



**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**Departamento de Ciências da Terra**

**Caracterização geológico-geotécnica do vale do rio  
Mondego entre a Ponte Açude e Ponte Rainha Santa  
Isabel em Coimbra**

Pedro Alexandre de Oliveira Rebelo Alves

**Mestrado em Geociências**

**Setembro, 2017**



**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**Departamento de Ciências da Terra**

**Caracterização geológico-geotécnica do vale do rio  
Mondego entre a Ponte Açude e Ponte Rainha Santa  
Isabel em Coimbra**

**Geological-Geotechnical Characterization of the Mondego river valley  
between the bridge-Weir and the Rainha Santa Isabel Bridge in Coimbra**

**Pedro Alexandre de Oliveira Rebelo Alves**

**Mestrado em Geociências**

**Orientação científica:**

Prof. Doutor Mário Quinta Ferreira\*

\*Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

**Setembro, 2017**

## Resumo

Procura-se caracterizar os solos aluvionares do rio Mondego no troço entre a Açude-Ponte e a Ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra, de modo a contribuir para um melhor conhecimento das características e distribuição dos solos aluvionares, tendo como referência as obras realizadas ou a realizar no rio, onde se inclui a requalificação das margens do Mondego.

Esta dissertação tem início com uma introdução à zona em estudo (Coimbra), seguida dos objetivos do trabalho, como a descrição do vale e das margens do Mondego e da caracterização geológica e geotécnica dos solos aluvionares. É feito o enquadramento da Geologia regional e do troço em estudo, com a análise das formações geológicas e das principais fraturas, procurando perceber a evolução da Bacia. É feita uma análise relativa à subida do nível da base do mar nos últimos milénios devido ao degelo após a erosão das últimas glaciações, sendo que solos aluvionares e a geologia da zona em estudo também condicionaram o enchimento aluvionar do vale do Mondego em Coimbra.

Estes depósitos aluvionares resultam da acumulação de materiais associados à dinâmica fluvial, correspondendo a depósitos terrígenos com estruturação interna, o que traduz uma evolução no leito aluvial do rio Mondego. São constituídos essencialmente por areias no topo e por areias com seixos e calhaus na base, com intercalações lenticulares de lodos e argilas menos significativas.

Serão referidos alguns métodos e técnicas de prospeção, privilegiando as que foram utilizadas nos estudos que serviram de base aos elementos apresentados para a caracterização das zonas aluvionares apresentadas neste trabalho.

Foram analisados vários relatórios de trabalhos de prospeção realizados nas margens e no vale do rio Mondego, entre a Ponte Açude e a Ponte Rainha Santa Isabel, incluindo sondagens e ensaios de laboratório, procurando-se entender as características e as propriedades do vale e das suas margens. Apresentam-se propostas de soluções para o atual estado dos muros de suporte nas margens, alguns dos quais serão brevemente sujeitos a obras de estabilização e requalificação.

Por fim são apresentadas as conclusões do trabalho, abordando as características geológicas da zona e avaliadas as possíveis situações de instabilidade.

Os problemas associados às margens do rio estão relacionados com a fraca capacidade de suporte dos solos aluvionares da fundação, constituídos por areias, lodos e cascalheira. As obras existentes ou a realizar no vale do Mondego e nas suas margens beneficiarão muito do conhecimento aprofundado das características dos sedimentos aluvionares e da sua distribuição espacial.

**Palavras Chave:** Aluviões; Rio Mondego; Coimbra; Geologia de Engenharia.

## Abstrat

The aim of the present work is to characterize the alluvial soils of the Mondego river in the section between the Bridge-Weir and the Rainha Santa Isabel bridge in Coimbra, in order to contribute to a better knowledge of the characteristics and distribution of the alluvial soils with reference to the works carried out or to be done in the river, including the requalification of the margins of the Mondego river.

This dissertation begins with an introduction to the study area (Coimbra) followed by the objectives of the work, including the description of the Mondego valley and its margins and of the geological and geotechnical characterization of the alluvial soils. The framework of the regional geology and of section under study is presented, including the analysis of the geological formations and of the mains fractures, trying to perceive the evolution of the Basin. An analysis is made of the sea level rise in the last millennia due to the thawing, after the erosion of the last glaciations, as the alluvial soils and the geology of the area also conditioned the alluvial sedimentation of the Mondego valley at Coimbra.

These alluvial deposits resulted from the accumulation of materials associated with the river dynamics, which corresponds to coarse deposits with internal structuring, promoting the evolution of the alluvial river bed of the Mondego. These deposits consist mainly of sands at the top and sand with pebbles at the base, presenting lenticular intercalations of mud and of smaller amount of clays.

A few site investigation methods and techniques will be mentioned, favoring those that were used in the studies that served as a basis for the characterization of the alluvial zones presented in this work.

Several site investigation reports work performed on the margins and in the Mondego river valley were analyzed, between the Bridge-Weir and the Rainha Santa Isabel Bridge, including soundings and laboratory tests, trying to understand the characteristics and properties of the valley and its margins. Proposals for solutions of the current state of the retaining walls in the margins are presented, some of which will soon be submitted to stabilization and requalification works.

Finally, the conclusions of the study are presented, addressing the geological characteristics of the zone and evaluating the possible situations of instability.

The problems associated with the river margins are related to the low bearing capacity of alluvial soils in the foundation, consisting of sands, mud and gravel. The existing or intended engineering works in the Mondego Valley and its margins will greatly benefit from a deeper knowledge of the characteristics of the alluvial sediments and of their volume distribution.

**Keywords:** Alluvium; Mondego River; Coimbra; Engineering Geology.

## **Agradecimentos**

Este é mais um marco na minha vida e uma etapa crucial na minha carreira acadêmica.

Foram muitas as pessoas que contribuíram para mais esta fase do meu percurso pessoal e profissional, sem as quais não seria possível terminar esta dissertação.

Em especial, quero agradecer ao Professor Doutor Mário Quinta Ferreira por me ter orientado neste ano letivo, pela sua disponibilidade e apoio na elaboração da presente dissertação, bem como tudo o que aprendi com ele como tutor ao longo da realização deste trabalho, através de todos os ensinamentos que me transmitiu.

Quero agradecer também à minha família e amigos pelo apoio, pelos conselhos prestados e por acreditarem sempre na minha força e capacidades.

A todos o meu bem-haja pela força e coragem sempre transmitidos.

## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Objetivos do trabalho.....	4
2	Enquadramento Local .....	6
2.1	Geologia regional .....	7
2.2	Depósitos aluvionares .....	10
2.3	Geologia do troço em estudo.....	12
2.4	Glaciações (subida do nível da base do mar) .....	14
3	Métodos de ensaios para a caracterização de zonas aluvionares .....	16
3.1	Cartografia Geológica.....	16
3.2	Geofísica .....	16
3.2.1	Método da resistividade elétrica .....	17
3.3	Prospeção mecânica .....	18
3.3.1	Grupo de sondagens geotécnicas, valas e poços.....	18
3.3.1.1	Sondagens à rotação.....	19
3.3.1.2	Sondagens à percussão .....	19
3.3.2	Grupo dos Ensaios <i>In Situ</i> .....	19
3.3.2.1	Ensaios de resistência.....	19
3.3.2.2	Martelo de Schmidt.....	19
3.3.2.3	Ensaio de Windsor ou pistola de Windsor.....	20
3.3.2.4	Corte direto <i>In Situ</i> .....	20
3.3.2.5	Ensaio Vane test .....	21
3.3.3	Ensaios permeabilidade .....	21
3.3.4	Ensaios penetrométricos .....	21
	Ensaios de penetração estática.....	22
3.4	Ensaios <i>In Situ</i> e Ensaios de Laboratório .....	24
3.4.1	Ensaios <i>In Situ</i> .....	25
3.4.1.1	Ensaio de penetração SPT .....	29
3.4.2	Ensaios de Laboratório.....	30
4	Prospeção das margens do Mondego .....	31
4.1	Sondagens .....	34
4.2	Sondagens ponte de Santa Clara .....	35
	36	
4.2.1	Geologia Local.....	37
4.2.2	Sondagens .....	38
4.2.3	Caracterização geotécnica .....	40
4.3	Condições geotécnicas da Ponte Rainha Santa Isabel.....	41
4.3.1	Caracterização geológica e geotécnica .....	42
4.4	Sondagens Ponte Pedro e Inês .....	44
4.4.1	Caracterização geotécnica .....	47
4.5	Sondagens de Março 2010 (“Escada de Peixes”).....	50
4.5.1	Zonamento Geotécnico .....	51
4.5.2	Conclusões.....	52
4.6	Sondagens entre Parque Manuel Braga e Ponte Açude .....	53
4.6.1	Caracterização Hidrogeológica.....	58
4.6.2	Interpretação e análise das características geológicas e geotécnicas ...	59
4.6.3	Conclusões.....	61
4.7	Sondagens perto do Mosteiro de Santa Clara .....	63

4.7.1	Ensaio de Laboratório.....	65
4.7.2	Análises químicas da água do solo.....	67
4.7.3	Zonamento Geotécnico .....	68
4.7.4	Parâmetros Geotécnicos e Permeabilidade .....	71
4.7.5	Conclusões.....	72
4.8	Sondagens no parque da Segurança Social (Av. Fernão Magalhães) .....	73
4.8.1	Sondagens .....	74
4.8.2	Zonamento Geológico e Geotécnico.....	75
4.8.3	Conclusões.....	76
5	Análise da intervenção nas margens do Mondego .....	79
5.1	Objetivos .....	79
5.2	Metodologia.....	79
5.3	Soluções.....	80
6	Considerações Finais.....	82
7	Referências Bibliográficas.....	84

## Índice de Figuras

Figura 1 - Zona de estudo assinalando as quatro pontes existentes (Google Eath, 2017). .....	1
Figura 2 - Limites dos principais muros nas margens do Mondego. A linha vermelha representa os muros que serão alvo de requalificação prioritária (Google Earth, 2017). .....	2
Figura 3 - Muro com fissuras junto à ponte de Santa Clara e consequente crescimento de vegetação. ....	3
Figura 4 - Passeio com deformações junto à estação Coimbra A. ....	3
Figura 5 - Rampa na portagem com deformações. ....	3
Figura 6 - Muro com fissuras, na zona a ser requalificada. ....	4
Figura 7 - Vegetação a crescer nas fissuras, junto à estação Coimbra A.....	4
Figura 8 – Vale aluvionar do Mondego e trajetória do rio na envolvente a Coimbra (Google Earth, 2017). ....	7
Figura 9 - Extrato da carta geológica de Portugal, folha 19-D à de escala 1:50000. Legenda simplificada da litologia (adaptado de Soares et al., 2007). ....	8
Figura 10 - Área de estudo com sobreposição de carta geológica 19-D. (Google Earth, 2017). ....	12
Figura 11 - Área de estudo com sobreposição de carta Coimbra Norte (Soares et al., 1987) e na parte inferior com extrato da carta geológica 19-D, Coimbra-Sul (Soares et al., 2007).....	13
Figura 12 - Variação da posição do nível do mar desde a última época glacial (Quigley, 1980). ....	15
Figura 13 - Esquema do martelo de Schmidt (Adaptado de Tomaz, 2005). ....	20
Figura 14 - Localização das sondagens analisadas junto ao rio Mondego. (Google Earth, 2017). Sondagens: S1_SC a S8_SC (roxo) - Ponte de Santa Clara (1954); S1_RSI (rosa) – Ponte Rainha Santa Isabel (1999); S1_PI, S2_PI, S3_PI, S4_PI, S9_PI, S10_PI (branco) – Ponte Pedro e Inês (julho 2003); .....	32
Figura 15 - Sondagens com sobreposição de mapa geológico com transparência. (Google Earth, 2017). ....	33
Figura 16 - Sondagens sobrepostas ao mapa geológico. ....	34
Figura 17 - Máquina de perfuração (APAFOR – 30D).....	35
Figura 18 - Ensaios SPT.....	35
Figura 19 - Equipamento utilizado para realizar o ensaio SPT.....	36
Figura 20 - Corte transversal da ponte de Santa Clara. (Retirado da Separata do.....	36

Figura 21 - Velha Ponte de Santa Clara, construída a 1875 (Retirada de Alarcão, 2012). .....	37
Figura 22 - Ponte D. Manuel, 1873 (Retirada de Alarcão, 2012).....	37
Figura 23 - Perfil geológico do subleito do Mondego, no local da nova Ponte de Santa Clara. (Retirado da Separata do artigo publicado no Boletim da Ordem dos Eng. n. 21 – Vol. III, (Cardoso e Abreu, 1954)). .....	38
Figura 24 – Localização das sondagens realizadas na ponte de Santa Clara (Google Earth, 2017).....	39
Figura 25 - Localização das sondagens na ponte Pedro e Inês (Google Earth, 2017).....	44
Figura 26 - Sondagens realizadas na ponte Açude. (Google Earth, 2017).....	50
Figura 27 - Localização das sondagens. (Google Earth, 2017).....	53
Figura 28 - Localização das sondagens entre o parque Manuel Braga e ponte Açude. (Google Earth, 2017). .....	56
Figura 29 - Localização das sondagens. (Google Earth, 2017).....	63
Figura 30 - Localização das sondagens com sobreposição da carta geológica (Google Earth, 2017).....	64
Figura 31 – Piézometro na S1_AC.....	65
Figura 32 - Perfuração à rotação da S1_AC. ....	65
Figura 33 - Localização das sondagens realizadas. (Google Earth, 2017).....	73
Figura 34 - Caixa com material de perfuração e SPT's. ....	79
Figura 35 - Material recolhido dos SPT.....	79
Figura 37 - Coroa diamantada (esquerda) e coroa de tungsténio (direita). ....	80
Figura 36 - Perfuração à rotação. ....	80

## Índice de Quadros

Quadro 1 - Evolução das Unidades Litoestratigráficas (Extraído de Soares et al., 1985). .....	9
Quadro 2 - Informação das várias camadas líticas encontradas (Extraído de Soares et al., 1985). .....	11
Quadro 3 - Dimensões e massas dos quatro tipos de dispositivos para ensaios de penetração dinâmica, adaptado da norma EN ISO 22476-2:2005. ....	23
Quadro 4 - Características de ensaios in situ (Cruz, 2010). ....	26
Quadro 5 - Aplicabilidade dos Ensaios in situ, Cruz (2010). ....	27
Quadro 6 - Qualidade dos parâmetros deduzidos (Cruz, 2010). ....	27
Quadro 7 - Síntese das unidades geológicas identificadas no subsolo. ....	38
Quadro 8 - Síntese das sondagens e ensaios realizados. ....	40
Quadro 9 - Síntese dos parâmetros geotécnicos. ....	41
Quadro 10 - Síntese das unidades geológicas encontradas no subsolo. ....	41
Quadro 11 - Resumo dos parâmetros geotécnicos analisados. Retirado do relatório “Ponte Europa sobre o Rio Mondego, Projeto de Execução”, 1999. ....	43
Quadro 12 - Síntese das unidades geológicas identificadas. ....	45
Quadro 13 - Síntese das sondagens realizadas. (Adaptado do relatório “Elaboração de Prospeção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovia sobre o Rio Mondego” realizado em julho de 2003). ....	46
Quadro 14 - Síntese dos furos realizados. (Adaptado do relatório “Elaboração de Prospeção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovia sobre o Rio Mondego” realizado em julho de 2003). ....	47
Quadro 15 - Resultados dos Ensaios de Compressão Uniaxial. (Adaptado do relatório “Elaboração de Prospeção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovia sobre o Rio Mondego” realizado em julho de 2003). ....	47
Quadro 16 - Síntese dos resultados obtidos nos ensaios pressiométricos tipo Menard. .....	48
Quadro 17 - Síntese dos parâmetros geotécnicos. ....	49
Quadro 18 - Profundidade de deteção do nível freático em cada.....	65
Quadro 19 - Esquema do plano de amostragem dos solos e dos ensaios realizados. (Quinta-Ferreira, Oliveira, Henriques & Carvalho, 2017). ....	66
Quadro 20 - Resumo dos Resultados dos ensaios de laboratório de solos. (Quinta-Ferreira, Oliveira, Henriques & Carvalho, 2017). ....	67
Quadro 21 - Resumo dos resultados das análises químicas da água. ....	68

Quadro 22 - Síntese dos resultados obtidos com as sondagens para as zonas geotécnicas consideradas.....	70
Quadro 23 - Estimativa dos parâmetros geotécnicos para cada zona geotécnica identificada. ....	71
Quadro 24 - Estimativa da permeabilidade dos solos ensaiados, com base na sua classificação. ....	71
Quadro 25 - Níveis freáticos de cada sondagem. ....	74
Quadro 26 - Síntese dos resultados dos ensaios (SPT, IR e RQD). (Quinta-Ferreira, Carvalho & Henriques, 2017).....	76
Quadro 27 - Estimativa dos parâmetros geotécnicos para cada zona geotécnica. (Quinta-Ferreira, Carvalho & Henriques, 2017).....	77

## 1 Introdução

O local de estudo (figura 1) situa-se no leito do rio Mondego entre a ponte Açude e a ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra, na cidade de Coimbra, estando incluído na Bacia Lusitaniana.

