

# **A EXECUÇÃO DAS FUNDAÇÕES DOS PILARES P3 E P4 DA PONTE SOBRE O RIO DOURO, EM CRESTUMA**

## **THE EXECUTION OF THE FOUNDATIONS OF THE COLUMNS P3 AND P4 OF THE BRIDGE OVER RIO DOURO, IN CRESTUMA**

Rosa, Ivo; *Teixeira Duarte S.A., Porto Salvo, Portugal, ir@teixeiraduarte.pt*

Ramos, Paulo Matias; *Teixeira Duarte S.A., Porto Salvo, Portugal, pmr@teixeiraduarte.pt*

Figueiredo, Nuno; *Teixeira Duarte S.A., Porto Salvo, Portugal, nrf@teixeiraduarte.pt*

### **RESUMO**

A presente comunicação pretende descrever e justificar as soluções e os faseamentos construtivos adotados para a execução das fundações dos pilares centrais, localizados sobre o leito do rio, de uma Ponte sobre o rio Douro. Esta obra foi executada no âmbito da construção da nova travessia sobre o rio Douro, a montante da atual barragem de Crestuma-Lever, integrada na A41, entre Picoto (IC2) e o Nó da Ermida (IC25). Serão abordadas as principais opções estruturais e construtivas desenvolvidas e descritos os faseamentos que lhes estão associados, referindo as condicionantes e particularidades geotécnicas bem como as limitações de meios e de acesso que, associadas às especificidades estruturais da obra, estiveram na origem da adoção das decisões tomadas.

### **ABSTRACT**

The following article aims to describe and justify the structural solutions and the construction sequence adopted in the execution of the foundation of the two central columns (placed over water) for a bridge located across the Douro River. This intervention was integrated in the construction of a new bridge over Douro River, located in the Crestuma-Lever Dam reservoir, and integrated in the construction of A41 Highway, between Picoto (IC2) and the Ermida junction (IC25). The main structural and construction options developed will be described along with their structural sequence. This document will describe the importance and the influence of the particular geotechnical specificities of the soil, the access restrictions (to heavy equipment and means) and the structural particularities of the bridge in the main construction choices, taken in order to overcome the major difficulties and to achieve the best possible execution processes.

### **1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A nova travessia sobre o Rio Douro, a montante da atual barragem de Crestuma-Lever, integrada na A41, entre Picoto (IC2) e o Nó da Ermida (IC25), é constituída por uma ponte em pórtico contínuo com dois tabuleiros independentes e vão total de 740 metros, estando dois dos pilares centrais localizados no leito do rio (Figura 1).

O projeto estrutural, desenvolvido pela Armando Rito Engenharia, determinou que as fundações destes dois pilares, P3 e P4, fossem executadas com recurso a 18 estacas de betão armado de diâmetro Ø2.00m, com revestimento metálico definitivo de 16mm de espessura.

As estacas atravessam os estratos arenosos das formações aluvionares e Plio-plistocénico, vindo a ganhar encastramento no substrato xisto-grauváquico.

Estas estacas são encabeçadas por maciços de betão armado com 4.20m de altura e uma geometria em planta de 12m de largura e cerca de 39.60m de comprimento, tendo as extremidades, segundo a dimensão maior do maciço, uma geometria semicircular com 12.0m de diâmetro.

As fundações dos restantes pilares e encontros são materializadas por sapatas assentes diretamente sobre o maciço rochoso.

A presente comunicação fará um enquadramento geológico e geotécnico da zona onde está inserida a ponte, descreverá os processos construtivos adotados para a execução das estacas, a conceção e a colocação da ensecadeira concebida por forma a permitir a execução do maciço a seco, bem como algumas das obras acessórias, tantas vezes esquecidas ou relegadas para segundo plano.

