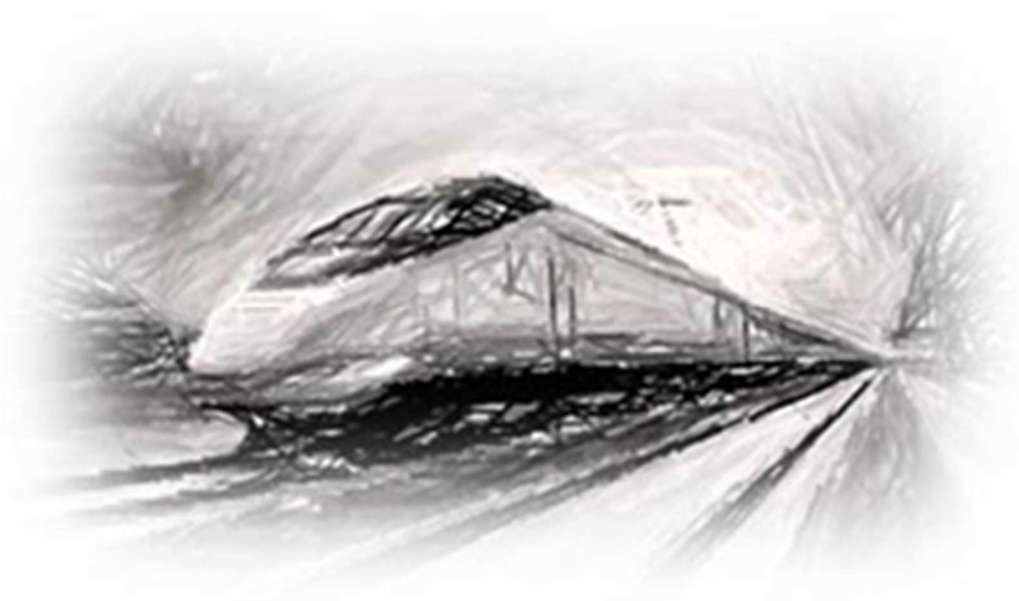


**LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE ENTRE
PORTO (CAMPANHÃ) E LISBOA
TROÇO PORTO (CAMPANHÃ) A OIÃ
SUBTROÇO A4 – KM 49+900 AO KM 69+563**



**PROJETO DE EXECUÇÃO
V02 – INFRA-ESTRUTURA DE OBRAS DE ARTE (VIA FÉRREA)
Tomo 02.01.00.681 – P 68.1 - PONTE SOBRE O RIO DOURO**

Memória Descritiva e Justificativa

Controlo de Assinaturas

Realizado	Revisto	Aprovado Coordenador Projeto
Ana Rita Joaquim Luís Xavier Pedro Azevedo Rodrigo Borges Rúben Batista	Susana Bispo	Pedro Cabral Tiago Vieira
14-08-2025	14-08-2025	14-08-2025
Data e Assinatura	Data e Assinatura	Data e Assinatura

Não necessita de assinatura se aprovado eletronicamente

Informação Adicional	Informação do Documento	
O Gestor de Projeto -	Código Documento PF102A4.PR.02.01.00.681.MDJ.01	
O Responsável Unidade -	Revisão 01	Data 30-04-2026
O Responsável Departamento -	Código Projetista P433.DLAV	
O Diretor -	Nome do Ficheiro PF102A4.PR.02.01.00.681.MDJ.01.docx	

Registo de Alterações

Rev	Data	Autor	Secção Afetada	Alterações
00	14-08-2025	Vários	Edição inicial	-----
01	30-04-2026	Vários	Revisão Geral	Revisão Geral

LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE ENTRE PORTO (CAMPANHÃ) E LISBOA**TROÇO PORTO (CAMPANHÃ) A OIÃ****SUBTROÇO A4 – KM 49+900 AO KM 69+563****PROJETO DE EXECUÇÃO****V02 – INFRA-ESTRUTURA DE OBRAS DE ARTE (VIA FÉRREA)****TOMO 02.01.00.681 – P 68.1 - PONTE SOBRE O RIO DOURO****MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA****ÍNDICE**

1	INTRODUÇÃO	1
2	CONDICIONAMENTOS	2
2.1	Principais Condicionantes do Projeto	2
2.2	Condicionamentos Topográficos.....	3
2.3	Condicionamentos Ferroviários.....	3
2.4	Condicionamentos Rodoviários.....	4
2.5	Condicionamentos Ambientais	5
2.6	Condicionamentos Geológicos e Geotécnicos	6
2.7	Condicionamentos Hidráulicos e Fluviais	7
2.8	Condicionamentos de Drenagem.....	9
2.9	Condicionamentos de Serviços Afetados.....	9
2.10	Condicionamentos Construtivos	10
2.11	Condicionamentos de Segurança e Saúde	10
3	GEOLOGIA E GEOTECNIA DO LOCAL	11
3.1	Enquadramento Geomorfológico.....	11
3.2	Litologia e Estratigrafia	12
3.3	Tectónica	14
3.4	Enquadramento Geológico-Geotécnico Local.....	15
3.4.1	Campanhas de Prospeção Geológico-Geotécnica Realizadas.....	15
3.4.2	Descrição do Cenário Geológico-Geotécnico Local	19
3.5	Zonamento Geotécnico	30
3.6	Condições de Fundação e Aspetos Construtivos.....	34
4	SOLUÇÃO ESTRUTURAL.....	35

4.1	Conceção Geral.....	35
4.2	Tabuleiro Superior Ferroviário	37
4.3	Tabuleiro Inferior Rodoviário.....	39
4.4	Torres	41
4.5	Pilares	42
4.5.1	Pilares Ferroviários	42
4.5.2	Pilares Rodoviários	43
4.6	Encontros e Estrutura de Transição	44
4.7	Equipamentos	45
5	DRENAGEM	47
6	RETORNO DE CORRENTES DE TRAÇÃO, TERRAS E PROTEÇÕES.....	48
7	MATERIAIS E DURABILIDADE	49
8	PROCESSOS CONSTRUTIVOS.....	51
9	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	54
9.1	Regulamentos e Normas	54
9.2	Ações	54
9.3	Combinações de Ações	55
9.4	Métodos de Dimensionamento.....	56
9.5	Critérios de Verificação da Segurança	56
9.5.1	Aspetos Gerais.....	56
9.5.2	Estados Limites de Utilização	57
9.5.3	Estados Limites Últimos.....	57
9.5.4	Interação Via-Estrutura	58
9.5.5	Efeitos Dinâmicos	58
9.5.6	Segurança na Fase Construtiva	59
9.5.7	Segurança dos Encontros e da Estrutura de Transição	59
9.5.8	Segurança das Fundações	59
10	PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	60
10.1	Componente Sensorial do Sistema de Monitorização	60
10.2	Sistema de Aquisição e Transmissão de Dados	64
10.3	Ensaaios de Receção da Ponte	65
11	INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Vista de jusante da solução proposta (fotomontagem)	1
Figura 2 – Condicionamentos fluviais – vista em planta	8
Figura 3 – Condicionamentos fluviais – vista em alçado	8
Figura 4 – Mapa hipsométrico simplificado da Plataforma Litoral do Porto (Cartografia base: Série Cartográfica Nacional - 1/25000 Digital; Fernandes, 2020) e representação esquemática, a vermelho, da área em estudo.....	11
Figura 5 – Representação esquemática da área em estudo sobre excerto da Folha 09-C (Porto), da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50.000 e respetiva legenda.....	14
Figura 6 - Principais lineamentos tectónicos da região do Porto/Vila Nova de Gaia e representação esquemática, a vermelho, da área em estudo (extraído e adaptado de Araújo et al, 2003).	15
Figura 7 – Representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios RCU em amostras obtidas das sondagens S323-1R, S323-2R, S324-1R e S324-2R.....	25
Figura 8 – Zonamento Geotécnico considerado proposto no Relatório Geológico Geotécnico elaborado pela Argonvia (2020).....	30
Figura 9 – Estimativa empírica da tensão admissível em Y3, considerando um maciço rochoso do tipo 3 (ver Quadro 10). Capacidade resistente presumida do terreno de fundações superficiais quadradas em rocha (Extraído do Anexo G da NP EN 1997-1: 2010)	33
Figura 10 – Estimativa empírica da tensão admissível em Y1, considerando um maciço rochoso do tipo 2 (ver Quadro 10). Capacidade resistente presumida do terreno de fundações superficiais quadradas em rocha (Extraído do Anexo G da NP EN 1997-1: 2010)	33
Figura 11 – Enquadramento da nova Ponte sobre o Rio Douro	36
Figura 12 – Alçado da Ponte sobre o Rio Douro	36
Figura 13 –Secção transversal do tabuleiro junto às torres.....	37
Figura 14 –Secção transversal do tabuleiro pela aduela de fecho do vão principal de 200 m.....	38
Figura 15 – Secção transversal do tabuleiro inferior na zona de atravessamento do Rio Douro.....	39
Figura 16 – Secção transversal do tabuleiro inferior nos tramos de acesso do lado de Vila Nova de Gaia	40
Figura 17 – Torre T1: Alçado de frente (esq.) e alçado lateral (dir.)	41
Figura 18 – Torre T2 implantada junto à margem direita do Rio Douro (fotomontagem)	42
Figura 19 – Secção transversal dos pilares PF6 e PF7	43
Figura 20 – Secção transversal do Pilar de Transição PR9	44
Figura 21 – Vista de jusante da nova Ponte sobre o Rio Douro (fotomontagem)	46
Figura 22 – Faseamento construtivo – Etapa 1 de 6	52
Figura 23 – Faseamento construtivo – Etapa 2 de 6	52
Figura 24 – Faseamento construtivo – Etapa 3 de 6	53
Figura 25 – Faseamento construtivo – Etapa 4 de 6	53
Figura 26 – Faseamento construtivo – Etapa 5 de 6	53
Figura 27 – Faseamento construtivo – Etapa 6 de 6	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Coordenadas das sondagens incluídas na campanha de prospeção executada pela Argonvia (2020)	16
Quadro 2 - Coordenadas das sondagens incluídas na campanha de prospeção executada pela Teixeira - Duarte (2022)	16
Quadro 3 - Coordenadas das sondagens incluídas na campanha de prospeção executada pela Geoprolífero (2022)	17
Quadro 4 - Coordenadas da sondagem S078A-23, incluída na campanha de prospeção executada pela Geocontrolo (2023)	17
Quadro 5 - Coordenadas das sondagens executadas pelo Adjudicatário durante a fase de concurso (2024)	17
Quadro 6 - Listagem de sondagens previstas para a fase de Projeto de Execução	17
Quadro 7 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios RCU realizados nas sondagens S323-1R, S323-2R, S324-1R e S324-2R	24
Quadro 8 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios Lugeon executados nas sondagens realizadas no leito do Rio Douro	26
Quadro 9 – Tensão admissível estimada para solos arenosos em função da sua compacidade (baseado na BS 8004 – 1986)	32
Quadro 10 – Agrupamento de rochas brandas e fraturadas (extraído do Anexo G da NP EN 1997-1: 2010)	32
Quadro 11 – Ponte sobre o Rio Douro. Características dos betões	50

1 INTRODUÇÃO

Para o Lote A - Troço Porto (Campanhã) / Aveiro (Oiã) da nova Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa, está prevista a construção de várias obras de arte especiais, nomeadamente Pontes e Viadutos, destacando-se pela sua grandeza e importância a nova Ponte rodoferroviária sobre o Rio Douro.

Este documento refere-se à Memória Descritiva e Justificativa da Ponte sobre o Rio Douro abordando-se especificamente o seu projeto e as soluções propostas, dando-se especial destaque às razões que levaram à escolha concetual proposta e à forma como a mesma responde de forma positiva às exigências dos condicionamentos impostos no Caderno de Encargos do Concurso.

A nova Ponte sobre o Rio Douro cruza este curso de água superiormente a uma cota alta como se impõe pela necessidade de estabelecer a ligação entre a nova Linha de Alta Velocidade e a atual Estação de Campanhã, no Porto, e inferiormente à cota baixa estabelecendo uma nova ligação rodoviária, pedonal e ciclável entre as duas margens do Rio Douro.

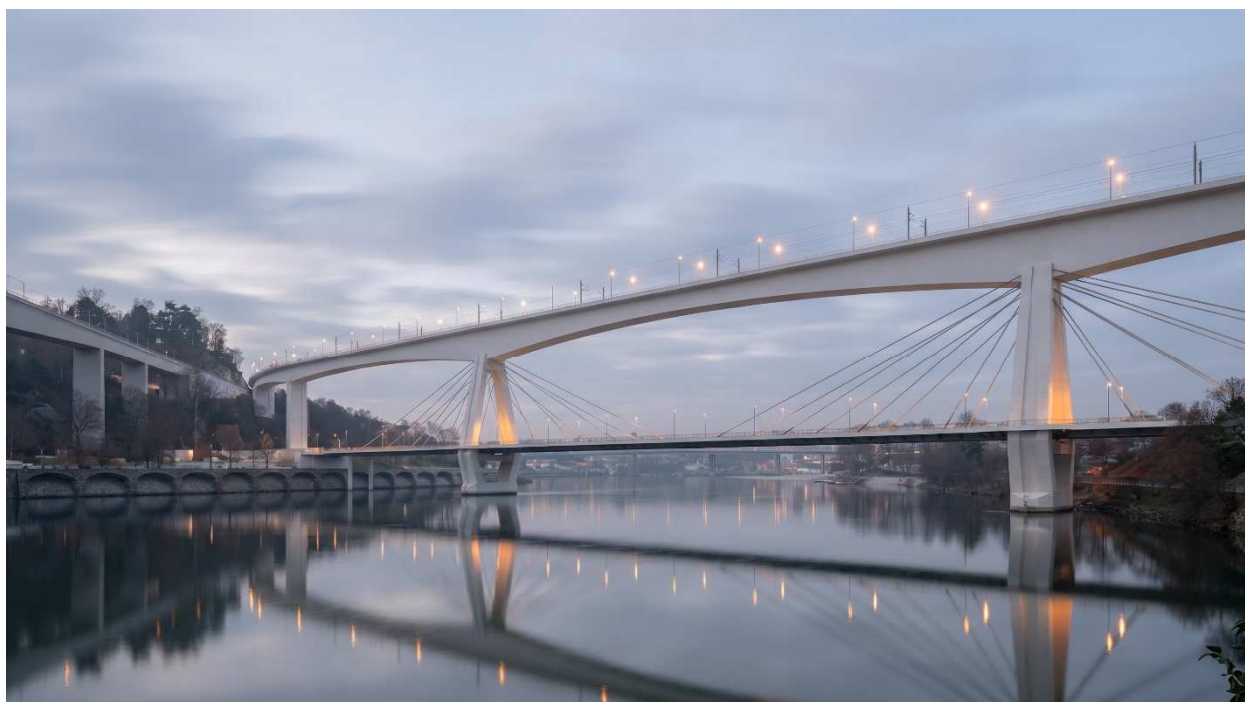


Figura 1 – Vista de jusante da solução proposta (fotomontagem)

A solução apresentada é aquela que a geometria do traçado, as condições topográficas, os obstáculos a transpor e os condicionamentos impostos aconselharam como sendo a mais favorável, quer do ponto de vista estrutural, quer do ponto de vista da adequada integração da obra no ambiente circundante.

Nos pontos seguintes descreve-se a solução preconizada e os seus condicionamentos e apresentam-se todos os aspetos considerados relevantes e específicos desta importante infraestrutura e travessia.

2 CONDICIONAMENTOS

2.1 PRINCIPAIS CONDICIONANTES DO PROJETO

Algumas das condicionantes mais importantes para a nova travessia sobre o Rio Douro decorrem das condições fisiográficas de todo o vale atravessado, da natureza urbana do local e da existência de uma ponte histórica nas proximidades.

Assim, as principais condicionantes do projeto podem ser sumarizadas da seguinte forma:

- Respeitar a DIA – Declaração de Impacto Ambiental.
- Uma nova travessia no corredor onde se prevê a nova Ponte, com a topografia existente, que permitirá, à coa alta, uma ligação ferroviária funcional entre as estações de Santo Ovídio (Gaia) e de Campanhã (Porto), e terá um comprimento na ordem dos 1.100 metros, e, à cota baixa, uma ligação rodoviária, pedonal e ciclável funcional entre as 2 margens do Rio Douro, e terá um comprimento na ordem dos 700 metros.
- O principal obstáculo a ser ultrapassado pela nova travessia é o curso de água do Rio Douro, um dos rios com maior caudal da Europa, e numa zona ambientalmente sensível. Tem uma largura entre margens de cerca de 330 metros medida no alinhamento em viés definido para a travessia. No local da travessia, o canal de navegação deve ter, no mínimo, uma largura de 64 metros, aumentando para 170 metros se consideradas as bóias existentes e o viés. Elementos de apoio permanentes dentro dos limites de assinalamento fluvial não são permitidos.
- O curso de água do Rio Douro na área é navegável. A envolvente de navegação a montante da Ponte Luiz I é definida pelo tabuleiro inferior desta estrutura, que deixa uma folga vertical de, pelo menos, 9,4 metros até ao tabuleiro rodoviário inferior.
- Outros obstáculos a serem ultrapassados pela nova infraestrutura são a Av. Paiva Couceiro, vulgarmente denominada como a Marginal do Porto, o Ramal de Alfândega existente que está desativado, na margem Norte, e o Passadiço de Quebrantões, que se desenvolve ao longo da margem esquerda do rio, já em Vila Nova de Gaia.
- A nova ponte fará parte de um dos mais notáveis conjuntos de pontes urbanas do mundo e, mais especificamente, do conjunto onde está inserida uma ponte de importância histórica internacional e de elevada qualidade arquitetónica – a Ponte de São João.
- A ponte será percorrida pelo comboio de alta velocidade no seu tabuleiro superior, e, no tabuleiro inferior, por veículos automóveis, peões e ciclistas, com uma disposição simétrica: as vias de circulação automóvel terão uma localização central no corte transversal, sendo duplamente ladeadas por zonas para uso de ciclistas e, exteriormente, para uso pedonal.
- Prever uma adequada ligação viária da travessia inferior ao tecido viário e urbano de ambas as margens do Rio Douro, minimizando o efeito barreira da solução proposta no território atravessado e mantendo uma idêntica e agradável fluidez de tráfego na atual Marginal do Porto.

Nos pontos seguintes detalham-se todos os requisitos que, de forma direta ou indireta, estiveram na base da solução proposta para a ponte comprovando-se, também, o seu cumprimento.

2.2 CONDICIONAMENTOS TOPOGRÁFICOS

O tabuleiro superior transpõe o vale do Rio Douro, o qual é, na zona de atravessamento da ponte, um vale com encostas suaves, a uma cota máxima de cerca de 63,0 m em relação ao nível máximo de preia mar (NMPM) do Rio Douro de modo a respeitar a sua inserção na Estação de Campanhã, o que constitui igualmente um condicionamento à extensão da própria obra de arte. A rasante do tabuleiro inferior atinge uma altura máxima de cerca de 16 m em relação ao nível máximo de preia mar (NMPM) nesta secção do Rio Douro.

A ponte assegura a transposição da Av. Paiva Couceiro nos vãos localizados entre a torre T2 e o pilar PF7 do tabuleiro superior ferroviário e entre o pilar PR10 e o encontro ER2 do tabuleiro inferior rodoviário. Assegura, ainda, a transposição do Ramal de Alfândega no vão entre os pilares PF8 e PF9 do tabuleiro superior ferroviário.

A localização dos pilares resultou da necessidade de respeitar a morfologia do terreno existente e do extenso vale atravessado, dos requisitos da via férrea assim como assegurar as exigências relativas ao atravessamento do Rio Douro, da Av. Paiva Couceiro e do Ramal de Alfândega.

2.3 CONDICIONAMENTOS FERROVIÁRIOS

A Ponte sobre o Rio Douro situa-se entre os kms 68+398,132 e 69+525,832 do Troço Oiã / Porto (Campanhã) da Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa.

O tabuleiro superior desenvolve-se em estrita concordância com o projeto ferroviário, isto é, em planta e ao longo do alinhamento da Via Ascendente encontra-se inserido num alinhamento reto até junto da margem direita do rio, onde inicia a aproximação à Estação de Campanhã através de uma clotóide de parâmetro $A=125,50$, uma curva circular direita de $R_H=350$ m, nova clotóide de parâmetro $A=125,50$, terminando num troço final reto. Em perfil longitudinal o tabuleiro desenvolve-se num trainel de inclinação $i=25\%$, seguido de uma curva de concordância convexa de $R_V=20.000$ m e de um trainel horizontal à cota 65,95 m que atravessa grande parte da extensão da Ponte até à estrutura de transição com o Viaduto de Campanhã. Assim, foi possível adotar Aparelhos de Dilatação de Via (AD) quer no encontro Sul (EF1), quer na estrutura de transição para o Viaduto de Campanhã (EF2).

O tabuleiro comporta um perfil transversal tipo de via em laje (não balastrada) associada a via dupla, com bitola de 1.668 mm, sendo a plataforma definida por:

- Distância entre vias..... 4,70 m
- Distância de segurança entre o eixo da via e o murete lateral 2,20 m
- Passadiço, incorporando guardas 2,45 m

Resultando uma largura total da plataforma de 14,00 m.

Os carris são constituídos por barras longas soldadas com 288 m de comprimento que serão assentes em travessas para via em laje de betão com fixação polivalente (bitola ibérica e bitola europeia). Sobre a via em laje são dispostos dispositivos de contenção lateral de veículos descarrilados, devidamente dimensionados para as solicitações regulamentares. Nesta fase seguiu-se o critério considerado na fase de estudos anteriores onde aquele dispositivo é constituído por um bloco em betão, à semelhança do que tem sido usado em outras linhas ferroviárias de alta velocidade no estrangeiro.

Assim, o tabuleiro comporta a via ferroviária bem como a estrutura da própria catenária e iluminação viária. Nas consolas de cada lado do tabuleiro existem ainda caleiras de cabos contínuas, com tampas amovíveis, e passadiços. Cumulativamente, em ambos os passeios, está prevista a colocação e fixação de postes de catenária através de base aparafusada e incluindo uma base de reserva. Nas extremidades das consolas existem vigas de bordadura nas quais se apoiam os guarda-corpos metálicos.

O tabuleiro é dotado de passadiços para evacuação lateral e assegurar a manutenção. Estes passadiços são dotados de guarda-corpos dispostos de modo a não permitir a queda de pessoas e objetos.

A variação de rigidez entre a superestrutura apoiada em obra de arte e em aterro é um dos pontos chave para a adequada exploração e conservação da via férrea. Assim, no tardo do encontro Sul é previsto um bloco técnico constituído por cunhas de aterro técnico de transição de rigidez até ao aterro corrente da via, o qual é apresentado em volume específico. Na extremidade Norte da ponte não está prevista a construção de um bloco técnico, uma vez que a transição entre a Ponte do Douro e o Viaduto de Campanhã é concretizada através de uma Estrutura de Transição que é encimada por uma laje de betão armado, conferindo uma rigidez similar à que se obtém sobre os tabuleiros das 2 obras de arte.

2.4 CONDICIONAMENTOS RODOVIÁRIOS

A travessia inferior rodoviária desenvolve-se, entre eixos de apoio nos encontros, entre os kms 0+035,000 e 0+725,000 do traçado estudado para estabelecer a ligação entre as duas margens do Rio Douro através de uma nova ligação rodoviária, pedonal e ciclável.

Em planta a travessia inferior desenvolve-se num alinhamento reto que liga as duas rotundas. Entre os kms 0+035,000 e 0+207,000 do traçado a travessia divide-se em dois tabuleiros afastados de 10 m. A partir do km 0+207,000 os dois tabuleiros aproximam-se tornando-se num tabuleiro único a partir do km 0+277,000 até ao final da travessia.

Em perfil longitudinal a obra insere-se na seguinte sequência de troços:

- Trainel horizontal $i=+0\%$ à cota +17,60;
- Curva vertical côncava com raio 100 000 m;
- Trainel $i=+0,33\%$;
- Curva vertical convexa com raio 16 500 m;
- Trainel $i=-0,33\%$;
- Curva vertical côncava com raio 100 000 m;
- Trainel horizontal $i=+0\%$ à cota +17,60.

Por se tratar de uma via urbana, com velocidades de projeto reduzidas ($V_b = 50$ km/h) a inclinação transversal dos tabuleiros é constante em toda a sua extensão, com 2,5% para o exterior das faixas de rodagem. Os passeios e ciclovias são inclinados a 2,0 % para o interior dos tabuleiros.

No dimensionamento do tabuleiro inferior foram asseguradas todas as exigências da Componente Rodoviária da Ponte impostas no Caderno de Encargos. Destas, destacam-se as normas municipais do Porto e de Vila Nova de Gaia.

O perfil transversal tipo comporta dois sentidos de circulação, cada um com 2 vias de circulação rodoviária de 3,25 m cada, um separador central com 1,00 m de largura, e passadiços em ambos os lados das vias de circulação rodoviária com as seguintes larguras livres por componente: ciclovias com 1,50 m e passeios com 2,25 m.

As guardas de segurança que são propostas tanto no separador central como nos limites laterais das vias de circulação foram definidas tendo em consideração o tipo de ponte proposto e o facto de não estarem previstas bermas laterais às vias de circulação. Assim optou-se pela adoção de guardas rígidas do tipo “New Jersey” que cumprem as exigências de capacidade de retenção de veículos de acordo com o estabelecido na Norma NP EN 1317.

Nas extremidades exteriores dos tabuleiros serão colocadas as vigas de bordadura pré-fabricadas sobre as quais serão colocados os guarda-corpos metálicos.

Para além de permitir a conveniente ligação e continuidade à rotunda implantada na margem de Gaia e ao entroncamento implantado na margem do Porto, o tabuleiro assegura, ainda, que o cruzamento com a Av. Paiva Couceiro, junto à margem do lado do Porto, e com o Passadiço de Quebrantões, do lado da margem de Gaia, é feito com as folgas necessárias para a manutenção dos respetivos tráfegos atuais e futuros. Em particular, sobre a Av. Paiva Couceiro assegura-se um gabarit vertical mínimo de 5,5 metros.

Importa, no entanto, referir que os limites de intervenção na travessia rodoviária da Concessão da LAV situam-se nas duas juntas de dilatação do tabuleiro inferior rodoviário e nos encontros apenas incluem a subestrutura que lhe dá suporte, ou seja, os montantes e as fundações dos eixos ER1 e ER2. As rotundas e todos os remanescentes trabalhos associados aos seus acessos são da responsabilidade das respetivas autarquias – CM de VN de Gaia e CM do Porto – como estabelecido no Caderno de Encargos deste projeto.

