

Aqueduto das Águas Livres, Lisboa

“Elaboração do projecto de execução para reparação da patologia verificada no intradorso de um dos arcos do Aqueduto das Águas Livres (bloco do módulo 29)”. Rev02

Fase II | Execução - Projecto de Estabilidade Anexo 01 | Nota de Cálculo

NCREP_1466P0220

Porto

Abril de 2021



Índice

01 Dimensionamento estrutural do reforço	3
01.1 Generalidades	3
01.2 Geometria	3
01.3 Materiais	3
01.4 Acções: quantificação de acções	5
01.5 Acções Permanentes (G_k)	5
01.6 Combinações de acções	5
01.7 Regulamentação considerada na análise e reforço estrutural	6
01.8 Verificação de segurança	7
01.8.1 Verificação do Tirante	7
01.8.2 Verificação de chapas de apoio/contraste	7
01.8.3 Verificação das tensões de contacto no enchimento e no elemento de contraste e dimensionamento do maciço de contraste	8

01 | Dimensionamento estrutural do reforço

01.1 | Generalidades

Neste documento são apresentados os pressupostos de cálculo e o dimensionamento da solução de reforço do bloco.

O sistema de ancoragem prevista em projecto será efectuado utilizando o sistema do tipo “Cintec” ou equivalente, que é um sistema de ancoragem e pregagem em alvenaria e foi especialmente concebido para o efeito. A aplicação desta técnica deverá respeitar as indicações da Memória Descritiva e Justificativa, Condições Técnicas prescritas do presente projecto e indicações do fabricante relativamente a: i) Campo de Aplicação; ii) Características Principais dos Materiais (calda, manga e elemento principal resistente) e Características Principais dos Equipamentos (equipamento de furo e injeção); iii) Características Técnicas e Faseamento de Aplicação.

A solução estrutural prevista deverá ser ajustada em função das reais características geométricas do local e do bloco a reforçar, informação que deve ser obtida na fase inicial dos trabalhos.

01.2 | Geometria

A geometria da estrutura adoptada nas análises efectuadas, nomeadamente vãos, secções transversais e espaçamentos dos elementos estruturais existentes, foi estabelecida com base nos elementos desenhados fornecidos (nomeadamente, a nuvem de pontos). Não tendo sido fornecidos levantamentos da parte superior do aqueduto, em particular da zona dos caminhos de ronda, foi realizada uma pesquisa que permitiu obter as dimensões da parte superior do aqueduto, necessárias ao dimensionamento da solução. As peças desenhadas em anexo a este documento e que resultaram dos elementos fornecidos e da pesquisa bibliográfica (Gil, 2011) realizada, terão que ser validadas previamente à entrada em obra (na fase de preparação de obra), por forma a verificar se será necessário ajustar a solução estrutural.

Bibliografia: Gil, A. 2011, Modelos Digitais - Geometria Associativa: particularidade da musealização de monumentos em extensão. O Aqueduto das Águas Livres como caso de estudo. Grau de Mestre em Arquitectura, Instituto superior Técnico, Lisboa.

01.3 | Materiais

Todos os materiais deverão obedecer à regulamentação aplicável e em vigor, e ao prescrito nas Condições Técnicas, nomeadamente no Eurocódigo 1 (EC1), Eurocódigo 2 (EC2) e Eurocódigo 3 (EC3) e a Norma Portuguesa NP-EN206-1. Relativamente ao sistema de ancoragem, devem ser respeitadas as prescrições do fabricante.

Sistema de ancoragem do tipo Cintec ou equivalente

O sistema de ancoragem do tipo Cintec ou equivalente, é constituída por uma ancoragem em varão roscado/nervurado de 16mm de diâmetro em aço inoxidável do tipo Cintec ou equivalente, envolvido numa manga e calda do tipo Cintec Presstec ou equivalente, de acordo com as indicações prescritas pelo fabricante. Em ambas as extremidades da ancoragem, serão colocadas chapas de contraste em aço inoxidável.

O varão roscado/nervurado envolvido numa manga será em aço inoxidável da classe 316S33 (aço inoxidável de classe 1.4436 - segundo BS EN 10088-1:1995), com valor mínimo da tensão de cedência característica, f_y , de 500MPa, de acordo com o fabricante do tipo Cintec ou equivalente.