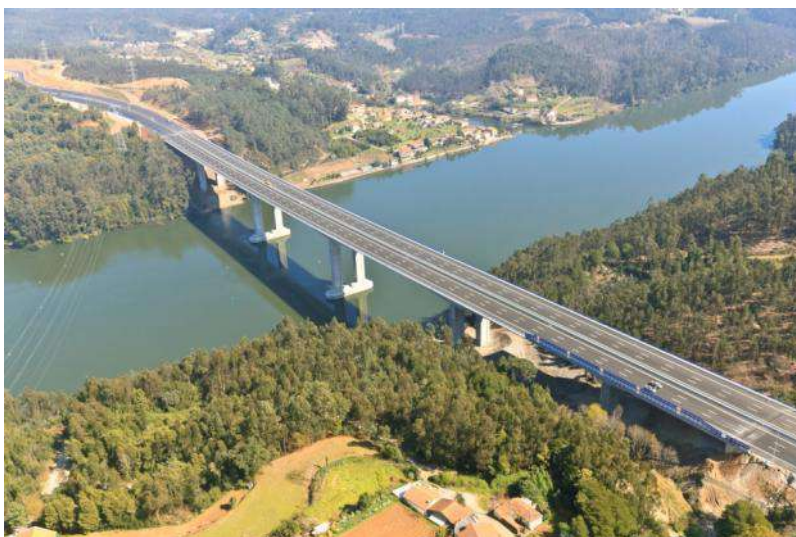


Figura 1 – Vista Geral da Ponte

## 2 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

O estudo das fundações da ponte sobre o Rio Douro, em Crestuma, foi suportado em fase de projeto por uma campanha de prospeção geotécnica e de ensaios *in situ* e laboratoriais, contemplando 21 sondagens mecânicas, 11 perfis sísmicos de reflexão, valas de prospeção nos encontros, ensaios de resistência à compressão uniaxial, entre outros. Na zona dos pilares P3 e P4, estes elementos foram complementados com a informação de uma segunda campanha de prospeção, elaborada com o objetivo de identificar e caracterizar o maciço xisto-grauváquico e assim confirmar os pressupostos de projeto, nomeadamente a profundidade das estacas e o seu comprimento de encastramento.

Esta campanha complementar envolveu a execução de 27 sondagens mecânicas que, conjuntamente com as 9 sondagens executadas na fase inicial, permitiu a implementação de uma sondagem por cada uma das 36 estacas dos pilares P3 e P4.

Para além dos ensaios de penetração dinâmica nas formações arenosas e dos ensaios de compressão simples sobre as amostras colhidas no substrato rochoso, esta última campanha contou ainda com a execução de duas sondagens com amostragem integral, uma em cada um dos pilares P3 e P4, com furação dupla coaxial e introdução no furo interior de um elemento rígido solidarizado à rocha envolvente com resinas epoxídicas, permitindo a obtenção de amostras orientadas e “integrais” do maciço rochoso.

Resumidamente, o local onde está inserida a ponte é caracterizado pela ocorrência de formações metamórficas xisto-grauváquicas, recobertos por horizonte Plio-Plistocénico, formado por depósitos de terraço fluviais.

Nas zonas dos pilares P3 e P4, sobre as formações xisto-grauváquicas ocorrem formações aluvionares arenosas que exibem espessuras de 22.0m a 27.0m junto ao pilar P3 e de 21.0m a 28.0m junto ao pilar P4.

As formações aluvionares são constituídas por areias médias a grosseiras, por vezes com areão e seixos rolados, amarelas, passando a areias médias a finas, cinzentas, na transição para os xistos luzentes, cinzentos-escuros, do Complexo Xisto-Grauáquico.

## 3 - DESCRIÇÃO DAS ESTACAS DE FUNDAÇÃO DOS PILARES P3 E P4

As estacas dos pilares P3 e P4 localizam-se no leito do Rio Douro a cerca de 90.0m e 130.0m das margens. As estacas têm um diâmetro nominal de 2.0m e um comprimento efetivo entre 24.0m e 36.0., acrescido da altura da lâmina de água, que é de cerca de 15.0m.

A reduzida compactidade das areias e os riscos associados à sua eventual instabilização, durante os trabalhos de perfuração na rocha, foram determinantes na decisão de levar o entubamento metálico definitivo até ao topo do substrato rochoso.

A solução construtiva adotada para a execução das estacas, tendo em conta os condicionamentos geométricos da eclusa da barragem de Crestuma Lever, da elevada altura da lâmina de água e do

posicionamento das estacas em relação à margem, consistiu na cravação dos tubos metálicos com vibrador hidráulico suspenso em grua de lagartas e na subsequente furação através do interior dos tubos com equipamento de furação colocados em pontões flutuantes.

Para a ligação entre as margens e os maciços dos pilares foram construídos passadiços provisórios, permitindo a circulação de pessoas e o transporte de betão e de energia elétrica, necessários para a execução dos trabalhos.

### 3.1 - Estaleiro, cais de embarque e meios flutuantes

Para além dos estaleiros centrais e industriais, a obra contou com a disponibilização de dois cais para o embarque de equipamento e de materiais.

O cais existente na antiga central termoelétrica da Tapada do Outeiro, propriedade da REN e localizado na margem direita a cerca de 400m da frente de trabalho, foi escolhido para a instalação do estaleiro de frente e do estaleiro de produção das armaduras e a partir do qual foram feitas as cargas das gaiolas para os pontões.

O elevado desnível entre a cota do cais e a cota do convés do pontão inviabilizou a sua utilização para o embarque dos equipamentos, obrigando a deslocação do local de embarque para o cais da Várzea do Douro, a cerca de 27Km a montante do local da obra (Figura 2).



Figura 2 – Cais de Embarque da Várzea do Douro

A eclusa da barragem de Crestuma Lever, que restringe a eclusagem a embarcações até 11.4m de boca e 3.8m de calado, condicionou a utilização de pontões com largura superior ao indicado e levou à adoção de um pontão modular, transportado por via terrestre até ao local da obra e montado na água a partir do cais de embarque da Várzea do Douro (Figura 3).



