

Fundações Indiretas de Pontes Modulares – Soluções de Execução Acelerada

Manuel António Correia de
Melo Ferreira Passos
Instituto Superior Técnico –
Universidade de Lisboa
Academia Militar
Lisboa, Portugal
passos.macmf@exercito.pt

Alexandre da Luz Pinto
Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
Departamento de Engenharia
Civil, Arquitetura e Georrecursos.
alexandrepinto@tecnico.ulisboa.pt

António Carlos Guerreiro
Morgado André
BERD Estruturas
Porto, Portugal
antonio.andre@protecna.pt

Resumo — O presente artigo pretende-se estudar uma solução de fundação indireta para pontes modulares capaz de satisfazer as exigências dos regulamentos em vigor, nomeadamente os Eurocódigos. Será necessário abordar o campo das pontes modulares e propor uma solução de fundação compatível com as exigências das pontes militares.

I. INTRODUÇÃO

As pontes modulares são soluções eficientes para unir dois pontos que estão separados por um obstáculo. A montagem das pontes modulares é do “tipo lego”, não necessitando de mão-de-obra especializada, e permite configurar a ponte para um determinado vão ou uma determinada carga. Geralmente, estruturas como pontes modulares, são apenas suportadas por encontros superficiais, sempre que possível. Estes encontros são compostos por um bloco de betão assentes diretamente no terreno. Esta forma de montagem poderá provocar assentamentos devido à falta de conhecimentos do solo.

Geralmente, estruturas como pontes modulares, são apenas suportadas por encontros superficiais, sempre que possível. Estes encontros são compostos por um bloco de betão, como explanado ao longo do capítulo 2, assentes diretamente no terreno. Esta forma de montagem poderá provocar assentamentos devido à falta de conhecimentos do solo. Desta forma, é frequente a utilidade das pontes modulares em momentos críticos ou com relativa urgência, posto isto, o local da montagem da ponte é muitas vezes inflexível, o que, por vezes, torna o trabalho do engenheiro mais problemático. Desta forma, será necessário recorrer a uma prospeção rápida do terreno, analisar as características do solo e por fim, ponderar a necessidade de uma solução profunda.

Assim sendo, este artigo pretende-se em propor uma solução de fundação profunda eficiente, que seja compatível com as exigências deste tipo de obra e que facilite o dimensionamento e montagem.

II. ESTADO DA ARTE

A. Introdução Histórica

Desde o início do seu emprego em ambiente operacional, as pontes modulares eram utilizadas maioritariamente para ambientes de guerra. Estas pontes serviam para apoiar as forças

militares e teriam de estar equipadas para resistir às cargas militares, isto é, dimensionadas com critérios mais exigentes.

Estas pontes eram montadas por módulos, facultando a vantagem de serem rápidas de montar. Dependendo das imposições da operação militar, a rapidez de montagem de uma ponte modular era e é um requisito importante. Na segunda guerra mundial os norte-americanos e os ingleses destacaram-se por desenvolver as pontes Bailey. O primeiro avanço na ponte Bailey foi feito pelos militares britânicos com a invenção desta ponte pelo autor Donald Bailey. Esta necessidade de uma ponte mais sustentável para os militares surgiu pelo avanço nos carros de combate. Realce para o veículo Tank Mark IV que pesava cerca de 39 toneladas. (ThinkDefence, 2012)

Durante a Segunda Guerra Mundial, a ponte Bailey foi usada por vários países europeus. Hoje em dia a ponte Bailey continua a ser comercializada e utilizada pelas suas vantagens de ser fácil de transportar, rápida de montar e desmontar, boa capacidade de carga e boa resistência à fadiga.

B. Tipos de Pontes Modulares

Foi decidido que seriam analisadas apenas as pontes do tipo apoio/logísticas e de comunicação, pois são estas que abrangem maior interesse para o objetivo final. As pontes logísticas são pontes que também podem ser utilizadas como pontes de assalto, estas pontes, por serem de categoria modular, são flexíveis de gerar diferentes vãos. As pontes logísticas são pontes que poderão conseguir ter uma maior resistência às cargas ou vencer um maior vão, dependendo da sua necessidade.

