

## UM CASO DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS: ATERRO ARMADO COM GEOGRELHAS APOIADO EM ESTACAS CRAVADAS

### A CASE OF SPECIAL FOUNDATIONS: REINFORCED GEOGRID FILL SUPPORTED IN PREFABRICATED HAMMER DRIVEN PILES

Vieira, Carlos, *Lisconcebe - Consultadoria de Projectos de Engenharia, S.A., Lisboa, Portugal, carlos.vieira@lisconcebe.pt*

Vaz, Nuno, *Lisconcebe - Consultadoria de Projectos de Engenharia, S.A., Lisboa, Portugal, nuno.vaz@lisconcebe.pt*

#### RESUMO

A Estação de Tratamento de Águas (ETA) da Boavista das Águas do Mondego, está inserida no sistema multimunicipal de abastecimento de água e saneamento do baixo Mondego-Bairrada. A obra localiza-se em Coimbra, junto ao rio Mondego, na sua margem direita à saída da Ponte Rainha Santa Isabel. A zona de intervenção é marcada pela presença de uma extensa planície aluvial, de natureza arenosa, areno-siltosa com intercalações de níveis lodosos pouco espessos. Apresentam-se os estudos geológicos e geotécnicos efectuados e a solução de fundações especiais adoptada para as plataformas e para os órgãos em geral, com recurso a aterros armados com geogrelhas e estacas cravadas pré-fabricadas. O dimensionamento e os estudos são complementados com os aspectos mais relevantes da execução deste tipo de fundações e pelo acompanhamento técnico dado pelo projectista para adaptar o projecto às condições em obra.

#### ABSTRACT

The Station Water Treatment (ETA) of Boavista of Águas do Mondego, is inserted into the multi-municipal system of water supply and sanitation in baixo Mondego-Bairrada. It is located in Coimbra, nearby the Mondego river, in the right bank of the Rainha Santa Isabel Bridge. The project area is characterized by the presence of an extensive alluvial plain of a sandy, sandy-silt with intercalations of silt levels slightly thick. Are presented in this paper, the geological and geotechnical studies carried out and the solution adopted for special foundations for the platforms and the organs in general, using reinforced geogrid fill supported in prefabricated hammer driven piles. The design and studies are complemented with the most relevant aspects of the implementation of this type of foundation for monitoring and technical assistance provided by the designer in order to adapt the project to the real conditions “in situ”.

#### 1. INTRODUÇÃO

O presente artigo refere-se aos estudos e assistência técnica às fundações dos Edifícios e Órgãos da ETA e do aterro especial reforçado com geogrelhas, a executar para a implantação desses elementos.

Estes estudos foram desenvolvidos na modalidade de concepção-construção para o consórcio MonteAdriano, Somague e Efacec Ambiente.

Neste artigo será dado especial ênfase ao dimensionamento das estacas cravadas através de um modelo numérico pelo método dos elementos finitos, à execução da plataforma de aterro

reforçado com geogrelhas para a transferência de carga e aos estudos geológicos e geotécnicos complementares efectuados em fase de obra. Para atravessamento da baixa aluvionar recorre-se a uma solução de estacas pré-fabricadas cravadas a partir de plataformas de saneamento e de arranque dos aterros.

Os estudos para o concurso de concepção construção foram efectuados entre Janeiro e Fevereiro de 2007, sendo a primeira versão do Projecto de Execução desenvolvido após a adjudicação da obra no primeiro trimestre de 2008, incluindo-se a prospecção geotécnica logo realizada em Janeiro. Os trabalhos da empreitada propriamente dita para as obras de fundações tiveram início no mês de Março de 2008, concluindo-se as estruturas no mês de Julho de 2009.

A necessidade de cedo se iniciar a obra, não obstante o curto prazo para a apresentação do Projecto de Execução, levou a que fossem entregues os estudos de forma faseada, pelo que se optou por uma subdivisão entre; i)Aterro e Fundações Especiais, seguida das várias ii)Estruturas Internas.