2.5 CONDICIONAMENTOS AMBIENTAIS

As condicionantes ambientais fundamentais para o desenvolvimento do estudo dizem respeito às recomendações decorrentes do processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) a que o projeto do Lote A foi sujeito, tendo sido emitida, a 21 de agosto de 2023, a Declaração de Impacte Ambiental (DIA), favorável condicionada.

Assim, de modo a dar seguimento ao referido nas “Condicionantes para Projeto de Execução” constantes da DIA, as soluções estruturais adotadas bem como os respetivos processos construtivos foram orientadas pela necessidade de observar os condicionamentos ambientais e paisagísticos.

Foi dada especial atenção ao enquadramento e integração paisagística da obra de arte, para esbater, minimizar e compensar significativamente os seus eventuais impactos negativos.

Os principais condicionamentos ambientais para a Ponte sobre o Rio Douro estão associados à travessia do rio, pelo que a geometria e localização dos pilares implantados no leito do rio foi definida de modo a garantir que o escoamento da linha de água se processa em condições adequadas.

As dimensões da linha de água, bem como os condicionamentos de navegabilidade do Rio Douro, foram tidos em conta na implantação da modelação estrutural dos vãos da obra no atravessamento do rio. Na parte que se estende pela margem Sul do Rio Douro, mas também do lado do Porto, foram, ainda, tidos em consideração fatores como a preservação do património existente, nomeadamente: a Igreja Românica de Quebrantões, a Quinta de Quebrantões, os arcos e paramentos de alvenaria da marginal do Porto, os fornos da antiga fábrica de louça de Massarelos e a Quinta da China.

Durante a construção da ponte serão tomados os cuidados necessários para minimizar a afetação das zonas adjacentes, recorrendo a processos construtivos que minimizem a ocupação do solo envolvente, não obstante a necessidade de aceder aos locais de implantação dos apoios em terra.

Atendendo à sensibilidade ecológica do vale atravessado procurou-se minimizar a sua afetação durante a construção da obra. Assim, não obstante o carácter provisório, as soluções preconizadas e os respetivos métodos construtivos tiveram em atenção estas preocupações. Refira-se, em particular, as soluções previstas para a execução das fundações das torres e pilar implantados dentro do leito principal do rio, cuja construção com recurso a meios flutuantes e ensecadeiras limitará os impactos estritamente à área das suas fundações.

Também o método definido para a construção dos tabuleiros, nos vãos principais da ponte, com recurso a carros de avanços no caso do tabuleiro superior e recurso a meios flutuantes e içamento a partir do tabuleiro superior no caso do tabuleiro inferior, evitam a colocação de apoios verticais dentro do leito, incluindo quaisquer fundações indiretas provisórias de grande porte.

A utilização de vigas pré-fabricadas nos tramos de tabuleiro sobre o leito de cheias do lado de Gaia limitam a utilização de cavaletes aos tramos extremos do tabuleiro superior onde as cotas do terreno se aproximam mais das cotas do tabuleiro.

De forma a reduzir os impactes ambientais decorrentes da sua construção, foram também considerados na conceção da obra os condicionamentos ambientais para assegurar a gestão dos resíduos resultantes das obras de construção.

Dada a localização da obra sobre o leito do Rio Douro, será necessário reduzir ao máximo ou mesmo impedir os riscos de contaminação da água do rio e das margens, resultantes das obras de construção civil a realizar.

No final da construção, será reposta a zona envolvente de forma semelhante às condições existentes antes da construção de acordo com o constante no volume específico de Integração Paisagística.

2.6 CONDICIONAMENTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

O alinhamento previsto para o atravessamento do vale do Rio Douro tem um enquadramento geotécnico bastante exigente e desfavorável, em especial do lado da margem de V.N. de Gaia, obrigando à adoção de fundações muito profundas com estacas de grande dimensão em grande parte dos apoios da nova Ponte. No capítulo 3 descreve-se em detalhe todo o enquadramento geológico e geotécnico local e as condições de fundação que tiveram que ser consideradas nas soluções propostas para cada apoio.

2.7 CONDICIONAMENTOS HIDRÁULICOS E FLUVIAIS

Sendo o principal obstáculo a ser ultrapassado pela nova travessia o curso de água do Rio Douro, um dos rios com maior caudal da Europa, teve-se particular atenção o cumprimento de todas as exigências associadas a este atravessamento.

Para respeitar a não interferência com o canal de navegação existente, que tem, no mínimo, uma largura de 64 metros, aumentando para 170 metros se consideradas as bóias de assinalamento e o viés, posicionaram-se os apoios dos pilares implantados dentro do leito do rio afastados de 200 metros. Esta distância entre eixos dos pilares permitiu, com alguma margem, assegurar a exigência do vão livre de 170 m entre os pontos limites das faces extremas dos fustes e embasamentos dos pilares. Também as zonas delimitadas para manobras dos navios de cruzeiro que atracam no Cais de Quebrantões são integralmente respeitadas com a implantação definida para os apoios no Rio Douro.

Durante a construção da Ponte admite-se que possam existir algumas interferências com os limites de assinalamento, embora seja sempre assegurado o canal de navegação e devidamente coordenado com as autoridades interessadas.

Dado o intensivo uso do canal de navegação do Rio Douro, em especial na componente turística que tem tido uma evolução muito significativa nos últimos anos, há que assegurar que a nova Ponte não introduz obstáculos ou restrições adicionais em relação aos já existentes, estando prevista a instalação e manutenção de um sistema de sinalização de apoio à navegação fluvial, respeitando a normalização nacional e internacional aplicável.

Como se sabe, a envolvente de navegação a montante da Ponte Luiz I é definida pelo tabuleiro inferior desta estrutura, que deixa uma folga vertical de, pelo menos, 9,4 metros até ao tabuleiro. Assim, o tabuleiro inferior da nova Ponte garante que, para uma cheia centenária, a cota inferior ao longo de toda a extensão da travessia do Rio Douro está sempre acima da cota 16,8 metros relativamente ao zero hidrográfico (ou 14,8 m em relação ao zero topográfico), cota imposta pelo Parecer da APDL (refª: Eml-rec_31186/2023, de 25/05/2023).

Nas figuras seguintes é possível constatar o cumprimento dos condicionamentos fluviais atrás elencados.

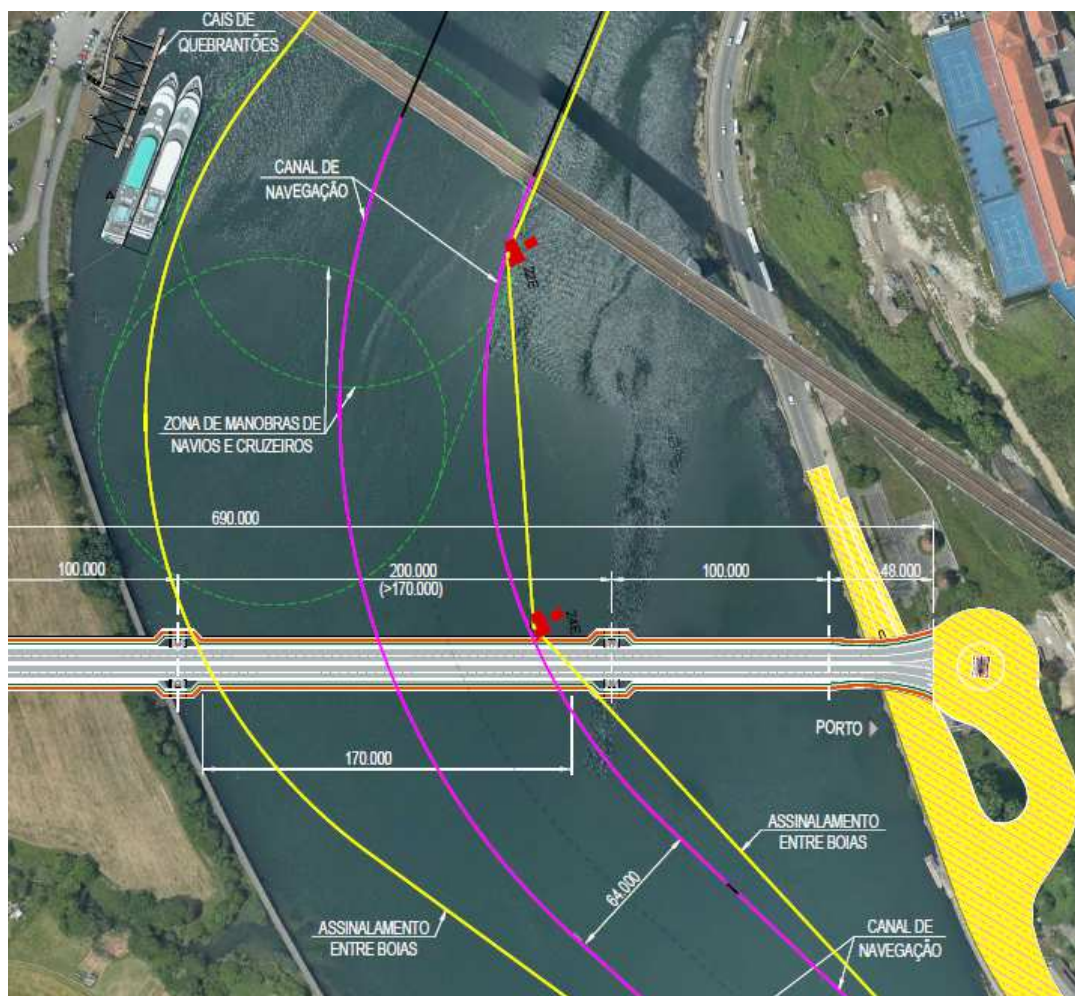


Figura 2 – Condicionamentos fluviais – vista em planta

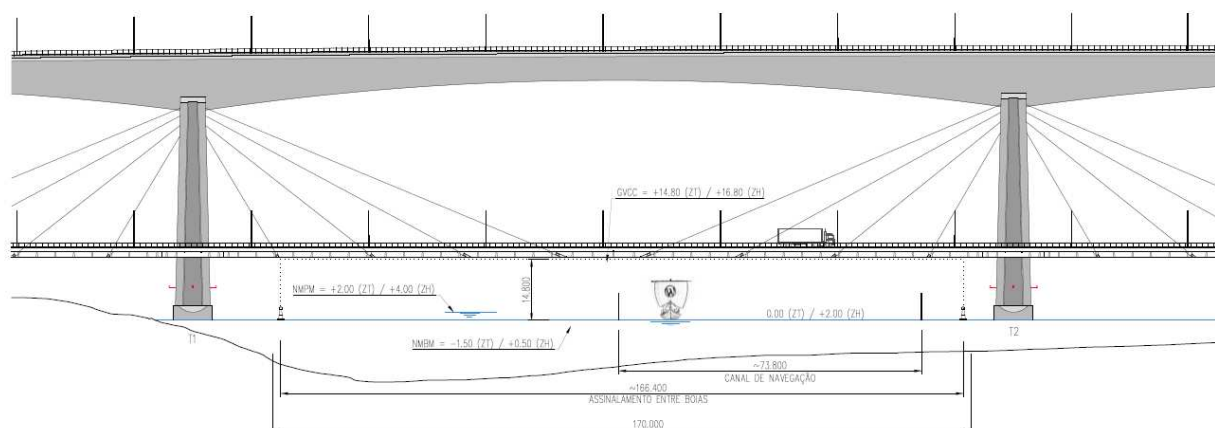


Figura 3 – Condicionamentos fluviais – vista em alçado

Adicionalmente às supramencionadas exigências e condicionamentos relativos ao tráfego fluvial, era imposto que os apoios implantados no Rio Douro fossem protegidos por estrutura apropriada, de forma a resistir ao embate accidental de embarcações. Assim, e à luz do exigido no Caderno de Encargos, a parte inferior das torres está protegida, junto à sua base, por embasamentos maciços

em betão armado que se elevam até à cota +3,50, ou seja, 1,5 m acima da cota do NMPM – nível máximo de preia mar –, dimensionados para resistir às ações impostas.

A geometria destes embasamentos tem formas hidrodinâmicas de modo a minimizar as interferências no escoamento e configuração atual do leito do rio. Adicionalmente, está prevista a colocação de tapetes de enrocamento junto aos apoios implantados dentro do leito do Rio Douro, cujo dimensionamento é objeto de um estudo pormenorizado e que consta de documento autónomo, o relatório das “Proteções contra erosões localizadas no contorno dos pilares” em anexo a esta Memória.

Nos documentos intitulados “Estudo de caracterização da dinâmica da erosão do leito do rio” e “Estudo Hidráulico” é feita a avaliação comparativa entre a situação atual, a solução que esteve na base da elaboração do EIA onde se considerou dois pilares implantados no leito do rio e a solução de projeto agora apresentada para a nova ponte a construir no âmbito da empreitada da Linha de Alta Velocidade.

2.8 CONDICIONAMENTOS DE DRENAGEM

Os condicionamentos de drenagem considerados são os impostos no Caderno de Encargos do Concurso, onde é exigido que os tabuleiros disponham de sistemas de drenagem das águas pluviais recolhidas sobre os tabuleiros ferroviário e rodoviário da ponte, não sendo permitida a descarga direta no Rio Douro.

2.9 CONDICIONAMENTOS DE SERVIÇOS AFETADOS

De acordo com a informação disponível, foi possível identificar o cruzamento de uma linha de Média Tensão com o traçado da ponte entre os pilares PF2 e PF3 do tabuleiro superior, embora sem interferência com a implantação dos apoios da obra nem com o tabuleiro ferroviário.

Por outro lado, a ponte cruza o Intercetor de Oliveira do Douro no vão localizado entre os pilares PF5 e PF6 do tabuleiro superior e entre os pilares PR5 e PR6 do tabuleiro inferior, o qual também não representa um condicionamento de maior para a implantação da obra.

No entanto, ambos os condicionamentos serão tidos em devida consideração na fase de construção para garantir que não irão implicar com os processos construtivos e equipamentos a utilizar em obra.

Entre os pilares PF8 e PF9, a ponte transpõe o Ramal de Alfândega ao longo do qual existe uma importante conduta adutora de água que será tida em devida consideração na fase de construção, em particular aquando da construção da fundação do pilar PF9.

A Estrutura de Transição Norte interfere com a rede de drenagem de águas pluviais existente, pertencente à Águas e Energia do Porto, estando previsto o reposicionamento desta infraestrutura previamente à construção da Estrutura de Transição.

Para a construção das fundações da Torre T1 será necessário, por razões de segurança durante a execução da obra, interromper e desmontar numa área interessada o Passadiço de Quebrantões. Este será, posteriormente à construção da ponte, reposto no mesmo alinhamento que tem atualmente.

Para além destes condicionamentos, foram contactadas todas as entidades cujas infraestruturas pudessem vir a ser afetadas pela construção desta infraestrutura, tendo sido confirmado que não há quaisquer interferências com todos os restantes serviços afetados.

2.10 CONDICIONAMENTOS CONSTRUTIVOS

Os condicionamentos construtivos a atender são os que resultam da proximidade de estruturas existentes, vias rodoviárias em serviço, transposição de linhas de água, ou resultantes da geometria própria da obra, respetiva altura ao solo ou outros aspetos, sendo a sua consideração fundamental na conceção da obra.

Face à necessidade de transposição, do lado de Gaia, de todo o leito de cheias do Rio Douro, no qual serão a atender aspetos de natureza ambiental, hidráulica e geotécnica, preconizaram-se soluções para as fundações, pilares e tabuleiro que minimizassem o impacto da ocupação do solo durante a sua construção. Estando em pleno leito de cheias será sempre necessário construir um aterro para acesso à construção das fundações dos apoios da ponte e o mesmo poderá ser usado pelos meios de elevação necessários à montagem das vigas pré-fabricadas do tabuleiro inferior.

No atravessamento do Rio Douro procurou-se uma solução que, cumprindo com as imposições da DIA e Caderno de Encargos, reduzisse ao máximo os trabalhos associados à construção de fundações no rio. Igualmente que a construção dos tabuleiros não implicasse a construção de apoios adicionais, mesmo que provisórios, dentro do leito do rio, como acontecia na solução apresentada em sede de EIA que era francamente mais intrusiva neste aspeto, onde se previam soluções provisórias de grande porte implantadas no leito do rio

Para a transposição da Av. Paiva Couceiro, na margem do lado do Porto, está prevista a instalação de estruturas para proteção dos utentes desta via uma vez que será mantida em funcionamento durante a construção da ponte.

2.11 CONDICIONAMENTOS DE SEGURANÇA E SAÚDE

O estudo da obra de arte foi desenvolvido em estreita colaboração com o Coordenador de Segurança em Projeto, tendo sido prestadas todas as informações necessárias sobre os riscos associados à elaboração do projeto e construção da obra, para incorporação no Plano de Segurança e Saúde e na Compilação Técnica.

No estudo das soluções para a obra de arte foram incorporadas as diretivas do Coordenador de Segurança, nomeadamente, do ponto de vista de prevenção dos riscos, das soluções desenvolvidas, dos métodos e processos construtivos a utilizar em obra e dos condicionalismos associados à execução dos trabalhos.

3 GEOLOGIA E GEOTECNIA DO LOCAL

3.1 ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO

A região do Porto, no geral, é caracterizada por baixo relevo, pois corresponde a uma extensa área aplanada. O relevo apresenta-se, maioritariamente, talhado em substrato granítico, definindo uma estrutura em doma que suporta grande parte da cidade do Porto. Esta região está levemente inclinada para ocidente até ao mar, para Sul termina em vertentes abruptas junto à margem direita do Rio Douro e para Norte está limitado pelo Rio Leça.

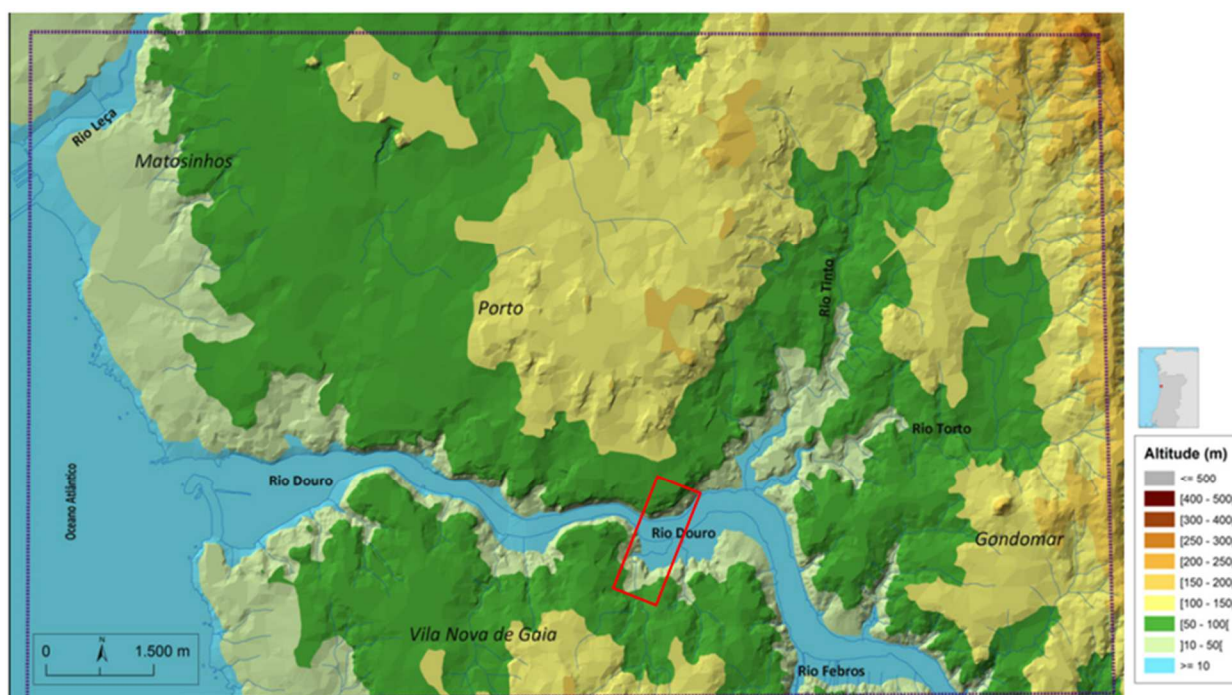


Figura 4 – Mapa hipsométrico simplificado da Plataforma Litoral do Porto (Cartografia base: Série Cartográfica Nacional - 1/25000 Digital; Fernandes, 2020) e representação esquemática, a vermelho, da área em estudo.

O relevo marginal, característico do Porto, tem um desenvolvimento essencialmente retilíneo, sofrendo apenas leves indentações provocadas pela incisão dos pequenos cursos de água, que nascem na sua base e têm percursos na ordem de 5 a 6 km de comprimento, com curso limitado à plataforma litoral do Porto (Araújo, 1991). O desenvolvimento topográfico da faixa litoral situada na região do Porto é definido, essencialmente, por três grandes conjuntos (Figura 4): 1) área acima dos 100 m de altitude, denominada de relevo marginal, constituída maioritariamente pelo Granito do Porto; 2) área situada entre 50 m e 100 m de altitude, caracterizada pelas rochas eruptivas do Granito do Porto e por unidades do Complexo Xisto-Grauváquico, ocorrendo também, depósitos de fácies fluvial; 3) área situada abaixo dos 50 m de altitude, constituída por depósitos de fácies fluvial.

A Plataforma Litoral do Porto encontra continuidade morfológica para Sul do Douro, em Vila Nova de Gaia. Nesta região, segundo Araújo (2008), os diversos depósitos sedimentares da cobertura cenozoica aparecem geralmente na proximidade do relevo marginal, o qual poderá ter funcionado como um *horst* que separa a plataforma das regiões mais interiores.

No que diz respeito à rede de drenagem, o Douro, curso de água principal, responsável pelo vale estreito e profundo visível ao longo da marginal que se prolonga até à Foz, separa as cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia, as quais se encontram instaladas sobre um substrato, maioritariamente, granítico. As vertentes têm um declive acentuado e o leito é relativamente estreito, apesar de se encontrar a poucos quilómetros do oceano. As restantes linhas de água, além de Torto e Tinto (a Este), Leça (a Norte) e o Douro (a Sul), desenvolvem-se radialmente em torno das superfícies mais elevadas marcadas no maciço granítico que suporta a cidade, abrangendo as freguesias de Paranhos, Cedofeita, Santo Ildefonso, Bonfim e Campanhã.

3.2 LITOLOGIA E ESTRATIGRAFIA

Do ponto de vista geológico regional, a região do Porto integra-se numa faixa metamórfica, de direção geral NNW-SSE, designada por faixa de cisalhamento de Porto-Tomar (Dias & Ribeiro, 1993). Esta faixa envolve terrenos do Proterozoico médio-superior, faz parte do Terreno Autóctone Ibérico e inclui-se na Zona de Ossa Morena – ZOM (Ribeiro et al., 1990).

Os sedimentos pré-existent na região foram fortemente metamorfizados pela intrusão do Granito do Porto, originando auréolas migmatíticas extensas e de difícil distinção, observando-se, muitas vezes, a presença de intercalações metassedimentares com outras de natureza ígnea. O preenchimento sedimentar associado ao vale do Douro desenvolveu-se sobre o substrato granítico/metassedimentar, com maior possança na margem esquerda.

O traçado em estudo interessa o bordo poente do Granito do Porto, aflorante ou sub-aflorante, recoberto por aterros e sedimentos aluvionares, na margem direita do Rio Douro. Por outro lado, na margem esquerda do Rio Douro, na região de Vila Nova de Gaia, o traçado interessa as formações de base, nomeadamente, o Granito do Porto e o maciço metassedimentar encaixante integrado no Complexo Xisto-Grauváquico, sendo que junto à margem do Rio, o preenchimento aluvionar do vale do Douro apresenta espessura de dezenas de metros.

Tendo como referência a notícia explicativa da Folha 9-C Porto, da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000, apresenta-se, de seguida, uma breve descrição de cada unidade geológica intersectada pelo traçado em estudo (Figura 5).

Depósitos Modernos

a-A-Ad – Aluviões atuais; Areias e cascalheiras de praia; Areias de dunas

O litoral da região do Porto é, no geral, de baixo relevo e caracteriza-se por depósitos de areias e cascalheiras, que origina uma sucessão de praias. A altitude destes depósitos, geralmente, não excede os 7 ou 8 m, correspondendo ao terraço de inundação durante as épocas de cheias.

Os depósitos recentes ocupam parcialmente o fundo dos vales, sendo constituídos por sedimentos argilosos.

Estes depósitos aluvionares, associados ao vale do Douro, são intersectados pelo traçado em estudo, com maior possança na margem esquerda do Rio Douro, nas proximidades do cais de Quebrantões (V. N. de Gaia).

Depósitos Plio-Plistocénicos

Q_b⁴ – Depósitos de praia de 15-20 m

Apesar da maioria destes depósitos ter sido destruída pelo mar, estes podem ser observados na margem esquerda do Rio Douro, apresentando constituição conglomerática e gresosa cor amarelada, a qual encontra-se coberta por capa areno-pelítica, também amarela.

Complexo Xisto-Grauváquico Ante-Ordoviciano e Séries Metamórficas derivadas

X_{yz} – Migmatitos, gnaisses, micaxistos, xistos luzentes, etc

As rochas do Complexo Xisto-Grauváquico sofreram intensa ação metamórfica, tendo sido esta provocada pela intrusão do “Granito do Porto” tendo sido, consequentemente, originadas extensas áreas de xistos luzentes, micaxistos e gneisses que correspondem a uma das principais unidades geológicas da região. Nas zonas de contacto com o granito do Porto, desenvolveram-se estruturas migmatíticas. Contudo, a cartografia destas rochas é difícil, devido à passagem gradual de umas litologias para as outras.

A Ponte sobre o Rio Douro deverá intersectar esta unidade no troço que se desenvolve na sua margem esquerda, situando-se a sul da unidade Q_b⁴. Esta unidade ocorre de modo aflorante a sub-aflorante na encosta do lado V.N. Gaia.

Rochas Eruptivas Pós-Complexo Xisto Grauváquico

X_m – Granito alcalino, de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto)

Este granito, de idade Hercínica, ocupa maioritariamente a cidade do Porto e está rodeado pelo maciço metamórfico descrito anteriormente. Apresenta cor clara, grão médio a grosseiro, e predomina a moscovite e turmalina.

No seio deste granito surgem nódulos, originados por diferenciações magmáticas, designados por “pipos” e “pernas de gigante”, cuja composição é mais biotítica. O granito apresenta-se, em muitas regiões, profundamente alterado, com intensa caulinização dos feldspatos, tendo metamorfozado, profundamente, as rochas do Complexo Xisto-Grauváquico. Nas zonas de contacto, formaram-se importantes auréolas migmatíticas, que tornam quase sempre difícil a cartografia dos afloramentos graníticos.