No que respeita à ponte MB60, utilizada durante o estudo de caso, está avaliada para atingir vãos próximos de 60 metros. Em relação aos encontros, a ponte MB36 recorre aos encontros de configuração simples, enquanto que a ponte MB60 recorre a encontros de configuração dupla. Estes encontros são compostos por blocos de betão, com uma altura que depende das cargas da ponte, que assentam diretamente no solo, caso o solo permita.

III. MICROESTACAS TRM APLICADAS EM PONTES MODULARES

Estruturas como as pontes modulares necessitam de conduzir as cargas do peso próprio e as respetivas sobrecargas de utilização para o terreno, estas cargas são encaminhadas dos montantes de extremidade para o solo. Caso o terreno superficial seja de características mecânicas adequadas, podemos recorrer a fundações superficiais, dispondo apenas de uma camada de betão (grout) e dos apoios de configuração simples, dupla ou tripla, tal como referido anteriormente. Visto estar-se a tratar de pontes modulares, onde se dá primazia à rapidez de construção, torna-se primordial pensar num método de fundação rápido e funcional. Desta maneira, será apresentado uma solução de microestacas tipo TRM, com destaque na composição, comportamento e processos construtivos.

A. Conceitos Gerais das Fundações por Microestacas

No que pertence às fundações indiretas, podemos dividir em estacas moldadas ou cravadas, e dentro das cravadas por estacas de madeira, metálicas, betão armado ou mistas. Para pontes modulares, não se justificaria utilizar estacas moldadas, assim sendo, definiu-se que a solução mais correta seria a de estacas cravadas.

Depois podemos definir como uma estaca de ponta caso seja apoiada num substrato rígido, flutuante caso as cargas sejam resistidas pela resistência lateral da estaca, ou então mista.

B. Microestacas TRM

As microestacas TRM são constituídas por ferro fundido dúctil e posteriormente injetadas com microbetão. O ferro fundido dúctil é utilizado devido à sua elevada resistência química e mecânica e o microbetão para oferecer maior resistência à compressão. O processo construtivo pode ser pelo método de cravação por via seca ou por via húmida, distinguindo-se estes dois pela sequência da injeção do microbetão.

No que respeita à aplicabilidade da solução para diferentes tipos de solos, é importante realçar que esta solução não terá o melhor rendimento para solos duros, rochas ou solos com blocos rochosos dispersos, isto porque a esbelteza da microestaca poderá sofrer encurvadura em situações mais críticas, pelo que, cabe à prospeção geotécnica analisar o terreno e, a partir do perfil geotécnico, retirar conclusões.

Em relação ao tipo de obra provisória, existe a preocupação do reaproveitamento de material de fundação. Este tipo de microestacas permite que sejam parcialmente removidas, no entanto, para este critério, existem outras soluções no mercado que garantem a reutilização do material de fundação, como por exemplo as estacas helicoidais. No que se refere aos equipamentos e máquinas utilizados em obra, estes são fáceis de manobrar e capazes de operar em locais de acesso difícil ou espaços de tamanho reduzido. Tanto as máquinas de construção como os materiais e suas geometrias serão fatores fundamentais para a rapidez de execução do processo construtivo. (Rohre, 2014)

Como destacado, a cravação por via seca está materializada para ambientes em que o terreno é bastante variável e com rigidezes muito desiguais. Em suma, o método viabiliza a realização da microestaca, desde o solo de fraca qualidade até ao substrato rígido, de forma a obter uma microestaca que transmita

as cargas da estrutura para o substrato unicamente (comportamento de estaca de ponta). (Tiroler Rohre, 2014)

Realça-se o facto destas microestacas trabalharem como estacas de ponta, ou seja, não resistem aos esforços de tração que poderão surgir por motivos como acidentes ou cheias, assim, deverá haver outro mecanismo no apoio capaz de suportar as cargas anti-gravíticas.