A bacia lusitaniana é uma bacia sedimentar que se desenvolveu na margem ocidental Ibérica (MOI) durante parte do Mesozóico. Caracteriza-se como uma bacia distensiva, pertencente a uma margem continental do tipo atlântico de *rift* não vulcânica. É na margem ocidental da Ibéria, onde se situa a bacia lusitaniana, bacia intracratónica, interna, separada de uma zona externa por um relevo estrutural, o *horst* da Berlenga. Esta bacia ocupa mais de 20 000 km<sup>2</sup> da MOI, alongando-se por cerca de 200 km segundo direção aproximada NNW-SSE e por mais de 100 km na direção perpendicular (Kullberg et al., 2006).

Na figura 1 pode-se ver uma imagem da zona de estudo, estando assinaladas as pontes existentes, sendo elas alguns dos locais onde foram realizadas maiores quantidades de trabalhos de prospeção e ensaios.

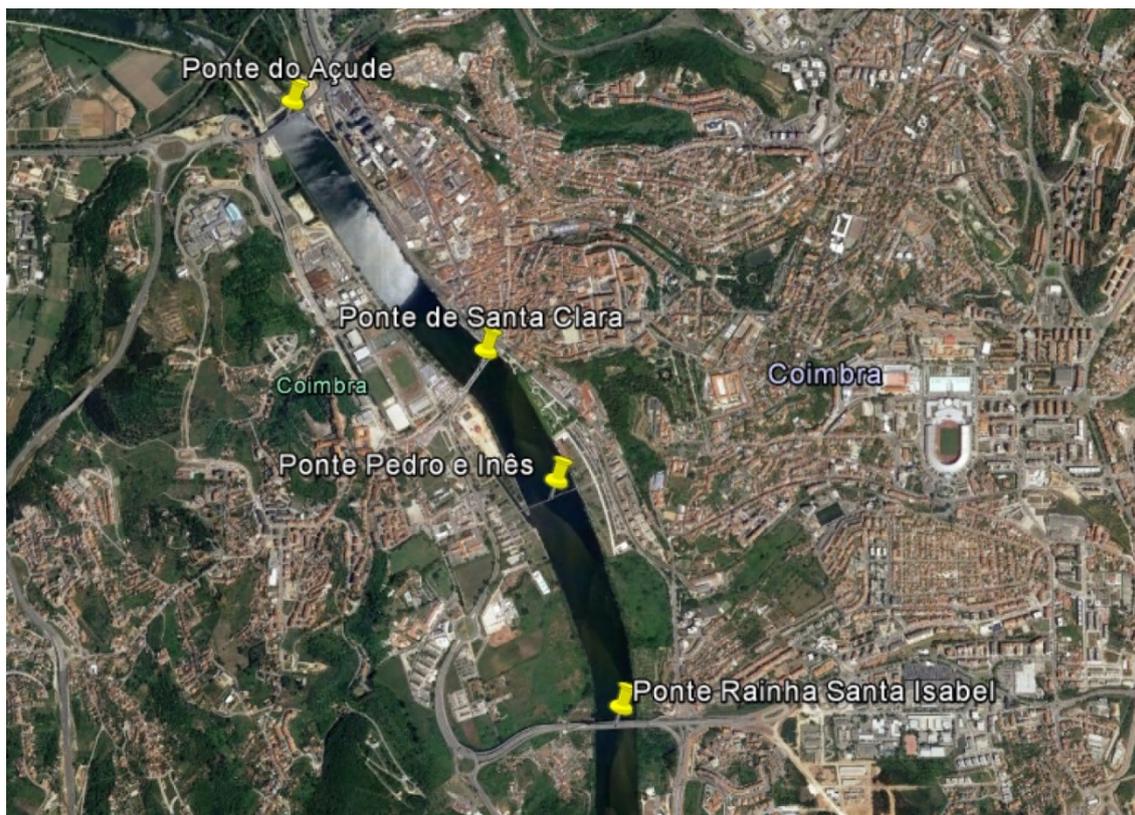


Figura 1 - Zona de estudo assinalando as quatro pontes existentes (Google Earth, 2017).

Pode-se ver delimitado na figura seguinte os muros nas margens do rio, aos quais uma parte será alvo de requalificação, pois devido às características geológicas da zona, sofreram abatimento devido à pouca resistência dos solos na sua fundação.



Figura 2 - Limites dos principais muros nas margens do Mondego. A linha vermelha representa os muros que serão alvo de requalificação prioritária (Google Earth, 2017).

A subida do nível do rio é um outro problema devido ao ambiente geológico ser propício ao assoreamento, com a acumulação de materiais terrígenos e devido ao degelo que tem vindo a ocorrer nos últimos milénios. Tanto quanto foi possível confirmar, a preocupação do assoreamento do rio Mondego vem desde o século XIII. Calcula-se que nos últimos seiscentos anos o leito do rio Mondego, na zona de Coimbra, terá subido cerca de um centímetro por ano, ou seja, um metro em cada século (Proença Cunha, Dinis, Freire da Silva & Nunes André 1995).

Consideramos, pois, muito provável que o rio, em 1513, em estiagem, corresse a cota máxima de 11,89m sobre o zero. Sendo assim, teria subido 5,16 m entre 1513 e 1872, e a média de assoreamento teria sido de 1,43 m por século, entre essas datas (Alarcão, 2012). Estes cálculos são, evidentemente muito incertos, pelo que só tem provavelmente explicação devido à construção das pontes, fazendo o leito do rio subir, devido ao efeito provocado pelo assoreamento.

Em 1962 foi preparado o Plano Geral de Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego, e implementado desde a década dos anos oitenta. Este Plano Geral, visava o aproveitamento da Bacia do Mondego nas suas possibilidades hidráulicas de utilização para fins múltiplos (Sanches, 1996). Desde esta implementação foi possível melhorar o controlo da subida das águas que provocam cheias e assegurar o aproveitamento dos recursos do rio Mondego, devido às infraestruturas criadas.

Nas figuras 3 a 7 ilustra-se o estado de degradação das margens do rio, sendo visíveis fissuras por onde já cresce vegetação e os passeios junto à estação Coimbra A com enormes deformações.

Caracterização Geológico-Geotécnica do vale do rio Mondego entre a Ponte do Açude Ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra



Figura 3 - Muro com fissuras junto à ponte de Santa Clara e consequente crescimento de vegetação.



Figura 4 - Passeio com deformações junto à estação Coimbra A.



Figura 5 - Rampa na portagem com deformações.



Figura 6 - Muro com fissuras, na zona a ser requalificada.



Figura 7 - Vegetação a crescer nas fissuras, junto à estação Coimbra A.

Ao longo deste trabalho vai-se também fazer a interpretação da geometria e distribuição das aluviões que encham o vale do Mondego após a erosão das últimas glaciações. Esta interpretação das aluviões, bem como outros métodos de prospeção e análises apresentados, vão servir de base para a interpretação dos problemas que se colocam no rio (assoreamento) e nas margens (deformações e problemas nas estruturas de engenharia) de modo a ter a geologia como base para a fundamentação da análise das causas, e que sirva para encontrar as soluções mais adequadas às condições naturais.

## 1.1 Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como principal objetivo, efetuar a caracterização geológica e geotécnica dos solos aluvionares do rio Mondego em Coimbra, com maior incidência entre a Ponte Açude e a Ponte Rainha Santa Isabel, mas também abordar e analisar a geologia que condiciona o enchimento aluvionar do vale do Mondego em Coimbra e as suas implicações.

Abordam-se principalmente os seguintes assuntos:

- as várias unidades geológicas que circundam o rio;

Caracterização Geológico-Geotécnica do vale do rio Mondego entre a Ponte do Açude Ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra

- as unidades geológicas que alimentam os sedimentos que chegam à secção do rio estudada;
- a taxa de acumulação de sedimentos (incluindo o fenómeno das glaciações);
- as cheias e regime hídrico do rio;
- o estudo geotécnico e as possíveis soluções de estabilização das margens;
- a intervenção humana (desflorestação, diques, pontes, casas e mosteiros na planície aluvionar) antiga e atual e as suas implicações;
- discutir toda esta informação e apresentar recomendações e conclusões.

Utilizam-se como elementos de base os trabalhos realizados na zona aluvionar, analisa-se a caracterização geológica e geotécnica da zona, os problemas associados às obras, avaliam-se os principais tipos de instabilidade dos muros de suporte das margens do rio, relacionando o estudo da geologia do local, obtida através de várias técnicas de prospeção, a fim de definir possíveis medidas de prevenção e de estabilização que possam ser aplicadas nas obras a realizar.

## 2 Enquadramento Local

Segundo Ribeiro (1979) a evolução tectónica da Bacia Lusitaniana foi condicionada por falhas, que se formaram durante o episódio de fracturação tardi-varisca aproximadamente entre os 300 e os 280 milhões de anos. Este episódio tardi-orogénico resulta da imposição de regime de cisalhamento direito à micro-placa ibérica nos seus paleolimites E-W setentrional e meridional, dos quais resultariam as falhas de desligamento esquerdo de direcção aproximada NNE-SSW a NE-SW (Ribeiro, 2002). Outras falhas orogénicas variscas de orientação N-S (falha de Porto-Tomar) e NW-SE foram também importantes na estruturação da Bacia Lusitaniana.

A evolução tectónica da Bacia Lusitaniana está condicionada pela distensão mesozóica relacionada com a abertura do Atlântico Norte, na proximidade do Atlântico Central, domínios oceânicos distintos separados pela Zona de Falha Açores-Gibraltar (ZFAG). Desta forma, alguns processos complexos, uns exógenos, outros de grande influência endógena, vão ficando registados na Bacia.

Os sedimentos da Bacia depositaram-se principalmente sobre as unidades da Zona de Ossa Morena e provavelmente também da Zona Sul Portuguesa (Dias & Ribeiro, 1995), pertencentes ao Maciço Hespérico, atingindo, nalguns locais, espessura máxima estimada na ordem de 5 000 m (Ribeiro et al., 1979).

A cidade de Coimbra localiza-se na Bacia Lusitaniana, no setor setentrional da mesma (Rocha & Soares, 1984; Ribeiro et al., 1996). Segundo Antunes (2012), este setor é limitado a sul devido à falha da Nazaré, que assume uma grande espessura de sedimentos depositados durante o Jurássico e o Cretácico, sendo também limitado a nordeste pela falha Porto-Tomar. De acordo com este mesmo autor, o preenchimento da bacia iniciou-se com a deposição de material composto por arenitos grosseiros, conglomerados e argilas, o atual *Grés de Silves*.

Em termos litológicos, mais de metade do Município de Coimbra, desenvolve-se em materiais do Complexo Xisto-Grauváquico que como já referido datam, provavelmente, do Câmbrico ao Pré-Câmbrico. No entanto, os traços mais marcantes da morfologia do território são conferidos pela dureza dos materiais associados às cristas quartzíticas.

De acordo com folha 19-D Coimbra – Lousã foi considerada a unidade litoestratigráfica para o Grupo das Beiras: da base para o topo: uma inferior Formação do Caneiro (NCa) constituída por metagrauvaques dominantes e metapelitos). Foram também consideradas de acordo com esta folha as Formações de Coimbra (Camadas de Coimbra e Camadas de S. Miguel), sendo identificado calcário dolomítico nestas formações.

Em relação ao Rio Mondego, desde a sua nascente, atravessa várias formações metamórficas e rochas graníticas, passando depois por formações xistosas e quartzíticas. Chegando a Coimbra, passando também na zona em estudo, onde atravessa vários afloramentos e zonas aluvionares, zonas essas que são o resultado da própria geodinâmica fluvial.

Na figura 8 pode-se observar o traçado do rio entre o relevo de montanha num vale encaixado a Este da ponte da Portela. Para jusante desta ponte o rio sofre um alargamento ao atravessar a cidade de Coimbra, sendo um rio mais vagaroso, com menor declive e propício ao assoreamento. Na última etapa, para além da Ponte Açude o vale alarga progressivamente, percorrendo uma vasta planície aluvionar de cerca de 40 km, cortando os conselhos de Coimbra, Montemor-o-Velho e Figueira da Foz, desaguando no oceano Atlântico.