Naturalmente que na vertente do Projecto de Execução de Aterro e Fundações Especiais foram desde logo consideradas nas análises tensão-deformação, as acções transmitidas pelas estruturas internas dos órgãos e edifícios constituintes da ETA. Por razões de garantia de adequado funcionamento do conjunto da plataforma de implantação da ETA, a solução de fundações foi estendida à totalidade das edificações, órgãos e arruamentos.

## 2. CONDICIONALISMOS

### 2.1. Implantação

A ETA localiza-se em Coimbra na margem direita do rio Mondego junto à ponte Rainha Santa nas imediações do edifício sede das Águas do Mondego. (Figura 1). Os principais condicionalismos de implantação dos diversos órgãos constituintes da ETA dizem respeito à proximidade do rio Mondego e à cota de implantação dos mesmos que irá obrigar à execução de plataformas de aterro com substituição de solo em algumas zonas. Esta especialidade foi desenvolvida sobre a solução de Projecto Base de processo da HIDROPROJECTO, apresentada a concurso, não se tendo alterado o “lay-out” geral.



Figura 1 - Vista Geral da localização da ETA antes dos trabalhos

## 2.2. Geologia e Geotecnia

Foram executadas duas campanhas de prospecção geológica geotécnica com o intuito de caracterizar os terrenos envolventes da zona a intervir. No total das duas campanhas foram executadas 9 sondagens mecânicas à rotação acompanhadas de 71 ensaios SPT, um ensaio DMT e outro CPTU nas aluviões do rio e 8 poços de prospecção com recolha de amostras para ensaios laboratoriais. O nível freático foi definido em torno da cota 18, ligeiramente abaixo da cota da superfície do terreno existente.

Foi definido um cenário geológico-geotécnico (Figura 2), com os parâmetros geomecânicos indicados no Quadro 1.

Quadro 1 – Cenário Geológico-Geotécnico e Parâmetros Geomecânicos de cálculo

Designação	Descrição	$c'$ (kPa)	$\Phi'$ (°)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E'$ (MPa)
At(*)	Aterro	20	36	19 - 20	20 - 25
ZG2B e ZG2C	Solos arenosos soltos a muito soltos	-	30	16 - 17	10 - 20
ZG3	Solos arenosos medianamente compactos	-	33	18 - 19	30 - 50
ZG1B	Arenitos friáveis	-	40	21 - 22	200 - 300
ZG1A	Arenitos medianamente alterados (W3)	40	45	22 - 24	>400

(\*) características exigidas ao aterro a realizar

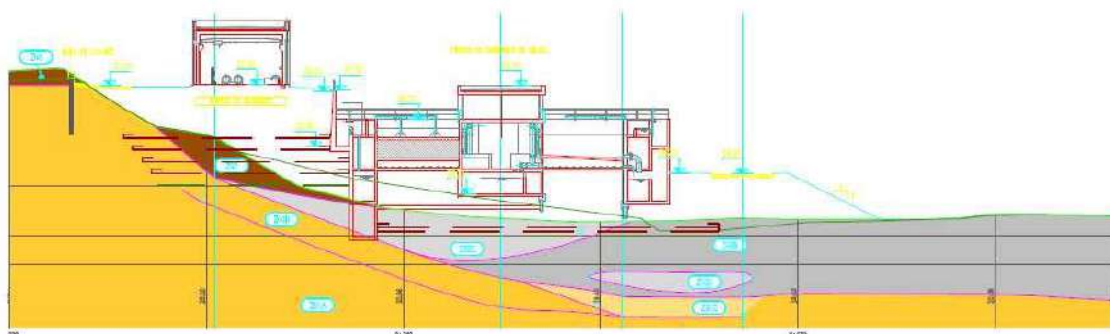


Figura 2 – Corte Transversal Tipo sobreposto com cenário geológico-geotécnico

## 3. DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO

Face à volumetria dos edifícios e órgãos a executar e à cota de implantação dos mesmos previu-se a execução de um aterro composto por material arenítico, reforçado com geogrelhas biaxiais e uniaxiais em certas zonas particulares. A escolha do material resultou, entre outros aspectos, de uma grande escavação para a implantação de um reservatório integrado no mesmo empreendimento. Este aterro é fundado em estacas quadradas pré fabricadas e cravadas nos terrenos arenosos, predominantemente soltos (ZG2B).