O processo de cravação é feito por um martelo hidráulico, e o controlo da cravação é feita por um operador que vai contabilizando o tempo de cravação por metro de estaca. O processo deverá ser registado num boletim de execução. Para este tipo de estacas será fácil detetar o término deste processo, dado que cravação da microestaca torna-se mais lenta quando atinge o substrato rígido. (Caetano, 2014)

Para atingir o substrato é possível realizar a quantidade necessária de uniões pois não existem limitações quanto ao número de tubos para uma microestaca TRM. (Tiroler Rohre, 2014) Durante a cravação das microestacas é importante estar atento a encurvaduras, pois as pressões aplicadas em secções de elevada esbelteza, como é o caso, poderá provocar encurvaduras que deformem as microestacas, alterando o natural encaminhamento de cargas.

Posteriormente, procede-se à injeção do microbetão no interior do tubo TRM, este material vai otimizar as características da microestaca. Para a selagem interior ser efetuada com sucesso o microbetão terá de atingir toda a profundidade do tubo. Terá ainda de preencher também o topo para assim garantir a boa ligação do tubo TRM à chapa de ligação pois o microbetão será o elemento ligante entre estes dois.

Quanto ao método de cravação por via húmida, e ao contrário do método por via seca, utiliza microbetão durante a sua cravação. O objetivo final deste método é formar um modelo tipo “sandwich” com o tubo TRM e com o microbetão no interior e no exterior do tubo. O microbetão no interior tem a mesma competência que nas microestacas cravadas por via seca, a modificação encontra-se na presença do microbetão entre o tubo TRM e o terreno envolvente, esta alteração garante à microestaca um incremento da resistência lateral provocada pelo atrito do microbetão com o tubo e com o terreno.

Assim, as microestacas cravadas por via húmida destinam-se especialmente a casos em que o terreno não apresenta boas propriedades mecânicas e conseqüentemente não encontramos solo rígido a uma profundidade próxima. Geralmente são solos granulares com média densidade, ou solos de elevada percentagem de cascalhos e areia. Nestas situações é imprescindível que a microestaca se comporte de modo flutuante. Para confirmar e melhorar o encaminhamento das cargas preenche-se o exterior da microestaca com microbetão de forma a criar uma superfície rugosa, aumentando assim o atrito entre o tubo TRM e a camada exterior. (Caetano, 2014)

Tal como no método por via seca, o primeiro troço a ser cravado é o mais condicionante. Este tubo é dotado de uma sapata de base com aberturas, estas aberturas permitem que o microbetão que está a ser injetado no interior da microestaca (isto durante a cravação) possa fluir para o exterior. A sapata de base terá ainda de ter um diâmetro maior que o diâmetro da estaca, isto para garantir que o microbetão acompanha a cravação.

Durante todo o processo de cravação, existe uma pressão de injeção na sapata de ponta provocada pelo impulso do microbetão, do interior para o exterior, tal como demonstrado na figura 1.

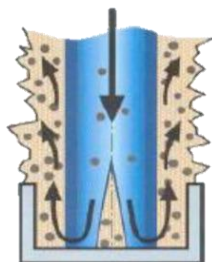


Figura 1. Representação de pressões devido à injeção do microbetão durante a cravação

IV. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento das soluções fundações indiretas, devemos partir de pressupostos considerado nos regulamentos de dimensionamento como o EC7. O dimensionamento das fundações profundas prevê o estudo da capacidade resistente da estaca e a capacidade resistente do solo.

A. Dimensionamento Geotécnico

Para a generalidade do artigo, terá de haver um contraste importante entre o emprego da análise do ELU e do ELS, isto pelo facto de estarmos a lidar com estruturas de carácter temporário e de emergência, como tem sido referido.

B. Dimensionamento Estrutural

Para o cálculo resistente da compressão é necessário considerar os materiais presentes na fundação e as suas diferentes propriedades. Assim, deverá entrar no cálculo a resistência do ferro fundido dúctil e a resistência do microbetão, tal como explanado na tabela 1.

TABELA 1. ÁREAS TRANSVERSAIS DE MICROBETÃO E DE FERRO FUNDIDO E AS RESPECTIVA CARGAS MÁXIMAS DE COMPRESSÃO PARA CADA MICROESTACA TRM

Microestaca (Ø x e) (mm × mm)	A_b (mm ²)	A_s (mm ²)	N_d (kN)
118 x 7,5	2604	8332	897
118 x 9,0	3082	7854	1028
170 x 9,0	4552	18146	1628
170 x 10,6	5308	19557	1835

V. DEFINIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE (PLAXIS 2D)

No presente capítulo será exposto o estudo de caso e serão apresentados os detalhes executados para obtenção dos resultados pelo software Plaxis 2D.