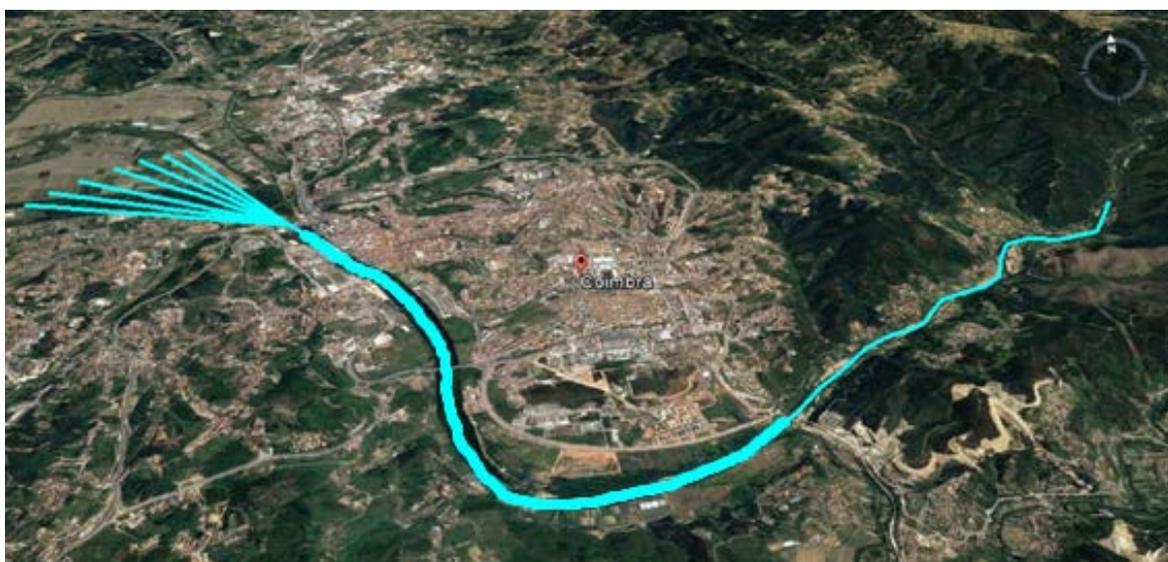


Figura 8 – Vale aluvionar do Mondego e trajetória do rio na envolvente a Coimbra (Google Earth, 2017).

## 2.1 Geologia regional

A área estudada localiza-se junto ao limite entre o Maciço Hespérico que é constituído por terrenos do Pré-câmbrico e os depósitos da orla meso-cenozóica. Este limite é devido a uma anomalia estrutural integrada na zona de fratura NNW-SSE, sendo terrenos correspondentes ao contacto entre a zona de ossa Morena e centro Ibérica.

Caracterização Geológico-Geotécnica do vale do rio Mondego entre a Ponte do Açude Ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra

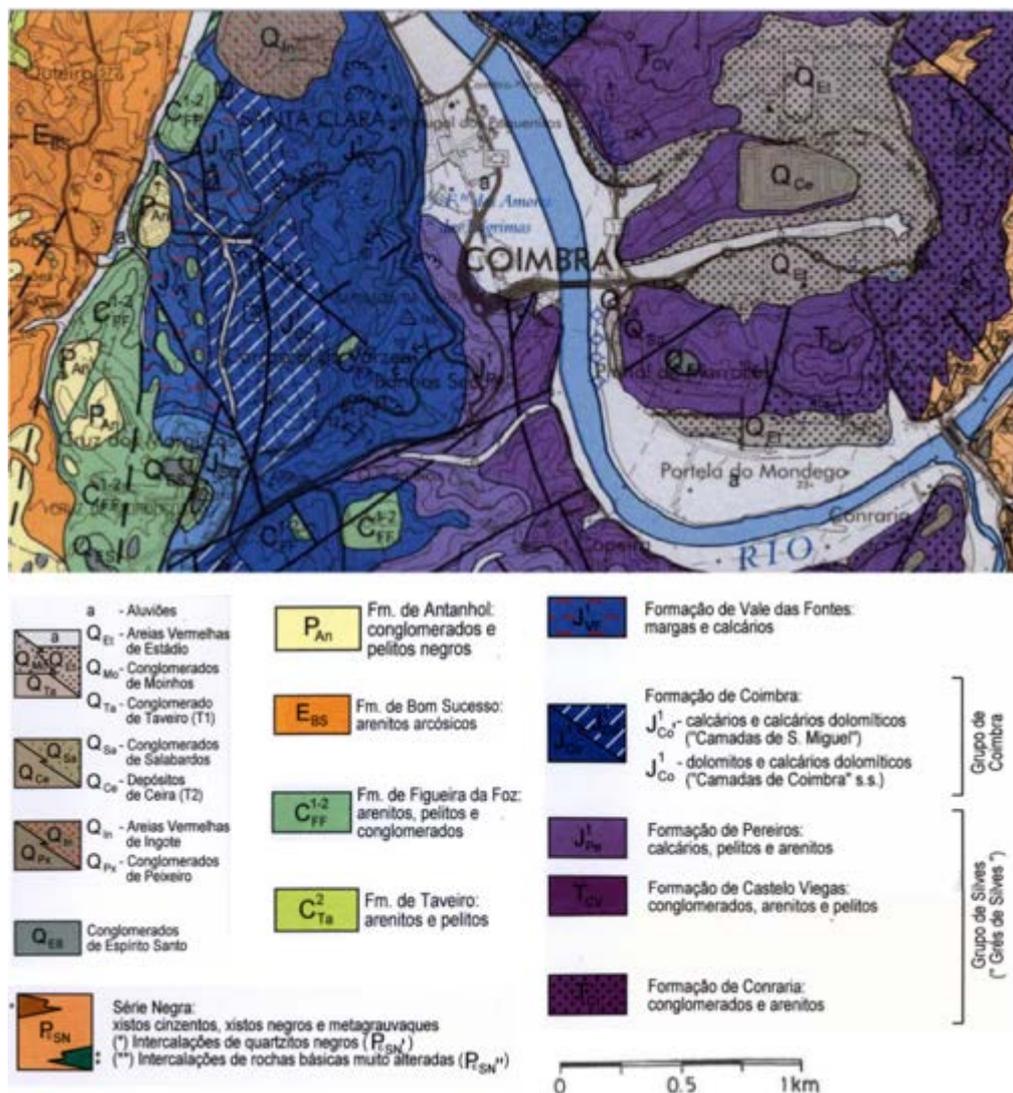


Figura 9 - Extrato da carta geológica de Portugal, folha 19-D à de escala 1:50000. Legenda simplificada da litologia (adaptado de Soares et al., 2007).

A carta da figura 9 não abrange toda a zona de estudo, contudo revela-se importante uma vez que permite conhecer a geologia regional e a geologia do local em estudo, sendo constituídas por várias formações, que irão ser referidas ao longo deste capítulo.

A formação série negra é composta por uma espessa sequência metassedimentar pelito-psamítica de tonalidade escura com intercalações de metaliditos negros, metavulcanitos e rochas carbonatadas. Esta sequência turbidítica é composta normalmente no seu topo por metapelitos e grauwaques de tons escuros com quartzitos negros, e na sua base por micaxistos biotíticos granatíferos e estaurolíticos (Chaminé et al., 2003).

Os afloramentos do Mesozóico possuem litologias do período Triásico, Jurássico, Cretácico e Quaternário.

Nesta zona de Coimbra afloram os depósitos detríticos do “Grupo de Silves” correspondentes ao “Grés de Silves” do Triásico. Neste grupo estão definidas também três sequências positivas que se inserem em três subunidades litostratigráficas. Estas formações do Triásico estão associadas a depósitos de granulometria grosseira e, conseqüentemente, a zonas de falha.

Os “Grés de Silves” existentes na zona de estudo, são essencialmente arenoconglomeráticos, submaturo e imaturo, que se organizam em sequências elementares positivas. Como é possível observar no quadro 1, verifica-se a evolução das unidades litoestratigráficas.

Quadro 1 - Evolução das Unidades Litoestratigráficas (Extraído de Soares et al., 1985).

CHOFFAT (1880-1903)		SOARES DE CARVALHO (1950)		PALAIN (1976)		UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS	
GRÉS DE SILVES	Camadas de Pereiros (108-129 m)	Camadas de Pereiros	GRÉS DE SILVES	C2	GRÉS DE SILVES (Grupo)	Camadas de Pereiros (50-60 m)	
	«Grés à nuance claire» (115-165 m)			C1 (10 m)			
	«Grés à rouge brique» (213-269 m)			B2 (5.4 m)			
		Camadas de Castelo Viegas (200 m)		B1 (210 ± 20 m)		Camadas de Castelo Viegas (170-190 m)	
		Camadas de Conraria (420 m)		A2 (80 m)		Camadas de Conraria (< 50 m)	
				A1 (100-140 m)			

Na transição dos materiais do Trássico para o Jurássico (topo das camadas de Pereiros para as bancadas carbonatadas das Camadas de Coimbra), encontram-se pelitos, essencialmente constituídos por silte e argila. (Quinta Ferreira, Velho e Pereira, 2004).

Do Jurássico, estão presentes as formações de Coimbra, de Vale das Fontes e de S. Gião.

Relativamente à Formação de Coimbra, esta integra, desde a sua base:

- Dolomitos e calcários dolomíticos, pertencentes às camadas de Coimbra s.s.
- Calcários e calcários dolomíticos, pertencentes às camadas de S. Miguel.

Em resumo, a formação de Coimbra, pertencente ao Jurássico Inferior, mais precisamente ao Sinemuriano-Carixiano Inferior, é composta por rochas carbonatadas, calcários e calcários margosos, ocorrendo também calcários dolomíticos e margocalcários. Esta formação é composta pelas camadas de Coimbra s.s. e camadas de S. Miguel.

Na zona de Coimbra, a Formação de Coimbra tem uma espessura entre os 70 e os 130 metros, tendo as Camadas de Coimbra espessuras entre 40 e 80 metros e as Camadas de S. Miguel dos 30 aos 50 metros de espessura.

A espessura total da unidade (Camadas de Coimbra) tem sido estimada em 200 metros (Choffat, 1903) e para a dolomias e calcários dolomíticos uma espessura de 150 a 300 metros, sustentando as zonas mais elevadas de Coimbra.

Estas camadas superiores remontam do período Sinemuriano ao Carixiano Inferior, traduzido por fácies e rampas monoclinais resultando em condensação em offshore na parte superior e inferior das camadas.

A formação de Vale das Fontes (Carixiano-Domeriano inferior) é composta por margas cinzentas acastanhadas, alternadas com bancadas de calcário margoso cinzento e rica em aminoácidos.

A formação de S. Gião (Toarciano-Aalenino inferior) é de natureza margo-calcária castanho acinzentada, com grande quantidade de aminoácidos. Esta formação é dividida em cinco subunidades de acordo com a natureza dos aminoácidos (Duarte & Soares, 2002).

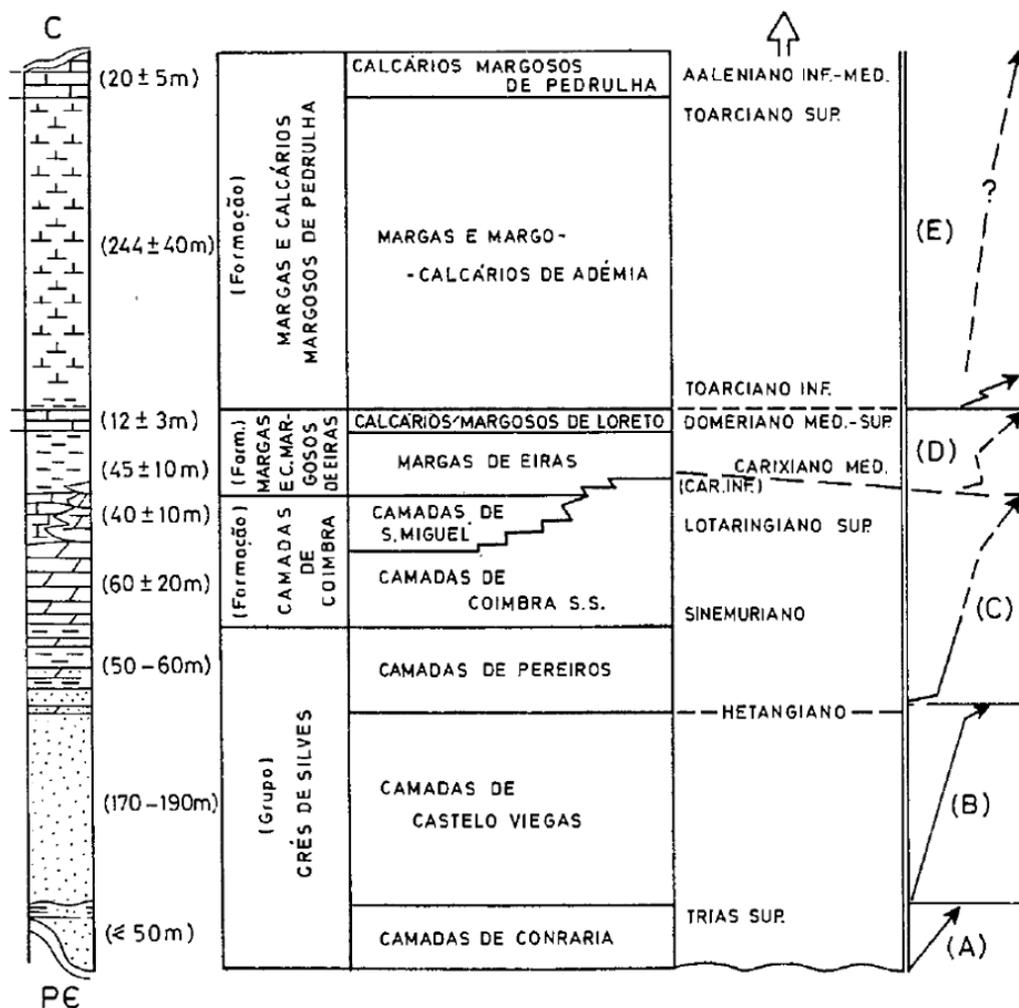
Em relação às formações do Triásico-Hentangiano (Grupo de Silves), estas constituem depósitos, que do topo para a base pertencem à formação hetangiana de Pereiros (constituídos por pelitos e calcários), às formações triásicas de Castelo Viegas (arenitos e pelitos) e às formações de Conraria (pelitos, arenitos e conglomerados). Relativamente à informação do Triásico e Jurássico da área cartografada, é possível verificar no quadro 2, as várias unidades líticas consideradas e ainda observar as diferentes unidades margosas ou calcários.

É possível verificar no quadro 2 as diferentes unidades, passando desde os ambientes continentais e hipersalinos das Camadas de Pereiros até aos ambientes marinhos de plataforma das Camadas de S. Miguel. É possível que o limite inferior das Camadas de Coimbra s.s não seja isócrono e tenha havido na base instabilidades para formação de pseudo-brechas.

## **2.2 Depósitos aluvionares**

Nos depósitos aluvionares têm particular interesse os que constituem o sistema aquífero designado “Aluviões do Mondego” (Almeida et al., 2000) sustentando grande parte do abastecimento regional de Coimbra. Este sistema é constituído pelos depósitos das zonas de Coimbra, incluindo a Quinta da Boavista, Taveiro, Ponte Açude e Ponte de Santa Clara dentro dos limites da zona em estudo.

Quadro 2 - Informação das várias camadas líticas encontradas (Extraído de Soares et al., 1985).



Deste montante até à ponte açude, as aluviões são formadas desde o topo por areias até calhaus na base, com intercalações de lodos e argilas. As aluviões observadas na quinta da Boavista têm espessuras na ordem dos 25 metros. Já as aluviões na zona da ponte açude têm espessuras na ordem dos 40 metros. Estas aluviões formam aquíferos com elevadas permeabilidades intersticiais, sendo que esses aquíferos facilitam a sua conexão ao rio Mondego.