Estas rochas são intersectadas pelo traçado em estudo, essencialmente, na margem direita do Rio Douro e, pontualmente, na sua margem esquerda.

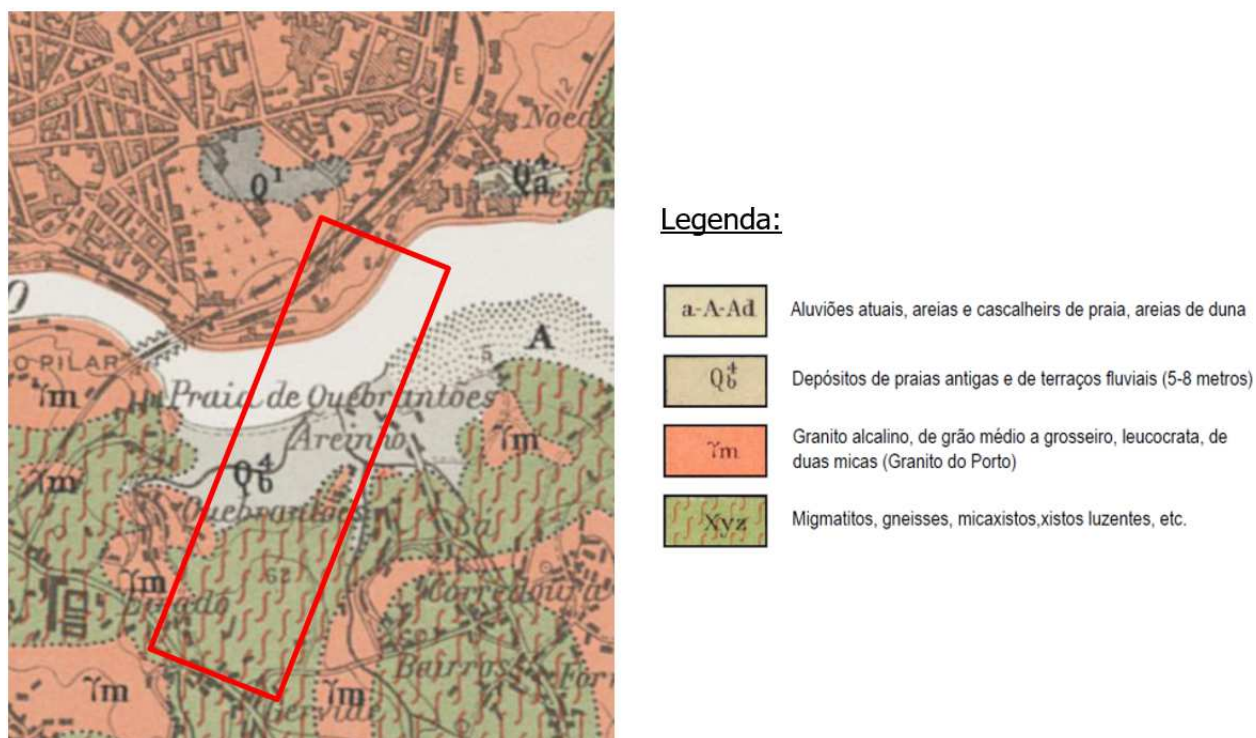


Figura 5 – Representação esquemática da área em estudo sobre excerto da Folha 09-C (Porto), da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50.000 e respetiva legenda.

3.3 TECTÓNICA

Do ponto de vista tectónico, a região do Porto é fortemente afetada pela orogenia Hercínica e é caracterizada pelo megacisalhamento direito de Porto-Coimbra-Tomar (ZOM/ZCI), próximo do limite ocidental do relevo marginal, que corresponde, localmente, ao contacto tectónico entre o substrato metassedimentar do Proterozóico (ZOM) e a mancha de granitos pós-tectónicos de Lavadores.

A cidade do Porto situa-se, essencialmente, na Zona Centro-Ibérica (ZCI), junto ao limite com a Zona de Galiza – Trás – os - Montes. Segundo Cabral & Ribeiro (1989), foram identificados, na margem esquerda do Rio Douro, dois lineamentos estruturais, com registo de movimentação recente, situados em posição idêntica à do relevo marginal, o que permitiu afirmar que esta margem é fortemente controlada pela tectónica da região. Diversas evidências mostram, também, que a maioria dos acidentes tectónicos que afetam os depósitos cenozóicos da área em estudo correspondem a falhas inversas.

Na região identificou-se uma rede de acidentes tectónicos, de natureza frágil, gerada durante as fases tardi a pós-variscas, que se encontram subordinadas ao sistema de fracturação de atitudes NNE-SSW a ENE-WSW e NW-SE a NNE-SSE (Figura 6), condicionando a geologia da região. A linha de costa é subparalela ao grande acidente NNW-SSE (falha Porto-Tomar).

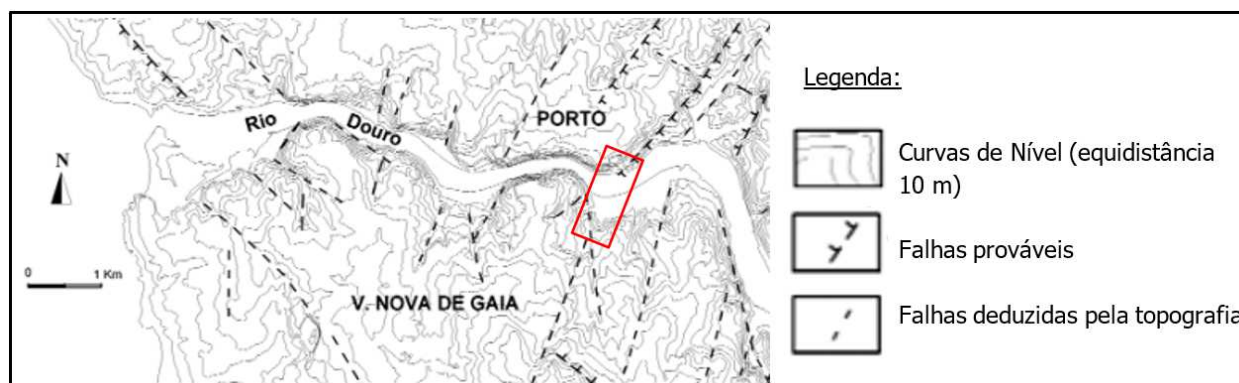


Figura 6 - Principais lineamentos tectónicos da região do Porto/Vila Nova de Gaia e representação esquemática, a vermelho, da área em estudo (extraído e adaptado de Araújo et al, 2003).

3.4 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO LOCAL

3.4.1 CAMPANHAS DE PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA REALIZADAS

O presente subcapítulo compreende uma descrição geológico-geotécnica dos terrenos interessados pela futura Ponte sobre o Rio Douro. Esta descrição toma como suporte todos os dados de prospeção geológica-geotécnica disponíveis que são representativos da área em estudo. A informação geotécnica considerada provém das seguintes fontes:

- Campanha de prospeção realizada pela Argonvia (2020) no âmbito do estudo de conceção/construção da Ponte D. António Francisco dos Santos;
- Campanha de prospeção executada pela Geoprolífero (2022), no âmbito do estudo de “Estabilização da Escarpa Adjacente ao Ramal Ferroviário da Alfândega”;
- Campanha de prospeção complementar executada pela Geocontrolo (2023), no âmbito da atualização do Estudo Prévio da Linha de Alta Velocidade Lisboa – Porto (Lote A);
- Campanha de prospeção realizada pelo Adjudicatário (2024) durante a fase de concurso para a Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa (Lote A);
- Campanha de prospeção geotécnica desenvolvida para a presente fase de Projeto de Execução da Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa (Lote A).

A primeira campanha mencionada (Argonvia, 2020) consistiu na realização de dezassete (17) sondagens à rotação, *onshore*, das quais 4 foram realizadas na margem direita (S1 a S4), enquanto as restantes (S5 a S17) foram executadas na margem esquerda. Esta campanha compreendeu ainda um conjunto de ensaios laboratoriais de identificação, nomeadamente análise granulométrica, determinação do teor em água e dos limites de consistência, sobre 43 amostras de solos (aterros, aluviões e solos residuais), e um conjunto de ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial – UCS (52 unidades) e de carga pontual – PLT (6 unidades), sobre tarolos rochosos. A execução das sondagens foi acompanhada da realização de ensaios de penetração dinâmica SPT.

Os trabalhos realizados pela Geoprolífero (2022) tiveram como objetivo específico caracterizar os terrenos adjacentes ao ramal ferroviário da alfândega. Os trabalhos de campo compreenderam a execução de 3 sondagens à rotação acompanhadas de ensaios SPT. Estas três sondagens situam-se muito próximas entre si, permitindo apenas, atendendo a escala da estrutura em estudo, uma caracterização muito pontual dos terrenos.

Já no que se refere à campanha de prospeção realizada pela Geocontrole (2023) no âmbito da atualização do Estudo Prévio da Linha de Alta Velocidade Porto – Lisboa (Lote A), que visou aumentar o grau de conhecimento geotécnico ao longo de todo o traçado em estudo, considera-se a análise da sondagem S078A-23, a qual é representativa das condições de fundação do lado norte.

A última campanha de prospeção geotécnica que servirá de suporte para a descrição das condições geológico-geotécnicas da estrutura em estudo corresponde à campanha executada pelo Adjudicatário, na fase de concurso, sendo esta justificada pelo facto de a prospeção disponível de estudos anteriores encontram-se significativamente afastadas do eixo em estudo. Estes trabalhos de prospeção adicionais incluíram sete (7) sondagens, das quais três (3) foram executadas *onshore*, enquanto as restantes quatro (4) foram executadas *offshore*.

Quadro 1 – Coordenadas das sondagens incluídas na campanha de prospeção executada pela Argonvia (2020)

ID	X	Y	Z (m)
S1	-38600,1	163540,0	8,501
S2	-38552,1	163573,0	12,466
S3	-38429,9	163559,0	8,540
S4	-38516,6	163549,0	8,567
S5	-38460,1	163215,0	5,520
S6	-38477,4	163177,0	5,350
S7	-38463,1	163139,0	6,380
S8	-38458,1	163082,0	6,290
S9	-38450,4	163032,0	5,990
S10	-38444,7	162975,0	10,520
S11	-38436,7	162920,0	20,470
S12	-38427,6	162860,0	43,800
S13	-38502,4	162838,0	33,580
S14	-38586,5	162819,0	31,400
S15	-38689,7	162734,0	43,310
S16	-38788,3	162631,0	47,530
S17	-38886,7	162564,0	46,700

Quadro 2 - Coordenadas das sondagens incluídas na campanha de prospeção executada pela Teixeira - Duarte (2022)

ID	X	Y	Z (m)
SC1	-38500,74	163461,28	-7,99
SC2	-38483,41	163277,87	-8,61
SC3	-38477,74	163269,66	-3,98

Quadro 3 - Coordenadas das sondagens incluídas na campanha de prospeção executada pela Geoprolífero (2022)

ID	X	Y	Z (m)
S1	-38521,4844	163621,5557	24,03
S2	-38523,6402	163627,6347	28,01
S3	-38611,3358	163609,2157	36,8

Quadro 4 - Coordenadas da sondagem S078A-23, incluída na campanha de prospeção executada pela Geocontrolo (2023)

ID	X	Y	Z (m)
S078A-23	-38419,372	163740,820	63,114

Quadro 5 - Coordenadas das sondagens executadas pelo Adjudicatário durante a fase de concurso (2024)

ID	X	Y	Z (m)
S322	-38645,865	163076,090	5,258
S323 (*)	-38619,852	163177,490	5,600
S323.1 (*)	-38614,939	163178,304	5,660
S323.2 (*)	-38621,228	163167,099	5,700
S323.3	-38630,324	163164,934	5,672
S324	-38488,166	163664,281	43,065
S323-1R	-38622,332	163227,087	-3,25 (**)
S323-2R	-38602,812	163227,087	-2,0 (**)
S324-1R	-38572,761	163428,658	-4,7 (**)
S324-2R	-38552,656	163420,156	-5,3 (**)

(*) – Sondagens que, por problemas técnicos, não puderam ser executadas até à profundidade prevista. A sondagem S323 corresponde à localização original da sondagem, sendo que as sondagens S323.1, S323.2 e S323.3 correspondem a sondagens que foram executadas, aproximadamente no mesmo local, com o intuito de atingir a profundidade objetivo. Tal apenas foi possível na sondagem S323.3.

(**) – Cotas altimétricas estimadas com base em planta batimétrica do Rio Douro.

Por fim, de modo a ter um volume adequado de informação geotécnica para suportar o estudo das fundações da estrutura em estudo, referem-se, no quadro infra, as sondagens a executar durante a fase de Projeto de Execução:

Quadro 6 - Listagem de sondagens previstas para a fase de Projeto de Execução

ID	M	P
S01A P 68.1	-38738,5835	162700,3986
S01B P 68.1	-38729,6335	162698,2681
S02A P 68.1	-38733,7580	162740,9207
S02B P 68.1	-38720,1475	162737,6415
S03A P 68.1	-38719,7046	162799,2516

ID	M	P
S03B P 68.1	-38706,0940	162795,9725
S04A P 68.1	-38705,6512	162857,5826
S04B P 68.1	-38692,0383	162854,3129
SR01A P 68.1	-38701,4048	162899,7613
SR01B P 68.1	-38675,7769	162893,5869
S05 P68.1	-38684,7925	162914,2740
SR02A P 68.1	-38693,5009	162928,7154
SR02B P 68.1	-38669,5864	162922,9538
SR03A P 68.1	-38686,6548	162957,9245
SR03B P 68.1	-38662,5597	162952,1193
S06 P68.1	-38670,7390	162972,6050
SR04A P 68.1	-38679,8088	162987,1335
SR04B P 68.1	-38655,5330	162981,2848
SR05A P 68.1	-38672,9627	163016,3425
SR05B P 68.1	-38648,5063	163010,4503
SR06A P 68.1	-38666,1166	163045,5515
SR06B P 68.1	-38641,4796	163039,6158
S07 P68.1	-38650,3615	163057,1848
SR07A P 68.1	-38659,1953	163074,7423
SR07B P 68.1	-38634,5010	163068,7928
SR08A P 68.1	-38650,0881	163103,4066
SR08B P 68.1	-38629,5548	163098,4596
SR09A P 68.1	-38641,3117	163132,1505
SR09B P 68.1	-38624,2778	163128,0466
S11 P 68.1	-38617,441	163225,646
S11A P68.1	-38622,0220	163217,5068
S12 P 68.1	-38601,1937	163210,5568
S13 P 68.1	-38537,961	163410,084
S14 P 68.1	-38557,581	163406,851
SR10A P 68.1	-38546,8710	163509,5278
SR10B P 68.1	-38536,4923	163507,0273
SR11A P 68.1	-38537,5895	163562,8368
SR11B P 68.1	-38520,0857	163558,6197
S15 P 68.1	-38531,5294	163584,7174
S16 P 68.1	-38513,9899	163583,6118

ID	M	P
S17 P 68.1	-38500,4282	163648,9326
S18 P 68.1	-38489,106	163642,5608
S19 P 68.1	-38467,5488	163697,4646
S20 P 68.1	-38453,754	163683,743
S21 P 68.1	-38432,654	163734,264
S22 P 68.1	-38423,5124	163725,6832
S23 P 68.1	-38390,232	163770,072
S24 P 68.1	-38394,2629	163751,4323
S25 P 68.1	-38373,2991	163770,1215
S19 PRD	-38469,861	163286,02
S20 PRD	-38490,975	163453,526
S21 PRD	-38475,261	163453,95

Nota: As linhas a verde indicam as sondagens já executadas e das quais se dispõe do respetivo *log*

3.4.2 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO LOCAL

Serve o presente subcapítulo para descrever as condições geológico-geotécnicas dos terrenos interessados ao longo do alinhamento da estrutura em estudo, tendo por base os trabalhos de prospeção geológica-geotécnica indicados no subcapítulo anterior.

De um modo global, considera-se que os terrenos interessados pela futura Ponte sobre o Rio Douro subdividem-se em 4 zonas distintas (ordenadas de sul para norte):

Zona 1 – A primeira zona, localizada entre o Pk 68+388 e 68+574, compreende a encosta do lado de Gaia, cujo flanco pende para norte. Neste trecho, as sondagens indicam a presença de solos residuais graníticos e migmatíticos, muito compactos, desde a superfície do terreno, encontrando-se o maciço rochoso subjacente muito alterado a decomposto. A transição solo-rocha é bastante irregular, apresentando fortes variações de sondagem para sondagem.

Zona 2 – A segunda zona, situada entre o Pk 68+574 e o Pk 68+927, interessa uma zona aplanada onde ocorrem aluviões de espessura muito elevada, os quais podem atingir espessuras da ordem dos 77,5 m, de acordo com a sondagem S5 (Argonvia, 2020), embora esta esteja significativamente afastada do eixo em estudo. A sondagem S323.3, realizada na fase de concurso, estando situada ao eixo de traçado, indica 46 m de espessura aluvionar. O maciço subjacente é predominantemente migmatítico, muito alterado a decomposto.

Zona 3 – A terceira zona, localizada entre o Pk 68+927 e o Pk 69+253, compreende o leito do Rio Douro, cuja possança aluvionar varia entre 5,9 e 33,6 m de espessura (aumentando de norte para sul). As aluviões são essencialmente arenosas, areno-lodosas e lodosas, apresentando seixo rolado em profundidade. O substrato rochoso corresponde a granitos de duas micas, geralmente medianamente a pouco alterados e com fracturação espaçada a medianamente espaçada (embora, pontualmente, registem-se horizontes muito alterados a decompostos – W4 a W4-5 - e com fracturação próxima a muito próxima – F4 a F4-5).

Zona 4 – Por fim, a quarta zona, situada entre o Pk 69+253 e 69+539, compreende os terrenos na margem norte do Rio Douro e a encosta que se desenvolve para montante. Trata-se de uma zona de orografia irregular, com importantes condicionamentos de ocupação superficial, na forma de algumas infraestruturas importantes, como é o caso da Av. Gustavo Eiffel (junto à margem) e o viaduto da Campanhã existente (que se desenvolve no seguimento da Ponte S. João). Do ponto de vista geológico, observa-se, de um modo geral, a presença de uma cobertura de aterro com espessura irregular, a qual encontra-se sobreposta aos granitos do Porto, que tanto podem tomar a forma de solos residuais medianamente compactos a muito compactos até elevadas profundidades, maciço decomposto a muito alterado, ou ainda maciço rochoso medianamente a pouco alterado.

Seguidamente efetua-se uma análise mais detalhada de cada zona.

Zona 1

Este trecho é caracterizado pelas sondagens S16 a S14 (Argonvia, 2020), as quais revelam, conforme já indicado, que o horizonte superficial é constituído por solos residuais de natureza granítica a migmatítica, passando, em profundidade, a maciço granítico ou migmatítico, decomposto a muito alterado (W5 - 4), registando-se algumas passagens medianamente alteradas a muito alteradas (W3 - 4).

Observa-se que os terrenos interessados na sondagem S14, quer se trate de solos residuais ou maciço rochoso, são inteiramente de natureza migmatítica. Já na sondagem S15 é observável que a generalidade dos materiais intersetados são de natureza granítica, passando a migmatitos aos 23,8 m de profundidade. Por fim, já na sondagem S16, observa-se que foram interessados, exclusivamente, materiais de origem granítica.

Nas sondagens referidas foram detetados solos de cobertura até espessuras compreendidas entre 0,7 e 3,8 m, que correspondem, essencialmente, a terra vegetal e pequenos depósitos de aterro, não contendo capacidade portante (N_{SPT} de 2 a 3 pancadas).

Subjacentemente, intersetaram-se solos residuais a maciço decomposto de natureza granítica (predominante) a migmatítica, de natureza areno-siltosa, com grão fino a médio ou médio a grosseiro, os quais apresentam-se, desde a superfície, muito compactos ($N_{SPT} > 50$), excetuando-se uma passagem entre os 5,1 e 8,4 m na sondagem S16 (cujo N_{SPT} varia entre 30 e 39 – solos compactos).

Os ensaios laboratoriais efetuados em amostras de solos residuais revelam que os mesmos correspondem a solos arenosos com baixo conteúdo em finos (SM no sistema unificado de classificação de solos; A-2-4 (0) a A-1-b (0) na classificação para fins rodoviários), sendo estes não plásticos.

Progressivamente, nalgumas sondagens, dá-se a passagem de maciço muito alterado a decomposto (W4-5) a maciço muito alterado a medianamente alterado (W3-4).

No caso da sondagem S14, essa passagem dá-se aos 3,5 m de profundidade, onde se intersetam migmatitos muito fraturados, aparentando a orientação das descontinuidades coincidir com a da foliação do maciço (com pendor de 10 a 25° face ao eixo da sondagem).

Já na sondagem S15, essa transição dá-se aos 12 m de profundidade, onde o maciço rochoso toma a forma de granitos de grão médio a grosseiro, muito alterado a decomposto a medianamente a muito alterado (W3-4) e fortemente fraturado (F5 a F4), passando, a partir dos 16,7 m de profundidade, a

migmatitos muito alterados a decompostos (W4-5) a medianamente a muito alterados (W3-4), intensamente fraturados (F5 a F3-4).

Finalmente, na S16, a transição solo residual/maciço decomposto para maciço muito alterado a decomposto dá-se aos 15,1 m de profundidade, o qual toma a forma de maciço granítico muito alterado a muito alterado a decomposto (W4 a W4-5), com fracturação muito próxima a próxima a medianamente afastada (F5-4 a F3), com indícios de oxidação, sendo que a generalidade das descontinuidades possui pendor de 10 a 45° relativamente ao eixo da sondagem.

Zona 2

A segunda zona interessada pela futura Ponte sobre o Rio Douro compreende a planície aluvionar que se desenvolve entre o sopé da encosta do lado de Gaia e a margem esquerda do Rio Douro. Neste trecho observam-se aluviões com espessura muito significativa, de natureza arenosa, areno-siltosa e lodosa, aumentando esta em direção ao rio.

Para caracterizar este setor, analisaram-se, com maior destaque, as sondagens S10 (Argonvia, 2020), S322 e S323.3 (prospecção executada pelo Adjudicatário durante a fase de Concurso). As restantes sondagens realizadas na campanha da Argonvia (2020), por se encontrarem mais afastadas do traçado, não foram consideradas para a interpretação lito-estratigráfica dos terrenos. Não obstante, os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais executados tanto em amostras de solo como de rocha, provenientes de todas as sondagens executadas neste trecho, foram considerados na caracterização dos materiais.

De acordo com a sondagem S10, que corresponde à sondagem executada em terrenos aluvionares com maior proximidade ao sopé da encosta do lado de Gaia, intersetaram-se solos aluvionares silto-argilosos a argilo-siltosos, de cor castanha, cinzento escuro ou negra, até aos 28,4 m de profundidade. Os ensaios SPT realizados nestes solos indicam que os mesmos se apresentam muito moles (N_{SPT} de 0 a 3 pancadas). Subjacentemente, intersetaram-se migmatitos muito a medianamente alterados, que passam, em profundidade, a medianamente a pouco alterados, verificando-se alguns horizontes finos muito alterados a decompostos. Trata-se de maciço rochoso, aparentemente, bastante competente, com fracturação, em geral, próxima a afastada e RQD > 90 %. As descontinuidades do maciço apresentam pendor 20 a 45° relativamente ao eixo da sondagem, encontrando-se a foliação paralela ao mesmo eixo. A sondagem atingiu os 39,5 m de profundidade.

Na sondagem S322, realizada pelo Adjudicatário durante a fase de concurso, observaram-se aluviões até aos 45 m de profundidade, sendo estas constituídas, predominantemente, por areias finas a médias, siltosas a silto-argilosas ou argilosas e, menos frequentemente, argilas arenosas e argilas lodosas (ocorrendo estas últimas exclusivamente, até aos 6 m de profundidade), com tons anegrados a cinza escuro. Observa-se que, em profundidade, dá-se um aumento de compacidade/consistência das aluviões. De um modo geral, observa-se que, até aos 28,5 m de profundidade os solos encontram-se, quase sempre, soltos a medianamente compactos, passando, em seguida, a solos compactos a muito compactos, até aos 45 m de profundidade. Subjacentemente, até aos 48 m de profundidade, detetaram-se xistos argilosos decompostos, caracterizados por “negas” em ensaios de SPT. Segue-se uma passagem quartzítica com 1,5 m de possança, à qual se seguem xistos luzentes de cor acastanhada a acinzentada, apresentando-se muito alterados (W4) a decompostos (W5) e intensamente fraturados (F5 a F4-5), até ao fim da sondagem (70,5 m).

Finalmente, na sondagem S323.3 (executada, também, pelo Adjudicatário durante a fase de concurso), intersetaram-se solos aluvionares de natureza areno-siltosa a areno-lodosa, até aos 46 m de profundidade, com características similares ao descrito na sondagem anterior, distinguindo-se

desta pelo facto de não se registarem passagens predominantemente argilosas. Em profundidade, tal como na sondagem anterior, verifica-se um aumento gradual da compactidade, encontrando-se os solos soltos a medianamente compactos até à profundidade de 22,5 m, a partir de onde passam a compactos a muito compactos. Aos 46 m interseta-se uma camada de areia siltosa muito compacta, com 3 m de espessura, a qual é interpretada como solo residual granítico. Subjacentemente, verifica-se a transição para granitos decompostos a muito alterados, que se debitam em solos arenosos muito compactos (com “nega” em todos os ensaios SPT realizados), micáceos, com fragmentos rochosos, de cor cinza anegrada, até aos 56 m de profundidade. A partir deste ponto, dá-se a passagem a maciço rochoso granítico, tratando-se de um granito leucocrata, com passagens quartzíticas, medianamente alterado, que em profundidade transita para xistos luzentes, com passagens argilosas. No horizonte rochoso são visíveis horizontes com fracturação medianamente afastada a próxima, intercalados com passagens onde a rocha apresenta fracturação muito próxima (F5), podendo encontrar-se inteiramente “triturada”. A sondagem terminou aos 69 m de profundidade.

Importa indicar que, comparativamente com a sondagem S5, que foi executada pela Argonvia (2020) no alinhamento teórico da Ponte D. Francisco dos Santos, junto à margem esquerda do Rio Douro, a espessura aluvionar intersetada no alinhamento atualmente em estudo, apesar de significativa, é bastante menor do que a intersetada na referida sondagem (77,5 m), o que poderá sugerir a existência de falhas, com rejeito, ao nível do substrato rochoso. Isto torna-se mais notório na transição da margem para o leito do rio, onde se observa que o maciço rochoso foi intersetado a uma profundidade significativamente menor do que no lado da margem. Não obstante, de acordo com a sondagem S323 - ver nota (*) do Quadro 5, observa-se que as aluviões podem atingir, pelo menos, os 51 m de profundidade (profundidade final da sondagem, a qual terminou em aluviões muito compactos - N_{SPT} de 55 pancadas).