A malha destas estacas é de cerca de 4,5 a 5,0m de lado, em quicôncio em função da carga actuante em cada estrutura, o que resulta uma área de influência por estaca de cerca de 12,5m<sup>2</sup>. O comprimento das estacas resulta variável em função do terreno encontrado em cada zona, com uma estimativa inicial de 12,0m no máximo e 3,0m como comprimento mínimo. Estas estacas foram dimensionadas para cargas verticais de serviço até 1200kN. Para alguns órgãos,

nomeadamente os que se localizam acima da estrutura dos filtros de carbonato de cálcio, apenas está previsto a realização do aterro assente directamente na camada ZG1B.

As geogrelhas são colocadas para a rigidificação dos aterros, armando-os e garantindo uma eficiente redistribuição por áreas maiores das cargas transmitidas à superfície. Esta concepção permite uma muito eficiente degradação das cargas conferindo aos aterros algum confinamento lateral interno pelas forças de coação que se instalam nas geogrelhas.

Nos aterros fundados sobre a baixa aluvionar e conseqüentemente sobre as estacas cravadas, as geogrelhas asseguram o funcionamento do aterro em arco, conferindo-lhe a corda inferior à tracção, e conduzindo assim, as cargas verticais direccionadamente para as estacas, que são elementos de elevada rigidez.

Estes efeitos são avaliados no modelo de cálculo pela introdução destes elementos com a sua rigidez equivalente e tem sido validado na prática pelo seu recurso, em estabilização de deficientes condições de fundação, com resultados comprovados.

Para a escavação foram concebidas duas plataformas nas cotas 18,0m e 23,0m (Figura 3). Na cota inferior as fundações dos órgãos são asseguradas pelas estacas cravadas. Aqui a progressão dos aterros é efectuada com intercalação de duas geogrelhas biaxiais extrudidas com um  $EA=350kN/m$ . Já na cota superior, que parte na sua quase totalidade do cretácico, a rigidificação do aterro é efectuada com intercalação de geogrelhas uniaxiais extrudidas com  $EA=850kN/m$ .

Porque a solução está muito dependente da qualidade do aterro, designadamente no que respeita ao seu módulo de deformabilidade, foi preconizada a realização de aterros experimentais para a aferição das espessuras e número de passagens que garantam  $E= 20 MPa$ .

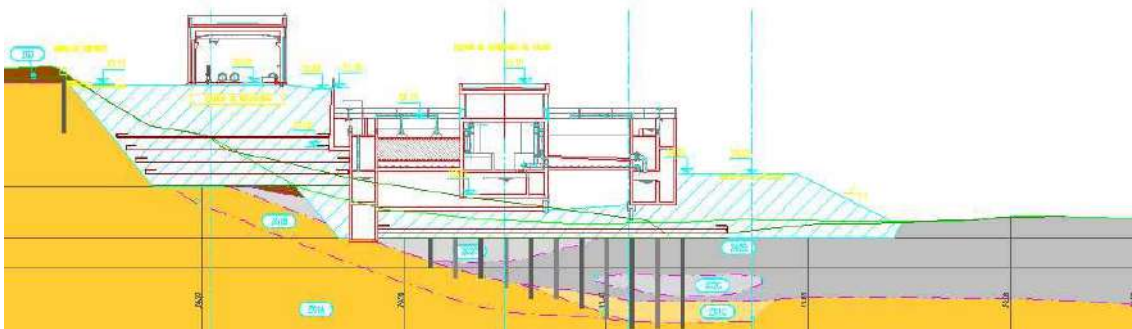


Figura 3 – Corte Transversal Tipo sobreposto com solução escolhida

## 4. AVALIAÇÕES DE CÁLCULO EFECTUADAS

### 4.1. Modelos de cálculo

Para efectuar avaliações de cálculo de validação da segurança da solução foram desenvolvidos e analisados modelos de elementos finitos, executados num software comercial específico para problemas geotécnicos -*Plaxis V8*-, que permitiu simular o comportamento fisicamente não linear dos solos bem como o faseamento construtivo, incluindo fases de escavação, execução das estacas e aterro com execução das geogrelhas (Figura 4).