Figura 3 – Instalação da Grua no Pontão

O pontão modular projetado para suportar a grua de 2.0MN e o equipamento de furação de 300KNm de *torque*, apresentava uma área total de 36.58m x 17.07m e 1.83m de altura e estava equipado com quatro *spudlegs* de 22.0m de comprimento, para estabilização no leito. Para o transporte dos materiais, nomeadamente dos tubos e das armaduras, foi utilizado um batelão auxiliar de apoio com 51.25m x 7.7m x 2.63m.

A necessidade de aumentar os rendimentos de execução das estacas, devido aos constrangimentos inerentes ao aprovisionamento dos tubos metálicos, levou à instalação de um segundo pontão de menores dimensões, reforçado com flutuadores laterais, onde se instalou o equipamento de furação.

### 3.2 - Passadiços de acesso aos pilares do rio

Para acesso de pessoas e para o transporte do betão, água e energia elétrica até junto do local dos pilares P3 e P4, foram construídos dois *jetties* concebidos em estrutura metálica modular apoiada em estacas materializadas por tubos metálicos de Ø820mm, afastadas de 12.0m e cravadas nas formações arenosas do leito do rio, com cerca de 9.0m de comprimento (Figura 4).

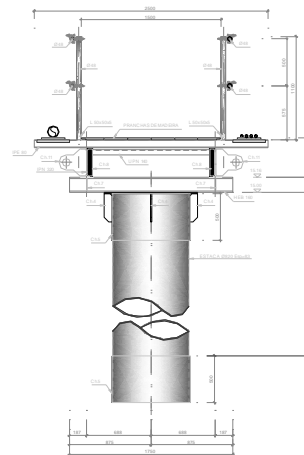


Figura 4 – Passadiço Metálico da Margem Direita

O tabuleiro metálico, formado por 2 vigas IPN320, devidamente contraventadas no seu plano horizontal, comportava uma zona de circulação de 1.50m de largura, pelo qual se procedia o acesso de trabalhadores, e uma altura livre entre o nível de pleno armazenamento da albufeira e a parte inferior das vigas metálicas de cerca de 2.0m. Nas zonas exteriores ao guarda corpos, foi montada uma linha com tubagem metálica de alta pressão Ø125mm para o transporte do betão, um tubo corrugado para infraestruturas elétricas e um tubo de 2" para circulação de água (Figura 4).

As estacas foram cravadas por meio de um vibrocravador suspenso numa grua de lagartas e trabalhando sobre um pontão. A estrutura do passadiço foi pré-montada nas margens em módulos de 12.0m e colocada sobre as estacas metálicas previamente cravadas.

### 3.3 - Tubos de revestimento

As estacas dos pilares P3 e P4 foram executadas com recurso a revestimento metálico definitivo. Os tubos de revestimento têm um diâmetro nominal de 2050mm e 16mm de espessura de parede. As extremidades dos tubos foram reforçadas com anéis metálicos numa extensão de 0.5m. Este reforço decorre da necessidade de proteger as extremidades dos tubos durante o atravessamento dos estratos mais compactos e perante a ação das pinças do vibrocravador.

Os tubos foram fabricados e soldados em troços de cerca de 20m e transportados em batelões até ao local dos trabalhos, necessitando assim de apenas uma soldadura, executada *in situ* (Figura 5). Com o decorrer dos trabalhos e perante as dificuldades encontradas com a penetração dos tubos topo a topo devido ao aumento de compactidade das areia por efeito da vibrocavação, decidiu-se aumentar para três, o número de troços de tubo para cada estaca, o que implicou o aumento do número de soldaduras realizadas *in situ*.



Figura 5 – Transporte dos tubos

Os tubos, suspensos em grua de lagartas de 2.0MN, foram descidos até ao leito do rio, penetrando parcialmente nas areias com o seu peso próprio e fazendo os ajustes necessários de posicionamento e de verticalidade. Cravado o primeiro troço com recurso a um vibrocravador do tipo PTC-120HD, os tubos foram prolongados com os troços subsequentes com recurso a soldaduras topo a topo e submetidos a ensaios através de ultra sons (Figura 6).



Figura 6 – Cravação e soldadura dos tubos

Tendo em atenção as baixas tolerâncias de implantação das estacas, o posicionamento dos tubos foi feito utilizando um "gabarit" de guiamento fixo no pontão (Figura 7). A sua verticalidade e o controlo final foram feitos com recurso a leituras topográficas.