Na zona de Taveiro as aluviões têm cerca de 25 metros de espessura, com areias mais finas à superfície, que se separam das mais grosseiras na base por espessos níveis de lodo e argila, que podem atingir mais de 5 metros, criando características de confinamento na base das aluviões condicionadas pela fácies argilosas e espessuras mais reduzidas dos aquíferos.

## 2.3 Geologia do troço em estudo

A geologia local em estudo, entre a ponte açude e ponte rainha Santa Isabel, no vale do rio Mondego, para além da formação de Coimbra e do Grés de Silves referidos anteriormente, é preenchido por aluviões espessos, correspondentes a depósitos terrígenos com forte estruturação associado à acumulação de materiais associados à dinâmica fluvial.

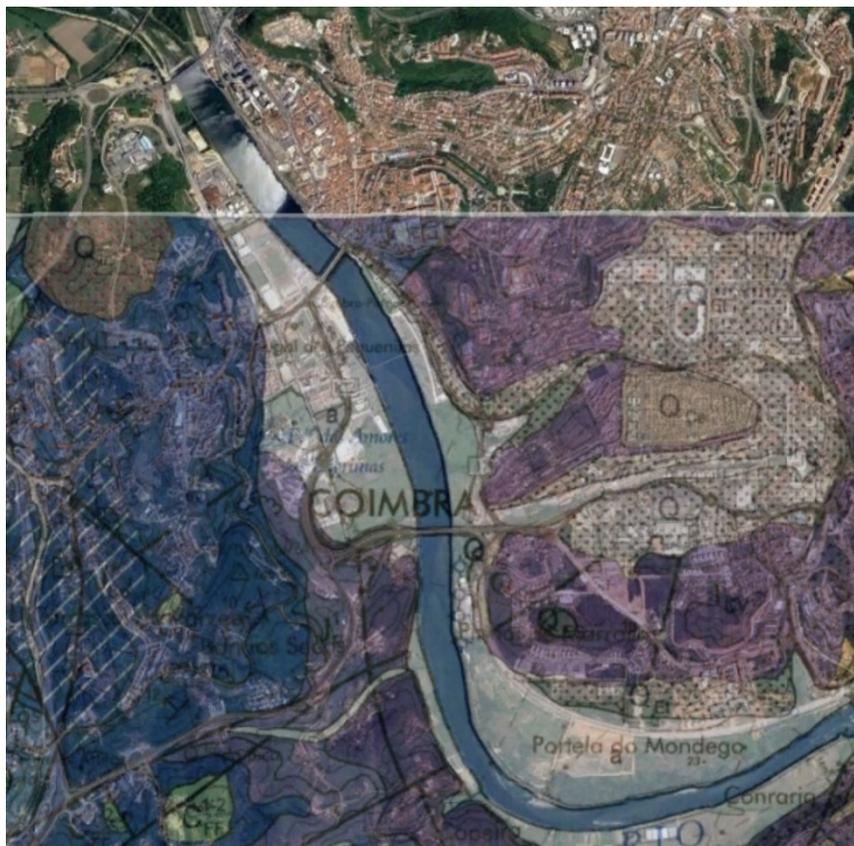


Figura 10 - Área de estudo com sobreposição de carta geológica 19-D. (Google Earth, 2017).

As camadas de Coimbra são essencialmente de natureza dolomítica, constituídas por dolomitos e calcários dolomíticos.

A colina de Santa Clara, constituída pelos calcários das camadas de Coimbra, encontra-se na margem esquerda do rio Mondego, enquanto na margem direita afloram calcários e arenitos. A transição entre as duas unidades localiza-se na zona do Parque Manuel Braga.

Segundo Soares, Marques e Rocha (1985), estas camadas de Coimbra têm início por bancadas dolomíticas espessas, castanhas, podendo ser homogéneas ou entrecruzadas. Sobre estas camadas vem as margas cinzentas, com clastos de dolomia. Depois surgem novas camadas dolomíticas que no contacto com as margas, apresentam aspetos brechóides. No topo, estas camadas tornam-se mais homogéneas, com bancadas com 15 a 70 cm de espessura, interestratificado com margas.

## Caracterização Geológico-Geotécnica do vale do rio Mondego entre a Ponte do Açude Ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra

Admitindo que o caráter dolomítico é o fator primário é possível constatar o limite com as camadas de S. Miguel. As camadas de S. Miguel têm uma estratificação mais regular, são formadas por calcários e calcários dolomíticos acinzentados e acastanhados, com estratificações de margas finas acinzentadas. Existe ainda alternância de bancadas de calcário margoso e margas cinzentas. Na parte superior os calcários são espessos, com materiais biodetríticos e fósseis.

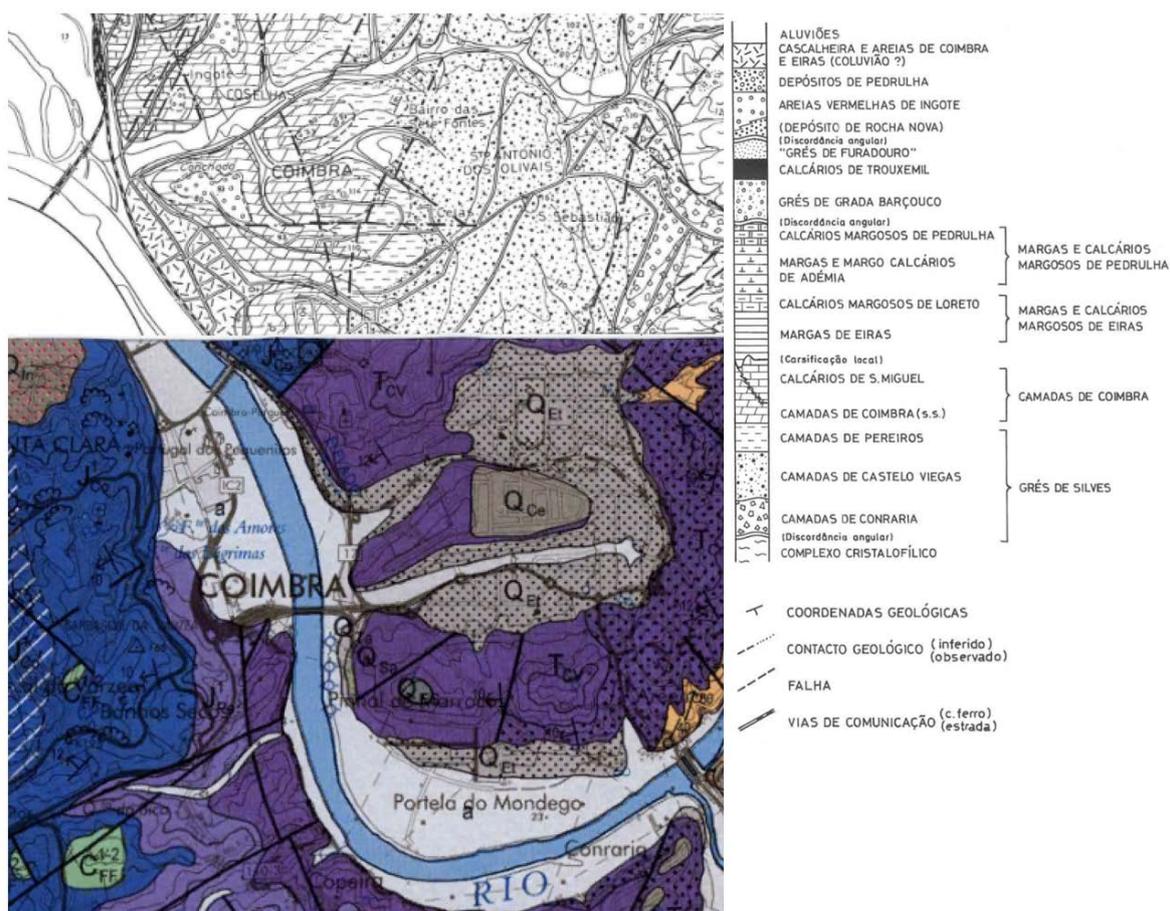


Figura 11 - Área de estudo com sobreposição de carta Coimbra Norte (Soares et al., 1987) e na parte inferior com extrato da carta geológica 19-D, Coimbra-Sul (Soares et al., 2007).

Como explicado anteriormente, esta zona de estudo encaixa no vale, constituído pelas camadas de Coimbra, Triásico Superior, Jurássico Inferior, Jurássico e os depósitos aluvionares do Quaternário.

Na margem direita do rio, existe a presença de areias vermelhas de Estádio, sendo possível ver estes depósitos terrigenos à superfície.

Para além das areias vermelhas, afloram ainda arenitos areno-conglomeráticos, constituídos por conglomerados de quartzo, xisto e quartzito de cor acastanhada e

corpos de arcoses na base. Estes arenitos, no topo são constituídos por corpos arenopelíticos e pelíticos de cor cinzenta, que pertencem à sequência do Grés de Silves.

## 2.4 Glaciações (subida do nível da base do mar)

O degelo dos glaciares e calotes de gelo em resultado do aumento da temperatura média global é um dos fatores que implica a subida do nível do mar. A diminuição do gradiente dos rios e a intervenção humana ao longo dos anos também contribuiu para o assoreamento em resultado do aumento do nível do mar. A desflorestação também pode contribuir para uma maior carga sólida dos rios pelo que nas zonas de menores gradientes ou com a construção de diques tende a aumentar a cota do leito do rio o que tende a afetar as construções existentes nas zonas aluvionares, tais como pontes, casas e mosteiros.

Em relação à zona em estudo, a unidade dos depósitos aluvionares resulta da acumulação de materiais associados à dinâmica fluvial, correspondendo a depósitos terrígenos com evidente estruturação interna, traduzindo a evolução do leito aluvial do rio Mondego.

A montante do açude-ponte as aluviões são constituídas por areias no topo e areias com seixos e calhaus na base, sendo as intercalações lenticulares de lodos e argilas menos significativas, quer em espessura quer em extensão.

A espessura das aluviões é variável, tendo sido observada na zona da quinta da Boavista, na zona de montante da área, uma espessura de 25 m e na zona do açude-ponte rondando os 40m o que ilustra o aumento de espessura das aluviões para jusante.

A geologia da zona em estudo condiciona o enchimento aluvionar do vale do Mondego em Coimbra. As unidades geológicas referidas acima, que englobam a zona de estudo onde vai ser feita a requalificação das margens do Rio Mondego, são mais finas no topo e mais grosseiras na base, verificando-se deposição de materiais neste sector do rio com uma taxa de acumulação muito grande.

De acordo com a “*Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 95, 17-32*” (Coelho & Lemos, 2001), o depósito de solos moles do Baixo Mondego estende-se ao longo da planície aluvionar do rio Mondego.

A formação do depósito do Baixo Mondego ocorreu sob as condições geológicas existentes durante e após o último período glacial, sendo que, no auge do último período glacial, o nível do mar situava-se cerca de 120m abaixo da sua posição atual (como se pode ver na figura 12), uma vez que grandes quantidades de água estavam consignadas à formação de enormes glaciares cuja espessura atingia, em alguns locais, vários quilómetros. Desde esse período, as alterações climáticas entretanto ocorridas produziram uma redução progressiva do volume dos glaciares, o que induziu uma

subida lenta do nível do mar até ao presente. Devido à subida do nível do mar e consequente diminuição da velocidade da corrente fluvial, o processo de sedimentação nos rios intensificou-se, levando à formação de muitos depósitos sedimentares nos vales.

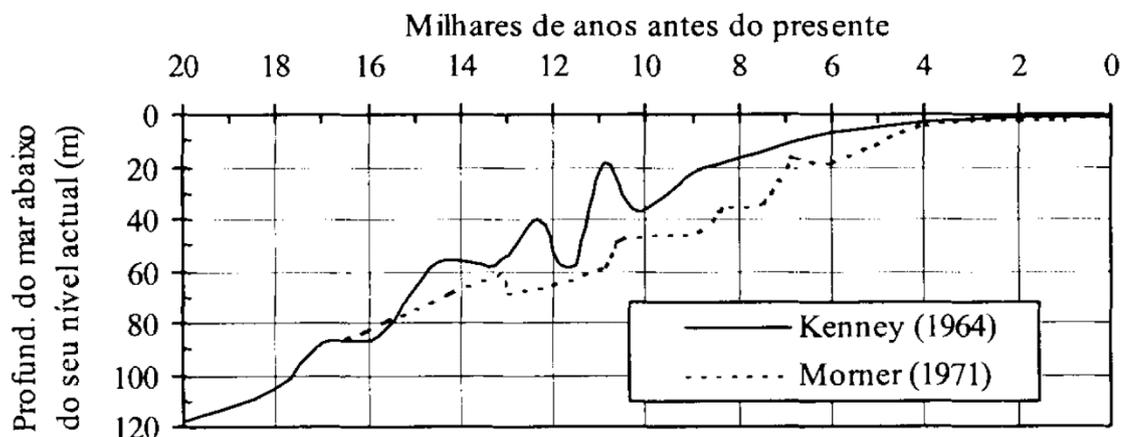


Figura 12 - Variação da posição do nível do mar desde a última época glacial (Quigley, 1980).

O depósito de solos moles do Baixo Mondego formou-se, assumindo o rio Mondego como responsável pela escavação dos vales envolventes e pelo transporte dos sedimentos recolhidos a montante e posteriormente depositados na sua secção final. Estes sedimentos resultaram da degradação e alteração dos maciços rochosos, fundamentalmente graníticos, atravessados a montante pelo rio Mondego. Assim, do ponto de vista da composição mineralógica do depósito, o quartzo, as micas e a caulinite são os minerais predominantes, evidenciando características da rocha-mãe.

## **3 Métodos de ensaios para a caracterização de zonas aluvionares**

### **3.1 Cartografia Geológica**

A cartografia geológica é uma tarefa básica e fundamental, que contempla todo o conhecimento geológico de uma região, nomeadamente a descrição das características geológicas de espaços territoriais. Segundo Romão (2005), a cartografia geológica revela-se um elemento essencial na planificação, gestão e controlo de todas as atividades humanas que exigem o uso do território. Deste modo, em quase todos os países do mundo, existem organismos, sendo estes maioritariamente dependentes do Estado, que se responsabilizam pela elaboração de cartas geológicas.

A carta geológica é um documento científico e técnico que representa graficamente de forma sintética a informação relativa aos materiais geológicos, que afloram na superfície da crosta terrestre. Apresenta ainda informação relativa à natureza e distribuição espacial das diferentes rochas e solos, quer à superfície quer em profundidade, à sua posição, atitude, idade relativa ou absoluta e a movimentos tectónicos ocorridos no decurso do tempo geológico, como também apresenta a ocorrência de substâncias minerais e localização de jazidas fossilíferas, nascentes de água naturais, poços, pedreiras, entre outros.