A. Caracterização Geotécnica do Terreno

Por forma a testar a solução descrita neste artigo, aproveitou-se os dados da campanha de prospeção da empresa

ENGCEO em Sarilhos Grandes, Montijo. O estudo geológico-geotécnico da campanha incidiu na identificação das formações geológicas, numa definição de um modelo geológico-geotécnico, e na estimativa das propriedades físicas do maciço e das respetivas características de resistência e deformabilidade

De forma a definir todos os elementos da ponte para posterior análise do peso distribuído para os encontros, é fundamental recorrer aos regulamentos AASHTO, *Trilateral Design and Test Code*, Eurocódigo 1 e STANAG 2021.

Conforme o fornecido pela BERD, foram utilizadas as cargas da ponte MB60 e as cargas variáveis Segundo a norma AASHTO.

B. Modelação em Plaxis 2D

A partir do software Plaxis 2D foi possível estimar o comportamento de uma microestaca de 170 mm de diâmetro, em função das cargas da ponte MB60 fornecidas pela BERD.

Para modelar a solução no software proposto, procedeu-se à análise de uma solução profunda de secção circular com carregamento axial no seu eixo. Com isto, iniciou-se o projeto considerando um modelo axissimétrico executado por meio de elementos triangulares de 15 nós (malha de elementos finitos), onde se definiu apenas metade da secção.

Na figura 2 encontra-se o modelo de elementos finitos desenvolvido em software.

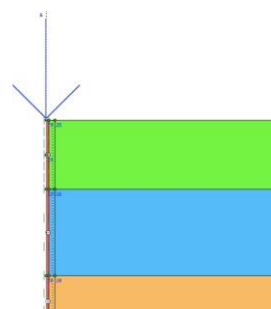


Figura 2. Modelo de Elementos Finitos

De modo a atingir o caso mais desfavorável para avaliar o comportamento da solução, elegeu-se a ponte de 61,6 metros de vão (ponte com maior vão, MB60) de forma a alcançar as cargas mais exigentes.

Assim, a partir do resultado para o ELU, optou-se por definir para este caso a solução microestaca TRM 170x9,0 mm.

Devido à distância entre encontros (mais de 5 metros) é sensato realizar a modelação do caso com apenas uma microestaca, isto porque as microestacas não se influenciarão mutuamente

C. Resultados do estudo

Os resultados obtidos para a solução proposta estão explanados na seguinte ilustração (figura 3), onde se pode analisar os assentamentos da solução no estudo de caso e as verificações impostas pelo EC7 e pela empresa BERD. A partir do EC7, foi calculado o valor para o ELS e para o ELU, resultando os valores de 781 kN e 1128 kN para ELS e ELU, respetivamente.

VI. CONCLUSÕES

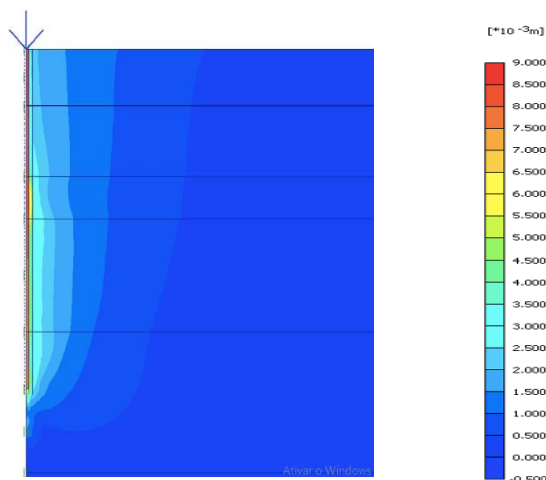


Figura 3. Diagrama de deformações empresa BERD, o valor do assentamento para a carga ELS é admissível.

