanismos de funcionamento das estruturas em arco de alvenaria de pedra, é de essencial importância um bom conhecimento do material alvenaria de pedra para que se possa interpretar o seu funcionamento como material construtivo, avaliar o seu comportamento mecânico e verificar a segurança da estrutura de forma factível e em conformidade com normativos em vigor.

Visando a continuidade dos estudos sobre estruturas históricas em alvenaria de pedra, sugere-se um estudo detalhado para redução dos parâmetros como a resistência dos materiais, espessuras dos arcos e pilares, a fim de se ter em consideração as anomalias identificadas na estrutura, e, até quanto estes podem afetar as propriedades e funcionalidades de cada elemento construtivo. Bem como estudo para avaliação não-linear da estrutura de alvenaria com o Ansys ou outros softwares comerciais em que se é possível realizar tais análises.

Assim como o incentivo a preservação dos monumentos e resgate por obras de artes com a utilização do material em causa, faz valer também um estudo comparativo de viabilidade econômica de projetos (quando comparados à estruturas em elementos de betão armado, aço e/ou madeira), relativo ao consumo dos materiais, desperdícios e descartes, tempo de execução e equipamentos necessários, não obstante a longevidade da estrutura, que, através da revisão bibliográfica aqui presente, reitera-se a relevância do material construtivo condicionada a falta de manutenção e alta resistência.

Ressalta-se, por fim, a importância deste trabalho, principalmente quando se trata de edificações de interesse histórico, artístico e cultural, visando deste modo um maior aprofundamento sobre a temática retratada no presente documento.

Referências Bibliográficas

- Alves, A. 2009.** *Reabilitação e Reforço de Pontes de Alvenaria*. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Alves, R. 2008.** *Comportamento Dinâmico de Pontes Sob a Acção Pedonal*. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto.
- Ansys, Inc. 2009.** *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*.
- Binda, L., Saisi, A., Messina, S. e Tringali, S. 2001.** Mechanical Damage due to Long Term Behaviour of Multiple Leaf Pillars in Sicilian Churches. *Historical Constructions*, P.B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimarães. 2001, pp. 707-718.
- Bourg, T. 2016.** *Análisis de Comportamiento Estructural; Iglesia Arciprestal de Callosa D'en Sarriá. Alicante*. Universidad Politecnica Valencia - Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Valencia.
- Carvalho, M. 2017.** *Projeto de Duas Pontes Pedonais Inseridas num Circuito Junto ao Rio Neiva*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Cordeiro, P. 2014.** *Pontes de Pedra - Estudo de um Caso Prático*. Instituto Politécnico de Viseu - Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Viseu.
- Costa de Sousa, G. 2012.** *Estudo do Comportamento Estrutural de Uma Ponte em Arco*. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.
- Costa, A. 2010.** *Metodologias de Avaliação da Segurança em Construções Tradicionais*.
- Costa, C. 2009.** *Análise Numérica e Experimental do Comportamento Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra*. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.
- Da Costa, P. 2007.** *Análise da Construção e do Comportamento numa Ponte de Pedra*. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto.
- De Celis, V. 2017.** *Caracterização Mecânica de Paredes de Alvenaria de Pedra*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- De Jesus, J. 2013.** *Caraterização Geométrico-Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria na Região de Bragança*. Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança.
- Debs, M. e Takeya, T. 2007.** *Introdução às Pontes de Concreto*. Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos.

Dejong, M. e Ochsendorf, J. 2006. *As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches.*

Domingues, J. 2017. *Caracterização Tipológica e Mecânica de Paredes de Alvenaria de Pedra em Centros Urbanos Antigos - Caso de Estudo de Viseu.* Universidade de Coimbra, Coimbra.

Dos Santos, J. 2014. *Estudo Construtivo e Estrutural de Abóbadas Alentejanas.* Instituto Técnico de Lisboa, Lisboa.

Eça Guimarães, D. 2017. *Caracterização Mecânica Experimental e Modelação Numérica do Comportamento Estrutural - Igreja de Mancelos – Um Caso de Estudo.* Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto.

Engineers, ECCE. 2014. *Footbridges - Small is Beautiful.* European Council of Civil Engineers, United Kingdom.

Favre, R. e San Roman, J. 2001. *The Arch: Enduring and Endearing.* Paris.

Filipe, M. 2012. *Caraterização de Alvenarias Antigas. Ensaios de Flat Jack.* Universidade de Aveiro - Departamento de Engenharia Civil, Aveiro.

Gago, A. 2004. *Análise Estrutural de Arcos, Abóbodas e Cúpulas - Contributo para o Estudo do Património Construído.* Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Gonçalves, A. 2010. *Leiria : as fontes, o rio Lis e suas pontes.* Leiria : Junta de Freguesia.

—. **2005.** *Toponímia de Leiria : e um pouco da sua história.* Leiria : Junta de Freguesia.

Gregorczyk, P. e Lourenço, P. 2000. *A Review on Flat-Jack Testing.* Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.

Guedes, J. e Costa, A. 2010. *A Alvenaria de Pedra e as suas Particularidades como Material.*

Huerta, S. 2004. *Arcos, Bóvedas y Cúpulas - Geometría y Equilibrio en el Cálculo Tradicional de Estructuras de Fábrica.* Instituto Juan de Herrera - Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid.