A implementação deste sistema implicará uma pequena carote na pedra (diâmetro de aproximadamente 3,0cm) realizada de baixo para cima (desde o bloco até ao caminho de ronda). Previamente ao início da carotagem para implementação do sistema, serão aplicados elementos metálicos para suspensão provisória do bloco a reforçar. A injeção da calda poderá ser executada de cima para baixo (desde o caminho de ronda até ao bloco) sendo necessário selar o furo inferior para não haver vazamento de calda.

A solução foi dimensionada de acordo com as características do sistema do tipo Cintec ou equivalente, devendo a sua execução respeitar todas as indicações do fabricante.

Aço das chapas

Considerou-se, as chapas de apoio/contraste e restantes elementos metálicos (chapas, cutelos e nervuras de rigidez), em aço inoxidável austenítico da classe 316L (classe 1.4404 – segundo EN 10088), com valor mínimo da tensão de cedência característica, f_y , de 200MPa.

As porcas e anilhas a utilizar serão em aço inox da classe A4-70 (EN ISO 3506), ou equivalente.

Betão armado

Os materiais a utilizar no maciço pré-fabricado de ancoragem (elemento de contraste) será o betão da classe C25/30, com classe de exposição XC2, os aços A500NR em varões nervurados de armadura ordinária.

Refere-se que o elemento de contraste pode ser materializado por um bloco de pedra ou por um elemento de betão armado, desde que se encontre isolado do restante enchimento através de uma tela impermeável. Alternativamente, e caso não seja possível a remoção do lajeado de pedra, o bloco a reforçar poderá ser ancorada directamente aos elementos do lajeado de pedra do caminho de ronda. Neste último caso, e dependendo da espessura do lajeado, a ancoragem poderá ser assumida e visível no caminho de ronda, e como tal, terá que ser: (i) protegida com um pequeno capacete metálico e (ii) sinalizada para que não ocorram acidentes.

Alvenarias

A estrutura do aqueduto é composta por blocos de pedra regulares em calcário ligados com uma argamassa pobre na envolvente exterior e um enchimento em alvenaria irregular no interior, (Schiappa et al., 1996). De acordo com (Schiappa et al., 1996) as pedras de calcário apresentam um peso específico de 26,6kN/m³, um módulo elástico de 68,0GPa e uma resistência à compressão de 75,0MPa. Já o enchimento apresenta um peso específico de 16,4kN/m³, um módulo elástico de 3,7GPa e uma resistência à compressão de 6,3MPa.

Bibliografia: Schiappa de Azevedo, F.; Sousa M.R.; Reis, M.O.B.; Casaca, J.M.M; Rodrigues, J.D.; Veiga, M.R.; Silva, A.S. (1996). Estudo dos efeitos das vibrações no Aqueduto das Águas Livres, produzidas pelas construções e tráfego do eixo Norte-Sul – Relatório 207/96-NDA, LNEC.

01.4 | Acções: quantificação de acções

A determinação e combinação das acções para a avaliação estrutural tiveram por base a regulamentação vigente, nomeadamente:

- Eurocódigo 0 (EC 0) - Bases para o projecto de estruturas, NP EN 1990, IPQ, 2009.
- Eurocódigo 1 (EC 1) - Bases para o projecto e acções em estruturas, Parte 1: Bases de projecto, NP EN 1991-1-4, 2010 - Acções do vento.

01.5 | Acções Permanentes (G_k)

No conjunto das acções permanentes incluem-se os pesos próprios dos elementos estruturais e não-estruturais, considerando as suas dimensões nominais, os pesos volúnicos dos materiais e as disposições previstas na regulamentação e em catálogos técnicos dos fabricantes.

Tabela 1.1 - Acções permanentes (G_k) consideradas.

Pesos Próprios (PP)

Peso específico do aço em elementos metálicos	77,00kN/m ³
Peso específico do betão armado	25,00kN/m ³
Peso específico do enchimento	16,40kN/m ³
Peso específico da pedra calcária	26,60kN/m ³

01.6 | Combinações de acções

As combinações de acções consideradas são as regulamentares estabelecidas no EC0. Foram consideradas as combinações de acções relativas aos Estados Limites Últimos (ELU) e aos Estados Limites de Serviço (ELS):

- Combinações de acções fundamentais em ELU:

$$Comb_U = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \times G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i}$$

$$\gamma_{G,j} = 1,35$$

$$\gamma_{Q,i} = 1,5$$

- Combinações de acções raras em ELS:

$$Comb_L = G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{1,i} \times Q_{k,i}$$

Com:

$G_{k,j}$ - valor característico das acções permanentes e peso próprio;

$Q_{k,1}$ - valor característico da acção variável base;

$Q_{k,i}$ - valores característicos das acções variáveis que não a acção base;

γ_{Gj} - coeficientes parciais de segurança relativos às acções permanentes;

$\gamma_{Q,i}$ - coeficientes parciais de segurança relativos às acções variáveis;

ψ_0, ψ_1, ψ_2 - coeficientes ψ_i .