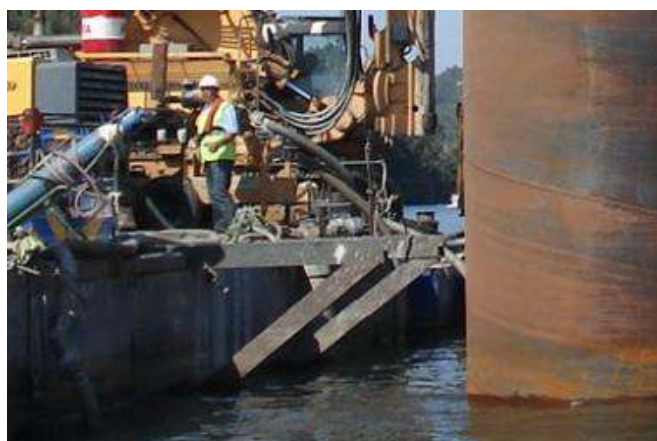


Figura 7 – Gabarit de guiamento das estacas

Sempre que necessário a vibrocravação foi complementada com a furação das areias pelo interior dos tubos, utilizando *grabs* de escavação, bombas de sucção com injeção de água ou através do sistema *jet water air lift*. Apesar da simplicidade do processo, já que qualquer um dos sistemas referidos podia ser movimentado através da grua principal, a compactação subsequente das areias associada à vibração transmitida ao terreno durante a própria cravação do tubo, aumentando as dificuldades de desagregação desse material, levou à adoção da solução de perfuração com baldes de escavação ligados a varas *Kelly* múltiplas, montadas no equipamento de furação Bauer BG30 (Figura 8).

Os tubos foram cravados até ao afloramento do substrato rochoso, sendo a sua penetração limitada às camadas superficiais mais alteradas, evitando assim a ovalização ou danificação da base do tubo, apesar do reforço executado.



Figura 8 – Limpeza com *Jet Water Air Lift* e Furação com Balde e Vara *Kelly*

Nas situações em que a dureza e a inclinação da superfície de contacto impediram a penetração de todo o contorno do tubo na rocha, foram executadas furações em avanço com recurso a trados rocha ou a *carotiers*, prosseguindo posteriormente com a sua recravação. É importante salientar a importância das informações obtidas através das sondagens mecânicas em cada ponto da estaca uma vez que estas se revelaram determinantes no sucesso destas operações.

As medidas referidas no ponto anterior são de extrema importância na qualidade de execução de estacas com esta metodologia uma vez que a não penetração de toda a periferia do tubo no substrato rochoso poderá conduzir à constituição de janelas, propiciando a entrada de areias e provocando o assoreamento do furo.

### 3.4 - Furação, colocação de armaduras e betonagem das estacas

A profundidade das estacas e o seu comprimento de encastramento foram definidas, estaca a estaca, tendo em conta as cargas atuantes e as características geomecânicas exibidas pelo substrato rochoso, nomeadamente a resistência à compressão, módulo de deformabilidade, grau de alteração e de fracturação.

Os comprimentos de encastramento definidos em projeto e executados em obra, variaram entre 2.2m e 6.9m o que traduz bem o reduzido rigor associado à utilização sistemática da regra dos três diâmetros da estaca (6.0m), habitualmente definida nas condições gerais inseridas nos cadernos de encargos.

Este aspeto torna-se especialmente relevante tendo em conta o facto de, tal como referido anteriormente, a furação de encastramento no substrato rochoso ter sido efetuada através de ferramentas especiais de corte, nomeadamente os trados progressivos para rocha e os *carotiers*, cuja utilização é bastante onerosa e demorada.

O sucesso na vedação do furo nos xistos, impedindo a entrada franca das areias, permitiu a conclusão da furação sem necessidade de utilização de fluidos estabilizadores poliméricos ou bentoníticos. Contudo e por forma a evitar a sedimentação subsequente das partículas mais finas em suspensão, foi necessário proceder-se à reciclagem da água no interior do tubo, utilizando para o efeito uma bomba de sucção. Esta operação é morosa mas fundamental para a qualidade final da estaca.

As armaduras das estacas foram fabricadas em estaleiro junto ao cais da REN, em dois troços de cerca de 20.0, com a execução de um empalme em obra (Figura 9). Para além da armadura propriamente dita, foram deixados negativos metálicos de 3" de diâmetro, para a posterior execução de ensaios de verificação da continuidade e homogeneidade do fuste das estacas, através da tecnologia de diagrafia sónica.



Figura 9 – Aplicação de um troço de armadura e pormenor dos empalmes

É importante referir que as operações associadas à suspensão, movimentação, posicionamento e introdução das armaduras no interior do tubo de revestimento das estacas foram objeto de projetos específicos executados no sentido de dimensionar todas as estruturas auxiliares necessárias ao sucesso destas operações (Figura 10).

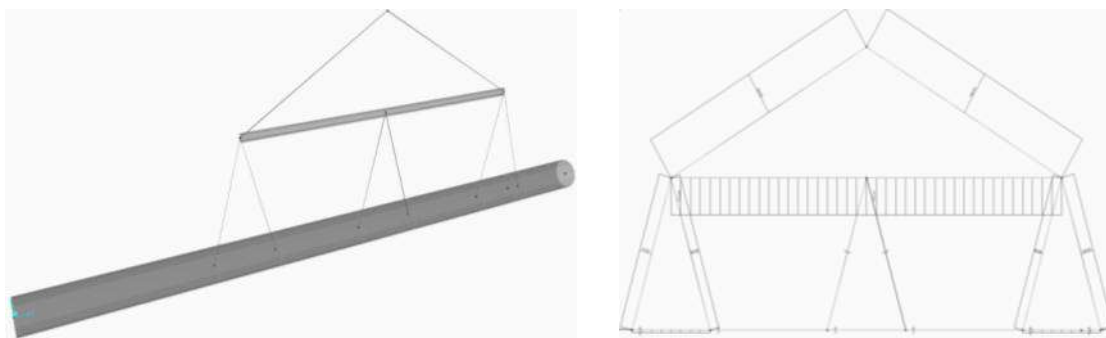


Figura 5 – Modelo de cálculo para dimensionamento da balança de suspensão necessária à movimentação e posicionamento das armaduras das estacas