Neste artigo é estudada uma solução de fundação de microestacas cravadas tipo TRM para pontes modulares. Para este feito, o artigo direccionou o foco para três pontos chave: estudar o campo das pontes modulares para entender as suas características base, analisar a adaptabilidade das microestacas TRM em pontes modulares e com isto, o comportamento deste tipo de fundação, e por fim, estudar a solução com base num modelo de elementos finitos e avaliar o seu comportamento, ao nível geotécnico e estrutural.

Outro aspeto específico nas fundações profundas e que precisou de destaque, foram os métodos de prospeção geotécnica expeditos e compatíveis com as exigências deste tipo de estrutura. Por outras palavras, antes da montagem da ponte modular, e dependendo dos conhecimentos que temos do local da obra, será necessário realizar uma prospeção geotécnica.

Na figura 4 está representada em pormenor, a curva carga vs. assentamento para o caso prático.

Definida uma solução que cumprisse os requisitos, foi necessário explorar as características básicas de uma fundação profunda, tal como a que foi escolhida, e ainda aprofundar o processo construtivo da mesma. No que corresponde ao processo construtivo da microestacas TRM, foi importante avaliar a funcionalidade de todo o processo em ambiente urgente, como a facilidade de transporte, material, equipamento, aplicabilidade em vários solos e rapidez de execução.

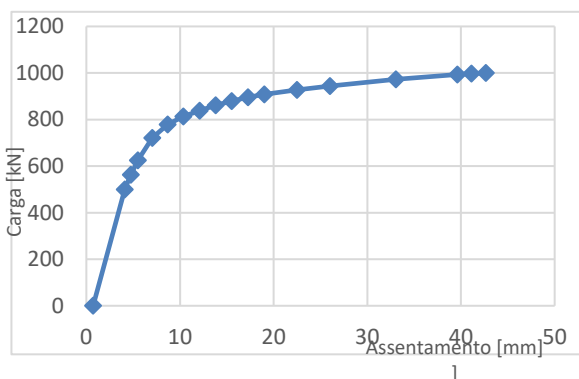


Figura 4. Gráfico curva vs. Assentamento para o ELS.

Como conclusão, os objetivos foram alcançados pois, podemos admitir que a solução de fundação profunda por microestaca TRM é uma solução eficiente para uma estrutura como uma ponte modular. O processo construtivo vai ao encontro dos critérios exigidos e a sua capacidade estrutural vai ao encontro do pretendido.

AGRADECIMENTOS

É importante para mim deixar uma palavra de apreço aos meus orientadores, Professor Alexandre Pinto e Engenheiro António André, por toda a dedicação. Por último, aos meus pais, irmã, avó e à Inês o mais profundo obrigado, por todo o apoio, e, acima de tudo, pela confiança que depositaram em mim, sempre crentes no meu sucesso.

Assim sendo, verifica-se que o assentamento obtido no software corresponde a um valor expectável (8,8 mm). No que respeita aos valores máximos admitidos pelo EC7 e pela BERD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Deslocamento vertical máximo (EC7)

$$d_{v,max} = H \times \frac{1}{1000} = 12 \times \frac{1}{1000} = 0,012 = 12 \text{ mm} > 8,8 \text{ mm}$$
- Deslocamento vertical máximo (BERD)

$$d_{v,max} = 10 \text{ mm} > 8,8 \text{ mm}$$

- [1] André, A. (2016). Estudo da Aplicação de Pré-Esforço Orgânico em Pontes Provisórias. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [2] BERD. (2019). M1 : Manual Técnico : Instalación, Montaje y Lanzamiento. Porto.
- [3] Caetano, M. (2014). Igreja Nossa Senhora dos Navegantes, Parque das Nações : Fundações Indiretas por Microestacas Cravadas. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- [4] Eurocódigo 7. (2010). Projeto Geotécnico. Regras Gerais". Eurocódigo 7 - Parte 1. Pré-norma europeia, ENV 1997-1.
- [5] ThinkDefence. (30 de dezembro de 2011). UK Military Bridging - Equipment (Pre WWII Equipment Bridging). Obtido em 5 de março de 2020, de <https://www.thinkdefence.co.uk/2011/12/ukmilitary-bridging-equipment-pre-wwii-equipment-bridging>
- [6] Tiroler Rohre. (2014). Piling Systems for Deep Foundations. Obtido em 28 de março de 2020, de <http://durotterra.com/>