Por fim, tendo por base a análise dos ensaios laboratoriais (realizados nas amostras S5 a S10 - Argonvia, 2020), observa-se que a maioria dos solos ensaiados correspondem a areias, por vezes com componente fina significativa. No que se refere à consistência, os solos mais arenosos são classificados como não plásticos. Já os solos finos, na sua maioria, são bastante plásticos, atingindo limite de liquidez de 73 % e limite de plasticidade de 45 %. Importa indicar que os limites de consistência foram avaliados no estado natural e após secagem, verificando-se que os limites de consistência são bastante inferiores após secagem. Os teores em água são algo elevados, variando entre 18,4 e 54,9 %. No que se refere à sua classificação, observa-se que a generalidade dos solos corresponde a areias siltosas a areias mal graduadas com silte (SM e SP-SM, respetivamente), observando-se alguns horizontes de solos orgânicos (OL e OH).

Por último, refere-se que, ao nível da resistência à compressão uniaxial (RCU) de amostras rochosas (Argonvia, 2020), observa-se uma grande variabilidade nos resultados obtidos. Na zona em descrição, observa-se que a esmagadora maioria das amostras ensaiadas correspondem a migmatitos e os valores obtidos variam entre 6,8 e 79,4 MPa, não sendo aparente qualquer relação entre a profundidade da amostra e a resistência obtida. Refere-se também que apenas foram ensaiados dois provetes graníticos, nos quais obtiveram-se valores de RCU entre 54,5 e 72,0 MPa. Foi ainda efetuado um ensaio RCU num provete de xisto, classificado com grau de alteração W3 e grau de fracturação F3, obtido da sondagem S323.3, no qual foi obtido um valor de σ_{rotura} de 37 MPa e um valor de módulo de deformabilidade de 13,7 GPa, embora devam ser encarados com as devidas reservas os resultados obtidos nesta amostra, já que a figura de rotura obtida no final do ensaio é classificada como não conforme (rotura atravessa o topo do provete).

Zona 3

A terceira zona compreende o segmento que atravessa o leito do Rio Douro, o qual, na presente fase, é caracterizado pelas sondagens SC1, SC2 e SC3, executadas em fase anterior pela Teixeira Duarte (2021), pelas sondagens S323-1R, S323-2R, S324-1R e S324-2R, executadas pelo Adjudicatário durante a fase de concurso e ainda pelas sondagens S11 P68.1, S13 P68.1, S14 P68.1, S19 PRD, S20 PRD e S21 PRD, realizadas na presente fase (sendo as sondagens sublinhadas as mais representativas do alinhamento atualmente em estudo).

De acordo com a informação geotécnica disponível, observa-se, que sob o leito do rio, ocorrem aluviões cuja espessura varia entre 5,9 (S324-1R) e 33,6 m (S11 P68.1), aumentando esta no sentido sul – norte. As aluviões são constituídas, superficialmente, por areias finas que passam a areias finas a médias ligeiramente lodosas, apresentando seixo rolado disperso na sua base. Nas sondagens S323-1R, S323-2R, S324-1R e S324-2R, não foram executados ensaios SPT ao nível das aluviões, pelo que se desconhece o seu grau de compactidade/consistência. Não obstante, a descrição litológica das sondagens S323-1R e S323-2R sugere que, superficialmente, as aluviões, com maior componente lodosa, deverão apresentar-se mais soltas/moles, tornando-se mais compactas/consistentes a partir dos 14 a 15 m de profundidade. No caso das sondagens S324-1R e S324-2R, a descrição litológica não sugere a presença de níveis lodosos moles, embora, na sua envoltória, a espessura aluvionar seja pouco significativa.

No caso das sondagens executadas na presente fase nesta zona (S11 P68.1, S13 P68.1 e S14 P68.1) foram executados ensaios sob as aluviões. No caso da sondagem S11 P68.1, onde se regista a maior espessura aluvionar no rio Douro, verifica-se que as areias lodosas encontram-se soltas a muito soltas ($N_{SPT} < 10$) até ≈ 10 m de profundidade (contada a partir do leito). A restante possança aluvionar apresenta-se medianamente compacta a compacta (N_{SPT} máximo obtido de 39). Nas sondagens S13 e S14 P68.1, onde a cobertura aluvionar é bastante menos significativa, observa-se que os solos areno-lodosos encontram-se soltos a muito soltos em toda a sua possança, excetuando-se na sua base, de natureza mais grosseira, onde foram atingidas “negas” nos ensaios SPT.

Na base das aluviões intersetou-se o granito do Porto, o qual corresponde a um granito leucocrata, de grão fino a médio, micáceo, com passagens pontuais ricas em fenocristais de quartzo e feldspato. O maciço apresenta-se bastante competente, sendo caracterizado, geralmente, por um grau de alteração W3-2 a W2 e um grau de fracturação F2 a F3. As recuperações foram quase sempre de 100 % e o RQD variou entre 20 e 100 %, com predominância de manobras com RQD superior a 80 %.

No caso do par de sondagens S323-1R e S323-2R observa-se, que no horizonte superficial do maciço, intersetaram-se passagens onde o maciço rochoso encontra-se mais fraturado e apresenta sinais de alteração mais evidentes (em particular na sondagem S323-1R, entre os 35 e os 37,5 m). Na sondagem S11 P68.1, executada bastante próxima da sondagem S323-1R, o maciço apresenta algumas passagens onde o grau de alteração aparenta ser superior ao do par de sondagens descrito (nomeadamente entre os 38 e os 38,55 m).

Já no par de sondagem S324-1R e S324-2R, representativas do lado norte da Torre T2, observa-se um contraste mais significativo na qualidade do maciço entre as duas sondagens, apresentando-se este são em toda a profundidade da sondagem S324-1R ($RQD > 90$ %), enquanto na sondagem S324-2R são evidentes os sinais de alteração no maciço rochoso até aos 15,6 m de profundidade (grau de alteração W4 a W3 e com passagens com grau de fracturação F4-3 a F4-5). No par de sondagens S13 e S14 P68.1, representativas do lado sul da mesma torre, observa-se também algum contraste na competência do maciço rochoso, encontrando-se este menos fraturado na sondagem

S13 P68.1 do que na sondagem S14 P68.1, sugerindo que, do lado nascente do maciço de fundação, os granitos apresentam uma capa superficial ligeiramente menos competente.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial (RCU) em amostras rochosas representativas dos granitos sob as aluviões do leito do Rio Douro, tendo-se obtido os seguintes resultados (Quadro 7).

Quadro 7 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios RCU realizados nas sondagens S323-1R, S323-2R, S324-1R e S324-2R

Sondagem	Litologia	W	F	RQD	Amostra	Profundidade (m)	σ_{rotura} (MPa)	E (GPa)
S323-1	Granito	W2	F2	92	A1481.24	37,8 – 38,1	37,7	7,7
S323-2	Granito	W2	F2-1	100	A1482.24	35,1 – 35,4	94,2	22,3
S323-2	Granito	W2	F3-2	79	A1483.24	38,7 – 39,0	91,8	30,8
S324-1	Granito	W2	F2	97	A1536.24	10,0 - 10,2	122,6	50,5
S324-2	Granito	W3	F4-3	83	A1537.24	7,85 – 8,10	51,9	5,8
S324-2	Granito	W3	F4-3	43	A1538.24	10,25 – 10,50	40,7	5,5
S324-2	Granito	W4-3	F4-3	47	A1539.24	12,0 – 12,30	27,0	4,4
S324-2	Granito	W3	F3-2	62	A1540.24	14,0 – 14,50	57,7	11,3
S324-2	Granito	W2	F3	63	A1541.24	15,6 – 16,2	112,2	34,6

Os resultados obtidos revelam que o maciço rochoso apresenta uma considerável gama de resistência à compressão, variando esta entre os 27,0 e os 122,6 MPa. Os valores obtidos são independentes da profundidade de colheita de amostra, aparentando a variabilidade constatada estar mais relacionada com o grau de alteração e de fracturação do maciço rochoso. Com efeito, os valores mais reduzidos de tensão de rotura (σ_{rotura}) estão associados a horizontes onde o maciço é caracterizado por grau de alteração W3 a W4-3 e grau de fracturação F4-3 (embora se verifique uma exceção a esta regra, na sondagem S323-1R, em que, na amostra representativa da profundidade de 37,8 a 38,1 m, onde o maciço é caracterizado por W2 e F2, o valor de σ_{rotura} obtido foi de apenas 37,7 MPa). Os módulos de elasticidade obtidos (E) acompanham a tendência dos valores de RCU, tendo-se obtido uma gama de valores compreendidos entre 4,4 e 50,5 GPa.

Os resultados obtidos (representados de forma gráfica na Figura 7) evidenciam que o maciço granítico possui uma boa capacidade portante.

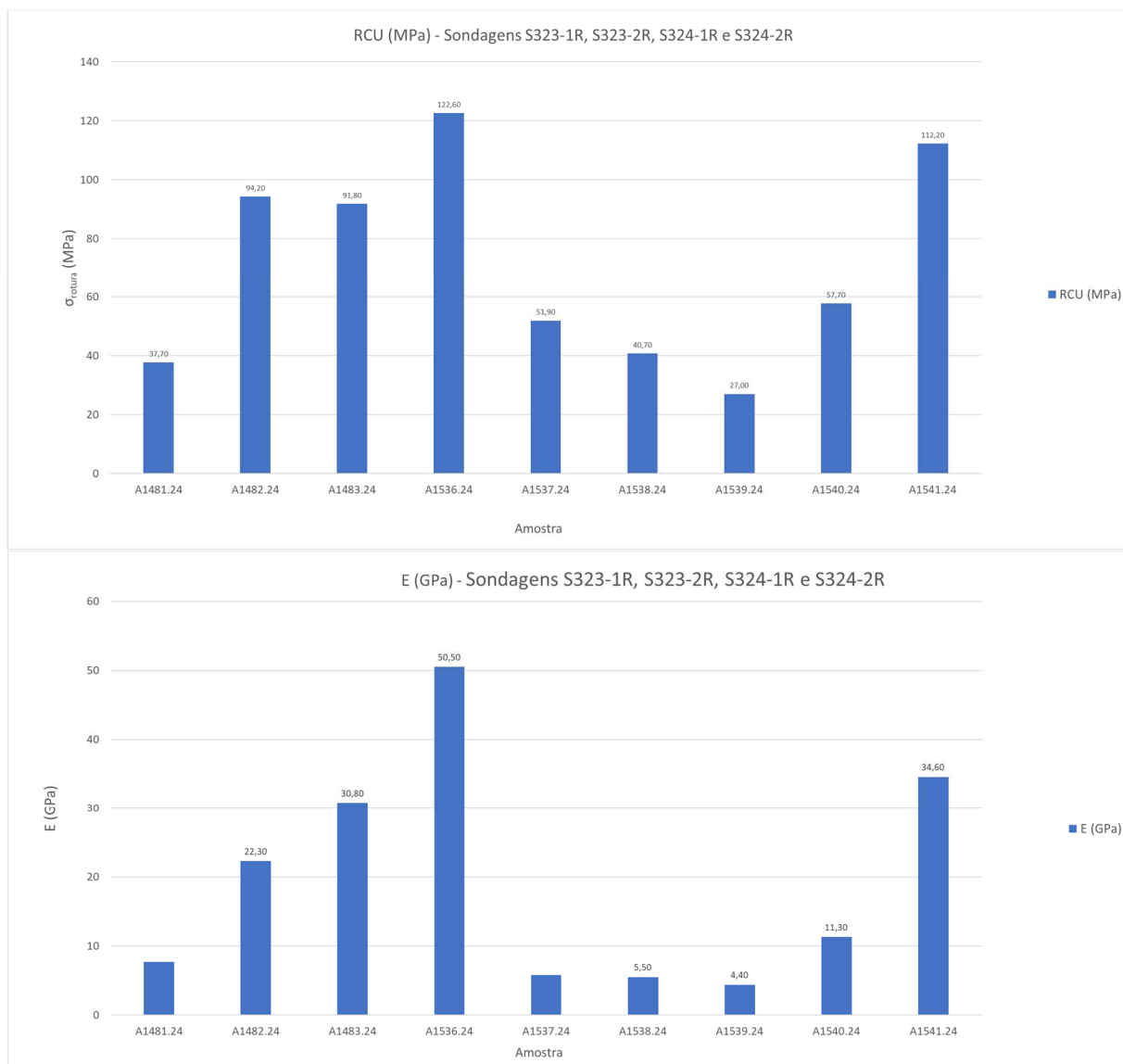


Figura 7 – Representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios RCU em amostras obtidas das sondagens S323-1R, S323-2R, S324-1R e S324-2R

Importa ainda descrever os resultados obtidos nos ensaios Lugeon realizados nas sondagens S11 P68.1, S13 P68.1 e S14 P68.1. Os ensaios foram efetuados em troços de 3,0 m, com obturador simples, no fundo do furo de sondagem. Os ensaios foram realizados às seguintes profundidades:

- S11 P68.1: 39,0 – 41,7 m (*)
- S13 P68.1: 14,4 – 17,4 m (*)
- S14 P68.1: 18,8 – 21,8 m (*)

(*) – As profundidades referidas incluem a coluna de água.

Os ensaios foram preconizados com 5 patamares de pressão, distribuídos do seguinte modo:

- S11 P68.1:
 - Patamar 1: Pressão mínima – 350 kPa;

- Patamar 2: Pressão intermédia – 600 kPa;
- Patamar 3: Pressão máxima – 850 kPa;
- Patamar 4: Pressão intermédia – 600 kPa;
- Patamar 5: Pressão mínima – 350 kPa.
- S13 P68.1:
 - Patamar 1: Pressão mínima – 200 kPa;
 - Patamar 2: Pressão intermédia – 350 kPa;
 - Patamar 3: Pressão máxima – 500 kPa;
 - Patamar 4: Pressão intermédia – 350 kPa;
 - Patamar 5: Pressão mínima – 200 kPa.
- S14 P68.1:
 - Patamar 1: Pressão mínima – 350 kPa;
 - Patamar 2: Pressão intermédia – 400 kPa (*);
 - Patamar 3: Pressão mínima – 350 kPa.

(*) – Não foi possível atingir a pressão intermédia de 600 kPa.

Os resultados obtidos nos ensaios supra listados encontram-se sintetizados no Quadro 8.

Quadro 8 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios Lugeon executados nas sondagens realizadas no leito do Rio Douro

Sondagem	Profundidade	Permeabilidade (U.L.)	Regime de escoamento
S11 P68.1	39,0 – 41,7 m	5,5	Dilatação
S13 P68.1	14,4 – 17,4 m	0,9	Colmatção
S14 P68.1	18,8 – 21,8 m	33,0	Lavagem / Vazão total

Da análise dos resultados, observa-se que o maciço apresenta permeabilidade muito baixa (S13 P68.1) a baixa/moderada (S11 P68.1), encontrando-se estes resultados coerentes com as características do maciço rochoso (Grau de alteração e de fracturação de W2 e F2, respetivamente, na sondagem S13 P68.1, e W3-2 e F3 na sondagem S11 P68.1). No caso do ensaio Lugeon realizado na sondagem S14 P68.1, observa-se que os resultados obtidos possuem pouco significado, dado que a pressão de injeção aparenta ter sido excessiva, levando a um regime de lavagem / vazão total.

Zona 4

A última zona compreende os terrenos que se desenvolvem a partir da margem direita do Rio Douro, o que inclui a via marginal (Av. Paiva Couceiro), assim como a encosta que se desenvolve para norte.

Nesta zona, conforme já referido, existem constrangimentos de ocupação superficial que irão afetar a posição dos pilares, como é o caso da Av. Paiva Couceiro, na marginal do Rio Douro, o Viaduto da Campanhã existente e ainda algumas infraestruturas ferroviárias (que se encontram atualmente desativadas).

As sondagens que serviram de base para a caracterização deste troço foram as seguintes:

- Argonvia (2020): Sondagens S2 e S4;
- Geoprolífero (2022): Sondagens S1 e S2;
- Geocontrolo (2023): Sondagem S078A-23;
- Prospeção executada pelo Adjudicatário em fase de concurso (2024): S324;
- Prospeção executada durante o Projeto de Execução (2025 – 2026): S20 P68.1, S21 P68.1 e S23 P68.1.

As sondagens S2 e S4 são representativas da zona marginal, as quais revelaram que, superficialmente, os terrenos são constituídos por aterros de natureza heterogénea, areno-argilosos, contendo blocos de granito e entulhos, possuindo espessura entre 4,7 e 7,2 m (S4 e S2, respetivamente). Ao nível da compacidade, estes depósitos apresentam comportamento extremamente heterogéneo, apresentando N_{SPT} entre 1 e 60 pancadas (embora predominem os valores mais reduzidos).

Sob os aterros acima mencionados, ocorrem depósitos aluvionares de natureza areno-siltosa. Estes depósitos possuem maior expressão na sondagem S4 (mais próxima do rio), onde foram detetados até aos 15,3 m de profundidade. Nesta sondagem, detetou-se a presença de seixos rolados nos níveis inferiores das aluviões. Em termos de compacidade, trata-se de solos muito soltos a compactos (N_{SPT} de 1 a 39 pancadas), embora com predomínio de solos muito soltos a soltos.

Sob os solos aluvionares intersetaram-se solos residuais graníticos e maciço granítico decomposto a muito alterado até profundidades compreendidas entre os 22,6 m e os 26 m de profundidade (S4 e S2, respetivamente). Os solos residuais apresentam natureza areno-siltosa e granulometria fina a média, enquanto o maciço rochoso apresenta grão médio a grosseiro. A nível de compacidade, estes materiais apresentam-se compactos a muito compactos (predominando os segundos face aos primeiros). Refere-se que no seio do maciço decomposto intersetaram-se passagens menos alteradas.

O maciço rochoso competente foi intersetado entre os 22,6 m e os 26 m de profundidade (S4 e S2, respetivamente), o qual corresponde a um granito muito a medianamente alterado de grão médio a grosseiro. O maciço apresenta-se, predominantemente medianamente alterado, ocorrendo algumas passagens onde o maciço ocorre muito alterado a decomposto. Ao nível da fracturação, observa-se que o maciço apresenta, de modo geral, fracturação medianamente espaçada a próxima ou próxima a muito próxima (F3-4 a F4-5).

Para montante da zona marginal, consideram-se os resultados obtidos nas sondagens S1 e S2 (Geoprolífero, 2022), onde se intersetou uma cobertura de aterro constituída por solos saibrentos contendo terra vegetal, blocos e entulhos diversos, cuja compacidade é bastante variável (N_{SPT} de 5 a 32 pancadas), cuja espessura variou entre 1,75 e 4,1 m (S1 e S2, respetivamente). Subjacentemente, intersetou-se um fino horizonte de granito decomposto, que se debita na forma de um solo areno-argiloso, de grão médio, de cor acastanhada e com oxidação disseminada. A transição para o maciço rochoso compacto dá-se entre os 3 e os 4,5 m de profundidade (S1 e S2, respetivamente), o qual toma a forma de um granito de grão médio, leucocrata, de duas micas, cujo grau de alteração encontra-se compreendido, geralmente, entre W4 e W3. No que se refere ao grau de fracturação, observa-se que as fraturas se apresentam, geralmente, próximas a medianamente afastadas (F4 a F3), tendo-se obtido valores de RQD entre 60 e 75 %. Importa indicar que estas

sondagens atingiram profundidades muito reduzidas (6 m, na sondagem S1 e 8,1 m, na sondagem S2).

A cotas mais altas, na plataforma de um caminho existente, executou-se a sondagem S324 (sondagem realizada pelo Adjudicatário durante a fase de concurso), na qual intersetou-se uma cobertura de aterro com 4,50 m de espessura, constituído por areias siltosas com cascalho e blocos graníticos e raízes no topo. Subjacentemente, intersetaram-se, até aos 12 m de profundidade, solos residuais graníticos, na forma de areias siltosas, micáceas e algo caulinizadas. A partir dos 12 m, dá-se uma transição de solos residuais para maciço granítico, de grão médio a grosseiro, decomposto e, a partir dos 13,5 m, maciço granítico muito alterado e intensamente fraturado, apresentando a rocha aspeto bastante friável.

Na presente fase de estudos, na aproximação ao Viaduto da Campanhã (existente), e aproveitando os caminhos existentes na sua envolvente, realizaram-se as sondagens S20 P68.1, S21 P68.1 e S23 P68.1. A primeira destas sondagens foi executada imediatamente a SE da futura localização do pilar PF9, sobre um caminho existente, tendo-se intersetado uma cobertura de aterro com 2 m de possança (areias, cascalho e blocos de granito), seguindo-se o Granito do Porto, o qual ocorre na forma de um solo residual medianamente compacto até aos 4,5 m de profundidade ($N_{SPT} = 25$) e maciço decomposto até aos 6 m ($N_{SPT} = 60$), a partir de onde ocorre a transição para maciço rochoso, geralmente com grau de alteração W4-3 e grau de fracturação de F5 a F3, até aos 15 m de profundidade. Dos 15 aos 24 m o maciço torna-se bastante friável, adquirindo um aspeto próximo de terroso, sendo descrito como W4. A partir dos 24 m volta-se a observar maciço rochoso, sendo competente abaixo dos 25,5 m (grau de alteração W3-2 e grau de fracturação F3).

A sondagem S21 P68.1, executada na futura localização do pilar PF10, num caminho existente situado a uma cota altimétrica 18 m superior à do caminho anterior, intersetou aterros numa possança de 3,5 m, abaixo do qual foi intersetado maciço rochoso franco (granito de grão médio, leucocrata, micáceo, biotítico com ocasionais fenocristais), com grau de alteração W3-2 e grau de fracturação F4 a F2. No entanto, observa-se que em profundidade o maciço perde qualidade, sendo caracterizado por grau de alteração W3-4 e grau de fracturação F4-5 entre os 16,5 e os 19,5 m de profundidade, a partir de onde dá-se a passagem a maciço decomposto, correspondente a um solo areno-siltoso muito compacto (“negas” consecutivas, de 1ª fase, em ensaios SPT) até ao término da sondagem (30 m).

A sondagem S23 P68.1, executada na localização prevista para a estrutura de transição entre a Ponte do Douro e o futuro Viaduto da Campanhã, sobre o mesmo caminho indicado no parágrafo anterior, revela, sob uma cobertura de aterro com 4 m de espessura, solos residuais e maciço decomposto de origem granítica em toda a profundidade da sondagem (39 m). O horizonte de solos residuais foi reconhecido até 13,5 m de profundidade, encontrando-se medianamente compacto (N_{SPT} compreendido entre 22 e 39). Por sua vez, o maciço decomposto é caracterizado por “negas” consecutivas em ensaios SPT, tornando-se “negas” de 1ª fase a partir da profundidade de 31 m. No final da furação, mediu-se um nível de água à profundidade de 17,3 m.

Por último, menciona-se a sondagem S078A-23, realizada pela Geocontrolo no âmbito da atualização do Estudo Prévio da Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa (Lote A), executada sobre o mesmo caminho indicado nos dois parágrafos anteriores, estando esta sondagem situada entre as sondagens S21 e S23 P68.1, embora mais próxima da primeira. Na referida sondagem detetou-se uma cobertura de aterro, de natureza areno-siltosa com importante componente pedregosa, caracterizada por N_{SPT} de 3 pancadas. Subjacentemente, detetou-se uma possança significativa de solos residuais graníticos, de natureza areno-siltosa, grão fino a médio (que passa, em profundidade, a grão médio a grosseiro), cuja compacidade aumenta gradualmente com o incremento da profundidade (N_{SPT} de

10 a 60 pancadas) até à transição para maciço rochoso (que ocorre, em contínuo, aos 24 m). No seio do maciço residual, entre os 16,50 e os 19,50 m detetou-se uma passagem de granito muito a medianamente alterado e com fracturação próxima a medianamente afastada, a qual corresponde a um horizonte menos alterado no seio dos solos residuais. O maciço rochoso detetado a partir dos 24 m (e até aos 30 m de profundidade) corresponde a um granito de grão médio a grosseiro, com fracturação próxima a medianamente afastada e RQD de 27 a 45 %.

Ao contrário do que sucede sob o leito do Rio Douro, os granitos ocorrentes na encosta do lado do Porto são caracterizados por bruscas variações laterais e verticais, transitando de modo muito irregular de um solo residual para um maciço rochoso franco, sendo este o cenário que é captado por esta sondagem.

Tendo por base o cenário geológico e geotécnico descrito para as 4 zonas analisadas, procedeu-se ao zonamento geotécnico dos terrenos interessados pela futura Ponte sobre o Rio Douro, o qual é apresentado no capítulo seguinte.

Importa efetuar uma referência aos resultados obtidos nos ensaios Lugeon, realizados nas sondagens S20 P68.1 e S21 P68.1 (3 ensaios por sondagem). Os ensaios foram efetuados em troços de 1,5 m a 2,0 m, com obturador simples, no fundo do furo de sondagem. Os ensaios foram realizados às seguintes profundidades:

- S20 P68.1:
 - 9,0 m – 10,5 m;
 - 10,5 m – 12,0m;
 - 12,0 m – 13,5 m.
- S21 P68.1:
 - 5,5 m – 7,5 m;
 - 7,5 m – 9,5 m;
 - 9,5 m – 11,5 m.

Os ensaios foram preconizados com 5 patamares de pressão, distribuídos do seguinte modo:

- Patamar 1: Pressão mínima – 200 kPa;
- Patamar 2: Pressão intermédia – 350 kPa;
- Patamar 3: Pressão máxima – 500 kPa;
- Patamar 4: Pressão intermédia – 350 kPa;
- Patamar 5: Pressão mínima – 200 kPa.

Em todos os ensaios foi obtido um resultado apenas parcial, já que não foi possível estabilizar as pressões de injeção em todos os patamares. Com efeito, em 4 dos 6 ensaios especificados, não foi possível, sequer, estabilizar a pressão do primeiro patamar de ensaio (200 kPa), enquanto nos restantes dois não foi possível estabilizar o segundo patamar. Tal situação insere-se no cenário tipo designado de “Lavagem”/Vazão total”, o qual ocorre tipicamente quando a pressão injeção promove a lavagem do preenchimento das diaclases do maciço rochoso. Com efeito, ao cotejar os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade com a caracterização macroscópica dos materiais atravessados em sondagem, observa-se que, nas duas sondagens interessadas, a permeabilidade

medida é independente das características do maciço (i.e., em termos de grau de alteração e de grau de fracturação).