A betonagem foi a etapa final de execução das estacas. O betão foi colocado utilizando a técnica de betão submerso com recurso a tubos *tremie*, sendo o seu transporte até à boca do furo feito através das linhas de bombagem montadas nos passadiços provisórios, utilizando bombas de betão do tipo Putzmeister 1408D e 1409D (Figura 11).



Figura 11 – Linhas de bombagem e colocação do betão com tubos *tremie*

#### 4 - MACIÇOS DE ENCABEÇAMENTO

O projeto de execução da ponte contempla a execução de maciços de encabeçamento, funcionando como elementos de transição das estacas de fundação para os pilares P3 e P4. A cota da base destes maciços está a cerca de 2.7m abaixo do nível de pleno armazenamento e a cerca de 1.0m abaixo do nível médio da albufeira.

A elevada altura da lâmina de água, com cerca de 15.0m, e a elevada permeabilidade das formações aluvionares do leito do rio, desaconselharam a utilização de ensecadeiras com estacas prancha abrindo caminho para a conceção de uma solução que permitisse a betonagem dos maciços a seco e sem necessidade de realização de extensos trabalhos subaquáticos e de impermeabilização. A solução preconizada para a execução dos maciços de encabeçamento das estacas dos pilares P3 e P4 assentou na montagem de um "cofre" que, dotado de um rolhão em betão armado (executado por betonagem submersa), foi concebido por forma a funcionar como elemento de cofragem perdida permitindo a execução dos trabalhos, inerentes à construção do maciço, "a seco".

A montagem dos dois "cofres" (um por maciço) e o seu posicionamento no local foi efetuada através de uma grua de rastos de 1.1MN, operando sobre uma plataforma flutuante com 45.0 x 10.0m. A limitação associada à capacidade de elevação da grua, foi ultrapassada concebendo peças com dimensões e peso passíveis de movimentação em segurança. Este facto esteve na origem da segmentação do cofre em 23 peças pré-fabricadas com peso compatível com as capacidades da grua em causa.

Esses elementos eram constituídos por 10 peças primárias, dotadas de laje de fundo e paramento vertical de apenas 3m de altura (por questões associadas às limitações de peso de cada peça), e 13 peças secundárias que funcionavam como complemento de altura (1.70m) dos paramentos verticais das 10 peças primárias. Este facto implicou a necessidade de prever sistemas de acoplagem entre peças, previamente posicionadas segundo uma sequência definida, que lhes conferisse uma ligação compatível com o seu funcionamento em conjunto. Estes elementos de betão armado foram pré-fabricados em estaleiro, transportados para o local por meios aquáticos e posteriormente posicionados sobre os sistemas de transferência de carga (figura 12).|

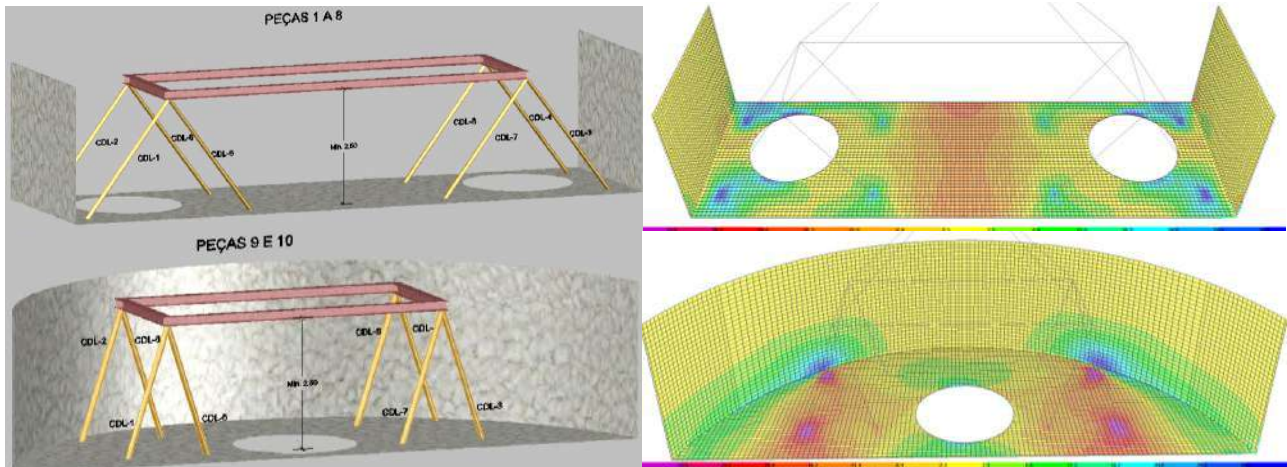


Figura 12- Imagem dos elementos pré-fabricados (primários) armazenados em estaleiro