—. **2001.** *Mechanics of Masonry Vaults: The Equilibrium Approach. Historical Constructions, P.B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimarães. Pp. 47-70.*

J. Nunes, A. 1997. *Pontes Antigas do Concelho de Bragança.* ISBN: 972-9001-21-9, Bragança.

Krus, T. 2012. *Análise Dinâmica e Controlo Passivo de Vibrações de uma Ponte Pedonal.* Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Lazzari, P. 2008. *Estudo de Projeto Estrutural de Ponte Rodoviário em Arco Inferior em Concreto Armado no Município de Saudades / SC.* Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Léon, J. e Goicolea, J. 2017. *Los Puentes de Piedra (o ladrillo) Antaño y Hogaño.* Madrid.

Leonhardt, F. 1979. *Construções de Concreto: Princípios Básicos da Construção de Pontes de Concreto.* Rio de Janeiro.

Lobo, L. 2002. Pontes que Fazem História. Número 14, Ano IV - Abril, Maio, Junho 2002, Lisboa : s.n., Maio de 2002, Revista Pedra e Cal, pp. 4-6. *Reabilitação de Pontes de Alvenaria.*

Lopes, N. 2012. *Inspeção de Pontes Ferroviárias em Arcos de Alvenaria.* Instituto Politécnico de Tomar, Tomar.

Miranda, L. 2011. *Ensaios Acústicos e de Macacos Planos em Alvenarias Resistentes.* Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto.

Morais, M. 2012. *Pontes em Arco de Alvenaria - Estudo de um Caso Prático.* Instituto Politécnico de Viseu, Viseu.

Morais, M., Santos, P. e Varum, H. 2008. *Estudo da Viabilidade de Construção de Pontes em Arco.* BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural 2008, Guimarães.

Moreira, R. 2013. *Controlo de Vibrações na Ponte Pedonal Sobre o Rio Ave em Santo Tirso.* Politécnico do Porto - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

Moura, A., et al. 2002. *Mármore e Calcários Ornamentais de Portugal.* Gestão de Artes Gráficas, S.A.

Nunes, P. 2009. *Teoria do Arco de Alvenaria: Uma Perspectiva Histórica.* Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília.

Nunes, R. 2013. *Modelação e Análise de Estruturas de Edifícios Existentes em Alvenaria.* Instituto Politécnico de Tomar - Escola Superior de Tecnologia de Tomar, Tomar.

Oliveira, D., Lourenço, P. e Lemos, C. 2011. Análise geométrica e capacidade de carga de pontes em arco de alvenaria do Noroeste Peninsular. *ASCP'2011 – 2º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes.*

Oliveira, D., Lourenço, P. e Lemos, C. *Geometric Issues and Ultimate Load Capacity of Masonry Arch Bridges from the Northwest Iberian Peninsula.* University of Minho, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal.

Pagaimo, F. 2004. *Caracterização Morfológica e Mecânica de Alvenarias Antigas - Caso de Estudo da Vila Histórica de Tentúgal*. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.

Pfeil, W. 1983b. *Curso Básico. Projeto, Construção e Manutenção*. 3ª edição. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos.

—, **1983a.** *Pontes em Concreto Armado*. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos.

Pinto, C. 2006. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/3ª Edição*. São Paulo : Oficina de Textos.

Proske, D. e Van Gelder, P. 2009. *Safety of Historical Stone Arch Bridges*.

Quadros, B. 2012. *Passarela em Arco com Tabuleiro Inferior: Proposta de Projeto Para o Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre.

Ramos, A. e Rodrigues, N. *As Obras de Arte Classificadas sob Jurisdição da EP - Estradas de Portugal, S.A. - Metodologias de Manutenção e Reabilitação*. Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria.

Rebello, Y. 2000. *A Concepção Estrutura e a Arquitetura*. São Paulo: Ziguarte Editora.

Ribeiro e Silva, C. 2016. *Reabilitação de Pontes em Alvenaria de Pedra*. Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo.

Ribeiro, D. et al. 2016. *Calibração Experimental de Modelos Numéricos de Pontes Ferroviárias em Alvenaria de Pedra*. XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Brasília.

Rodrigues, F. 2014. *Pontes Antigas na Ilha da Madeira - Caracterização e Diagnóstico*. Universidade da Madeira.

Rodrigues, H. e Varum, H. 2005. *Avaliação do Comportamento Estrutural da Torre Medieval de Vilharigues - Vouzela*.

Rodrigues, J. 2004. *Identificação Modal Estocástica - Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto.

Rouxinol, G. 2007. *Modelação e Avaliação Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria*. Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra.

Santos, P. 2008. *Processos construtivos de pontes de alvenaria em arco*. Universidade de Aveiro, Aveiro.

Serra, M. 2013. *Modelação Numérica de Pontes de Alvenaria de Pedra*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

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

Süssenkind, J. 1981. *Curso de Análise Estrutural - Estruturas Isostáticas.* 6ª. Rio de Janeiro: Globo.

Trigo, J., et al. *Pontes em Arco de alvenaria de Pedra. Um Contributo Para a sua Conservação.* Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto.

Varum, H., et al. *Estudo da Vulnerabilidade e Soluções de Reforço de Edifícios em Alvenaria: Centro Histórico de Coimbra.*

Vicente, R., et al. 2009. Levantamento das Patologias e Monitorização do Arco da Igreja da Misericórdia de Aveiro. [Online] 2009. [Citação:]
https://www.researchgate.net/publication/229151300_Levantamento_das_patologias_e_monitorizacao_do_arco-cruzeiro_da_Igreja_da_Misericordia_de_Aveiro.