01.7 | Regulamentação considerada na análise e reforço estrutural

O dimensionamento e a verificação estrutural foram efectuados de acordo com a Teoria da Resistência dos Materiais e da Estabilidade de Estruturas. A verificação da estabilidade estrutural foi realizada para os Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS).

Na análise e dimensionamento das estruturas adoptaram-se os critérios de verificação de segurança definidos na regulamentação portuguesa de estruturas, nas recomendações internacionais e dados técnicos dos materiais, nomeadamente:

- Condições técnicas do fabricante do sistema do tipo Cintec ou equivalente;
- Eurocódigo 0 (EC 0) - Bases para o projecto de estruturas, NP EN 1990, IPQ, 2009;
- Eurocódigo 3 (EC 3) - Projecto de Estruturas de Aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, NP EN 1993-1-1, IPQ, 2010;
- Eurocode 3 (EC3) - Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels, EN 1993-1-4:2006;
- ICOMOS (2004) - Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico do ICOMOS, ICOMOS;

01.8 | Verificação de segurança

01.8.1 | Verificação do Tirante

A solução de reforço com ancoragem do tipo Cintec ou equivalente, será constituída por um varão roscado/nervurado de 16mm de diâmetro (em aço inoxidável), revestido em manga de tecido poliéster, na qual se injecta uma argamassa em calda.

De acordo com as tabelas técnicas do fabricante do sistema do tipo Cintec ou equivalente, foi adoptado um varão roscado/nervurado em aço inoxidável da classe 316S33 (aço inoxidável de classe 1.4436 - segundo BS EN 10088-1:1995), com valor mínimo da tensão de cedência característica, f_y , de 500MPa.

A solução foi dimensionada de acordo com as características do sistema do tipo Cintec ou equivalente, devendo a sua execução respeitar todas as indicações do fabricante.

Foi considerada uma espessura de 1,5m para o bloco a reforçar. Esta espessura foi por sua vez utilizada para determinar a carga de ancoragem do bloco. Em fase de implementação da solução de reforço (durante a carotagem), terá que ser aferida a verdadeira espessura do bloco e a solução terá que ser ajustada em função dessa espessura.

Na Tabela 1.2 é apresentada a verificação de segurança para a solução de reforço, segundo as características do varão do tipo Cintec ou equivalente indicadas pelo fabricante ($f_y=500\text{MPa}$).

Tabela 1.2 - Verificação de segurança do tirante metálico.

Dimensões do Bloco			Densidade (KN/m ³)	Peso _{sd} (KN)	Coef. Seg. (-)	Diâmetro (mm)	Tensão Admissível (MPa)	Tensão Actuante (MPa)	Verificação	Rácio
b (m)	a (m)	h (m)								
0,8	0,48	1,5	26,6	20,7	1,1	16	500	103	OK	22,6%

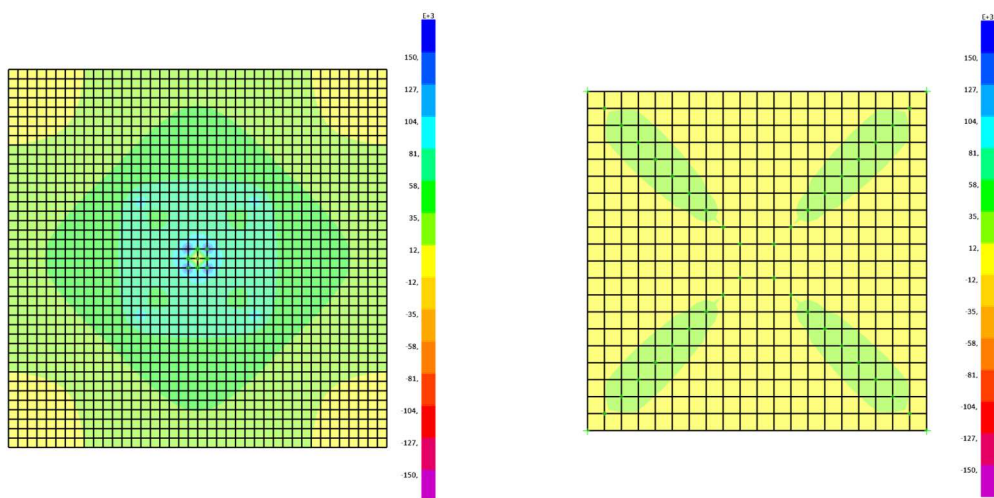
01.8.2 | Verificação de chapas de apoio/contraste

Foi utilizado um modelo numérico recorrendo ao programa de cálculo automático SAP2000 para dimensionamento das chapas de apoio/contraste, a colocar em ambas as extremidades da ancoragem em tirante.