A conceção de todo este sistema foi executada tendo em conta a envolvente de esforços máximos associada à simulação de todas as situações decorrentes do processo de transporte e posicionamento dos elementos pré-fabricados do "cofre". Para o efeito, desenvolveram-se modelos tridimensionais de cálculo que permitiram efetuar o dimensionamento das peças pré-fabricadas de betão armado e dos elementos estruturais necessários à sua suspensão (olhais, cadernais, rigidificadores e quadros metálicos de suspensão), aferindo os esforços de elevação (e a distância operacional que lhes está associada) com a capacidade das guias. Com a elaboração desses modelos computacionais obtiveram-se previsões detalhadas das forças de elevação associadas a cada peça pré fabricada de betão armado. As primárias, com pesos entre 290kN e 414kN, implicaram forças máximas de suspensão nos cadernais de 217kN e as secundárias, com pesos de aproximadamente 70kN, implicaram cargas máximas de suspensão nos cadernais de 35kN (Figura 13).

A elevação e posicionamento controlado das peças primárias do "cofre", alinhando os negativos das lajes de fundo em torno das estacas de betão armado (previamente executadas), foi feito com auxílio de uma estrutura de suspensão, constituída por um quadro metálico em perfis HEB280 e por oito cadernais de 100kN e 250kN e respetivos olhais de suspensão. (Figura 13).





CARGAS MÁXIMAS DE SERVIÇO PARA DIMENSIONAMENTO DOS ESTROPOS E DOS CADERNAS MAIS CARREGADOS DURANTE AS ACÇÕES DE SUSPENSÃO/MOVIMENTAÇÃO DE CADA PEÇA DO "COFRE"									
PEÇA	Peso das peças	Espaçamento entre olhais de extremidade	Dist. min. entre laje do cofre e a balança	<Ângulo do cadernal com a horizontal xx	Carga de serviço máxima para equilíbrio global nos 8 pontos de suspensão	Carga de serviço máxima para equilíbrio global nos 8 pontos de suspensão majorada de 1.2	Carga de serviço máxima em cada cadernal (equilíbrio em 3 pontos)	Carga de serviço máxima em todos os Cadernais da peça	Carga de serviço máxima nos Estropos de suspensão ao cadernal da Grua
(-)	(kN)	(m)	(m)	(°)	(kN)	(kN)	(kN)	(TON)	(TON)
Peças 1 e 2	330.1	3.5	2.5	55.0	65.0	78.0	134.3	13.4	14.4
Peças 3 e 4	289.7	3.5	2.5	55.0	55.0	66.0	117.9	11.8	12.6
Peças 5 e 6	322.4	3.5	2.5	55.0	65.0	78.0	131.2	13.1	14.0
Peças 7 e 8	289.9	3.5	2.5	55.0	56.0	67.2	118.0	11.8	12.6
Peças 9 e 10	413.9	1.5	2.5	73.3	155.0	186.0	216.0	21.6	27.0

Figura 13- Perspetivas de alguns modelos de cálculo usados para o dimensionamento e suspensão das peças primárias do "cofre"

Os 10 elementos primários de cada "cofre" foram posicionados e acoplados, entre si, seguindo metodologias e faseamentos criteriosos, após a sua prévia colocação sobre alinhamentos de vigas metálicas HEB300 (figura 14).



Figura 14- Perspetiva do modelo de cálculo usado para definir a sequência de colocação dos elementos primários do cofre sobre as vigas metálicas HEB300, já devidamente posicionadas sobre os anéis de transferência de carga

De salientar que o posicionamento das peças pré-fabricadas de betão armado sobre essas vigas metálicas foi precedido da colocação de "anéis" metálicos de suporte, montados a uma cota altimétrica compatível com o correto posicionamento do maciço, tal como previsto no Projeto de Execução da Ponte. Esse facto implicava a montagem submersa desses anéis, a uma cota sensivelmente 3.7m abaixo do nível de pleno armazenamento da albufeira, que corresponde a 2m, abaixo do seu nível médio (sensivelmente igual ao nível de água durante a execução dos trabalhos).

Os "anéis" do sistema de transferência de carga eram constituídos por conjuntos de chapas metálicas, sendo algumas calandradas por forma a envolver os tubos de revestimento das estacas de betão armado, tendo sido dimensionados de modo a poder transmitir o peso dos elementos estruturais constituintes do "cofre" às estacas de fundação (previamente executadas). Estes elementos implicaram a conceção de sistemas de conexão, entre os referidos "anéis" e as estacas, recorrendo a "uniões de aperto por esmagamento", materializadas pela utilização de ligações aparafusadas pré-esforçadas, de fácil aplicação submersa (com recurso a mergulhadores). O pré-esforço que assegura a transmissão de carga entre os dois elementos (estaca/anel) foi materializado pela aplicação de torque a 18 parafusos M36 (com um valor mínimo de projeto de 500Nm), mobilizando o aperto relativo das duas metades constituintes de cada anel (uma contra a outra) e, conseqüentemente, uma pressão radial de aperto do sistema em cada tubo de revestimento das estacas. A conceção deste sistema de transferência foi elaborada com auxílio de modelos tridimensionais de cálculo, nos quais foram dimensionadas as peças constituintes e os esforços de aperto necessários à estabilidade da solução (Figura 15).