Os materiais estruturais considerados bem como os parâmetros geomecânicos aplicados ao modelo são os já indicados no Quadro 1. Nos elementos estruturais em betão armado e nas geogrelhas foi considerado um comportamento elástico e linear.

Para análises de estabilidade de taludes estáticas e pseudo-estáticas recorreu-se ao programa *SLOPE*.



Figura 4 - Modelo do *Plaxis*

### 4.2. Faseamento construtivo

O faseamento construtivo adoptado, nos referidos modelos, de uma forma sucinta, foi assim simulado:

- geração do estado de tensão inicial;
- escavação até à cota 19;
- execução das estacas;
- aterro por camadas com as geogrelhas até à cota 22;
- execução do edifício de filtros de  $C_aCO_3$ ;
- aterro por camadas com as geogrelhas na zona do espessador até à cota 31
- execução do espessador;
- activação da carga nos edifícios e órgãos.

O dimensionamento das estacas foi baseado nos resultados obtidos dos modelos numéricos realizados no programa *Plaxis*, que estabelece a interacção solo-estrutura através do parâmetro *Rinter*.

### 4.3. Deformações obtida na sequência tensão-deformação

Nas situações de cálculo assumiu-se um comportamento em deformação plana. Como resultado desta simplificação, o comportamento modelado não corresponde inteiramente à situação real. No entanto, as análises de sensibilidade efectuadas foram conduzidas de modo a fornecerem valores conservativos. Assim, na sequência dos faseamentos estudados, as análises efectuadas demonstraram a viabilidade da solução com deformações aceitáveis e sempre inferiores a 1'' (2,54cm). Ver na Figura 5 as deformações totais obtidas com o modelo do *Plaxis*.



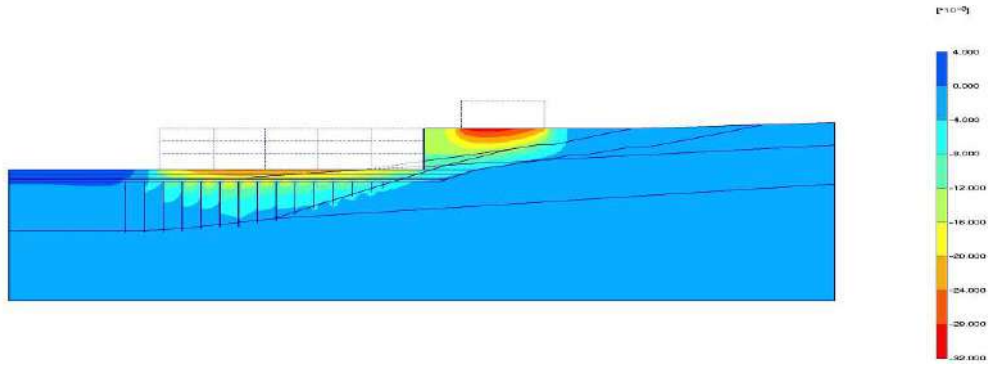


Figura 5 – Deformações Totais com o modelo do *Plaxis*

#### 4.4. Estacas

Os esforços obtidos para as verificações aos estados limites últimos e de utilização foram retirados nestes modelos de cálculo, onde se contabiliza: a acção das terras e o faseamento construtivo. A carga máxima de serviço nas estacas é da ordem de 1200kN pelo que se preconizaram estacas com secção quadrangular com 0,35m de lado.

#### 4.5. Geogrelhas

Das envolventes de esforços obtidas, os valores de tracção atingidos nas geogrelhas (Figura 6) estão muito abaixo das suas capacidades limite, já acima referidas.



Figura 6 – Colocação das Geogrelhas Biaxiais

#### 4.6. Taludes

Das análises de estabilidade com o programa *SLOPE* (Figura 7) quer estática quer pseudo-estática, para simulação da acção sísmica – Coimbra zona C -, obtiveram-se valores de factor de segurança de 1,7 e 1,5 respectivamente.