Por outro lado, as cartas geológicas incluem normalmente também as colunas estratigráficas representativas, cortes geológicos sintéticos e legenda com simbologia adaptada e esquemas de enquadramento geológico. Esta informação geológica está representada na carta geológica através de um vasto conjunto de cores e símbolos, que tem como objetivo facilitar a leitura e interpretação da informação representada.

Com base na carta geológica podem ser realizadas outras cartas que incluem informação especializada de carácter geológico, sendo designadas como cartas geológicas derivadas. As cartas geológicas derivadas ou também conhecidas como cartas geológicas temáticas têm como objetivo tratar um assunto específico. São exemplos destas cartas temáticas as cartas hidrogeológicas, litológicas, mineiras, tectónicas, geoquímicas, geofísicas, geotécnicas, geomorfológicas, de riscos geológicos, entre outras, (Romão & Cunha, 2012).

### **3.2 Geofísica**

A Geofísica é uma ciência que aplica os princípios da física ao estudo da Terra, que tem como objetivo investigar propriedades e aspetos da crosta terrestre que podem ocorrer embora possam não ser visíveis, como é o caso das falhas geológicas, depósitos de argila e de areia, entre outras.

No que diz respeito aos métodos de prospeção geofísica, são vários, contudo serão apenas referidos nesta dissertação o método da resistividade elétrica e os métodos sísmicos.

### 3.2.1 Método da resistividade elétrica

O método da resistividade elétrica baseia-se no princípio de que normalmente terrenos diferentes apresentam também resistividades elétricas diferentes.

No método de resistividade, é injetada corrente elétrica no terreno através de um par de elétrodos A e B, elétrodos de corrente, e é medida a diferença de potencial resultante entre outro par de elétrodos, neste caso o M e N, elétrodos de potencial. A resistividade do terreno é calculada a partir das distâncias entre elétrodos, ou seja, a corrente aplicada e a diferença de potencial medida. O resultado é a resistividade do terreno em ohm.m ou a condutividade em Siemen (S)/metro (Oliveira, 2009). Deste modo, a corrente elétrica constitui um fluxo de partículas portadoras de carga elétrica, sendo que a quantidade de carga que flui por unidade de tempo é a intensidade de corrente ( $I$ ).

O potencial elétrico diz respeito à capacidade de um corpo realizar trabalho, ou seja, capacidade de atrair ou repelir cargas elétricas. Já a tensão elétrica é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos.

Em relação às aplicações mais frequentes e eficazes do método de resistividade elas são várias, nomeadamente, caracterização geotécnica, mapas litológicos, prospeção de massas minerais, deteção de cavidades, prospeção de águas subterrâneas, deteção de plumas de contaminação, investigações arqueológicas, entre outras (Aktarakçi, 2008).

De acordo com Martinho (2002), no que se refere ao estudo de locais perigosos e não perigosos, o método de resistividade pode ser utilizado para localizar e delimitar plumas de contaminação, localizar locais de resíduos enterrados, verificar a qualidade da água subterrânea e estabelecer a direção e fluxo de propagação de plumas de contaminação, revelando-se um método muito útil.

O método de resistividade elétrica apresenta várias capacidades e limitações. Em relação às capacidades deste método refere-se (Martinho, 2002):

- As sondagens de resistividade podem estimar a profundidade, espessura e resistividade das camadas;
- Os dados obtidos pelas sondagens e perfis podem ser avaliados no terreno;

- Os valores da resistividade podem ser utilizados para identificar a composição geológica de uma camada, ou por outro lado, para estimar a condutividade de uma pluma.
- Contudo, em relação às limitações que o método de resistividade apresenta assume-se que:
- O método é muito suscetível ao ruído provocado por cercas metálicas, tubos e heterogeneidade geológica;
- É um método lento e exige dois ou três técnicos em campo;
- A interpretação quantitativa exige o uso de curvas padrão e/ou de programas de computador e experiência na sua utilização.

### 3.3 Prospecção mecânica

As técnicas de prospecção podem ser definidas em dois tipos, como refere Coelho (1996), por um lado as que permitem o exame visual do terreno quer em valas, poços, furos, galerias acessíveis ao homem ou acessíveis a sistemas de vídeo, com a recolha de amostras através de sondas de percussão, rotativas ou trados. Por outro lado, existem as técnicas que não recolhem amostras, mas que são ensaios de penetração como os “Ensaio *In Situ*”, como por exemplo o penetrómetro dinâmico leve e “standard penetration test” (SPT), que também é um penetrómetro que permite a amostragem; o pressiómetro; os ensaios rotativos (Vane Test); os ensaios de permeabilidade e de compactação geofísicos.

Por outro lado, Vallejo et al. (2002) referem-se à prospecção como “investigação *In Situ*”, dividindo-a em três grupos, designadamente: 1) grupo das sondagens geotécnicas, valas e poços; 2) grupo dos Ensaio *In Situ*; 3) grupo das sondagens geofísicas.

Deste modo, é com base na categorização deste autor que se procede à descrição dos métodos de investigação *in situ*.

#### 3.3.1 Grupo de sondagens geotécnicas, valas e poços

As sondagens geotécnicas, valas e poços são realizadas mediante a necessidade de haver dentro do maciço determinadas características, como por exemplo falhas, filões ou ainda determinar algumas características do maciço *in situ*, como pode ser o caso da permeabilidade.

Segundo Ayala Carcedo e Andreu Posse (1987), as valas e poços são realizados em maciços fáceis de escavar, de forma manual ou mecânica, em que o seu tamanho é limitado pelo objetivo da investigação, fatores de segurança e equipamento utilizado.

As sondagens mecânicas são definidas em função do tipo de mecanismo de perfuração que vai ser utilizado podendo ser:

#### **3.3.1.1 Sondagens à rotação**

Sondagens à rotação podem ser utilizadas quando se atinge material impenetrável à percussão, como por exemplo os solos em estado rochoso ou extremamente rijos, possibilitando a recolha de amostras cilíndricas de corpos rochosos.

#### **3.3.1.2 Sondagens à percussão**

Sondagens à percussão, que podem ser aplicadas em solos granulares, em solos coesivos, podendo atravessar solos de consistência rija ou muito rija. As sondagens, valas, poços e galerias permitem a recolha de amostras que podem ser alteradas ou não, contudo segundo Coelho (1996) a recolha de amostras inalteradas para o estudo laboratorial ocorre mais dificilmente em areias do que em argilas.

### **3.3.2 Grupo dos Ensaios *In Situ***

Ensaio *in situ* podem ser classificados em quatro grupos, nomeadamente em Ensaio de Resistência, Ensaio de Deformabilidade, Ensaio de Permeabilidade e Ensaio Penetrométricos.

#### **3.3.2.1 Ensaio de resistência**

Os ensaios de resistência permitem determinar os parâmetros de resistência dos maciços, encontrando-se assim agrupados de acordo com a natureza do maciço. Deste modo, nos ensaios de resistência em rocha podem ser utilizados:

#### **3.3.2.2 Martelo de Schmidt**

Permite estimar a resistência à compressão uniaxial em rochas utilizando uma simples correlação (Vallejo, 2002). O martelo Schmidt consiste num aparelho metálico de forma cilíndrica possuindo uma mola no seu interior e de uma ponta retrátil, que ao ser pressionada contra uma superfície provoca o disparo da mola, medindo a resistência dessa superfície.

O martelo mede o ressalto do impacto de uma massa, que está carregada por uma mola, contra uma superfície rígida. Esta medição é registada num indicador graduado, que permite entrar em ábacos e estimar parâmetros de resistência à compressão.

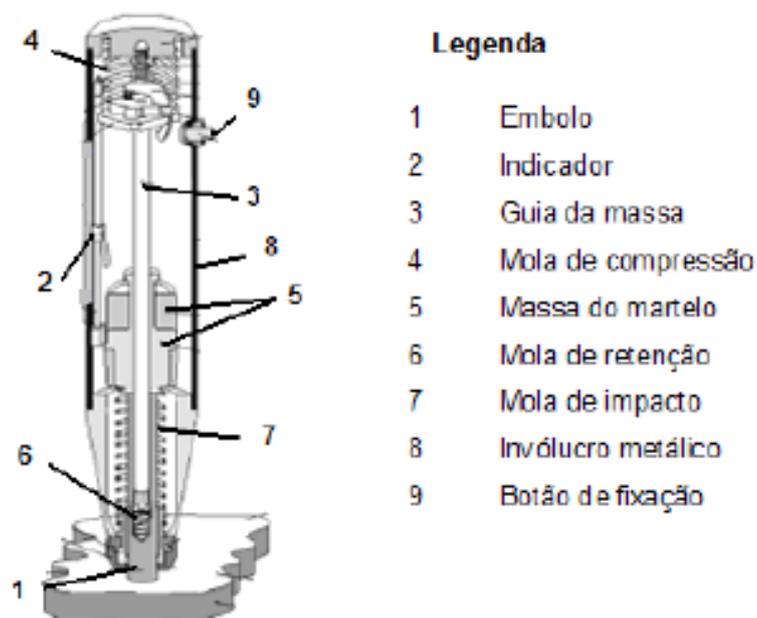


Figura 13 - Esquema do martelo de Schmidt (Adaptado de Tomaz, 2005).

### 3.3.2.3 Ensaio de Windsor ou pistola de Windsor

O Ensaio de Windsor ou pistola de Windsor consiste numa pistola que através da percussão de um cartucho de pólvora penetra no solo ou na rocha um pino de aço. A profundidade de penetração é utilizada para determinar a resistência da rocha utilizando curvas de calibração. A penetração varia conforme o tipo de material componente do maciço, das características da pistola e da quantidade de pólvora explodida.

### 3.3.2.4 Corte direto *In Situ*

O corte direto *in situ* tem como objetivo medir a resistência do corte de discontinuidades e pode ser realizado tanto em subterrâneos como a céu aberto, contudo na maioria dos casos realiza-se nas cavidades subterrâneas, em que os macacos são instalados contra as paredes e o teto das galerias. Por outro lado, no caso do céu aberto recorre-se a vigas ancoradas para apoiar os macacos, (Vallejo, 2002). Este ensaio realiza-se em duas fases, em primeiro lugar aplica-se uma carga constante e normal à discontinuidade sobre o bloco medindo os deslocamentos provocados. Posteriormente, aplicam-se cargas tangenciais até alcançar a rotura do bloco, permitindo a medição da magnitude da carga na rotura e os deslocamentos tangenciais e normais. Com o ensaio de corte direto é possível determinar os parâmetros de resistência residual, realizando-se assim os ensaios de amostras após a rotura do bloco. Este ensaio de corte direto normalmente é apenas usado em obras bastante específicas, como por exemplo o caso de barragens e algumas obras subterrâneas, uma vez que é um tipo de ensaio bastante caro.

### **3.3.2.5 Ensaio Vane test**

Segundo Ferruccio (1990) o ensaio Vane test é o principal método de medição da resistência ao corte (não drenada) *in situ* de solos coesivos saturados. Este teste consiste em cravar uma vareta com quatro lâminas ortogonais, permitindo a medição do valor máximo da torção, que permite estimar a resistência do corte.

### **3.3.3 Ensaios permeabilidade**

Segundo Coelho (1989; citado por Bessa, 2009) é fundamental conhecer os níveis hidráulicos e sua variação, como as propriedades hidráulicas do maciço, pois a água que presente no maciço pode provocar sérios problemas na realização de uma obra. O autor refere ainda que as propriedades hidráulicas são determinadas através de ensaios de Lugeon, Lenfranc e de Bombagem, sendo que os ensaios de Lugeon se destinam a maciços rochosos e os ensaios de Lenfranc e Bombagem são utilizados em maciços terrosos.

Ensaios de permeabilidade em solos – os ensaios de permeabilidade em solos podem ser realizados em carga variável ou em carga constante. Os ensaios de permeabilidade em solos mais conhecidos são os ensaios de bombagem e os ensaios de Lenfranc. Deste modo, o ensaio de bombagem permite determinar a variação da superfície piezométrica através da extração de um caudal de um aquífero. Por outro lado, o ensaio de Lenfranc resulta na provocação de variações de carga hidráulica, quer por injeção quer por bombagem, numa cavidade de dimensão conhecida. Este ensaio implica um especial cuidado na execução das cavidades, uma vez que poderá haver desmoronamento de paredes (Coelho, 1996).

Ensaios de permeabilidade em rochas – O ensaio Lugeon que se destina aos maciços rochosos tem como objetivo avaliar a possibilidade de circulação de água no maciço, resultando na injeção (radial) de água sob pressão num determinado trecho de um furo de sondagem e medir a quantidade de água que entra no maciço num período de tempo depois de estabelecido um regime de escoamento permanente (Coelho, 1996). É obtido um parâmetro de absorção do maciço em função da pressão de injeção utilizada, do caudal e do diâmetro do furo, podendo ser estimada a permeabilidade com base em correlações empíricas.

### **3.3.4 Ensaios penetrométricos**

Os penetrómetros são aparelhos que medem a resistência à penetração de um solo em profundidade, através da cravação de uma ponteira (Ayala-Carcedo e Andreu Posse, 1987). A estratégia de cravação possibilita a classificação dos ensaios penetrométricos em penetrómetros estáticos e penetrómetros dinâmicos.

Deste modo:

**Ensaios de penetração estática** – Designados de CPT (Cone Penetration Test) e segundo Ferruccio (1990) como Static Penetration Test, Quasi-Static Penetration Test, que podem ter variações, originando os CPTU e a os SCPTU (piezocones). De acordo com Cassan (1982), os CPT apresentam um “carácter prático, de fácil interpretação” fazendo do CPT “uma ferramenta de primeira”. Para Ferruccio (1990), esta ferramenta é inigualável, uma vez que revela a estratigrafia, na vertical do maciço em estudo. Na opinião de Pereira (2005), o ensaio CPT pode substituir vantajosamente o ensaio SPT, em alguns solos (exemplo argilas moles e areias finas a médias) e permite a menor variabilidade de resultados dentro de uma mesma formação.

**Ensaios de penetração dinâmicos** - Os ensaios de penetração dinâmica permitem de forma simples e rápida investigar as condições dos solos *in situ*, obtendo-se informações geotécnicas praticamente em contínuo. De acordo com Cassan (1982), este tipo de ensaios resulta na penetração do solo, por meio de pancadas, de um conjunto de varas unidas a tubos metálicos, permitindo obter uma indicação qualitativa de resistência do maciço. O ensaio de penetração dinâmica divide-se em duas fases, nomeadamente nas operações preliminares e a realização do próprio ensaio (Ferruccio, 1990).

Em Portugal, os penetrómetros de utilização mais frequente são o PDL e o DPSH, em que na norma europeia EN ISO 22476-2:2005 é possível verificar os procedimentos de realização e análise.

Os ensaios DP (penetrométricos dinâmicos) são uma opção bastante atrativa a incluir nas campanhas de caracterização geotécnica, devido à sua grande manobrabilidade, execução elementar e baixo custo e ao facto importante de estar associado a grandes rendimentos. Segundo Fonseca (1996), constituem métodos mais adequados para a avaliação da posição do “firme” e como detetores de obstáculos pontuais ou com singularidades do maciço natural ou criados pelo homem.