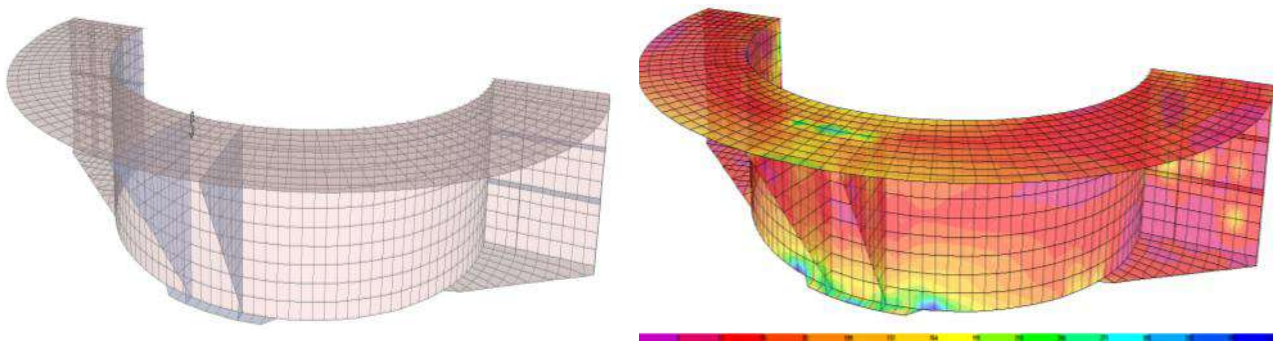


Figura 15 – Imagens ilustrando o início do posicionamento submerso dos anéis metálicos e perspectivas do modelo de cálculo adotado no dimensionamento (estrutura indeformada e diagrama das tensões de Von Mises)

Na Figura 16, é ilustrado o início do posicionamento submerso dos anéis metálicos.



Figura 16 – Imagens ilustrando o início do posicionamento submerso dos anéis metálicos

As peças primárias constituintes do cofre de betão armado pré-fabricado foram posteriormente posicionadas sobre outros anéis metálicos de betonagem, forrados com uma camada de neoprene de 3mm de espessura, posicionados sobre os alinhamentos de perfis metálicos HEB300, previamente dispostos segundo a maior dimensão do maciço ( $\pm 39.6\text{m}$ ) (Figura 17).



Figura 17- Sistema de suspensão e posicionamento sequencial das peças primárias, pré-fabricadas, do "cofre"

Cada um dos elementos primários pré-fabricados era constituído por uma peça base específica, incorporando uma laje de fundo com 0.20m de espessura e paredes laterais, também com 0.20m de espessura e 3.0m de altura. A geometria final do "cofre" foi complementada em segunda fase pela colocação de um segundo nível de painéis, com 1.70m de altura, acoplados às peças base, garantindo assim uma altura útil de betonagem para o maciço de 4.20m (descontando os 0.20m de espessura da laje de fundo das peças e os 0.30m do rolhão de fundo garantiam-se os 4.20m necessários para o maciço de Projeto). A geometria interna da laje do cofre, após acoplagem das peças que o constituem, apresentava uma geometria em planta idêntica à da base do maciço, mas dotada de negativos no local de implantação das estacas de fundação (Figura 18).



Figura 18- Imagens ilustrativas da conclusão dos trabalhos de posicionamento das peças primárias do cofre

Após posicionamento e acoplamento das 10 peças primárias do cofre, procedeu-se à sua selagem/ligação aos tubos metálicos de revestimento das estacas de fundação. Para essa operação recorreu-se a uma argamassa de alta resistência passível de aplicação submersa. Com a selagem das aberturas existentes na laje, procedeu-se à execução do rolhão de fundo do cofre, com 0.30m de espessura, recorrendo igualmente à técnica de betonagem submersa.

Com o rolhão de fundo executado, procedeu-se à bombagem da água existente no interior do "cofre" de modo a permitir a execução dos trabalhos subsequentes a seco. Desses trabalhos destacam-se o corte dos tubos metálicos de revestimento das estacas (acima da cota de topo do rolhão), o saneamento do betão à cabeça das estacas, a colocação das armaduras e início da 1ª fase de betonagem do maciço de encabeçamento das estacas.

De salientar que o rolhão de fundo foi dimensionado para a envolvente dos esforços resultantes da combinação com ação de base adveniente da impulsão hidrostática, gerada após bombagem da água no interior do cofre, e dos esforços resultantes da combinação com ação de base proveniente do peso inerente à betonagem máxima de 1.00m de altura de maciço (Figura 19).