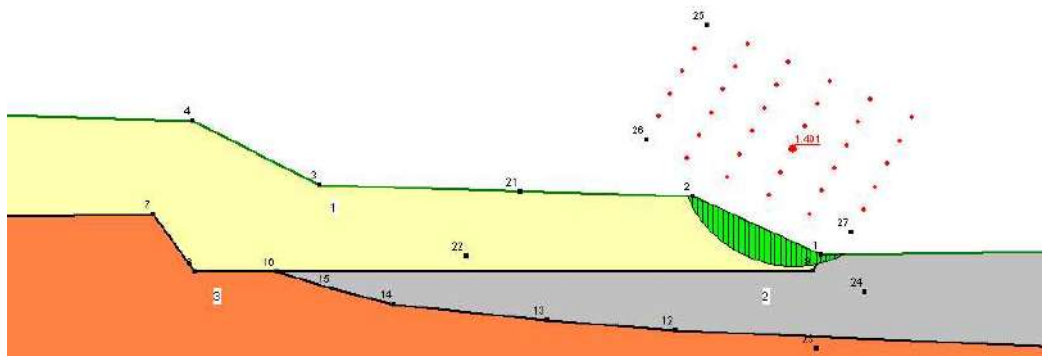


Figura 7 - Análise de Estabilidade pseudo-estática com o programa *SLOPE* (exemplo)

## 5. ESTACAS CRAVADAS

### 5.1. Execução

O projecto considerou a utilização de estacas pré-fabricadas com secção quadrada de  $0,35 \times 0,35 \text{m}^2$ , fabricadas em elementos entre 3 e 12 metros de comprimento, preparadas para ser cravadas no terreno (Figura 8).



Figura 8 - Vistas da execução de Estacas Cravadas

A SOPECATE assegurou a correcta execução da cravação das estacas, tanto na implantação das mesmas como na manutenção da sua integridade estrutural (recepção, manuseamento e processo de cravação), assim como pelo alcance da nega adequada em cada uma delas.

Foram inicialmente cravadas estacas de amostra por forma a proceder às remessas seguintes já tendo em conta os comprimentos de cravação obtidos. Esta amostra foi realizada com treze “estacas-penetrómetro”, com queda do pilão desde a altura estipulada para medição de “negas” - 1 por cata um dos 4 cantos de cada grupo  $4 \times 3 + 1$  na câmara de medição de caudais.

Durante a execução dos trabalhos garantiu-se o manuseamento e armazenamento de uma forma suave, sem movimentos bruscos nem choques com outros elementos.

O equipamento empregue durante a cravação assegura uma pancada centrada, sem movimentos laterais dos martelos. Tanto o capacete de cravação como a cabeça da estaca são de material suficientemente resistente, de forma a que distribuam a força da pancada uniformemente sobre a cabeça da estaca, com mínima perda de eficácia.

### 5.2. Especificações

Obrigou-se em termos de especificações técnicas a que todas as estacas para serem cravadas, cumprissem as seguintes condições:

- Ausência de fissuras longitudinais maiores que 100mm e transversais com aberturas máximas de 0,5mm ou que não alcancem numa face, um comprimento maior do que a metade do diâmetro equivalente da estaca;
- A superfície da cabeça da estaca ser perpendicular ao eixo do tramo, com um desvio máximo de 1%;
- A curvatura do tramo não superar os 0,2%.

### 5.3. Cravação

A cravação deve realizar-se sem que se danifique a estrutura da estaca (Figura 9). Para tal foi instalada uma proteção da estaca com um capacete de cravação que distribui a força do golpe, bem como impede o movimento lateral do martelo.

Não se permitiu apumar estacas, quando já cravadas no terreno num comprimento superior a 1/10 do elemento.

Em todas as estacas foi realizado um controlo da nega, verificando-se a mesma em pelo menos 5 séries de 10 pancadas.

Esta nega final com que ficou a estaca depende do tipo de terreno, equipamento de cravação, carga actuante na estaca secção e comprimento. Foi medida, sobre uma série de 10 pancadas, a penetração no terreno, tendo-se assegurado que o valor obtido foi menor do que o calculado.

A nega previamente estabelecida foi confirmada com os resultados das estacas-penetrómetro.