A utilização destes ensaios é praticável em materiais que apresentam resistência apreciável à penetração de outros equipamentos, em que ao ser possível utilizar mais do que uma energia de penetração permite cobrir uma vasta gama de tipos de solos, como por exemplo argilas moles, siltes, areias e cascalhos, solos residuais ou argilas rijas.

De acordo com Rodrigues (2003), normalmente os ensaios de penetração dinâmica realizam-se nas fases iniciais de prospeção, permitindo obter informações qualitativas e quantitativas das características do subsolo. O ensaio permite determinar as características e espessura de solos e materiais de cobertura, detetar irregularidades

no solo, determinar a localização de camadas irregulares e localizar níveis de elevada rigidez.

Com o objetivo de normalizar os equipamentos e metodologias de ensaio a norma EN ISO 22476-2:2005 define as dimensões e massas dos quatro tipos de dispositivos para a realização de ensaios de penetração dinâmica como é possível verificar no quadro seguinte.

Quadro 3 - Dimensões e massas dos quatro tipos de dispositivos para ensaios de penetração dinâmica, adaptado da norma EN ISO 22476-2:2005.

Dispositivos para ensaios de penetração dinâmica	Símbolo	Un.	DPL (ligeiro)	DPM (médio)	DPH (pesado)	DPSH (super pesado)	
						DPSH-A	DPSH-B
<b>Dispositivo de queda</b>							
Massa do martelo, M	m	kg	10 ± 0,1	30 ± 0,3	50 ± 0,5	63,5 ± 0,5	63,5 ± 0,5
Altura de queda, H	h	mm	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	750 ± 20
<b>Batente</b>							
Diâmetro	d	mm	50 < d < D <sub>h</sub> <sup>a</sup>	50 < d < D <sub>h</sub> <sup>a</sup>	50 < d < 0,5D <sub>h</sub> <sup>a</sup>	50 < d < 0,5D <sub>h</sub> <sup>a</sup>	50 < d < 0,5D <sub>h</sub> <sup>a</sup>
Massa (máx.) incluindo barra guia	m	kg					
<b>Cone de 90°</b>							
Área nominal da base	A	cm <sup>2</sup>	10	15	15	16	20
Diâmetro da base, nova	D	mm	35,7 ± 0,3	43,7 ± 0,3	43,7 ± 0,3	45,0 ± 0,3	50,5 ± 0,5
Diâmetro da base, usada (min.)		mm	34	42	42	43	49
Comprimento da camisa cilíndrica	L	mm	35,7 ± 1	43,7 ± 1	43,7 ± 1	90,0 ± 2 <sup>b</sup>	51,0 ± 2
Comprimento da ponta cónica		mm	17,9 ± 0,1	21,9 ± 0,1	21,9 ± 0,1	22,5 ± 0,1	25,3 ± 0,4
Desgaste máx. admissível da ponta		mm	3	4	4	5	5
<b>Varas<sup>c</sup></b>							
Massa (máx.)	m	kg/m	3	6	6	6	8
Diâmetro exterior (máx.)	d <sub>e</sub>	mm	22	32	32	32	35
Desvio da vara <sup>d</sup> :							
nos 5 m inferiores		%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
nos restantes		%	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Energia específica por pancada	E <sub>n</sub>	kJ/m <sup>2</sup>	50	100	167	194	238

a : D<sub>h</sub> - diâmetro do martelo. Em caso de este ser de forma retangular, assume-se a menor dimensão como equivalente ao diâmetro.

b : Somente da ponta perdida.

c : O comprimento máximo das hastes não deve exceder os 2 m.

d : Desvio das hastes em relação à vertical.

No que diz respeito às características do equipamento, existem algumas que podem influenciar os resultados dos ensaios, nomeadamente o diâmetro da ponta cónica; o comprimento do trem de varas; o desvio das varas em relação à posição vertical e as perdas de energia do sistema de penetração. Deste modo, a escolha do tipo de penetrómetro dinâmico depende das opções na prospeção e do conhecimento prévio das características dos terrenos, de modo a que a energia do equipamento seja a indicada à profundidade que se pretende alcançar e ao tipo de terreno em estudo.

Assim, os tipos de penetrómetros dinâmicos apresentam características diferentes que se devem ter em consideração nas prospeções geotécnicas, nomeadamente:

- DPL utilizam-se em profundidades que não ultrapassam os 8 m. A massa do martelo é de 10 kg e a altura da queda é de 0,5 m. É necessário contar-se o número de pancadas para que ocorra uma cravação de 10 cm ( $N_{10}$ ).
- DPM pode alcançar os 20 m de profundidade. A massa do martelo que cai livremente de uma altura de 0,5 é de 30 kg. Regista-se o valor de  $N_{10}$  com o avanço em profundidade.
- DPH atinge profundidades entre os 20 e os 25 m. A altura da queda é de 0,5 m, a massa do martelo é de 50 kg e regista-se o valor de  $N_{10}$ .
- DPSH. A norma EN ISO 22476-2:2005, subdivide o DPSH em DPSH-A e DPSH-B, conforme a altura de queda do martelo que pode ser de 0,5 ou de 0,75 m, respetivamente, sendo a massa do martelo de 63,5 kg. A profundidade alcançada pelo DPSH é superior a 25 m, registando-se o número de pancadas efetuadas para que aconteça a cravação da ponteira crónica. Em relação à energia cinética o ensaio DPSH-B é semelhante ao ensaio SPT, possibilitando o estabelecimento de relações diretas entre estes dois tipos de ensaios de penetração.

Segundo Matos Fernandes (2011), são desconhecidos métodos que possibilitem interpretar teoricamente os resultados dos ensaios com penetrómetros dinâmicos para alcançar parâmetros dinâmicos do terreno.

### **3.4 Ensaios *In Situ* e Ensaios de Laboratório**

Os ensaios *in situ* e ensaios de laboratório são tipos de ensaio que se complementam uma vez que ambos apresentam vantagens e limitações.

Os ensaios *in situ* realizam-se no solo no seu meio natural permitindo em certa parte evitar a alteração das amostras recolhidas.

Os ensaios *in situ* revelam-se importantes na medida em que o volume de solo analisado tende a ser muito superior à amostra recolhida pelos ensaios de laboratório. Contudo, segundo Duarte (2002), as condições de fronteiras, geralmente, são mal conhecidas como também as condições de drenagem durante a realização do ensaio, não sendo assim viável o estudo de tensões efetivas.

Os ensaios *in situ* são uma alternativa aos ensaios de laboratório uma vez que podem ser mais económicos; são métodos expeditos e rápidos para a determinação de parâmetros geotécnicos dos maciços; são realizados nos maciços no seu meio natural permitindo assim uma análise global tanto do maciço como da envolvente e por fim

permitem obter informações necessárias para avaliar de forma qualitativa e quantitativa o comportamento geotécnico dos maciços e dos materiais que os constituem através de parâmetros geomecânicos, tais como a resistência, a deformabilidade e a permeabilidade.

### **3.4.1. Ensaios *In Situ***

Os ensaios *in situ* são realizados nas condições naturais, o que é uma característica fundamental na determinação das tensões *in situ*. É uma vantagem realizar estes ensaios quando se intercetam formações nas quais não é possível recolher uma amostra representativa, existindo assim equipamentos que permitem obter informação contínua, como por exemplo o Cone Penetration Test (CPT).

Segundo Fonseca (1996), a realização de ensaios geotécnicos *in situ* num determinado local tem como principal objetivo determinar as propriedades do solo necessárias para o dimensionamento de estruturas geotécnicas, revelando-se por vezes o meio mais fiável para determinar os parâmetros a serem utilizados na análise e no dimensionamento geotécnico ou apenas para avaliação de perfis do subsolo.

Com a utilização dos ensaios *in situ* pretende-se caracterizar o terreno, determinar as propriedades específicas do solo e verificar hipóteses de cálculo e análise retrospectivas (IGEOTEST, 2004).

De acordo com Viana da Fonseca (2004) para uma boa caracterização dos maciços são indispensáveis algumas metodologias para a análise geotécnica *in situ*, nomeadamente o mapeamento, métodos de prospeção geofísica, bases de dados materiais e zonais, sondagens de furação com recolha de amostras, poços de inspeção e amostragem a trado.

Na seleção dos ensaios *in situ* para a caracterização mecânica dos solos devem ser considerados três fatores principais, designadamente: a variabilidade destes materiais tem que ser bem avaliada, a vasta gama de rigidez e resistência que tipifica um determinado maciço natural supõe tecnologias que se adaptem facilmente a respostas heterogéneas, sem esquecer as exigências de uma boa sensibilidade para avaliação paramétrica e por último a interpretação tem que ser adequada a diferentes condições de textura, anisotropia e saturação dos solos (Viana da Fonseca, 2004).

Nos trabalhos de Cruz (2010) é possível obter informações relacionadas com ensaios *in situ* sobre as suas características gerais, domínio de aplicação e qualidade dos parâmetros resultantes como se podem verificar nos quadros 4 a 6.

Caracterização Geológico-Geotécnica do vale do rio Mondego entre a Ponte do Açude Ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra

Quadro 4 - Características de ensaios *in situ* (Cruz, 2010).

	*SPT/DP's	*PLT	*FVT	*SCPTU	*PMT	*DMT
<b>Equipamento</b>	Simples e robusto	Simples e robusto	Simples e robusto	Complexo e sensível	Complexo e sensível	Simples e robusto
<b>Execução</b>	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil	Complexo	Fácil
<b>Tipo Perfil</b>	Contínuo Descontínuo	Descontínuo	Descontínuo	Contínuo	Descontínuo	Contínuo
<b>Interpretação</b>	Empírica	Teórica	Empírica Teórica	Empírica Teórica	Empírica Teórica	Empírica Teórica
<b>Tipo de solo</b>	Todos os tipos	Aterros Solos acima do nível freático	Argilas moles	Argilas muito moles a rígidas, areias muito soltas a medianamente compactas	Todos os tipos	Argilas muito moles a rígidas, areias muito soltas a medianamente compactas Aterros
<b>Tipo de informação</b>	Qualitativa	Quantitativa	Quantitativa	Quantitativa	Quantitativa	Quantitativa
<b>Informação Geotécnica</b>	Compactação e consistência derivado de modelos parametrizados	Módulos de deformabilidade e capacidade de carga de fundações superficiais	Resistência ao corte não drenado	Avaliação contínua da densidade e resistência Avaliação descontínua da rigidez e das propriedades hidráulicas	Compressibilidade e capacidade de carga	Estado de tensão, histórico de tensões, resistência e propriedades hidráulicas
<p>*<b>SPT/DP's</b>- Standard Penetration Test/ Penetrómetros dinâmicos; *<b>PLT</b>- Ensaio de carga em placa; *<b>FVT</b>- Vane test; *<b>SCPTU</b> - Ensaio sísmico de CPTU; *<b>PMT</b>- Pressiómetro de Menard; *<b>DMT</b>- Dilatómetro de Marchetti.</p>						

Quadro 5 - Aplicabilidade dos Ensaio *in situ*, Cruz (2010).

	Tipo de solos					
	Gravilhas	Areias		Siltes	Argilas	
		Soltas	Densas		Moles	Compactas
<b>SPT e DP's</b>	2 a 3	1	1	2	3	3
<b>PLT</b>	4	1	1	1	1	1
<b>FVT</b>	4	4	4	3	1	2
<b>CPT (Mec)</b>	2 a 3	1	2	1	1	2
<b>CPT (Elect)</b>	3	1	2	1	1	2
<b>SCPTU</b>	3	1	2	1	1	2
<b>PMT</b>	2	2	1	1	1	1
<b>SBPT</b>	3	2	2	1	1	1
<b>DMT</b>	3	1	2	1	1	2

1-Alto; 2- Moderado; 3- Limitado; 4- Inapropriado.

Quadro 6 - Qualidade dos parâmetros deduzidos (Cruz, 2010).

	Tipo de solo/perfil	u	y	Cu	ø	I <sub>D</sub>	M	G <sub>0</sub>	K <sub>0</sub>	OCR	C <sub>v</sub>	k
<b>SPT</b>	Perfuração	---	3	3	3	2	3	3	---	---	---	---
<b>DP's</b>	---	---	---	3	3	2	3	3	---	---	---	---
<b>FVT</b>	Perfuração	---	---	1	---	---	---	---	---	---	2 / 3	---
<b>PLT</b>	---	---	---	2	3	---	1	1	---	---	---	---
<b>PMT</b>	Perfuração	---	---	2	3	3	2	2	3	3	---	---
<b>CPTu</b>	1 / 1	1	2	2	2	2	3	3	---	3	1 / 2	2
<b>SCPTu</b>	1 / 1	1	2	1 / 2	2	1 / 2	1 / 2	1	---	2	1 / 2	2
<b>DMT</b>	1 / 1	3	2	1 / 2	2	1 / 2	1 / 2	2 / 3	2 / 3	2	---	---
<b>SDMT</b>	1 / 1	3	1	1 / 2	2	1 / 2	1	1	2	2	---	---
<b>CH</b>	Perfuração	---	---	---	---	---	---	1	---	2	---	---

1- Alto; 2- Moderado; 3- Limitado; 4- Inapropriado.  
u- Pressão neutra; y- Peso volúmico; cu – Resistência não drenada; ø- Ângulo de atrito; ID – Índice de compactidade; M – Módulo de deformabilidade; G<sub>0</sub> – Módulo de distorção; K<sub>0</sub> – Coeficiente de impulso; OCR – Grau de sobreconsolidação; cv – Coeficiente de consolidação vertical; k – Coeficiente de permeabilidade.

É possível concluir após a análise da informação disponibilizada por Cruz (2010) que cada tipo de ensaio apresenta as suas vantagens e desvantagens dependendo do tipo de solo a caracterizar e da qualidade dos parâmetros a inferir. Deste modo, é necessário conjugar vários tipos de ensaios nas campanhas geotécnicas, uma vez que as desvantagens de um tipo de ensaios podem ser ultrapassadas pelas vantagens de outro.

Segundo o mesmo autor, a realização de campanhas combinando vários tipos de ensaios aumentam o nível de eficiência do conjunto. A combinação de vários tipos de ensaios na realização de campanhas resulta em várias vantagens, nomeadamente: 1) aumento do número de parâmetros geotécnicos avaliados como resultado da soma de várias combinações de ensaios; 2) estão disponíveis mais parâmetros de ensaio para combinar, surgindo deste modo mais possibilidades para deduzir parâmetros geotécnicos que não poderiam ser obtidos de outra forma; 3) cada ensaio tem as suas vantagens e limitações diferentes e que combinados podem corrigir ou completar as informações obtidas; 4) o cruzamento de informação do mesmo parâmetro geotécnico obtido por mais do que um ensaio permite a calibração das correlações e a deteção da inadequada aplicação de metodologias decorrentes e 5) é possível combinar testes adaptados às condições locais com o objetivo de avaliar as informações de boa qualidade nos estratos com diferentes níveis de resistência à penetração.