Referem-se ainda os resultados obtidos no ensaio pressiométrico executado na sondagem S23 P68.1 (9,0 – 10,0 m), o qual é representativo do maciço residual presente na fundação da estrutura de transição. Neste ensaio foi obtido um módulo pressiométrico (E_M) de 26,88 MPa, uma pressão limite (P_L) de 22,15 bar ($\approx 2,22$ MPa) e uma pressão de fluência corrigida (P_{Fcorr}) de 11,18 bar ($\approx 1,12$ MPa).

3.5 ZONAMENTO GEOTÉCNICO

Tendo por base o cenário geológico-geotécnico descrito no subcapítulo 3.4.2, procedeu-se à elaboração do zonamento geotécnico dos terrenos interessados. Para o efeito, tomou-se, como ponto de partida, o zonamento geotécnico elaborado pela Argonvia no Relatório Geológico-Geotécnico intitulado “Elaboração de Campanha de Prospeção Geotécnica Preliminar para a Conceção da Ponte D. António Francisco dos Santos e Acessos” (2020).

No trabalho supracitado, consideraram-se as seguintes zonas geotécnicas:

At	Aterros
S ₃	Sedimentos silto-argilosos, com níveis lodosos e areias argilo-siltosas
S ₂	Sedimentos arenosos de compactidade média a elevada ($17 < N_{SPT} < 40$)
S ₁	Sedimentos arenosos muito compactos ($N_{SPT} > 40$)
Y ₃	Solo residual, granito e migmatito decomposto a muito alterado, com passagens menos alteradas – $UCS < 15$ MPa
Y ₂	Granito e migmatito muito a medianamente alterado, com passagens menos alteradas – $15 \text{ MPa} < UCS < 40 \text{ MPa}$, $I_{s50} > 1 \text{ MPa}$
Y ₁	Granito e migmatito medianamente a pouco alterado, com passagens mais alteradas – $UCS > 40 \text{ MPa}$

Figura 8 – Zonamento Geotécnico considerado proposto no Relatório Geológico Geotécnico elaborado pela Argonvia (2020)

Na presente fase, tendo como referência a análise de todos os dados de prospeção disponíveis, consideraram-se todas as zonas geotécnicas propostas pela Argonvia (Figura 8), verificando-se as diferenças ao nível da zona geotécnica Y3. No referido trabalho, esta zona engloba solos residuais de natureza granítica e migmatítica assim como rocha decomposta a muito alterada, por vezes com passagens menos alteradas, sendo caracterizado, em geral, por $RCU < 15$ MPa. Após reflexão, considerou-se adequado estabelecer novas zonas geotécnicas de modo a separar os solos residuais do maciço residual a muito alterado. Deste modo, propõe-se o seguinte zonamento geotécnico:

At - Aterro constituído por areias siltosas a argilosas, acastanhadas, contendo blocos e cascalhos de origem granítica, assim como entulhos. Os níveis superiores podem conter RCD e raízes. $2 < N/SPT < 56$ (geralmente $N/SPT < 10$).

S3 - Sedimentos silto-argilosos, com níveis lodosos e areias argilo-siltosas ($N/SPT \leq 17$)

S2 - Sedimentos arenosos de compacidade média a elevada ($17 < N/SPT < 40$)

S1 - Sedimentos arenosos muito compactos ($N/SPT \geq 40$)

Y6 - Solo residual granítico, areno-siltoso, com grão fino a médio, feldspático, micáceo e caulinizado, medianamente compacto. $10 < N/SPT < 30$.

Y5 - Solo residual de natureza granítica, areno-siltoso, com grão fino a médio, feldspático, micáceo e/ou caulinizado, compacto. $30 < N/SPT < 50$.

Y4 – Solo residual, de natureza granítica a migmatítica (mais raramente, xistenta), areno-siltoso, com grão fino a médio, por vezes feldspático, micáceo e/ou caulinizado, muito compacto. $N/SPT \geq 50$.

Y3 - Granitos, migmatitos e xistos luzentes, geralmente muito alterados e, por vezes, com passagens menos alteradas, com $UCS < 15$ MPa

Y2 - Granitos e migmatitos, muito a medianamente alterados, por vezes com passagens menos alteradas, com $15 \text{ MPa} < UCS < 40 \text{ MPa}$ e $Is_{50} > 1 \text{ MPa}$

Y1 - Granitos e migmatitos, medianamente a pouco alterados, com algumas passagens mais alteradas, com $UCS > 40 \text{ MPa}$

Tal como exposto no zonamento apresentado, optou-se por subdividir os solos residuais graníticos em função da sua compacidade (dado que se tratam de solos areno-siltosos), o que leva a que o horizonte geotécnico Y3, conforme definido no Relatório Geológico Geotécnico da Argonvia (2020), tenha sido subdividido em 4 horizontes geotécnicos, dos quais 3 visam representar solos residuais (Y6 a Y4), enquanto o “novo” Y3 considera maciço rochoso menos competente ($RCU < 15 \text{ MPa}$), mas que ainda assim é, claramente, maciço rochoso.

Importa ainda referir que, tendo em consideração as zonas geotécnicas definidas, admite-se que, dependendo da carga de cada apoio, estima-se que poderão ser consideradas fundações diretas sempre que ocorra Y4 ou Y3 de modo aflorante a sub-aflorante. Para este fim, procurou-se estimar, empiricamente, as tensões admissíveis que poderão ser consideradas no cálculo das fundações da futura Ponte sobre o Rio Douro.

No caso da zona geotécnica Y4, considerou-se o exposto no Quadro 9, que compreende uma estimativa empírica em função do tipo de solo ocorrente, sendo este adaptado da tabela 1 do normativo BS 8004:1986. Tendo em consideração os materiais englobados na zona geotécnica Y4, considera-se que, na sua generalidade, deverão ser equivalentes a cascalhos ou areias cascalhentas compactas. Na presente fase, considera-se prudente, para esta zona geotécnica, assumir um valor não superior a 500 kPa.

Por outro lado, no caso da zona geotécnica Y3, considerou-se a classificação patente no Quadro 10 e o ábaco apresentado na Figura 9, que compreende uma estimativa empírica da tensão admissível em função do tipo de rocha, espaçamento entre descontinuidades e a resistência à compressão uniaxial da rocha intata, sendo este método baseado no Anexo G do normativo NP EN 1997-1: 2010 – Eurocódigo 7 / Parte 1. Tendo em consideração os tipos de rocha intersetados nas sondagens realizadas, considera-se que estas inserem-se nas categorias (Quadro 10) “Rochas Ígneas” (granitos – Grupo 1), “Rochas metamórficas, incluindo ardósias e xistos (clivagem e foliação horizontais)” (migmatitos com foliação/xistosidade sub-horizontal – Grupo 2) e “Ardósias e Xistos (clivagem e foliação inclinadas)” (migmatitos com foliação/xistosidade inclinada – Grupo 3). Dos vários tipos de

rocha indicados, considera-se como o mais condicionante o grupo 3 (Figura 9), para o qual considera-se um valor de RCU médio de 10 MPa e um grau de fracturação de F4 a F5. A posição correspondente às condições descritas está assinalada com um círculo vermelho na Figura 9. Nesta fase, com o objetivo de efetuar um pré-dimensionamento e efetuar cálculos preliminares das fundações da estrutura, considera-se prudente não assumir um valor superior a 1 MPa (Figura 9).

Por último, para a zona geotécnica Y1, seguiu-se o mesmo procedimento descrito no parágrafo anterior. Esta zona geotécnica é constituída por granitos francamente competentes, tendo maior exposição no leito do Rio Douro (zona 3), inserindo-se estes no Grupo 2 (Quadro 10). Para efeitos de estimativa de tensão admissível nesta formação, considerou-se, de modo conservador, um valor de RCU (da rocha intata) de 40 MPa e um espaçamento médio entre fraturas de 200 mm. A posição correspondente às condições descritas está assinalada com um círculo vermelho na Figura 10, as quais se traduzem numa tensão admissível estimada de 10 MPa.

Quadro 9 – Tensão admissível estimada para solos arenosos em função da sua compacidade (baseado na BS 8004 – 1986)

Categoria	Tipos de solo	Tensão admissível estimada (kPa)
Solos não coesivos	Cascalho compacto ou areias cascalhentas compactas	> 600
	Cascalho ou areia cascalhenta medianamente compacta	< 200 a 600
	Cascalho solto ou areia cascalhenta solta	< 200
	Areia compacta	> 300
	Areia medianamente compacta	100 a 300
	Areia solta	< 100

- Linhas a **negrito** representam as situações aplicáveis.

- Linha a **negrito e a verde** representa a situação considerada mais provável

Quadro 10 – Agrupamento de rochas brandas e fraturadas (extraído do Anexo G da NP EN 1997-1: 2010)

Grupo	Tipo de rocha
1	Calcários e dolomias puros Arenitos calcários de baixa porosidade
2	Rochas ígneas Calcários oolíticos e calcários margosos Arenitos bem cimentados Siltitos argilosos calcários endurecidos Rochas metamórficas, incluindo ardósias e xistos (clivagem e foliação horizontais)
3	Calcários muito margosos Arenitos fracamente cimentados Ardósias e xistos (clivagem e foliação inclinadas)
4	Siltitos argilosos não cimentados e argilitos xistosos

- Linhas a **negrito** representam as situações aplicáveis.

- Linha a **negrito e a verde** representa a situação considerada mais provável ou mais condicionante.

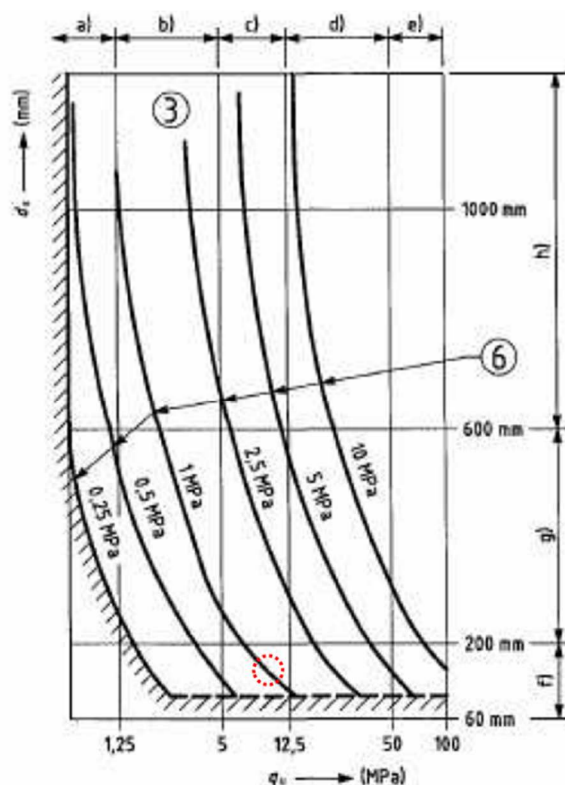


Figura 9 – Estimativa empírica da tensão admissível em Y3, considerando um maciço rochoso do tipo 3 (ver Quadro 10). Capacidade resistente presumida do terreno de fundações superficiais quadradas em rocha (Extraído do Anexo G da NP EN 1997-1: 2010)

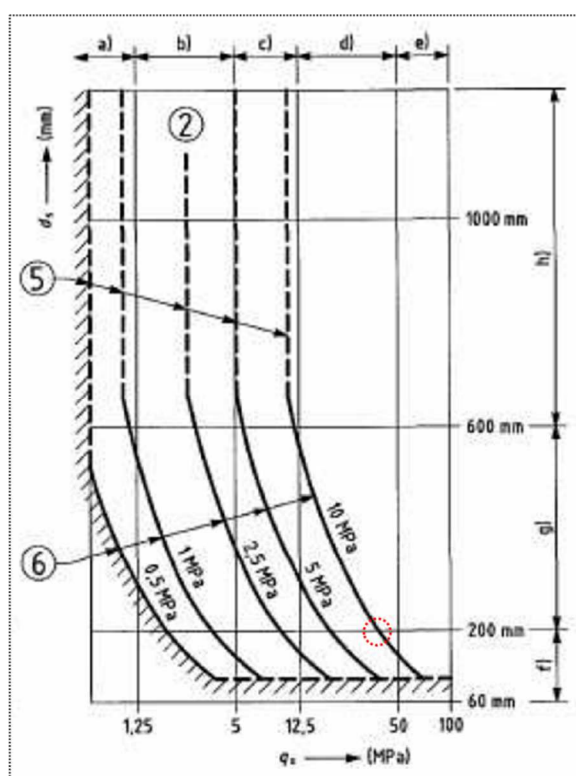


Figura 10 – Estimativa empírica da tensão admissível em Y1, considerando um maciço rochoso do tipo 2 (ver Quadro 10). Capacidade resistente presumida do terreno de fundações superficiais quadradas em rocha (Extraído do Anexo G da NP EN 1997-1: 2010)

3.6 CONDIÇÕES DE FUNDAÇÃO E ASPETOS CONSTRUTIVOS

Tomando em consideração toda a análise geológica-geotécnica exposta nos capítulos anteriores, apresenta-se, no presente subcapítulo, as condições de fundação estimadas na presente fase, por cada zona do alinhamento em estudo (conforme descritas em 3.4.2).

Zona 1 - Neste trecho aparentam existir condições para executar fundações diretas, devendo-se garantir que as sapatas fundam em materiais Y4 ou superiores.

Zona 2 – Neste trecho prevê-se a execução de fundações indiretas, cuja profundidade deverá aumentar, progressivamente, no sentido da margem do rio Douro. É expectável que as estacas atravessem grandes possanças aluvionares, essencialmente arenosas, de compacidade crescente em profundidade, seguindo-se um maciço migmatítico a xistento, muito alterado a decomposto (essencialmente Y4 a Y3). Nesta zona é prudente executar o revestimento das estacas com tubo metálico em toda a espessura das aluviões, de forma a prevenir fenómenos de lavagem do betão. Ao nível dos potenciais horizontes de fundação, o maciço apresenta-se muito fraturado, sendo provável a necessidade de injeções na ponta das estacas.

Zona 3 – Neste trecho, que atravessa o leito do Rio Douro, considera-se, com exceção do apoio 6, a execução de fundações indiretas. As estacas deverão ficar encastradas no maciço rochoso a profundidade mínima equivalente a 1,5 diâmetros, e possuir revestimento metálico ao longo de toda a possança aluvionar. Atendendo ao diâmetro das estacas e à qualidade do maciço rochoso, antecipam-se dificuldades na furação da rocha para o seu encastramento. Ao nível da ponta das estacas, de acordo com os resultados obtidos, apenas se prevê o recurso a injeções de modo pontual, com o fim de garantir uma adequada ligação entre o maciço de fundação e a ponta das estacas. No apoio 6 aparentam existir condições para executar fundação direta, devendo-se garantir que a sapata funda em materiais Y2 ou superiores.

Zona 4 – Na presente fase de estudos, consideram-se, para este trecho, fundações indiretas nos apoios PF7, PF8, PF9 e ainda na Estrutura de Transição. Já no apoio PF10 encontra-se prevista fundação direta com endentamento no terreno, sendo isto consequência da forte irregularidade transversal do terreno em perfil transversal. Além da orografia, é também relevante que, no trecho final da estrutura, o espaço de trabalho torna-se exíguo, levando a que as escavações para execução das fundações destes apoios venham a requerer contenções provisórias e / ou medidas de estabilização adicionais.

4 SOLUÇÃO ESTRUTURAL

4.1 CONCEÇÃO GERAL

No processo de conceção da nova Ponte rodoferroviária sobre o Rio Douro foi imperativo o desígnio de conceber uma solução estrutural com um conceito forte e emblemático, mas que, na medida do possível, respeitasse ao máximo a presença muito próxima da Ponte de São João, assim como de toda a paisagem envolvente em ambas as margens.

Para tal, procurou-se conceber uma solução visualmente o mais permeável possível, para o que se percebeu como determinante a minimização dos obstáculos visuais entre os 2 tabuleiros da nova Ponte, o superior ferroviário e o inferior rodoviário, pedonal e ciclável.

Neste aspeto particular, quaisquer soluções com um vão principal em arco seriam indesejáveis pelo evidente “efeito de barreira” que criariam, sobretudo para quem circula nas vias marginais do Douro – a Av. Gustavo Eiffel, do lado do Porto, e o Passadiço de Quebrantões, do lado de Vila Nova de Gaia. Este efeito é claramente perceptível nas simulações apresentadas nos estudos prévios anteriormente desenvolvidos. Por outro lado, sabendo-se que a zona prevista para o atravessamento tem um enquadramento geológico-geotécnico muito desfavorável, em especial na margem do lado de Gaia, é muito pouco avisada a adoção de soluções em arco, por não ser possível de forma adequada a absorção das forças horizontais afluentes às nascenças do arco diretamente às suas fundações, implicando a sua transferência para o tabuleiro inferior com as consequentes desvantagens, quer a curto quer a longo prazo, sobretudo quando temos um tabuleiro superior ferroviário que recebe sobrecargas muito significativas.

Também o facto de já existirem, na ligação entre as cidades do Porto e Gaia, 4 pontes com tipologia em arco, nomeadamente a Ponte Maria Pia, a Ponte Luiz I, a Ponte da Arrábida e a Ponte do Infante, que têm uma identidade muito marcante e emblemática, para esta Ponte com tantos condicionamentos a respeitar seria quase impossível conceber uma solução em arco que respeitasse o legado dessas pontes em arco sobre o Rio Douro. Resultou, portanto, a opção por uma ponte em pórtico, na linha das outras 2 pontes que lhe farão vizinhança – a Ponte de São João e a Ponte do Freixo.

A imposição de prever pelo menos 1 vão de grande dimensão para atravessamento do leito principal do Rio Douro trazia consigo o desafio de suspender um tabuleiro inferior que tinha obrigatoriamente de ter uma altura reduzida, à luz das cotas exigidas para a cheia centenária. Isso conduziu ao aproveitamento dos apoios do tabuleiro superior para acomodar a instalação de cabos de atirantamento do tabuleiro inferior. Apesar de os feixes de tirantes tradicionais serem elementos pouco visíveis e que facilmente se confundem com a paisagem circundante procurou-se privilegiar ainda mais a permeabilidade visual para a envolvente e para a Ponte de São João, minimizando o seu número e aumentando o seu afastamento, para o que se previu a adoção de um tabuleiro inferior em estrutura metálica por ser mais leve e facilitar a sua construção.

Para o tabuleiro ferroviário superior optou-se por uma solução estruturalmente idêntica à da Ponte de São João, ou seja, uma solução em pórtico com tabuleiro em viga-caixão em betão armado e pré-esforçado.

Assim, previu-se a adoção de 2 torres principais que moldam os 3 vãos centrais de grandes dimensões (1 central de 200 metros e 2 laterais de 170 metros), reduzindo-se as dimensões dos vãos apenas nas extremidades laterais do vale, quando as alturas ao solo vão reduzindo também.

Para o tabuleiro rodoviário inferior, dado que na zona inicial da travessia não haveria necessidade de continuar com uma estrutura dimensionada para grandes vãos optou-se por uma solução de tabuleiro com recurso a vigas-caixão pré-fabricadas.

Na definição da geometria da solução adotada, à parte das considerações de natureza estrutural, houve particular cuidado com o seu aspeto estético já que a mesma ficará inserida num eixo viário fundamental e de grande visibilidade, e com muita proximidade às Pontes de São João e Maria Pia, existentes a jusante do alinhamento previsto para a Ponte sobre o Rio Douro. Na figura seguinte é possível observar o enquadramento previsto para a futura ponte.



Figura 11 – Enquadramento da nova Ponte sobre o Rio Douro

A solução adotada para a ponte tem vãos compatíveis com os processos construtivos adotados e com a geometria e altimetrias do atravessamento, resultando nas seguintes distribuições de vãos:

Tabuleiro Ferroviário Superior: $40,5 + 4 \times 60 + 170 + 200 + 170 + 70,5 + 58 + 51 + 40,7 = 1.127,7 \text{ m}$;

Tabuleiro Rodoviário Inferior: $22 + 8 \times 27,5 + 100 + 200 + 100 + 48 = 690 \text{ m}$.

Na figura seguinte apresenta-se o alçado da solução adotada para a ponte.

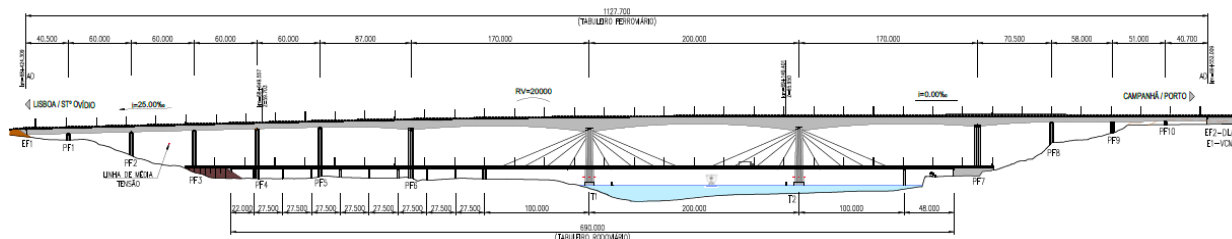


Figura 12 – Alçado da Ponte sobre o Rio Douro

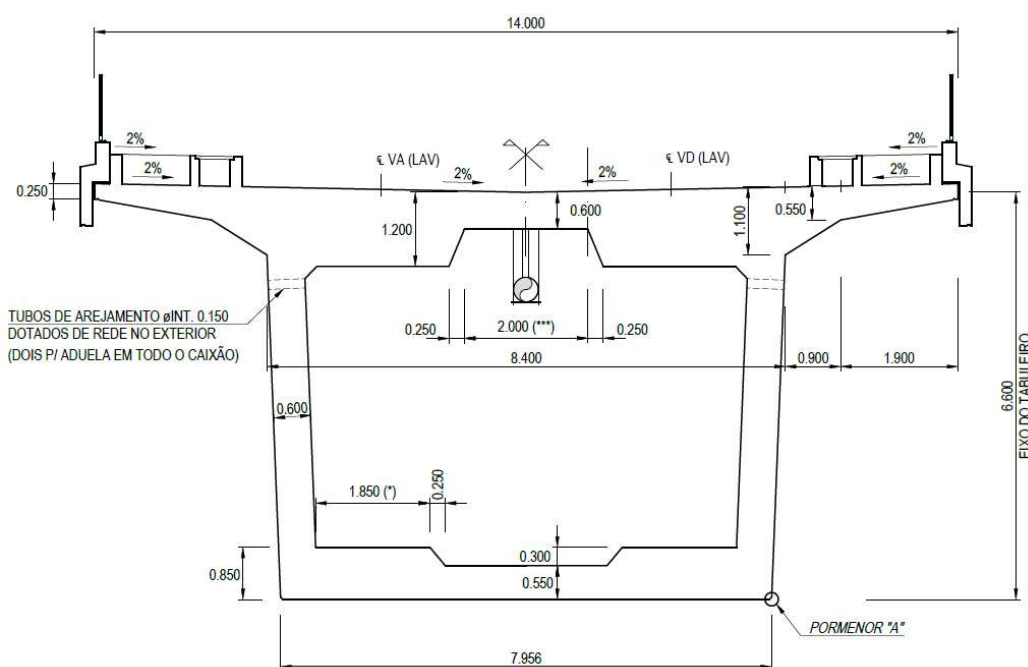


Figura 14 – Secção transversal do tabuleiro pela aduela de fecho do vão principal de 200 m

A secção transversal do tabuleiro será constituída por duas almas, com espessuras que variam entre 0,50 m e 0,80 m, as quais são ligadas inferiormente por uma laje de espessura variável decrescente dos pilares para os vãos, e superiormente pela laje que comporta as vias e passadiços de serviço.

Na zona central, construída por avanços sucessivos, o tabuleiro será pré-esforçado longitudinalmente com duas famílias de cabos:

- os cabos das consolas dispostos na face superior do tabuleiro, e colocados à medida que vão sendo executadas as sucessivas aduelas;
- os cabos de solidarização nas zonas centrais dos vãos para estabelecer a continuidade do tabuleiro.

Nos tramos laterais, contruídos com recurso a cavalete apoiado no solo e a viga de lançamento, o tabuleiro será pré-esforçado longitudinalmente com três famílias de cabos:

- os cabos interiores de geometria parabólica que são dispostos no interior dos estribos das almas do caixão;
- os cabos superiores de geometria retilínea dispostos na laje superior do tabuleiro;
- os cabos inferiores de geometria retilínea dispostos na laje inferior do tabuleiro.

Prevendo a eventualidade de, no futuro, poder ser necessário reforçar o tabuleiro em viga-caixão por aumento das sobrecargas de exploração ou eventual excesso de deformação, o tabuleiro ficará dotado, tal como exigido no Caderno de Encargos da IP, dos dispositivos necessários para a realização desse reforço até cerca de 20% do pré-esforço inicialmente instalado através da utilização de bainhas e ancoragens para pré-esforço interior (pré-esforço aderente) e pré-esforço exterior.

A secção será armada transversalmente apenas com armaduras passivas, exceto nos septos sobre os pilares onde será também pré-esforçada.

A ligação do tabuleiro aos pilares é feita monoliticamente nas zonas centrais construídas por avanços sucessivos e por intermédio de aparelhos de apoio do tipo “calote metálica” nas restantes zonas.

4.3 TABULEIRO INFERIOR RODOVIÁRIO

Como já referido, para o tabuleiro inferior rodoviário adotaram-se duas soluções distintas: i) no atravessamento do Rio Douro preconizou-se uma solução de tabuleiro com nervuras metálicas e laje de betão armado; ii) nos tramos de acesso do lado de Vila Nova de Gaia preconizou-se uma solução de 2 tabuleiros paralelos com vigas-caixão pré-fabricadas.

No atravessamento do Rio Douro, a solução concebida para o tabuleiro, com largura constante de 25 m, é constituída por 2 nervuras longitudinais de altura constante e igual a 1,70 m em aço estrutural de alta resistência, encimadas por uma laje de betão armado de 0,30 m de espessura, constituindo uma secção composta aço-betão. As nervuras são compostas por chapas soldadas de espessuras variáveis e rigidificadores interiores e a laje em betão armado poderá ser pré-fabricada por painéis ou betonada “in situ” com recurso a pré-lajes ou cofragens fixadas à estrutura metálica.

Em ambas as extremidades do tabuleiro são previstas travessas compostas por perfis metálicos tubulares e afastados de 4,50 m para suportar as consolas de grande dimensão. Nos mesmos alinhamentos das travessas das consolas são também previstos quadros de contraventamento em perfis tubulares entre as 2 nervuras longitudinais. Todos estes elementos conferem apoios longitudinais à laje da plataforma, reduzindo desta forma a necessidade de espessura da laje de betão e, consequentemente, a leveza do tabuleiro.