Figura 9 - Vistas do equipamento de cravação das estacas

## 6. SISTEMA DE CONTROLE DOS ATERROS

A concepção estrutural dos órgãos da ETA assentava numa solução constituída em geral por ensoleiramentos gerais na qual é determinante o bom comportamento dos aterros a construir.

Neste sentido, preconizou-se a realização de um aterro experimental para a definição das condições de compactação dos materiais a utilizar nos aterros de fundação da obra, em área próxima do local e antes do início dos aterros definitivos, no qual foram aferidas as regras de construção.

De uma forma sistemática, para avaliação das características dos aterros realizados foram executados um vasto conjunto de ensaios de carga em placa.

### 6.1. Aterro experimental

Os aterros experimentais permitiram aferir o tipo de equipamento de compactação, condições de colocação dos materiais em obra, garantindo a obtenção de adequadas características de resistência e deformabilidade dos materiais de aterro, adequadas às exigências de comportamento consideradas no projecto, que deverão traduzir-se em módulos de



deformabilidade iguais ou superiores a 20MPa, aferidos no trecho experimental através de ensaios de carga em placa

## 6.2. Ensaios de carga em placa

Foi prevista a realização de ensaios de carga em placa no aterro experimental, com vista à validação das condições de compactação dos aterros de acordo com os pressupostos de projecto, relativos aos módulos de deformabilidade dos materiais após compactação.

Antes da realização dos ensaios foram compactadas com a espessura e energia volúmica de compactação que se pretende testar, 3 a 4 camadas sobrepostas de material de aterro. A espessura total de ensaio foi superior a 2 vezes o diâmetro da placa de ensaio.

O ensaio consiste na aplicação de um conjunto de cargas estáticas, em regime de patamares com incrementos sucessivos, a uma placa rígida e consequente medição dos assentamentos provocados pela sua aplicação. No final do ensaio, o conjunto de dados obtidos permite obter os parâmetros de deformabilidade dos materiais ensaiados.



Figura 10 – Aspectos do Ensaio de Placa

O equipamento de ensaio é constituído por uma placa rígida de secção circular com 0,30 ou 0,40m de diâmetro, uma célula de carga com dispositivo de medição da carga aplicada, um sistema de medição constituído por deflectómetros e barras de posicionamento para a medição dos assentamentos e um mecanismo de reacção para a aplicação das cargas de ensaio (Figura 10).

Em geral, o diâmetro da placa de ensaio deverá ser tal que seja superior a 5 vezes o diâmetro equivalente da partícula de maior diâmetro presente no solo.

A superfície do terreno onde assenta a placa foi regularizada tendo sido espalhada uma camada de areia de modo a garantir tanto o contacto integral da placa como a horizontalidade da mesma.

Considerou-se a utilização de 4 patamares de pressão: 0,05, 0,10, 0,20 e 0,40 MPa. A cada patamar de carga foram medidos os assentamentos a intervalos de tempo regulares que em solos coerentes poderá ser a 1, 2, 4 e 8 minutos.

Os resultados foram apresentados em gráficos de assentamento-tempo, para cada ciclo de carga e assentamento máximo/carga aplicada.

## 7. CONCLUSÕES

A concepção de uma solução de fundações especiais tecnico-economicamente vantajosa permitiu ao consórcio adjudicatário executar as obras apresentadas neste artigo de uma forma muito rápida e industrializada, bastando cerca de 6 meses entre a campanha de prospecção e a execução das primeiras lajes de betão – incluindo-se a realização dos projectos de execução.

Os trabalhos de obra foram alvo do acompanhamento do Projectista Lisconcebe, em particular durante a fase de elaboração do plano para a campanha de prospecção, seu acompanhamento, discussão de soluções, projectos de execução, implementação e assistência técnica à solução escolhida (Figura 11).



Figura 11 – Evolução da Obra

## AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos ao consórcio construtor MonteAdriano, Somague e Efacec Ambiente, seus subempreiteiros, designadamente a SOPECATE, bem como ao dono da Obra – Águas do Mondego -, pelos elementos disponibilizados e que permitiram a publicação do presente artigo.