Segundo Ribeiro (2011), as combinações de ensaios devem ser selecionadas incluindo sempre um ensaio contínuo. Utilizar o ensaio SPT com o ensaio DPSH pode resultar num método interessante, uma vez que ambos funcionam de forma semelhante possibilitando uma fácil correlação local entre os resultados dos dois ensaios. Para Folque (1996), aproveitar a informação qualitativa e quantitativa, que se pode obter com a operação de cravar um dispositivo penetrante num maciço foi um recurso que se apresentou desde as fases primitivas da sistematização da prospeção geotécnica. Deste modo, surgiram vários penetrómetros, a partir dos quais se deduziam correlações com características mecânicas dos solos ensaiados.

Contudo, destes penetrómetros universalizaram-se três tipos em que os seus resultados têm permitido identificar, caracterizar e quantificar características mecânicas de terrenos, sendo eles o ensaio de penetração STP (Standard Penetration Test), o ensaio de penetração estática CPT (Cone Penetration Test) e os ensaios penetrómetros dinâmicos com ponteiros crónicas DP (Dynamic Probing).

### 3.4.1.1 Ensaio de penetração SPT

Segundo Matos Fernandes (2011) o ensaio Standard Penetration Test (SPT) é o ensaio *in situ* de penetração dinâmica mais utilizado em todo o mundo e tem como principal objetivo determinar, em profundidade, a resistência dos solos à penetração dinâmica de um amostrador normalizado, através do número de pancadas necessárias para penetrar no terreno um certo comprimento. Esta penetração dinâmica permite o reconhecimento geotécnico do solo através da análise das amostras de solo retiradas do amostrador.

A realização do ensaio SPT pretende essencialmente determinar os parâmetros de resistência e de deformação de solos sem coesão (solos granulares), sendo possível utiliza-lo também em outros tipos de solos, como por exemplo determinar a consistência dos solos coesivos (solos argilosos) e caracterizar as rochas brandas.

Na opinião de Fonseca (1996), este ensaio tem como vantagem a possibilidade de poder associar a resistência à penetração e a recolha de amostras ao longo de um perfil geotécnico. Apesar de ser um ensaio simples de realizar, este ensaio apresenta limitações na medida em que o uso de correlações empíricas para parametrização geotécnica pode variar muito conforme o tipo de maciço e de equipamento utilizado.

No que respeita aos resultados obtidos através do SPT, vários autores (Cavalcante, 2002; Odebrecht, 2003) referem que os resultados podem ser influenciados por diversos fatores, como por exemplo pelos operadores, dispositivos de cravação, tipos de solo e pelas condições de amostragem.

Por outro lado, Mayne et al. (2002) descrevem vantagens e desvantagens do ensaio SPT, referindo como vantagens o facto de ser um ensaio simples e robusto, ser adequado a muitos tipos de solos, permitir obter uma amostra e um valor simultâneo e poder ser realizado em rochas brandas. Por outro lado, como desvantagens aponta o facto de não poder ser realizado em argilas ou siltes muito moles, a recolha simultânea resulta em má qualidade tanto para a amostra como para os valores obtidos, e também a perturbação da amostra com as pancadas, o que revela grande variabilidade e incerteza.

Deste modo, devido à grande variedade de fatores que afetam os resultados do ensaio SPT, é importante realizar outros tipos de ensaios para comparação e complemento, como por exemplo os CPT, DPL, DPSH, ensaios pressiométricos, ensaios geofísicos, entre outros.

### **3.4.2 Ensaios de Laboratório**

No que respeita aos ensaios de laboratório, estes têm a grande vantagem de terem as suas condições de fronteira bem definidas e as condições de drenagem bem controladas.

As características físicas e químicas do solo em estudo são bem conhecidas como também as trajetórias de tensões, que são previamente selecionadas e posteriormente aplicadas durante o ensaio.

Segundo Duarte (2002), em relação às limitações dos ensaios de laboratório a principal limitação deve-se à dificuldade de dispor de amostras realmente representativas. Esta falta de representatividade agrava-se nos solos heterogéneos a uma certa escala, devido à desproporção entre as dimensões da amostra relativamente ao maciço. Por outro lado, representa uma limitação dos ensaios de laboratório o facto de as condições de fronteira poderem ser afetadas pelo contacto entre a amostra e o aparelho de ensaio.

Os métodos de recolha de amostras intactas têm evoluído, contudo resulta sempre numa ação que altera as propriedades originais do solo, sendo que a recolha de amostras inalteradas só é possível nos solos que apresentem um nível mínimo de coesão. Para além destas questões, os ensaios de laboratório apresentam também objeções de natureza teórica no que respeita à sua interpretação e utilização que se pode fazer com os resultados obtidos.

## 4 Prospeção das margens do Mondego

Para esta dissertação vou apresentar várias sondagens e alguns outros métodos de prospeção realizados ao longo dos anos para outros projetos, bem como alguns ensaios e análises feitos. Estas sondagens estão inseridas na área de estudo (Figs. 14, 15 e 16) pelo que são muito importantes. Como são várias sondagens para vários projetos, vão permitir uma análise mais aprofundada e um zonamento mais preciso para um perfil geral de toda esta zona em estudo.

Através da separata do artigo publicado no Boletim da Ordem dos Engenheiros N. 21 – Vol. III, (Mesquita Cardoso e Franco Abreu, 1954), foram analisadas 8 sondagens (S1\_SC a S8\_SC) na ponte de Santa Clara, nas quais foram recolhidas várias amostras intactas dos terrenos atravessados, para reconhecimento geológico, geotécnico e ensaios laboratoriais. Foram ainda executados ensaios de injeções de cimento para melhorar o comportamento das formações arenosas no furo de sondagem S8\_SC.

De acordo com Lopes (2009) a Ponte Rainha Santa Isabel, inaugurada em 2004, permitiu um melhor e mais rápido acesso à zona sul de Coimbra. Por consulta do relatório “Ponte Europa sobre o Rio Mondego, Projeto de Execução” realizado em 1999, apenas se teve acesso a uma sondagem “S1\_RSI”, permitindo analisar ensaios de penetração estática (CPTU), ensaios de penetração dinâmica (CPT) e quantificar a percentagem de recuperação dos solos.

Na ponte Pedro e Inês, situada sobre o rio Mondego e inaugurada a 28 de novembro de 2006, segundo o relatório “Elaboração de Prospeção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovía sobre o Rio Mondego” realizado em julho de 2003, foram realizadas 4 sondagens na zona terrestre (S1\_PI, S2\_PI, S9\_PI e S10\_PI) e 2 sondagens na zona do leito do rio (S3\_PI, S4\_PI) (Lopes, 2009). Para além destas sondagens foram feitos ainda 2 furos (PM1 e PM2) de modo a serem feitos ensaios pressiométricos de Menard.

Foram ainda tidas em conta três sondagens (S1\_EP, S2\_EP e S3\_EP) realizadas em março de 2010, pelo IPNlabgeo (Instituto Pedro Nunes), no âmbito do projeto “Construção da Nova Escada de Peixes do Açude-Ponte de Coimbra” (Quinta Ferreira, 2010). Na conclusão destas sondagens vão ser comparados os resultados com outras prospeções geotécnicas (incluindo sondagens) realizadas em março de 1978 também no Açude-Ponte.

Foram realizadas várias sondagens entre o Parque Manuel Braga e Ponte do Açude (sondagens S1, S2, S3, S4) em agosto de 2011 (Quinta-Ferreira et al., 2011) e março de 2009 (sondagens S1\_SAB, S2\_SAB, S3\_SAB, S4\_SAB, S5\_SAB, S6\_SAB,

S7\_SAB, S8\_SAB) para a empresa Águas do Mondego, (Nogueira, Pinheiro, Vergas, 2009) cedidas pela Câmara Municipal de Coimbra.

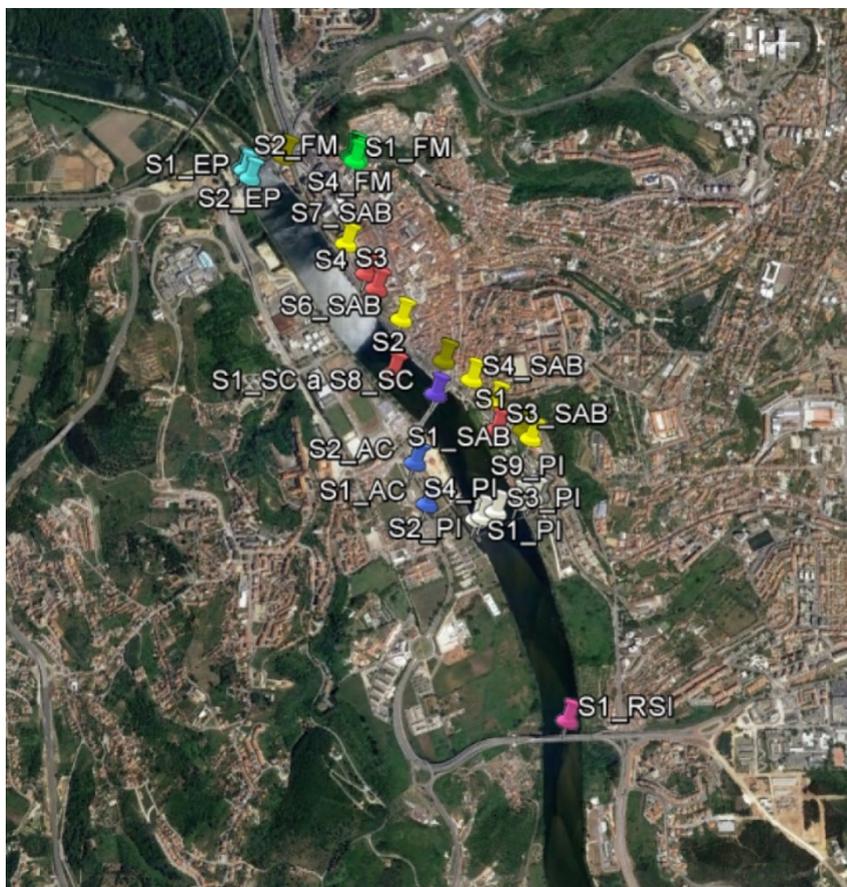


Figura 14 - Localização das sondagens analisadas junto ao rio Mondego.

(Google Earth, 2017). Sondagens:

S1\_SC a S8\_SC (roxo) - Ponte de Santa Clara (1954);

S1\_RSI (rosa) – Ponte Rainha Santa Isabel (1999);

S1\_PI, S2\_PI, S3\_PI, S4\_PI, S9\_PI, S10\_PI (branco) – Ponte Pedro e Inês (julho 2003);

S1\_SAB a S8\_SAB (amarelo) – Sistema Adutor da Boavista (2009);

S1\_EP a S4\_EP (azul claro) – Escada de Peixes (março 2010);

S1 a S4 (vermelho) – Estabilidade das Margens do Mondego, entre o Parque Manuel Braga e o Açude-Ponte (setembro 2011);

S1\_AC e S2\_AC (azul escuro) – Mosteiro de Santa Clara (fevereiro 2017);

S1\_FM a S5\_FM (verde) – Fernão Magalhães (fevereiro 2017).

Para além destas sondagens foram realizadas outras duas sondagens (S1\_AC, S2\_AC) junto ao Mosteiro de Santa Clara com instalação de piezómetros para medir o nível da água. Estas sondagens são importantes para o entendimento das características dos terrenos aluvionares, pois estão inseridas no vale aluvionar do Mondego facilitando a análise geológica e geotécnica. Uma melhor abordagem do Contexto geológico da região é útil para o estudo da reabilitação do muro que vai ser realizada na margem direita.

Foram realizadas 5 sondagens (S1\_FM, S2\_FM, S3\_FM, S4\_FM, S5\_FM) de perfuração até aos 20 metros com recolha de testemunho e sondagens SPT na rua Fernão de Magalhães, na zona do parque de estacionamento da Segurança Social, parque esse situado em frente à Telepizza. Estas sondagens são para a construção de um novo centro de saúde nesse terreno.

Todas estas sondagens estão inseridas na mesma área em estudo. Servem para melhor perceber a geologia, a dinâmica geológica e fluvial da zona, para se poder fazer uma análise mais ampla da geologia local.

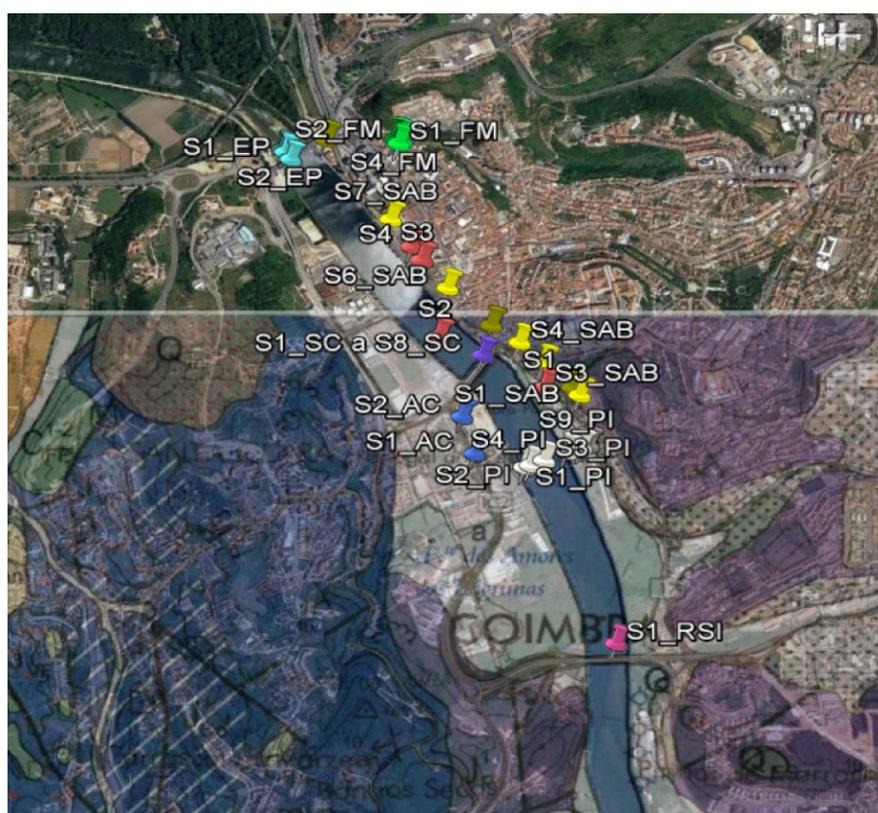


Figura 15 - Sondagens com sobreposição de mapa geológico com transparência. (Google Earth, 2017).