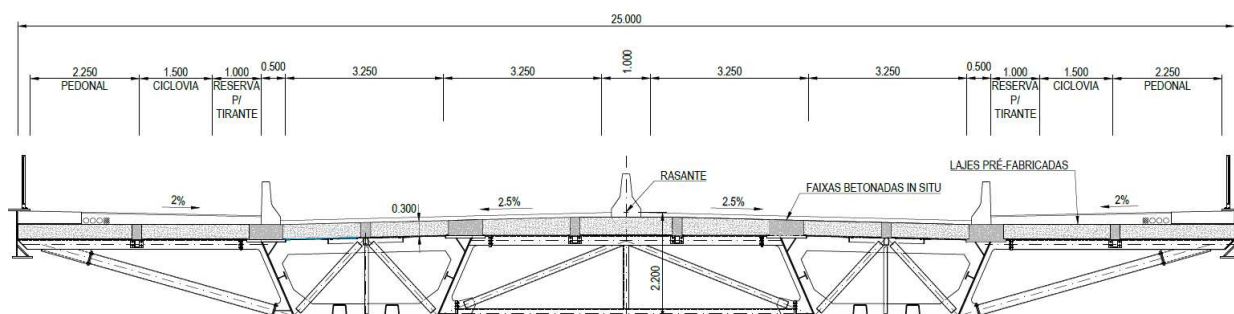


Figura 15 – Secção transversal do tabuleiro inferior na zona de atravessamento do Rio Douro

Nas zonas próximas das torres, o tabuleiro tem um alargamento de 25 para 32 metros por forma a circundar os fustes inclinados. Esta disposição dos elementos estruturais confluentes permitiu reduzir a abertura indesejada entre os 2 fustes das torres, tornando a sua geometria muito mais agradável e permitindo a redução das dimensões das suas fundações.

Nas secções junto às ancoragens inferiores dos tirantes, localizadas junto às faces exteriores de ambas as nervuras metálicas, adotaram-se carlingas metálicas que ligam as 2 nervuras entre os 2 pontos de suspensão, por forma a distribuir convenientemente as forças de suspensão a toda a secção do tabuleiro.

O tabuleiro será de suspensão total a partir das duas torres através de pares de cabos repartidos e afastados de 22,5 m entre si ao longo do tabuleiro e sem quaisquer apoios verticais nas torres. Esses cabos serão constituídos por vários cordões de aço de 15,7 mm de diâmetro, do tipo usado em tirantes e amarrados no tabuleiro através de ancoragens especialmente concebidas para este tipo de

estruturas. Essas ancoragens são estudadas para garantir a resistência dos tirantes aos fenómenos de fadiga, serão reguláveis, a fixação dos "cordões" é realizada por cunhas cónicas de tipo especial e o esticamento é feito com a utilização de macacos monocordão correntes. A passagem dos cabos nas torres é feita através de selas estruturais, também elas estudadas e ensaiadas para garantir um comportamento seguro em relação à fadiga e a eventuais desequilíbrios de forças entre os tirantes. Dado o comportamento estrutural peculiar do atirantamento do tabuleiro inferior, com as torres travadas superiormente pelo tabuleiro ferroviário, houve necessidade de recorrer a selas estruturais com ancoragens à saída da torre e com um número de cordões diferente entre cada um dos lados da torre.

Os cabos de atirantamento serão protegidos por bainhas de polietileno de alta densidade (PEHD) de cor branca e constituídos por cordões auto-embainhados.

Nos tramos de acesso do lado de Vila Nova de Gaia, cada tabuleiro em betão armado pré-esforçado é constituído por duas vigas "U" pré-fabricadas com 1,60 m de altura ligadas superiormente por uma laje de betão armado realizada com recurso a pré-lajes.

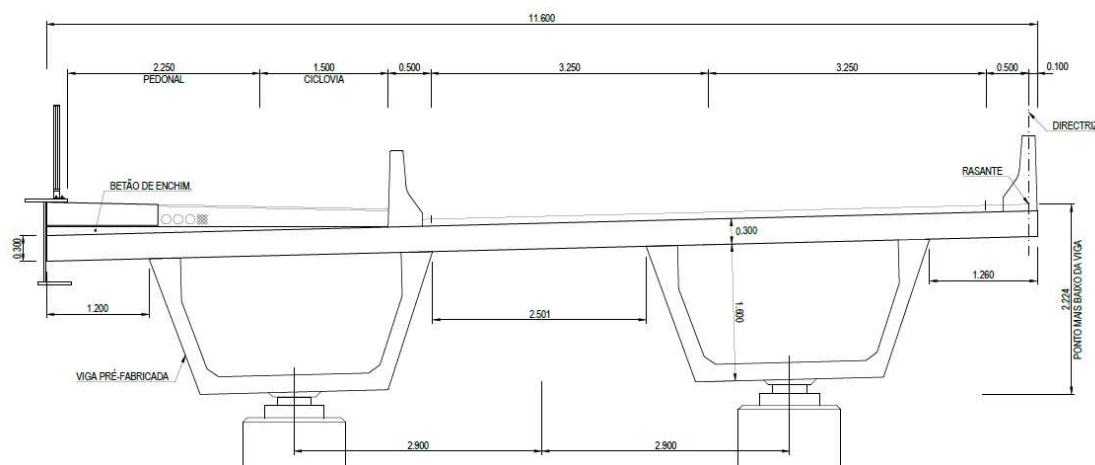


Figura 16 – Secção transversal do tabuleiro inferior nos tramos de acesso do lado de Vila Nova de Gaia

Os tabuleiros, com 11,6 metros de largura, estão afastados de 10 m entre eles por forma a contornar os pilares do tabuleiro ferroviário. A partir do pilar PF6 os tabuleiros aproximam-se até se juntarem na zona de transição para o tabuleiro metálico.

As vigas "U" são pré-tensionadas em estaleiro e colocadas em obra através de guias. O pré-esforço é realizado com cordões aderentes, de traçado reto, tornado não aderente junto às extremidades com a ajuda de mangas que impedem a aderência do aço ao betão de forma a evitar que os momentos isostáticos devidos ao pré-esforço provoquem trações nas fibras superiores.

A laje do tabuleiro é pré-esforçada longitudinalmente sobre os pilares por cabos retos de pós-tensão. Este pré-esforço foi dimensionado para fazer face aos momentos negativos provocados pela betonagem do vão central e pelas restantes cargas permanentes e variáveis que atuam após a conclusão da estrutura. As ancoragens são realizadas em zonas rebaixadas da laje, permitindo assim a correta disposição das cabeças de pré-esforço.

4.4 TORRES

Para as torres, que suportam os tramos principais de ambos os tabuleiros, propõe-se uma geometria constituída por dois fustes verticais inclinados em forma de “A”. Na definição da geometria proposta para as torres teve-se em consideração a importante diferença entre as larguras das plataformas ferroviária (superior) e rodoviária (inferior).

Após o atravessamento do tabuleiro inferior os fustes das torres infletem para o interior de modo a diminuir ao mínimo as dimensões das suas fundações e a afetação dos condicionamentos fluviais em particular os limites das bóias de assinalamento junto ao canal de navegação. Nessa inflexão é disposta uma viga travessa a ligar os 2 fustes. Como já referido o tabuleiro rodoviário tem suspensão total pelo que as travessas não servem de apoio ao mesmo.

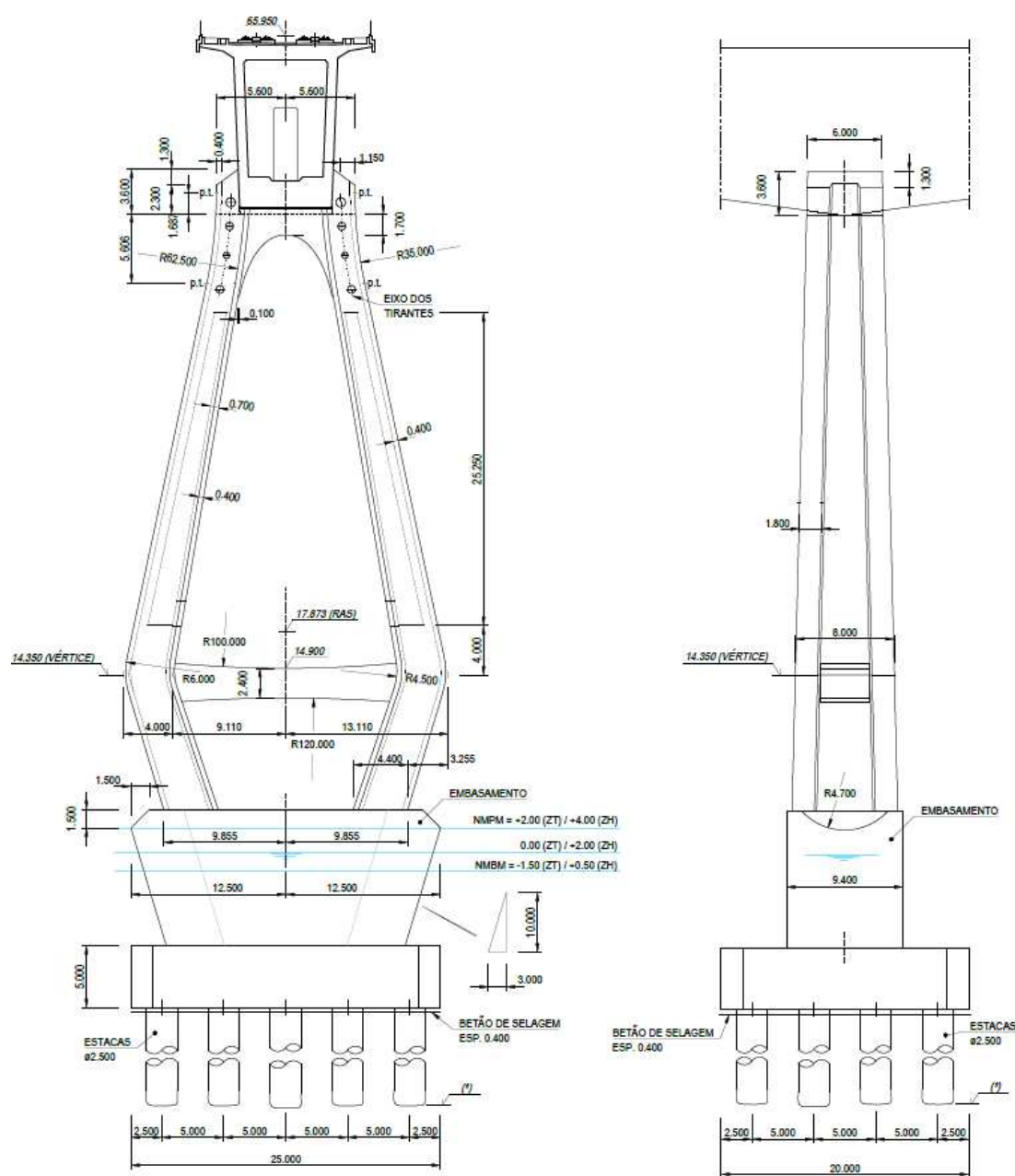


Figura 17 – Torre T1: Alçado de frente (esq.) e alçado lateral (dir.)

As torres, que são implantadas dentro do leito principal do Rio Douro, possuem um embasamento de proteção com forma hidrodinâmica. A torre T1 é fundada por intermédio de 20 estacas de 2,5 m de diâmetro encimadas por um maciço de encabeçamento enquanto que a fundação da torre T2 é direta por intermédio de uma sapata fundada diretamente sobre o maciço rochoso competente que, nessa zona, fica poucos metros abaixo das cotas do leito do rio.

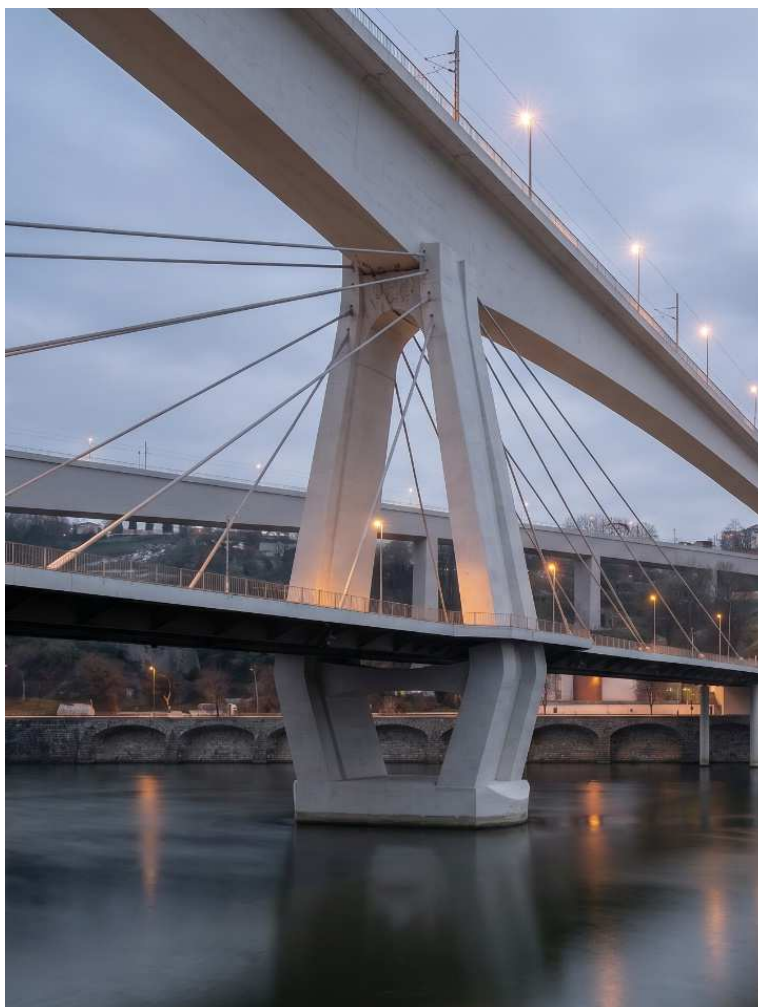


Figura 18 – Torre T2 implantada junto à margem direita do Rio Douro (fotomontagem)

Para o nível máximo de preia mar na zona de implantação da obra, a superfície da água fica muito próxima do topo dos embasamentos das torres pelo que se prevê, como referido em 2.7, a instalação da sinalização fluvial (fixa nas torres e flutuante) necessária para precaver o embate accidental das embarcações que navegam no Rio Douro.

4.5 PILARES

4.5.1 PILARES FERROVIÁRIOS

Os pilares dos tramos laterais do tabuleiro superior da nova Ponte têm geometrias que derivam da geometria definida para as torres, adaptados naturalmente às menores necessidades de suporte das cargas provenientes do tabuleiro.

Os pilares, um por eixo de apoio do tabuleiro, são construídos em betão armado e são formados por uma secção transversal, constante em toda a altura do fuste, e com contornos exteriores derivados de um retângulo. Os pilares PF1 e PF10, em virtude da sua reduzida altura, têm fustes maciços enquanto que os restantes pilares, PF2 a PF9, tem fustes vazados. Estes pilares são fundados, no caso dos pilares PF1 a PF3 e PF10, por intermédio de sapatas e, no caso dos pilares PF4 a PF9, por fundações indiretas com estacas de 2,00 metros de diâmetro encimadas por um maciço de encabeçamento.

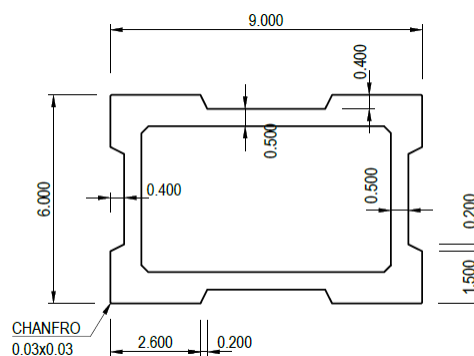


Figura 19 – Secção transversal dos pilares PF6 e PF7

No processo de construção do tabuleiro por avanços sucessivos está prevista a utilização, em cada pilar, de um sistema de equilíbrio longitudinal das consolas, de forma a garantir a segurança das mesmas durante a sua construção às ações de derrubamento, nomeadamente para a situação de acidente correspondente à queda de um dos cimbres. Estes sistemas disporão de macacos hidráulicos por forma a que, terminada cada fase de construção em consola e ligada uma delas ao tramo central de 200 m, se possa levantar o tabuleiro para retirar os aparelhos de apoio provisórios e permitir que as reações sejam transferidas para os apoios definitivos.

Devido à acentuada curvatura na zona de implantação do pilar PF7 será utilizado um sistema de equilíbrio adicional cujo objetivo é anular os momentos e deformações transversais no pilar devidos ao peso próprio do tabuleiro durante a execução das aduelas em consola.

Nos pilares dotados de aparelhos de apoio serão instaladas placas metálicas nos locais de posicionamento de macacos hidráulicos para substituição dos aparelhos de apoio.

4.5.2 PILARES RODOVIÁRIOS

Os pilares dos tramos laterais do tabuleiro inferior, na zona de tabuleiro pré-fabricado do lado de Vila Nova de Gaia, são em betão armado e em número de dois por eixo de apoio de cada tabuleiro. Os pilares são de forma circular e dão continuidade às estacas de fundação, isto é, as estacas são elas próprias, os pilares. Cada fiada de dois pilares está interligada, 0,50 metros abaixo do terreno natural, por uma travessa de betão armado. Os pilares-estaca têm 1,20 metros de diâmetro.

O pilar PR9, localizado na zona onde se realiza a transição entre o tabuleiro pré-fabricado e o tabuleiro metálico, tem secção retangular e é fundado por intermédio de 14 estacas de 1,20 metros de diâmetro encimadas por um maciço de encabeçamento.

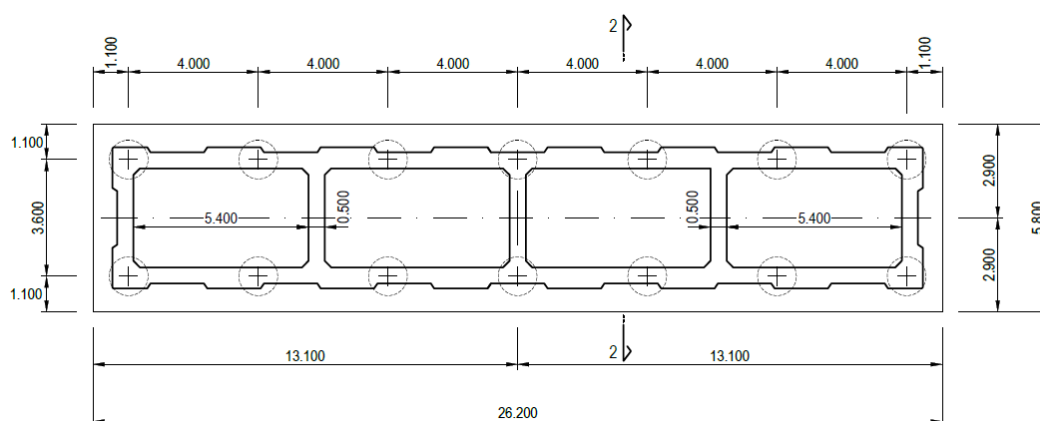


Figura 20 – Secção transversal do Pilar de Transição PR9

O pilar PR10, implantado no leito do rio e próximo da margem direita, é constituído por 2 pilares-estaca com 2,00 m de diâmetro.

4.6 ENCONTROS E ESTRUTURA DE TRANSIÇÃO

O encontro ferroviário do lado de VN de Gaia (Sul) é do tipo cofre fechado em betão armado e constituído pela viga de estribo que recebe o tabuleiro, que, por sua vez, se apoia em montantes e no muro frontal. O encontro dispõe, ainda, de muros de avenida laterais que se destinam a suportar os acrotérios e a dar contenção aos aterros de acesso à obra de arte.

Na mesa do encontro serão acomodados dois aparelhos de apoio localizados sob cada uma das almas do tabuleiro.

A estrutura de transição do lado do Porto (Norte) é uma estrutura semelhante a um encontro, na medida em que se destina a receber tanto o tabuleiro da Ponte sobre o Rio Douro assim como o tabuleiro do Viaduto de Campanhã. Esta estrutura é constituída por duas vigas de estribo que recebem os tabuleiros, suportadas por montantes alongados encimados por uma laje em betão armado que liga as 2 vigas de estribo. Esta laje tem a função de rigidificar o apoio da via férrea entre os tabuleiros das 2 obras de arte e, desta forma, obviar os problemas associados às diferenças de rigidezes nessa transição. A estrutura de transição dispõe ainda de muros de testa frontais e de muros laterais que servem de contenção ao enchimento com solos do interior da estrutura e suportam os passeios e acrotérios.

A geometria particular desta estrutura, em especial o seu comprimento, está relacionada com o facto de esta ter de acomodar os aparelhos de dilatação de via (AD) necessários instalar na extremidade da Ponte do Douro do lado Norte, que para além das suas dimensões muito alongadas, obrigam a respeitar critérios de posicionamento e rigidez muito exigentes. Sobre a estrutura de transição far-se-á também a transição entre a via não balastrada para via balastrada.

Em ambos os encontro/estrutura de transição o tabuleiro possuirá livre dilatação no sentido longitudinal, sendo travado na direção transversal.

No tabuleiro rodoviário, ambos os encontros são em betão armado e constituídos pela viga de estribo, que assenta sobre estacas de diâmetro igual a 2,00 metros e recebe o tabuleiro. Os encontros

disporão, ainda, de muros de avenida laterais que se destinam a suportar os acrotérios e a dar contenção aos aterros de acesso à obra de arte.

Na mesa dos encontros serão acomodados dois aparelhos de apoio localizados, no caso do encontro E1, sob cada uma das nervuras, e, no caso do encontro E2, sob cada uma das almas do tabuleiro. O tabuleiro possuirá livre dilatação em ambos os encontros, embora seja travado na direção transversal.

De forma a garantir a contenção dos taludes de aterro na zona do entroncamento preconizado na margem Norte está prevista a execução de um muro de contenção frontal, autónomo da estrutura do encontro da ponte, que acompanhará a Av. Paiva Couceiro.

São também sugeridas neste estudo as geometrias da rotunda e do entroncamento na margem Norte e da rotunda na margem Sul, apesar do desenvolvimento do projeto destas ligações e a sua execução estarem fora do âmbito da empreitada da LAV (a concretizar pelo Adjudicatário), pois, como acima foi dito, a responsabilidade do Adjudicatário restringe-se à travessia rodoviária sobre o Rio Douro entre as suas juntas de dilatação e às sub-estruturas que dão suporte ao tabuleiro (vigas de estribo e fundações dos eixos ER1 e ER2).

4.7 EQUIPAMENTOS

Os aparelhos de apoio a instalar na obra, no apoio do tabuleiro superior ferroviário, serão do tipo “calote metálica” deslizantes na direção longitudinal e fixos na direção transversal. Excetua-se o pilar PF10, do lado do Porto, que, pela sua reduzida altura, terá aparelhos deslizantes em ambas as direções. Todos os aparelhos permitem rotações em todas as direções. Os aparelhos de apoio serão dotados de célula de carga para registo e controlo das reações sobre cada apoio terão um período de vida útil de 50 anos.

No encontro ferroviário Sul (EF1) e na estrutura de transição para o Viaduto de Campanhã, como atrás referido, os deslocamentos longitudinais são permitidos pelo que serão instaladas juntas de dilatação entre o tabuleiro ferroviário e estas estruturas. Em virtude desta conceção estrutural, sobre estas estruturas serão instalados aparelhos de dilatação de via.

No tabuleiro inferior rodoviário, os aparelhos de apoio a instalar na obra serão do tipo “pot-bearing” deslizantes sobre teflon na direção longitudinal e fixos na direção transversal. Todos os aparelhos permitem rotações em todas as direções.

O tabuleiro rodoviário será ainda dotado de juntas de dilatação em ambas as extremidades e sobre o pilar de transição.

Está prevista a instalação de postes de iluminação viária ao longo de toda a extensão de ambos os tabuleiros ferroviário e rodoviário, assegurando a conveniente visibilidade noturna da totalidade dos passeios e vias de circulação, de acordo com as Normas aplicáveis.

Esses postes de iluminação serão dispostos de forma a manter uma métrica adequada face aos vãos entre apoios dos tabuleiros e, no caso do tabuleiro inferior, devidamente compatibilizados com os cabos de atirantamento do tabuleiro.

Está, também, prevista a instalação de focos de luz para iluminação cénica da Ponte, criteriosamente posicionados para iluminar os elementos estruturais que se considerou relevante destacar face à solução estrutural concebida e face ao enquadramento da nova Ponte em relação ao ambiente

circundante. Muito em particular, procurou-se respeitar o desígnio de, também em período noturno, garantir e valorizar a permeabilidade visual face à envolvente construída e à Ponte de São João. Por este motivo optou-se por não iluminar os feixes dos tirantes, solução tão característica em pontes de tirantes.

Pelo exposto, a iluminação cénica prevista limita-se a destacar as faces laterais dos fustes das torres acima do tabuleiro rodoviário e as faces inferiores convexas dos tramos principais do tabuleiro superior. Os estudos luminotécnicos a desenvolver na fase posterior permitirão simular e controlar as intensidades de luz a considerar nos focos para se obterem os efeitos desejados.