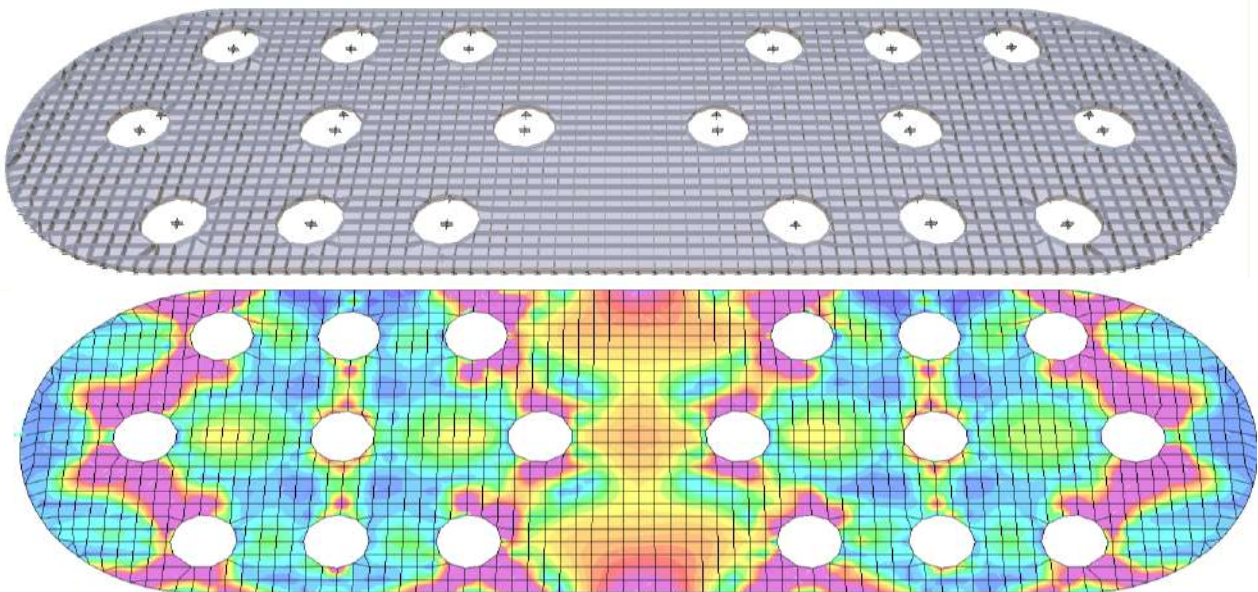


Figura 19 - Modelo e envolvente de esforços (segundo a direção longitudinal do maciço) para o rolhão de fundo

A betonagem do maciço de encabeçamento das estacas foi realizada em três fases, após saneamento da cabeça das estacas e montagem das armaduras do maciço de encabeçamento das estacas (Figura 20). A betonagem da primeira fase foi efetuada com 1.0m de altura, após a qual foram montados e acoplados os painéis secundários do "cofre" (um total de 13 elementos pré-fabricados com 1.70m de altura). Após o endurecimento do betão correspondente à primeira fase de betonagem, executaram-se as betonagens subsequentes, com 1.70m e com 1.50m, até atingir a altura total de 4.20m (Figura 21).



Figura 20 – Montagem das armaduras do maciço de encabeçamento das estacas



Figura 21 – Conclusão da betonagem do maciço e “arranque” dos pilares da ponte

Todas as operações referidas neste capítulo foram executadas após desenvolvimento de inúmeros projetos (comumente designados como auxiliares) que, elaborados em estreita colaboração com a frente de obra, visaram o dimensionamento dos elementos estruturais secundários e a definição dos faseamentos de execução por forma a adotar soluções construtivas que se revelassem eficientes face a todas as condicionantes existentes.

## 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A organização do estaleiro e o dimensionamento dos meios de execução das estacas de grande diâmetro no leito do rio estão profundamente dependentes das soluções construtivas projetadas. Na situação específica da Ponte sobre o Rio Douro, em Crestuma, em que dois dos seus pilares estão localizados na albufeira da barragem, as fortes restrições inerentes à instalação dos meios flutuantes e dos equipamentos foram condicionantes na definição do próprio processo construtivo das estacas e dos respetivos maciços de encabeçamento.

A implementação de estruturas acessórias, tais como os *jetties* de ligação entre as margens e os locais de construção dos pilares, permitindo a circulação de pessoas e o transporte de betão e energia elétrica necessários para os trabalhos relevaram-se cruciais para o desenvolvimento dos trabalhos subsequentes.

A preconização da solução de cofres em elementos pré-fabricados, funcionando simultaneamente como ensecadeira e como cofragem para a execução do maciço de encabeçamento das estacas, permitiu, não só realizar os trabalhos abaixo do nível das águas da albufeira, a seco, mas também, prescindir da execução das tradicionais ensecadeiras em estaca prancha.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DLACE – Douro Litoral ACE e ao DLOEACE – Douro Litoral Obras Especiais ACE, a permissão para a publicação desta comunicação.