As chapas de apoio/contraste com dimensão 200x200mm², em aço inoxidável austenítico da classe 316L (classe 1.4404 - segundo EN 10088), foram modeladas em elementos finitos de casca tendo-se analisando as tensões actuantes instaladas (Figura 1.1). Para a solução de espessura da chapa propõe-se a utilização de uma das soluções: (i) 20mm espessura; (ii) 12mm de espessura reforçada com nervuras de rigidez nos quatro cantos. As duas soluções das chapas de apoio/contraste estão pormenorizadas nas peças desenhadas em anexo.

Na

Tabela 1.3 é apresentada a verificação de segurança obtida no dimensionamento da chapa de apoio/contraste.



a) Mapa da envolvente máxima de tensões actuantes ($S_{max} = 150,0\text{MPa}$) para a solução de chapa de 20mm espessura.

b) Mapa da envolvente máxima de tensões actuantes ($S_{max} = 30,0\text{MPa}$) para a solução de chapa de 12mm espessura reforçada com nervuras

Figura 1.1 - Resultado do modelo numérico para verificação de segurança das chapas de apoio/contraste.

Tabela 1.3 - Verificação de segurança das chapas de apoio/contraste.

solução da espessura	Dimensões da chapa		Carga actuante do tirante em varão (KN)	S_{max} Tensão actuante na chapa (MPa)	Coef. Seg. (-)	Tensão Admissível (MPa)	Verificação	Rácio
	a (m)	b (m)						
20mm	0,2	0,2	20,7	150	1,1	200	OK	82,5%
12mm de espessura reforçada com nervuras de rigidez	0,2	0,2	20,7	30	1,1	200	OK	16,5%

A solução de chapa de contraste dimensionada deverá ser validada em fase de obra com base na real espessura do bloco a suportar.

01.8.3 | Verificação das tensões de contacto no enchimento e no elemento de contraste e dimensionamento do maciço de contraste

Na tabela seguinte é apresentada a verificação de segurança das tensões de contacto do maciço de contraste na alvenaria de enchimento do aqueduto (cujas propriedades mecânicas se apresentaram anteriormente).

Tabela 1.4 - Verificação das tensões actuantes no enchimento do aqueduto devido aos esforços introduzidos no maciço de contraste.

Acções	Dimensões do elemento de contraste					Verificação do enchimento			Verificação no contacto com o elemento de contraste			
	Fz	Fx	Bx	By	H	Tensão Actuante no enchimento (MPa)	Tensão Resistente do enchimento (MPa)	Verificação Segurança	Tensão Actuante (MPa)	Tensão resistente betão (MPa)	Tensão resistente da alvenaria (MPa)	Verificação Segurança
(KN)	(KN)	(m)	(m)	(m)								
Elemento de contraste	18,0	10,5	1,0	1,0	0,25	0,05	6,3	OK	0,5	25,0	75,0	OK

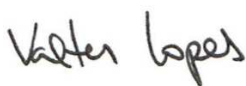
Tabela 1.5 – Dimensionamento do maciço de contraste.

	Elementos de Betão Armado																		
	Acções		Dimensões do elemento de contraste			Verificação ao Corte												Dimensionamento armadura	
	Fz	Fx	Bx	By	H	Verificação ao Derrube		Verificação ao Deslizamento		Vsd,x	Vsd,z	Vcd,x	Vcd,z	Verificação		As ⁻ x e As ⁻ y	Rácio		
	(KN)	(KN)	(m)	(m)	(m)	x	y	x	y	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)	(cm²/m)					
Elemento de contraste	18,0	10,5	1,0	1,0	0,25	5,8	-	2,0	-	9,3	6,5	78,4	78,4	OK	Ø12 //0,150	7,5	33%		

Porto, Abril de 2021



Bruno Quelhas
Eng. Civil



Valter Lopes
Eng. Civil



Filipe Coelho
Eng. Civil



Jorge Soares
Eng. Civil