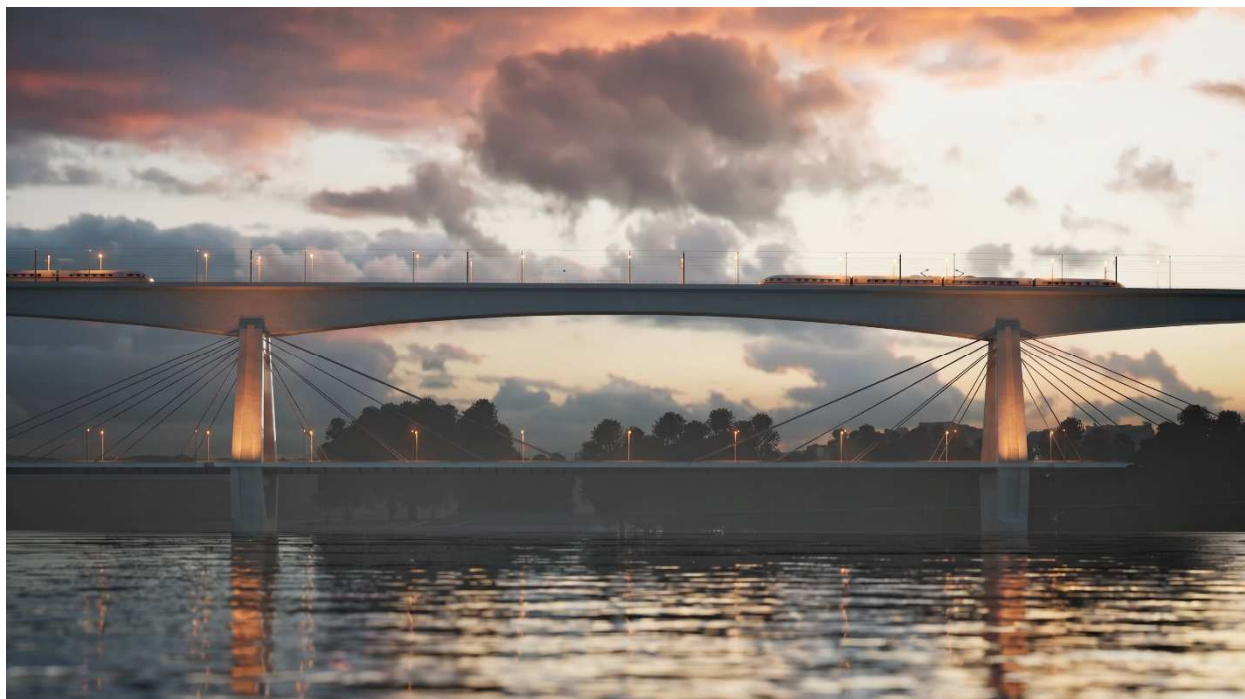


Figura 21 – Vista de jusante da nova Ponte sobre o Rio Douro (fotomontagem)

O tabuleiro rodoviário será dotado de sistema de CCTV que permite a cobertura da sua extensão total, com a instalação de câmaras em ambos os municípios e na travessia; inclusão de um canal técnico rodoviário (CTR) de ambos os lados do tabuleiro rodoviário, sob os passadiços, e constituído por 3 tubos Ø110 mm e 3 tritubos Ø40 mm e respetivas caixas de visita; rede de marcos de incêndio ligada à rede pública de abastecimento de água dos municípios do Porto ou de Gaia; mobiliário urbano, tais como papeleiras, dissuasores e bancos; vigas de bordadura e guarda-corpos nos limites dos passadiços.

O tabuleiro possibilitará ainda a instalação, por terceiras entidades, de redes de comunicações móveis (GSM, UMTS e de forças de emergência/segurança) e de sinalização vertical variável necessária para a conveniente captação, orientação, gestão e segurança da circulação (rede semafórica (SLAT), a interligar com as respetivas redes municipais existentes nos municípios do Porto e de Vila Nova de Gaia.

A ponte será ainda dotada dos equipamentos normalmente considerados em obras do género, tais como, guarda-corpos, vigas de bordadura, etc.

5 DRENAGEM

A obra será dotada de um sistema de drenagem pluvial dos tabuleiros. O sistema de drenagem destina-se a que as águas das chuvas recolhidas sobre os tabuleiros da obra possam ser drenadas com a eficácia e fiabilidade necessárias, conduzindo-as às redes de drenagem adjacentes à ponte, em ambas as margens. Como já referido, não pois é permitida a descarga direta para o Rio Douro.

Assim, e também como antes foi referido, ambos os tabuleiros estão preparados para coletar e encaminhar as águas pluviais recolhidas sobre os mesmos para locais apropriados em ambas as margens do Rio Douro, assegurando-se que não serão efetuadas quaisquer descargas diretamente no Rio Douro.

A face superior dos tabuleiros ferroviário e rodoviário será impermeabilizada e as águas captadas pelos sumidouros são encaminhadas para coletores posicionados no interior da seção do tabuleiro ou sob a laje da plataforma e, posteriormente, para zonas de descarga adequadas já mencionadas.

Serão adotados acessórios que permitem realizar a limpeza dos coletores e tubos de queda, ao longo de todo o seu desenvolvimento.

6 RETORNO DE CORRENTES DE TRAÇÃO, TERRAS E PROTEÇÕES

A implementação do sistema de terra de proteção a utilizar para a obra de arte visa fundamentalmente:

- Garantir a existência de um ambiente seguro para seres humanos bem como para os próprios sistemas elétricos na vizinhança da via-férrea;
- Atenuar os efeitos de corrosão elétrica que as correntes vagabundas podem originar sobre os elementos metálicos da obra.

Foram definidos sistemas de proteção dielétrica de todas as peças metálicas, nomeadamente as armaduras estruturais (passivas e ativas), os aços estruturais, os guarda-corpos, as juntas e os aparelhos de apoio, evitando a sua corrosão precoce por influência dos campos eletromagnéticos, a realizar por isolamento ou implementação de uma rede de terras adequada.

Assim, é garantida a ligação à terra de todos os elementos metálicos, incluindo as armaduras passivas e ativas, sendo cumprido o estipulado em termos do sistema de retorno de corrente de tração e terras e proteções (RCT+TP) na norma GR.IT.GER.002.6-V06 da IP.

Todos os componentes a aplicar na rede de terras obedecerão às especificações da norma GR.IT.GER.002.13-v08.

A execução dos trabalhos terá o adequado acompanhamento técnico, com a verificação em fase de obra da continuidade das armaduras e das suas ligações antes das betonagens.

7 MATERIAIS E DURABILIDADE

Os materiais a utilizar na execução da Ponte sobre o Rio Douro são ditados pela necessidade de garantir não só a resistência, mas também a durabilidade da obra. Nesse sentido, prescrevem-se betões de classes superiores às mínimas regulamentares, indicando-se também as respetivas classes de exposição segundo a norma NP EN 206:2013.

Para efeitos da prescrição dos parâmetros que controlam a durabilidade dos materiais, estabeleceu-se a seguinte classificação e condições de execução da estrutura de betão:

- Vida Útil da Estrutura (NP EN 206:2013/A2:2021 - DNA 5.3.1): Categoria 5 (100 anos)
- Classe Estrutural (NP EN 1992-1-1): S6
- Classe de Execução (NP EN 13670:2011/E2:2021 – DNA 4.3.1): 3
- Classe de Consequência (NP EN 1990 – Anexo B, Secção B3) CC3
- Classe de Fiabilidade (NP EN 1990 – Anexo B, Secção B3) RC3
- Nível de Supervisão (NP EN 1990 – Anexo B, Secção B4) DSL3
- Nível de Inspeção (NP EN 1990 – Anexo B, Secção B5) IL3

As classes de exposição e execução da estrutura de betão seguem o prescrito nas normas NP EN 206:2013 e NP EN 13670:2011 e nas especificações LNEC E 464-2007 e LNEC E 465-2007.

Segundo a Norma NP EN 206:2013, a obra de arte é projetada considerando:

- Ambiente moderadamente agressivo e Classes de Exposição: XC2 para fundações de pilares e encontros, XC4 para elevação de encontros, XC4 ou XS3 para elevação de pilares e XC4 para tabuleiros;
- Para cada elemento estrutural foi verificado se o ambiente é o definido acima ou se se está na presença de elementos que o tornem mais condicionante, nomeadamente algum tipo de agressividade química, tomando como base a Norma NP EN 206:2013.

A estrutura é dimensionada para um período de vida útil de 100 anos.

No que diz respeito à estrutura metálica do tabuleiro rodoviário, estabeleceu-se a seguinte classificação:

- Classe de Execução (NP EN 1090-2): EXC4;
- Classe de Serviço (NP EN 1090-2): SC2;
- Categoria de Produção (NP EN 1090-2): PC2.

No quadro seguinte indicam-se as classes de resistência e de exposição (agressividade do ambiente) consideradas e os recobrimentos a adotar. O cálculo dos recobrimentos nominais segue as regras estipuladas na NP EN 1992-1-1 em consonância com o indicado nas Especificações LNEC E464 e E465. Para cada tipo de elemento estrutural serão considerados os seguintes betões:

Quadro 11 – Ponte sobre o Rio Douro. Características dos betões

Elemento	Classe de Resistência (NP EN206)	Classe de Exposição	Teor de Cloretos	D _{máx} (mm)	Classe de Abaixamento	Rec. (mm)
Regularização e selagem	C 16/20	X0	Cl 1.0	-	S1 / S2	-
Estacas	C 30/37	XC2	Cl 0.40	22	S4 / S5	75
Sapatas e Maciços de Estacas	C 30/37	XC2	Cl 0.40	22	S2 / S3 / S4	50
Encontros e Muros em elevação	C 30/37	XC4	Cl 0.40	22	S2 / S3	50
Pilares em elevação	C 35/45	XC4	Cl 0.40	22	S2 / S3	50
Torres: Elevação até à cota +12	C 35/45	XS3	Cl 0.40	22	S2 / S3	65
Torres: Elevação acima da cota +12	C 35/45	XC4	Cl 0.40	22	S2 / S3	50
Torres: Travessa inferior	C 35/45	XC4	Cl 0.20	22	S2/S3	50
Tabuleiro Ferroviário	C 50/60	XC4	Cl 0.20	16	S3 / S4	50
Tabuleiro Rodoviário: Zonas "in situ"	C 35/45	XC4	Cl 0.20	22	S2/S3/S4	50
Tabuleiro Rodoviário: Vigas pré-fabricadas	C 35/45	XC4	Cl 0.20	16	S3/S4	50
Tabuleiro Rodoviário: Pré-lajes	C 35/45	XC4	Cl 0.20	16	S4	50

Os recobrimentos são estabelecidos de acordo com a GR.IT.OAP.002 e em conformidade com a especificação LNEC E464:2007, considerando a classe de exposição ambiental, o período de vida útil, o tipo de elemento estrutural e a classe de resistência do betão.

São a utilizar os seguintes tipos de aço de construção, em armaduras ordinárias em conformidade com a EN 10080 e em barras e cabos ou cordões pré-esforçados com a prEN 10138:

- Armaduras para betão armado:.....A500 NR SD
- Armaduras de pré-esforço: $f_{pk} \geq 1860$ MPa; $f_{p0.1k} \geq 1600$ MPa
- Barras de alta resistência para pré-esforço:..... $f_{puk} \geq 1050$ MPa

Na estrutura metálica do tabuleiro rodoviário são a utilizar os seguintes tipos de aço de construção, em perfis, barras e chapas em conformidade com a EN 10025-5 e tubos com a BS 7668:2016:

- Perfis, barras e chapas com espessura igual ou inferior a 30 mmS355 J2W
- Barras e chapas com espessura superior a 30 mm S355 J2W+N
- Cantoneiras do contraventamento superiorS355 J2W
- Tubos S355 J2WH

8 PROCESSOS CONSTRUTIVOS

Para a construção da Ponte previram-se diferentes métodos construtivos visando a melhor adequação das metodologias empregues às soluções adotadas, com vista a atingir um elevado nível de eficiência e simplicidade construtiva conjugados com o mínimo impacto sobre o rio e suas margens.

Por razões que se prendem com a estabilidade das torres e com o facto de as etapas de fechos dos tramos do tabuleiro superior poderem influenciar, do ponto de vista da geometria, a construção do tabuleiro inferior, previu-se, nesta fase, que a construção do tabuleiro inferior, suspenso nos tirantes, só deverá iniciar-se aquando da realização do fecho do tramo central de 200 m. Este procedimento garante que a rigidez providenciada pelo pórtico constituído pelo conjunto das torres e tabuleiro superior, se torne muito menos suscetível de afetar a construção do tabuleiro inferior nesta fase.

Os tabuleiros dos tramos de acesso aos vãos principais do tabuleiro ferroviário superior serão construídos com recurso a vigas de lançamento ou sobre cavaletes apoiados no solo, enquanto que nos vãos centrais de altura variável a construção será feita por avanços sucessivos em consola a partir das aduelas de encabeçamento das torres ou dos pilares PF6 e PF7.

O tabuleiro metálico inferior será içado, de forma simétrica em relação às torres, por troços com comprimentos semelhantes à distância entre tirantes, seja com recurso a meios flutuantes e içamento a partir do tabuleiro superior, seja com recurso a gruas automóveis, nos troços fora do rio. Após o içamento da estrutura metálica e efetuadas as uniões por soldadura topo a topo, são tensionados os pares de tirantes frontais e montadas as lajes pré-fabricadas que compõem a plataforma do tabuleiro rodoviário inferior.

As fundações dos apoios implantados dentro do leito principal do Rio Douro – torres T1 e T2 e pilar PR10 – serão executadas com recurso a meios flutuantes. Serão executadas ensecadeiras para a construção das fundações abaixo do nível das águas do rio.

No caso particular da construção da sapata de fundação da torre T2, será realizado o nivelamento prévio da base do leito do rio sobre o maciço granítico, sobre o qual serão apoiadas cascas pré-fabricadas que servem simultaneamente de ensecadeira e cofragem. O nivelamento do leito do rio será materializado com recurso a um rolhão em betão armado, executado de forma submersa. Na construção das fundações da torre T1 e do pilar PR10 está prevista a utilização de cortinas de estacas-prancha.

Após a construção das fundações e elevação dos fustes das torres e pilar PR10 serão construídos tapetes em enrocamento cujo dimensionamento visa a anulação de potenciais fenómenos de infraescavação junto aos apoios e minimização da modificação dos padrões de sedimentação do leito do rio.

Para a construção das fundações dos pilares PF9 e PF10 e da Estrutura de Transição foram desenvolvidas soluções específicas de contenção periférica ajustadas às condições geotécnicas existentes e às alturas previstas para cada local. Estas contenções que, em parte são provisórias, são também necessárias para o encaixe na encosta dos dois últimos tramos Norte do tabuleiro ferroviário.

De uma forma geral as contenções são constituídas por uma cortina de estacas moldadas, encastradas 3 m abaixo do fundo da escavação. A face visível da contenção é complementada com

a aplicação de betão projetado com fibras. A estabilização das cortinas de estacas é assegurada por um sistema de ancoragens ativas distribuídas por vários níveis de acordo com a sua altura. O primeiro nível, de carácter definitivo, encontra-se próximo da superfície do terreno e está integrado na viga de coroamento. Os níveis intermédios, também de carácter definitivo, localizam-se a profundidades intermédias e são associados a vigas de distribuição. O nível inferior, de carácter provisório, é desativado após a execução da estrutura definitiva e respetivo reaterro dos terrenos sobre a fundação.

Independentemente de terem sido cumpridos integralmente todos os requisitos do Caderno de Encargos relacionados com os condicionamentos de tráfego fluvial e canais de navegação na zona de implantação dos elementos de suporte da Ponte no rio, serão, naturalmente, devidamente coordenados junto das entidades competentes todos os procedimentos necessários à boa execução das fundações e posteriormente de toda a obra.

Resumidamente, a sequência de construção envolve as etapas seguintes que se descrevem nos pontos em seguida, em uso dos meios, em tipologias e quantidades adequados, necessários à correta execução dos trabalhos no prazo definido.

1. Criação de plataformas de trabalho e acessos. Execução de contenções/ensecadeiras e escavações para execução de fundações. Execução de fundações. Elevação dos pilares e torres.

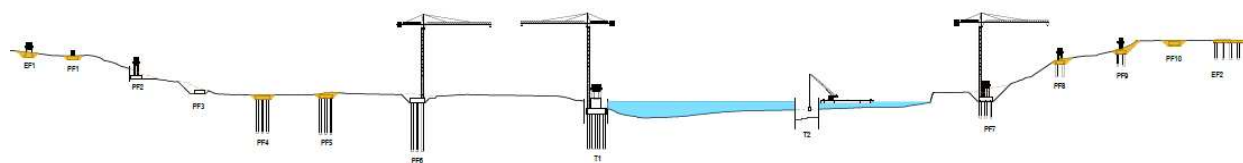


Figura 22 – Faseamento construtivo – Etapa 1 de 6

2. Execução dos tramos laterais do tabuleiro ferroviário com recurso a cavalete ou viga de lançamento. Continuação da execução de contenções/ensecadeiras e escavações para execução de fundações. Continuação da execução de fundações. Continuação da elevação dos pilares e torres.

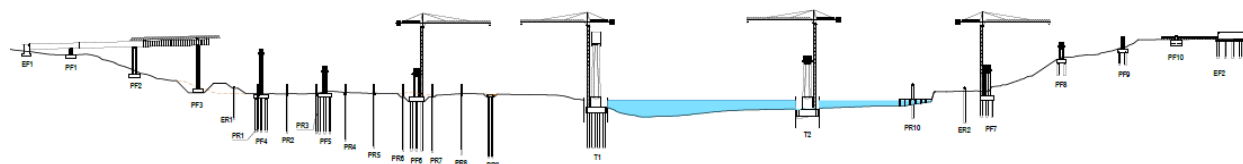


Figura 23 – Faseamento construtivo – Etapa 2 de 6

3. Continuação da execução dos tramos laterais do tabuleiro ferroviário, tramo a tramo. Continuação da elevação dos pilares. Execução do tabuleiro ferroviário a partir das aduelas de encabeçamento das torres T1 e T2 pelo método de avanços sucessivos.

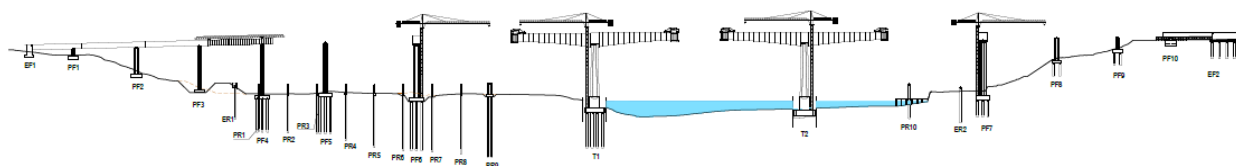


Figura 24 – Faseamento construtivo – Etapa 3 de 6

4. Continuação da execução dos tramos laterais do tabuleiro ferroviário, tramo a tramo. Execução da aduela de fecho do tramo T1-T2. Continuação da execução do tabuleiro ferroviário a partir das aduelas de encabeçamento dos pilares PF6 e PF7 pelo método de avanços sucessivos. Execução dos tramos laterais do tabuleiro rodoviário com recurso a cavaletes (margem norte) e pré-fabricação (margem sul). Montagem dos troços de arranque do tabuleiro rodoviário sobre os maciços de fundação das torres. Içamento de forma simétrica dos troços de tabuleiro metálico rodoviário e tensionamento dos tirantes.

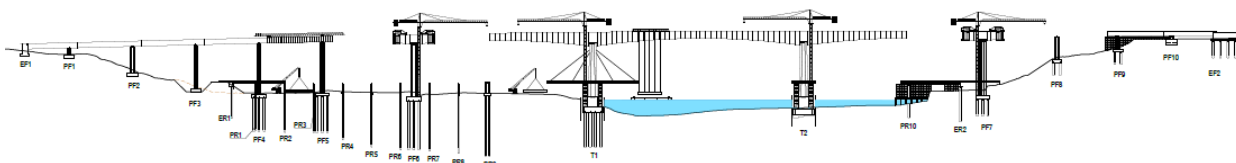


Figura 25 – Faseamento construtivo – Etapa 4 de 6

5. Execução das aduelas de fecho dos tramos PF6-T1 e T2-PF7. Execução das aduelas de fecho dos tramos P3-P4 e P6-P7. Execução da aduela de fecho do tramo PF5-PF6. Execução do tramo de fecho entre os pilares PF8 e PF9.

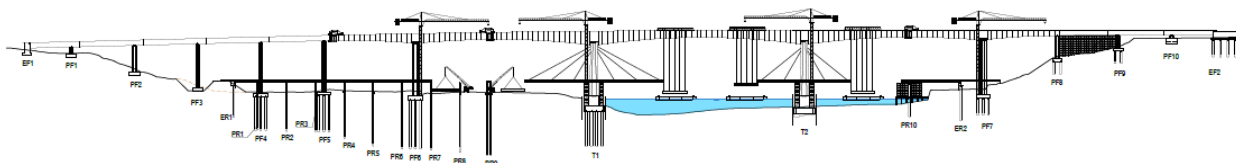


Figura 26 – Faseamento construtivo – Etapa 5 de 6

6. Execução e instalação de todos os equipamentos no tabuleiro. Acabamentos finais.

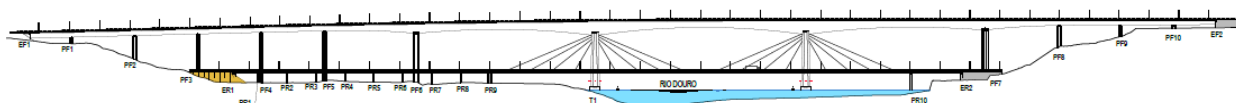


Figura 27 – Faseamento construtivo – Etapa 6 de 6

9 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

9.1 REGULAMENTOS E NORMAS

Na análise e dimensionamento da estrutura e respetivas fundações, em geral, adotaram-se os critérios de verificação de segurança aos Estados Limite Últimos e de Utilização preconizados nas normas portuguesas e europeias, designadamente nos Eurocódigos.

Os Eurocódigos integram a maioria das normas e recomendações existentes, pelo que são considerados para definição das ações e critérios de dimensionamento das pontes e viadutos.

Para além desta regulamentação, são ainda consideradas as recomendações da *UIC – Union Internationale des Chemins-de-fer*, as Especificações do LNEC, as Instruções Técnicas da IP e o Caderno de Encargos da IP, nomeadamente, o Anexo 5, Parte C4 – Ponte sobre o Rio Douro (Ponte) e a Parte C3 – Pontes e Viadutos.

Para além desta regulamentação, são ainda consideradas as Especificações do LNEC e as Notas Técnicas da IP, em particular a Nota Técnica relativa às Obras de Arte Especiais Rodoviárias (NT P8).

Apesar de se descreverem de forma sumária nos pontos seguintes, os mesmos estão descritos em detalhe no Tomo 2.01.00.681 – Cálculos Justificativos que se considera o documento efetivo de referência para estas definições.

9.2 AÇÕES

As ações consideradas na verificação da segurança da obra de arte são as indicadas no Eurocódigo e estão detalhadamente descritas no Tomo 2.01.00.681 – Cálculos Justificativos deste projeto.

Para além das ações permanentes foram consideradas as ações variáveis regulamentares definidas no Eurocódigo 1 para as pontes ferroviárias e para as pontes rodoviárias.

As ações variáveis para pontes ferroviárias são consideradas segundo os modelos de carga estáticos ou dinâmicos previstos no Eurocódigo 1, afetadas do fator de classificação do tráfego $\alpha = 1.33$ conforme especificado no Caderno de Encargos da IP.

Segundo a NP EN 1991-2, apenas os modelos de carga vertical LM 71 e SW/0 são multiplicados pelo fator α .

Os efeitos dinâmicos devido à passagem dos comboios regulamentares, são estimados afetando a sobrecarga dos comboios tipo LM71, SW0 e SW2, por um coeficiente dinâmico que, para o presente caso, toma o valor $\Phi_3 = 1.10$, correspondente a vias com “manutenção corrente”.

As forças de arranque e frenagem são consideradas atuando em conjunto com a carga ferroviária vertical, de forma consistente e são também multiplicadas pelo coeficiente α mas não são multiplicadas pelo coeficiente dinâmico.

Na determinação dos efeitos da ação sísmica sobre a estrutura, seguiu-se o disposto na NP EN 1998-1:2010 e na NP EN1998-2:2023 e respetivos Anexos Nacionais.

A classe de importância considerada para a Ponte sobre o Rio Douro é a Classe III e os coeficientes de importância tomam os valores $\gamma_f = 1,69$ (sismo tipo 1) e $\gamma_f = 1,37$ (sismo tipo 2), aplicando os valores recomendados na NP EN 1998-2.

São consideradas as ações sísmicas tipo 1 e tipo 2, e do ponto de vista do zonamento sísmico, a obra encontra-se nas zonas sísmicas 1.6 e 2.5, sendo a aceleração do terreno de $0,35 \text{ m/s}^2$ e $0,80 \text{ m/s}^2$, respetivamente. Em função do estudo de caracterização geotécnica da obra o terreno foi considerado do tipo B.

Assim, foram consideradas no dimensionamento da estrutura as seguintes ações:

Permanentes:

- peso próprio;
- restante carga permanente;
- ação isostática e hiperstática do pré-esforço;
- ações de retração e fluência do betão;
- ações inerentes ao funcionamento e substituição dos aparelhos de apoio;
- impulsos de terras;

Variáveis:

- ações durante a fase construtiva;
- sobrecargas ferroviárias, e seus efeitos;
- sobrecargas rodoviárias, e seus efeitos;
- variações de temperatura, uniformes e diferenciais;
- ações do vento;
- ação da neve;
- ações em passadiços e guarda-corpos.

Acidentais:

- ações de descarrilamento de comboio;
- ações de embate de veículos rodoviários;
- ações de embate de comboios;
- ações de embate de embarcações;
- ações de levantamento do tabuleiro;
- ações sísmicas.

9.3 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

As combinações de ações seguem o indicado no Anexo A2 (2005) da NP EN 1990:2009, tal como descrito em detalhe no Tomo 2.01.00.681 – Cálculos Justificativos.

Consideram-se as seguintes principais combinações de ações:

- Combinações fundamentais;
- Combinações acidentais;
- Combinações características;
- Combinações frequentes;
- Combinações quase permanentes.

Os coeficientes parciais de segurança aplicados são os definidos na NP EN1990, no Anexo A2, para a fase definitiva e para as fases provisórias (fases construtivas).

9.4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

A análise das estruturas submetidas às ações regulamentares foi efetuada por métodos matemáticos realizados em computador através de programas de cálculo estrutural, quer de aplicação geral, quer especificamente desenvolvidos para o cálculo de obras de arte.

A estrutura da obra de arte foi analisada através de modelos de barras tridimensionais para a análise do seu comportamento global devido às ações verticais e horizontais.

Dos programas de aplicação geral recorre-se prioritariamente aos programas SAP2000 e RM Bridge, sendo utilizados modelos de barras tridimensionais. Estes programas permitem efetuar a análise do processo construtivo de obras de arte, determinando as histórias e envolventes de deslocamentos, esforços e tensões ao longo do processo.

Na análise transversal dos tabuleiros utilizam-se também modelos de elementos finitos de casca, recorrendo-se ao programa SAP2000.

9.5 CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

9.5.1 ASPETOS GERAIS

Os critérios de verificação da segurança estrutural seguiram o estipulado nos Eurocódigos, tal como descrito em detalhe no Tomo 2.01.00.681 – Cálculos Justificativos.

As verificações da segurança dos elementos estruturais foram efetuadas em relação aos estados limites últimos de rotura e aos estados limites de utilização.

Em geral os elementos resistentes do tabuleiro superior ferroviário são em betão armado pré-esforçado, apenas se recorrendo a estruturas metálicas em elementos secundários. No caso do tabuleiro inferior rodoviário, como já referido, recorreu-se a uma estrutura mista aço-betão na zona de atravessamento do rio Douro enquanto que as restantes zonas são em betão armado e pré-esforçado.

A segurança dos restantes elementos constituintes da obra foi efetuada em relação aos estados limites últimos de resistência para os elementos em betão armado e pelo método das tensões admissíveis para outros elementos, como aparelhos de apoio e dispositivos de travamento.

9.5.2 ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

As verificações de segurança aos Estados Limite de Utilização aplicadas a pontes ferroviárias são estabelecidas visando:

- Durabilidade da estrutura;
- Segurança do tráfego;
- Conforto dos passageiros;
- Segurança da via, considerando a sua interação com a estrutura.

Para a durabilidade de estruturas de betão armado e pré-esforçado, foram efetuadas as verificações da segurança aos Estados Limites de Utilização de:

- Descompressão;
- Abertura de Fendas;
- Compressão máxima no betão.

E, seguindo a GR.IT.OAP.002 da IP, foram também efetuadas as verificações da segurança aos Estados Limites de Utilização de:

- Descompressão, considerando a combinação frequente de ações;
- Não Fissuração, considerando a combinação característica de ações.

A segurança do tráfego e o conforto dos passageiros foi efetuada através da verificação de valores limite de deformações e vibrações da estrutura, para:

- Acelerações máximas verticais;
- Deslocamentos verticais máximos;
- Deslocamento vertical nas extremidades do tabuleiro (nas juntas);
- Distorção do tabuleiro;
- Rotação nas extremidades;
- Deslocamentos transversais;
- Rotações horizontais;
- Frequência própria de vibração fundamental.

No caso do tabuleiro misto aço-betão foi avaliado o nível de deformação vertical do tabuleiro provocado pela ação isolada da sobrecarga rodoviária.

9.5.3 ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

A verificação da segurança em relação aos estados limites últimos de resistência, foi efetuada de acordo com as disposições da NP EN 1992-1-1:2010, NP EN 1992-2:2008 para estruturas de betão armado e pré-esforçado.

Na estrutura mista do tabuleiro rodoviário seguiu-se o disposto na NP EN 1993, Partes 1-1, 1-5, 1-8 e 1-10 e na NP EN 1993-2 para estruturas de aço e na NP EN 1994-1-1 e NP EN 1994-2 para estruturas mistas aço-betão.

No que se refere à verificação de segurança à fadiga foi seguido o disposto na NP EN 1991-2, na NP EN 1992-1-1 e na NP EN 1992-2 para estruturas de betão armado e pré-esforçado e na NP EN 1993-1-9 para estruturas de aço.

Em relação aos pilares, a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos de resistência foi efetuada considerando a encurvadura de acordo com o disposto na NP EN 1992-1-1.

9.5.4 INTERAÇÃO VIA-ESTRUTURA

No caso da interação via-estrutura, foram tidas em consideração as verificações da segurança estabelecidas no Eurocódigo 1 para controlo indireto dos efeitos das deformações estruturais na via, nomeadamente:

- Deslocamento longitudinal nas extremidades do tabuleiro ferroviário (relativo e absoluto);
- Deslocamento vertical nas extremidades do tabuleiro.

Para além destas últimas verificações, e tratando-se de uma via férrea com barra longa soldada, foram verificadas as tensões adicionais nos carris e as deformações no tabuleiro e entre o tabuleiro e os carris devidas aos efeitos das ações variáveis. Como base de partida, foram seguidas as recomendações da ficha UIC 774-3R e da EN 1991-2:2003 para o cálculo da interação via-tabuleiro, de forma a controlar a tensão máxima e mínima nos carris e deslocamentos diversos entre elementos, tendo em conta a interação carril/via em laje/tabuleiro.

No entanto, a regulamentação atualmente em vigor (EN 1991-2, 2023) no que respeita à interação via-ponte, uma vez que recorre a métodos indiretos para controlar as tensões nos carris como atrás foi dito, não contempla adequadamente algumas condições específicas, tais como a presença de curvas com raios reduzidos, diferentes estados de manutenção ou imperfeições geométricas. Estas limitações tornam-se particularmente relevantes quando se realizam avaliações de segurança em estruturas especiais como é o caso da nova Ponte sobre o Rio Douro que se insere em zonas de raios apertados inferiores a 1500 m, que chegam a raios na via férrea na ordem de 350 m.

Assim sendo, foi desenvolvido um “Estudo Dinâmico e de Interação Via-Estrutura” que considera modelos avançados de análise de encurvadura lateral para ter em conta aspetos não contemplados explicitamente pela EN 1991-2 (2023). Este estudo consta de documento autónomo e visa apresentar a metodologia definida e seguida para este caso particular.

9.5.5 EFEITOS DINÂMICOS

Foram ainda efetuadas análises dinâmicas de interação comboio/via e verificadas as exigências da EN 1990-Annex A2(2023) para a conceção de pontes ferroviárias, relacionadas com efeitos dinâmicos resultantes da passagem de comboios sobre pontes, de forma a analisar fenómenos de ressonância, determinar as acelerações verticais máximas do tabuleiro, determinar o incremento de esforços e deslocamentos na estrutura e determinar o nível de conforto no interior das carruagens, tendo em conta a interação comboio/via/tabuleiro. Estas análises constam no “Estudo Dinâmico e de Interação Via-Estrutura” que integra este Projeto de Execução.

9.5.6 SEGURANÇA NA FASE CONSTRUTIVA

A verificação da segurança da obra durante a fase de construção foi efetuada com base na limitação das tensões máximas e mínimas ocorrentes e tendo em conta a curta duração das situações em causa, admitindo-se que possam ocorrer, nas fibras opostas àquelas em que se situem os cabos de pré-esforço, tensões de tração inferiores ao valor característico da tensão de rotura do betão à tração simples na data em causa.

9.5.7 SEGURANÇA DOS ENCONTROS E DA ESTRUTURA DE TRANSIÇÃO

A segurança global dos encontros e da estrutura de transição com o Viaduto de Campanhã foi verificada em relação aos estados limites últimos de equilíbrio e a segurança das diversas peças de betão armado que os constituem foi verificada em relação aos estados limites últimos de resistência.

9.5.8 SEGURANÇA DAS FUNDAÇÕES

Em relação à segurança das fundações avaliou-se a capacidade resistente do terreno de fundação e verificou-se a segurança do mesmo ao estado limite de utilização (assentamento) de acordo com a NP EN 1997-1:2010.

Assim, foi verificado o estado limite último de rotura interna dos elementos de fundação ou rotura do terreno (STR/GEO), comparando os valores de cálculo dos efeitos das ações (E_d) com os valores de cálculo das capacidades resistentes (R_d). Conforme estabelecido no Anexo Nacional do EC7, adotou-se a Abordagem de Cálculo 1.

Complementarmente, as fundações de betão armado foram verificadas aos estados limites últimos de acordo com o descrito nos pontos anteriores.

10 PLANO DE MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

A dimensão, complexidade e o carácter inovador da solução estrutural proposta para a travessia rododiferroviária do Rio Douro, tornam particularmente relevante a monitorização do seu comportamento durante a construção e em serviço, bem como a realização de ensaios de receção no final da construção.

Ao longo deste capítulo descreve-se, de forma preliminar, o plano proposto para o sistema de monitorização contínua a instalar na Ponte, visando a caracterização do seu comportamento estrutural estático e dinâmico ao longo do tempo, bem como da evolução da durabilidade dos materiais, de forma a detetar precocemente uma eventual anomalia no seu desempenho. Apresenta-se também o plano preliminar dos ensaios de receção que serão realizados no final da construção.

Na elaboração deste plano foram consideradas as características específicas desta obra de arte, bem como o estado da arte dos conhecimentos no domínio da monitorização do comportamento estrutural e da durabilidade.

10.1 COMPONENTE SENSORIAL DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

A monitorização do comportamento estrutural durante a construção permite acompanhar as grandes mudanças estruturais que ocorrem ao longo da evolução da obra, bem como a realização de medições antes dos elementos estruturais se encontrarem sujeitos a esforços.

O sistema de monitorização a instalar irá operar de forma contínua ao longo de parte significativa da vida útil da estrutura, sendo por isso ser dotado de elevada robustez e fiabilidade. O sistema terá uma ligação de banda larga à Internet e será associado a um software que permita a sua configuração remota, proceda ao armazenamento da informação experimental obtida, realize o processamento desta informação em tempo real, disponibilize o acesso online à informação processada e, finalmente, com possibilidade de emissão de alertas.

Monitorização das ações meteorológicas

As condições meteorológicas influenciam de forma significativa o comportamento da estrutura e, no caso do vento, afetam a operacionalidade da obra de arte. Na realidade, se o efeito da temperatura sobre os diversos elementos da estrutura é evidente, também a evolução da humidade condiciona a durabilidade dos elementos metálicos e o vento poderá, em caso de grande intensidade, diminuir a segurança do tráfego, tornando aconselhável a imposição de restrições ao tráfego.

Face ao exposto, prevê-se a instalação de uma estação meteorológica, que inclua um udómetro, sensores de temperatura e humidade relativa do ar, bem como um anemómetro que permitirá o registo da velocidade e direção do vento. Esta estação meteorológica deverá ser localizada sobre o tabuleiro superior, fixada no mastro de um candeeiro ou poste de catenária, próximo de uma secção de meio-vão.

A temperatura e humidade relativa do ar serão também medidas no interior de ambos os tabuleiros.

A temperatura no interior do betão será medida em duas secções do tabuleiro e numa secção de uma torre, através de termómetros elétricos de resistência do tipo Pt100. Estes sensores serão instalados nas secções selecionadas para a instrumentação com extensómetros no interior do betão. Em cada secção os sensores serão instalados ao longo da espessura das almas e dos banzos, de forma a

caracterizar a evolução da temperatura uniforme e da temperatura diferencial no tabuleiro ferroviário e numa torre.

Caracterização in situ do comportamento diferido do betão

O estudo in situ do comportamento diferido do betão inclui a caracterização da retração e fluência do betão. Este estudo será realizado através de provetes, betonados em simultâneo com a estrutura que permanecerão sujeitos às mesmas condições ambientais da obra. Para este efeito, serão executados três provetes para o estudo da retração e três provetes para o estudo da fluência, em duas secções do tabuleiro superior ferroviário.

Monitorização do comportamento estático

A medição dos deslocamentos verticais no tabuleiro será efetuada através de um sistema de nivelamento hidrostático. Este sistema permitirá a medição dos deslocamentos nas secções de meio vão e de quarto de vão dos 3 tramos compreendidos entre os pilares PF6 e PF7.

Os movimentos dos tabuleiros nas juntas de dilatação refletem a resposta global destes elementos às ondas térmicas anuais e ao comportamento diferido do betão. Nesta Ponte, os movimentos das juntas de dilatação de ambos os tabuleiros serão medidos através de sensores de deslocamento. Em cada junta será instalado um sensor do lado de montante e outro do lado de jusante.

Nos pilares em que o apoio do tabuleiro superior ferroviário se processa através de aparelhos de apoio serão medidos os movimentos do tabuleiro relativamente aos pilares. No caso do tabuleiro inferior rodoviário serão medidos os movimentos do tabuleiro relativamente aos pilares localizados na zona atirantada. Para este efeito, junto a cada aparelho de apoio será instalado um sensor de deslocamento, que, associado à célula de carga integrada em cada aparelho de apoio, permite ter um conhecimento muito rigoroso do comportamento estático nessas secções.

As rotações no topo das torres serão medidas através de clinómetros biaxiais do tipo gravidade, que permitem a medição automática das rotações em duas direções ortogonais com uma resolução superior a 1 segundo sexagesimal.

A medição de extensões no interior do betão permitirá acompanhar a evolução das deformações e, por via indireta, os efeitos da previsível redistribuição de tensões que irá ocorrer devido ao comportamento diferido do betão. A medição destas extensões fornecerá também informação relevante sobre o regular desempenho da obra de arte, contribuindo para a identificação de eventuais anomalias.

Serão instrumentadas com extensómetros três secções: uma secção situada próxima da base de uma das torres, provavelmente na torre T1 e em duas secções do tabuleiro ferroviário, uma próxima desta torre e outra numa secção de terço de vão do mesmo tramo.

Monitorização do comportamento dinâmico

A monitorização do comportamento dinâmico da Ponte é muito relevante numa estrutura com as características estruturais desta obra de arte. A monitorização proposta para este efeito baseia-se na medição de acelerações em diversas secções dos tabuleiros e das torres.

Em ambos os tabuleiros, serão instrumentadas com acelerómetros as secções de meio-vão e de quarto de vão do tramo com 200 m de vão e as secções de meio-vão dos tramos adjacentes. No tabuleiro ferroviário serão também instalados acelerómetros nas secções de apoio nas torres.

Nas secções de meio-vão e de quarto de vão de ambos os tabuleiros acima referidas serão instalados dois acelerómetros orientados verticalmente em cada secção, um do lado de montante e outro no lado de jusante, que permitirão a medição de acelerações associadas a modos de vibração verticais e de torção. Será também instalado um terceiro acelerómetro, orientado transversalmente, de forma a permitir a identificação de modos de vibração nessa direção.

Em cada secção de apoio do tabuleiro ferroviário nas torres será colocado um acelerómetro orientado longitudinalmente, de forma a caracterizar os modos longitudinais, e outro orientado transversalmente. A caracterização do comportamento dinâmico das torres será complementada com a instalação de dois acelerómetros numa secção a meia altura da torre, dispostos no sentido longitudinal da Ponte, um em cada fuste, de modo a efetuar a medição das acelerações associadas a modos de vibração longitudinais e de torção. Nesta secção será também instalado um terceiro acelerómetro para a medição das acelerações transversais.

Os acelerómetros a utilizar poderão ser do tipo force balance, que tenham uma capacidade de medida até $\pm 1g$, com baixo ruído elétrico e uma largura de banda entre DC e 200 Hz.

Os tirantes são elementos essenciais na segurança do tabuleiro rodoviário, pelo que a monitorização do seu estado de tensão se reveste do maior interesse, permitindo identificar eventuais alterações ao longo do tempo. A medição das acelerações nos tirantes, para além permitir a caracterização do seu comportamento mecânico, possibilita a determinação das forças suportadas por cada tirante através do método de vibração.

Para este efeito prevê-se a instalação de acelerómetros em 12 dos 32 tirantes que irão suportar o tabuleiro rodoviário, de forma a constituir uma amostra representativa dos estados de tensão existentes nestes elementos estruturais. Os acelerómetros a utilizar poderão ser do tipo piezoelétrico, com uma sensibilidade de 10 V/g e um intervalo de medição de $\pm 0,5 g$.

No tabuleiro rodoviário serão instrumentadas com extensómetros elétricos de resistência duas secções, situadas nos tramos suspensos. Estes sensores terão um regime de aquisição dinâmico, de forma a quantificar o número de ciclos de tensão e a sua magnitude ao longo da vida da obra, para além da monitorização da evolução das deformações ao longo do tempo, será possível.

Os resultados experimentais obtidos com a monitorização dinâmica prevista permitirão extrair um relevante conjunto de informações associado ao desempenho da obra de arte, designadamente:

- a caracterização da resposta dinâmica da estrutura à ação do vento;
- a caracterização da resposta dinâmica da estrutura a eventuais ações sísmicas;
- a caracterização de níveis de vibração registados nos tabuleiros, decorrentes das ações ferroviárias e rodoviárias;
- a determinação da evolução temporal dos parâmetros dinâmicos mais representativos da estrutura, tendo em vista a deteção de danos estruturais a longo prazo;
- a caracterização dos níveis de vibração num conjunto de tirantes representativo e da evolução temporal dos respetivos esforços axiais.

Monitorização da durabilidade do betão armado

A monitorização das condições do betão para proteger as armaduras da ocorrência de corrosão possibilitará a deteção precoce deste tipo de degradação e o desencadear de medidas mitigadoras. Assim, prevê-se a instalação de sensores de potencial de corrosão (Ecorr), para detetar a despassivação do aço, e de sensores de medida de corrente galvânica em macro-células (Igal) e de resistividade (R), para detetar a penetração de agentes agressivos no betão de recobrimento.

O potencial de corrosão fornece informação direta sobre o estado de corrosão das armaduras, permitindo detetar a despassivação por ação dos iões cloreto e da carbonatação do betão. O potencial de corrosão será medido com um elétrodo de referência de dióxido de manganês, que será colocado junto das armaduras exteriores.

A corrente galvânica será medida em macro-células constituídas por um elétrodo de aço de construção e um elétrodo de aço inoxidável. A configuração da macro-célula será desenhada tendo em conta o tipo de betão e de forma a garantir a sensibilidade adequada para determinar a penetração de agentes agressivos a dois níveis no betão de recobrimento.

A medida da resistividade permite detetar a perda das características do betão de recobrimento enquanto barreira de proteção das armaduras, quer por ação da penetração de agentes agressivos, quer por ocorrência de fissuração no betão. Para medição da resistividade do betão serão colocados sensores de resistência elétrica constituídos por eléttodos de grafite, em dois níveis no betão de recobrimento.

A monitorização da corrosão será efetuada numa secção de uma torre e numa secção do tabuleiro ferroviário. Os diversos sensores serão embebidos no betão do recobrimento, prevendo-se, em cada secção, a instalação de um sensor de potencial de corrosão, bem como dois conjuntos de dois sensores de medida de corrente galvânica em macro-células e de dois sensores resistividade.

O sensor de potencial de corrosão ficará ligado à armadura exterior. Cada conjunto de dois sensores de medida de corrente galvânica em macro-células e de dois sensores resistividade será instalado de forma que um sensor de cada tipo fique à distância de 2 cm da superfície exterior e um outro par de sensores diste 4 cm dessa superfície.

Monitorização das proteções do leito do rio

A monitorização das proteções do leito do rio proposta possibilitará estimar o eventual abaixamento do solo.

A monitorização proposta, a realizar com recurso a perfis batimétricos em cada torre e pilar implantado no leito do rio, compreende o conjunto de trabalhos que se apresenta de seguida:

- Realização de perfis batimétricos para monitorização local que se deverão estender numa área que cubra a faixa de pelo menos 2 m em torno do talude da proteção.
- Realização de um perfil batimétrico após a instalação das proteções.
- Realização de um perfil batimétrico aquando da entrada em funcionamento da obra.
- Realização de um perfil batimétrico a cada dois anos de vida útil da obra ou num intervalo menor sempre que for registada/estimada a ocorrência de um caudal ou velocidade média de escoamento com período de retorno de 10 anos ou mais, no local da ponte.

- Se a comparação entre dois perfis consecutivos, demonstrar uma redução da armadura superior $2D_{50}$, numa área projetada na horizontal superior a $4D_{50}^2$, conforme sugerido por De Boon *et al.* 2004 ou Fazeres-Ferradosa *et al.* (2020), recomenda-se o preenchimento da camada de filtro granular e do enrocamento, nas classes especificadas.
- Na comparação entre perfis, deve ter-se em consideração que pequenas variações topográficas e construtivas podem não ser imediatamente detetáveis, mas agravar-se com o tempo e com a ação hidrodinâmica repetida, especialmente junto a pilares ou transições.
- A comparação entre perfis deve garantir o nível de referência adequado, nomeadamente, identificando, entre perfis, os pontos de referência que garantam que a comparação segue o mesmo referencial.
- Aconselha-se a monitorização para o fenómeno de erosões localizadas noutros pilares que possam não ter sido considerados para proteção, mas que estejam em risco de ser afetados pelo escoamento, nomeadamente, no caso da subida do nível de água na cheia centenária e/ou milenar. Esta recomendação é igualmente aplicável às margens, com especial destaque para a margem Sul por ser do tipo lodosa e arenosa.
- Se possível, deve ser realizada monitorização automática e frequente do fundo do rio, usando quatro sonares por encabeçamento de estacas.

Em virtude de a solução ser encaixada no solo com um ângulo de apenas 18° , a possibilidade de o material de proteção resvalar (em cunha passiva) fica acautelada. Não obstante, importa que as ações de monitorização verifiquem se área em planta se mantém ao longo do tempo de vida útil da obra.

10.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS

A aquisição e transmissão dos valores medidos pela generalidade dos sensores a instalar no âmbito do sistema de monitorização proposto será efetuada de forma automática. Para este efeito serão instaladas diversas unidades de aquisição, um computador industrial e equipamento de comunicação. As unidades de aquisição serão ligadas em rede através de uma rede local de comunicação (LAN) em fibra ótica, sendo a gestão da rede, o processamento da informação recolhida e a sua transmissão assegurada pelo computador industrial a instalar na obra. A concentração do sistema de aquisição será no interior do tabuleiro ferroviário.

As diferentes exigências associadas aos diferentes ritmos de aquisição tornam necessária a instalação de dois sistemas de aquisição: um vocacionado para a monitorização das ações meteorológicas, do comportamento estático e da durabilidade; o outro para a monitorização da resposta dinâmica da estrutura.

O sistema a instalar para a aquisição dos dados relativos à monitorização das ações meteorológicas e do comportamento estático da estrutura irá assegurar uma resolução de 18 bits e uma temperatura de funcionamento até 70°C .

As exigências da aquisição dinâmica, nomeadamente no que se refere à frequência de aquisição, condicionam a escolha do sistema específico para este efeito. Com efeito, o sistema de aquisição dedicado à monitorização dinâmica, para além dos requisitos indicados para a aquisição estática, terá de garantir uma cadência de aquisição de 500 Hz com uma resolução de 24 bits.

Prevê-se a instalação de módulos de canais analógicos ao longo da obra de arte, na proximidade dos sensores. Contudo, a unidade de controlo da aquisição de dados será instalada no interior do tabuleiro ferroviário, como referido, onde serão centralizadas as operações de controlo do sistema de monitorização. Para este efeito, será também instalado neste local um computador industrial que, através da rede local de comunicação, irá concentrar a informação recolhida pelas unidades de aquisição estática e controlar a aquisição dinâmica, gerindo também a transmissão remota de sinal, que se processará graças a um modem a instalar na sua proximidade.

Todas as unidades de aquisição, bem como o computador industrial, e as respetivas fontes de alimentação serão instaladas em armários a instalar especificamente para esse efeito.

10.3 ENSAIOS DE RECEÇÃO DA PONTE

No final da construção da Ponte, e antecedendo a sua entrada em serviço, serão realizados ensaios de receção em ambos os tabuleiros, compreendendo a realização de ensaios estáticos e dinâmicos de vibração ambiente. No tabuleiro ferroviário serão também realizados ensaios de frenagem.

Ensaio estáticos

Os ensaios estáticos consistem na aplicação de sobrecargas significativas, em diversas posições estabelecidas de forma a maximizar os momentos fletores sobre os apoios e secções de meio vão dos diversos tramos.

Em cada carregamento serão efetuadas medições pelos diversos os sensores que integram o sistema de monitorização estrutural, prevendo-se também a instalação de sensores especificamente para o ensaio, designadamente clinómetros para a medição de rotações em diversas secções de ambos os tabuleiros, assim como um sistema de nivelamento geométrico no tabuleiro rodoviário para medição dos deslocamentos verticais.

No tabuleiro ferroviário as cargas de ensaio serão materializadas por duas composições constituídas por uma locomotiva e vagões balastreiros. No tabuleiro rodoviário será mobilizado um conjunto de camiões devidamente carregados.

Ensaio dinâmicos de vibração ambiente

Os ensaios dinâmicos de vibração ambiente têm como principal objetivo a avaliação experimental das características dinâmicas globais da estrutura, nomeadamente, das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos seus principais modos naturais de vibração.

Serão realizados ensaios de vibração ambiente em ambos os tabuleiros, durante os quais serão medidas acelerações em diversas secções da obra de arte. Para este efeito, serão utilizados os acelerómetros incluídos no sistema de monitorização dinâmico que serão complementados por outros acelerómetros para medição da vibração noutras secções relevantes.

Ensaio dinâmicos de vibração livre

Caso os ensaios de vibração ambiente não sejam suficientemente conclusivos na determinação dos coeficientes de amortecimento modais serão realizados ensaios de vibração livre.

Os ensaios de vibração livre serão baseados na libertação súbita de uma massa suspensa dos tabuleiros, sendo os pontos de suspensão criteriosamente escolhidos, de modo a serem

convenientemente excitados os modos de vibração mais relevantes. Estes ensaios visam não só uma confirmação dos parâmetros modais identificados nos ensaios de vibração ambiental, mas sobretudo a identificação rigorosa dos coeficientes de amortecimento modais dos principais modos de vibração, conforme previsto no Caderno de Encargos.

Estes ensaios devem ser realizados sob velocidades de vento inferiores a 5 m/s, de modo que os amortecimentos medidos não comportem uma parcela de amortecimento aerodinâmico significativa.

Ensaios de frenagem

Por fim, com a realização dos ensaios de frenagem pretende-se caracterizar a resposta da estrutura quando sujeita a frenagens de emergência, em particular dos aparelhos de apoio e do sistema concebido para suportar as forças longitudinais.

Para este efeito, será utilizada uma composição circulando a diversas velocidades e em ambos os sentidos de circulação, que irá efetuar uma frenagem brusca sobre o tabuleiro. Nestes ensaios, para além das acelerações medidas pelos diversos acelerómetros que integram o sistema de monitorização, será quantificada a intensidade da força de frenagem através da medição da aceleração da locomotiva. Serão também medidos os deslocamentos longitudinais nos aparelhos de apoio.

11 INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO

O Sistema de Gestão de Obras de Arte a implementar será informatizado, de forma a permitir monitorizar as condições normais de serviço das estruturas e equipamentos, estando previstos o inventário e a inspeção periódica da totalidade das obras de arte incluídas na concessão. O programa informático a utilizar permitirá a partilha de toda a informação com a IP.

Por forma a facilitar os trabalhos de inspeção e manutenção a ponte será dotada dos meios de acesso necessários.

No encontro ferroviário (EF1) e na estrutura de transição (ET) o acesso será efetuado através de um alçapão e uma escada metálica vertical para acesso direto à viga de estribo. Em complemento estas estruturas serão também dotadas de escadas e portas de acesso para permitir a reparação e substituição dos aparelhos de apoio e juntas de dilatação.

Os encontros rodoviários (ER1 e ER2) serão dotados de escadas e portas de acesso para permitir a reparação e substituição dos aparelhos de apoio e juntas de dilatação.

Nos pilares de apoio do tabuleiro ferroviário dotados de aparelhos de apoio o acesso para inspeção e manutenção será efetuado a partir do passadiço do tabuleiro, através de um alçapão e uma escada vertical até uma plataforma a instalar sob o tabuleiro.

O tabuleiro ferroviário superior terá o seu interior acessível, com aberturas nas carlingas sobre os apoios, para permitir a passagem de pessoas e equipamentos necessários à inspeção. A estrutura metálica do tabuleiro rodoviário será dotada de alçapões para inspeção visual do interior das nervuras.

Para a inspeção do tabuleiro ferroviário pelo exterior está prevista a utilização de um equipamento do tipo plataforma móvel. No caso do tabuleiro rodoviário está prevista a utilização de um veículo de inspeção, vulgarmente designado por “*by-bridge*”. Este veículo permitirá, ainda, a inspeção dos aparelhos de apoio instalados nos pilares.