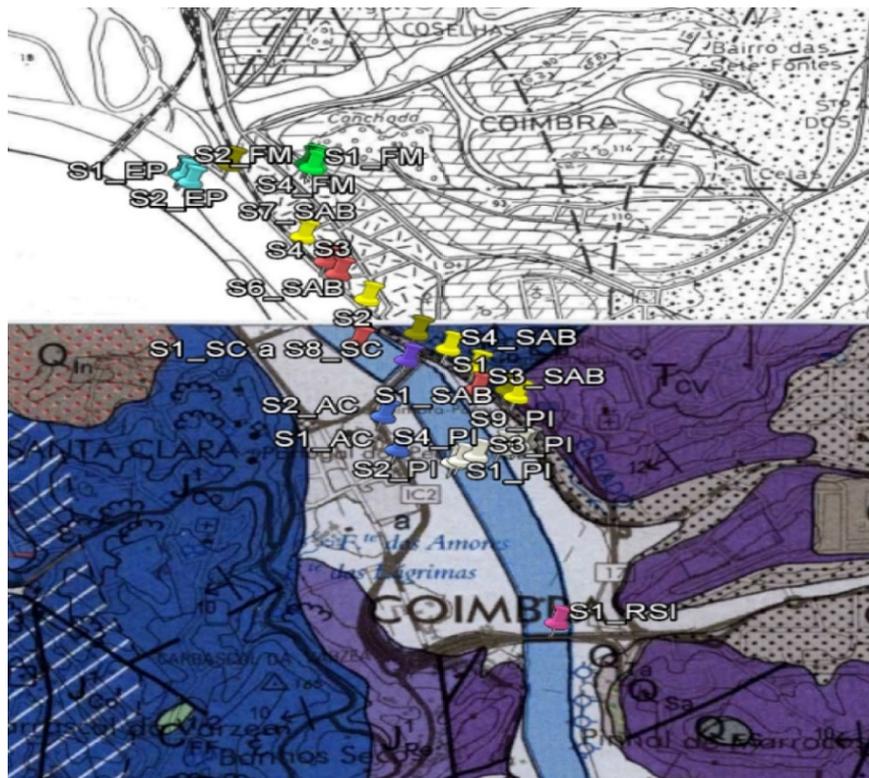


Figura 16 - Sondagens sobrepostas ao mapa geológico.

## 4.1 Sondagens

Todas as sondagens de prospeção que vão ser apresentadas servem para melhor compreender os elementos geotécnicos nas zonas com mais instabilidade, e para avaliar ou não a existência de infraestruturas enterradas. As sondagens vão servir para fazer um realce de todo o vale Mondego na zona de Coimbra devido a estarem inseridas na mesma zona.

Os materiais recolhidos ao longo das furações foram guardados em caixas próprias com o registo do número da sondagem e a profundidade de recolha. Nas imagens seguintes (Fig. 17 e 18) estão representados os trabalhos na rua Fernão Magalhães aos quais foi possível estar presente durante a realização das sondagens e recolha de amostras.

Os ensaios SPT (Standart Penetration Test) foram sempre realizados durante o avanço da furação, que consiste na ação de queda de um pilão de 63,5 Kg, com uma altura de queda livre de 76 cm (Fig. 19). São anotados os números de pancadas necessárias até cravar 30 cm, após os 15 cm iniciais, sendo que estes não são tidos em consideração devido a estarem numa zona perturbada por causa da perfuração do equipamento.



Figura 17 - Máquina de perfuração (APAFOR – 30D).



Figura 18 - Ensaio SPT.

Vão ser apresentadas e analisadas várias outras sondagens e análises realizadas que se vão complementar em termos de informação geológica e geotécnica para se perceber de que modo a geologia influencia a distribuição das aluviões e consequente erosão e assoreamento, assim como problemas nas estruturas de engenharia nas margens do rio Mondego.

## 4.2 Sondagens ponte de Santa Clara

Esta ponte rodoviária que fica situada em frente ao largo da Portagem sobre o rio Mondego, feita em betão armado, sendo formada por quatro pilares de um metro de espessura e 19,50 metros de largura, com 6,50 metros de altura. Esta ponte tem um comprimento total de 213 metros. Na figura 20 podemos observar um corte transversal da ponte de Santa Clara.

A sua inauguração ocorreu a 30 de outubro de 1954, tendo sido construída para substituir as pontes “que se afogaram no rio” (Alarcão, 2012), que ficavam a alguns metros a jusante. Em 1875 foi construída a velha ponte de Santa Clara, uma ponte metálica, com passeio pedonal e os seus pilares apoiados na ponte manuelina, construída anteriormente, tendo sido demolida em 1873 (Alarcão, 2012). A ponte metálica foi construída devido ao rio ter subido consideravelmente, e a ponte anterior terá criado um efeito de barragem, que contribuiu para o assoreamento, que é um processo que se observa no leito do rio, que com o acumular de vários tipos de materiais no fundo do rio, esse acumular interfere na topografia do seu leito, provocando inundações em épocas de eleva pluviosidade.



Figura 19 - Equipamento utilizado para realizar o ensaio SPT.

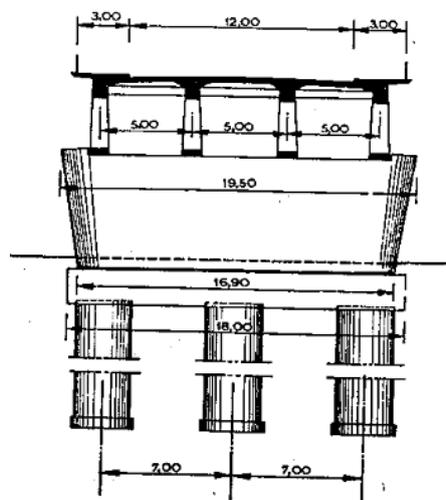


Figura 20 - Corte transversal da ponte de Santa Clara. (Retirado da Separata do artigo publicado no Boletim da Ordem dos Eng. n. 21 – Vol. III, 1954).

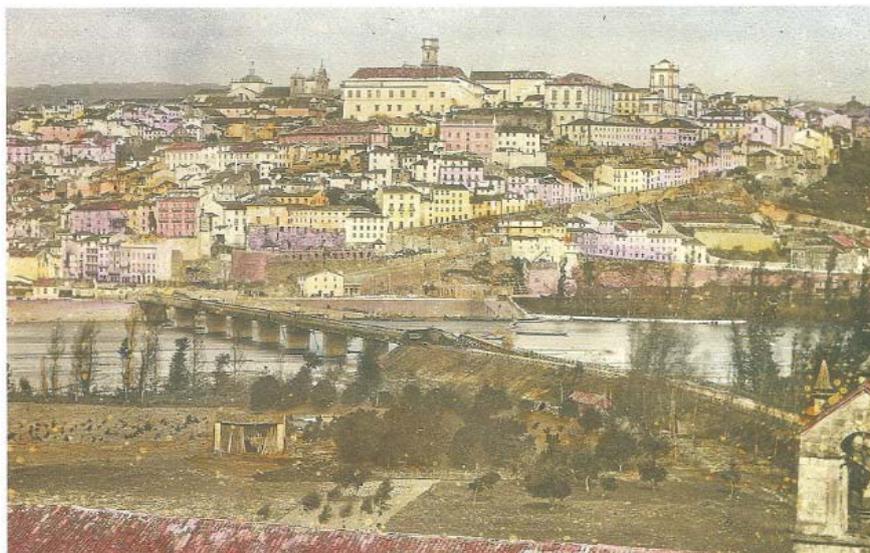


Figura 21 - Velha Ponte de Santa Clara, construída a 1875 (Retirada de Alarcão, 2012).



Figura 22 - Ponte D. Manuel, 1873 (Retirada de Alarcão, 2012).

A atual ponte de Santa Clara é muito mais larga que a anterior, dando acesso às avenidas Emídio Navarro e Fernão Magalhães.

#### **4.2.1 Geologia Local**

De acordo com Cardoso e Abreu (1954), a natureza dos terrenos encontrados no local está representada no perfil geológico do subleito do Mondego, no local da Ponte de Santa Clara, que se reproduz na figura 23.

Margem esquerda

Margem Direita

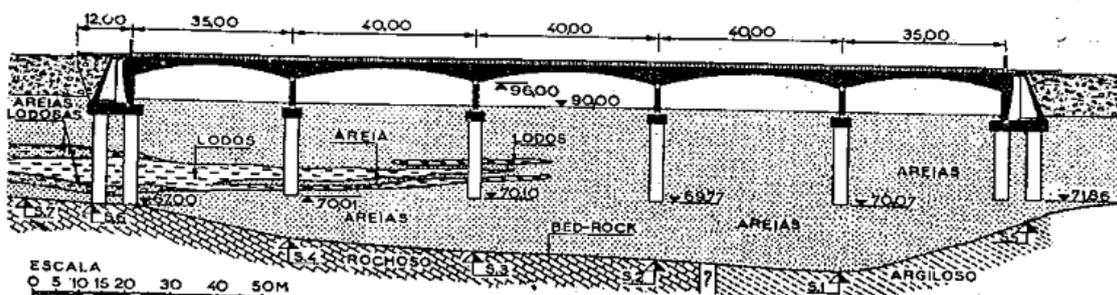


Figura 23 - Perfil geológico do subleito do Mondego, no local da nova Ponte de Santa Clara. (Retirado da Separata do artigo publicado no Boletim da Ordem dos Eng. n. 21 – Vol. III, (Cardoso e Abreu, 1954)).

Nas sondagens realizadas, foram encontradas aluviões arenosas, espessas, que assentam sobre um “bed-rock” mesozóico constituído por formações argilosas compactas na margem direita e formações gresosas calcárias na margem esquerda, com uma lenticula de lodos intercalada na formação arenosa predominante, sendo constituída por lodo negro, arenoso, compacto, com alguns calhaus, fragmentos lenhosos e folhas em decomposição. Estas lenticulas talvez tenham surgido devido ao arrastamento dos detritos nas margens do rio, acumulados em pegos existentes naquela zona.

Numa das sondagens (Sondagem S6\_SC), a cerca de 14m de profundidade foi encontrado durante os trabalhos uma camada de calhaus de grandes dimensões, muito rijos, na margem esquerda.

No quadro seguinte pode-se ver uma síntese de unidades geológicas identificadas no subsolo.

Quadro 7 - Síntese das unidades geológicas identificadas no subsolo.

Unidades	Designação
Depósitos Aluvionares	Areias em ambas as margens do rio.
	Lenticula de lodos na margem esquerda.
Mesozóico	Formações compactas argilosas na margem direita e formações gresosas calcárias na margem esquerda.

#### 4.2.2 Sondagens

Os elementos disponibilizados foram retirados da Separata do artigo publicado no Boletim da Ordem do Eng. N. 21 – Vol. III, (Cardoso e Abreu, 1954), pelo o que se pode ver a localização destas sondagens na figura seguinte.



Figura 24 – Localização das sondagens realizadas na ponte de Santa Clara (Google Earth, 2017).

Foram realizadas 7 sondagens que atingiram profundidades entre os 40,5m e os 23,5m. Durante estas sondagens, para se obter a resistência à penetração das formações lodosas e argilosas, foram recolhidas várias amostras intactas dos terrenos atravessados, com extrator apropriado, para reconhecimento geológico e geotécnico através de ensaios laboratoriais.

Para se obter a resistência à penetração das formações lodosas e argilosas, foram recolhidas amostras intactas através de um aparelho, com controlo das alturas das pancadas do pilão e da penetração do extrator no terreno. Este aparelho tinha as seguintes características:

- Peso do pilão = 107 kg
- Diâmetro do extrator = 21/2"
- Altura do extrator = 1,12m

Foram executados ensaios de injeções de cimento para melhorar o comportamento das formações arenosas, tendo sido feito um furo de sonda S8\_SC um pouco a montante do alinhamento previsto para a ponte. O obturador foi posto até à profundidade de 14,5m e injetou-se 200 kg de cimento num dia, 500 kg no dia seguinte e 3,450 kg no terceiro dia. Devido ao terreno se negar a admitir mais cimento, subiu-se o obturador para a profundidade de 13,0m e fez-se um novo ensaio. Injetou-se 3,900 kg

de cimento com facilidade e a baixa pressão, concluindo o ensaio. Para verificar os resultados, foram feitos 4 furos à volta da sondagem S8\_SC, tendo sido feitas injeções distanciadas a 2,0m, 1,5m, 1,0m e 0,5m, respetivamente. Observou-se que a penetração do cimento não tinha sido homogénea.

No quadro 8 está representado a síntese das sondagens e ensaios realizados.

Quadro 8 - Síntese das sondagens e ensaios realizados.

Sondagens	Localização	Profundidade	Ensaio
S1_SC	Leito do rio	40,50	Resistência à penetração + Ensaio hidráulico
S2_SC	Leito do rio	±38,50	Resistência à penetração + Ensaio hidráulico
S3_SC	Leito do rio	36,50	Resistência à penetração + Ensaio hidráulico
S4_SC	Leito do rio	±34,00	Resistência à penetração + Ensaio hidráulico
S5_SC	Margem direita	±27,50	Resistência à penetração + Ensaio hidráulico
S6_SC	Margem esquerda	±26,50	Resistência à penetração + Ensaio hidráulico
S7_SC	Margem esquerda	23,50	Resistência à penetração + Ensaio hidráulico
S8_SC	A montante do alinhamento da ponte	14,50	Injeções de cimento

#### 4.2.3 Caracterização geotécnica

Para se obter o grau de compacidade do terreno, foi realizado o ensaio de resistência à penetração, anotando o tempo gasto na furação. Na areia, a velocidade média foi de 0,3m/h e nas argilas arenosas 0,2m/h (Cardoso e Abreu, 1954).

Nos ensaios de injeção de cimento, como já dito, a penetração do cimento não foi homogénea, mesmo conseguindo uma certa impermeabilização das areias, a consolidação foi muito variável de local para local, o que fez com que este processo não resultasse, devido às injeções não formarem um bloco argamassado e resistente.

O ensaio hidráulico não revelou problemas associados, pois as escavações que fossem feitas, seriam de grandeza menor.

Das características geológicas e geotécnicas encontradas, foram distinguidas as seguintes unidades sintetizadas:

- a) Zona geotécnica 1 (ZG1) – Aluviões (areias)
- b) Zona geotécnica 2 (ZG2) – Aluviões (lenticula de lodos)
- c) Zona geotécnica 3 (ZG3) – Aluviões (argilas arenosas)

Quadro 9 - Síntese dos parâmetros geotécnicos.

Unidades	Designação	Velocidade de avanço (m/h) (Cardoso e Abreu, 1954)
<b>ZG1</b>	Areias	0,3
<b>ZG2</b>	Lenticula de lodos	-
<b>ZG3</b>	Argilas arenosas	0,2

### 4.3 Condições geotécnicas da Ponte Rainha Santa Isabel

Lopes (2009) refere que de acordo com o relatório “Ponte Europa sobre o Rio Mondego, Projeto de Execução”, em 1999, o nome da ponte foi alterado mais tarde para Ponte Rainha Santa Isabel. No que concerne às unidades geológicas foram identificadas unidades pertencentes ao Cenozoico e Mesozoico-Triásico, pelo que nestas unidades geológicas foram identificadas formações aluvionares constituídas por areias, cascalheira e lodos moles sobre grés silicioso e siltitos.

Podemos observar no quadro 10 uma síntese das unidades geológicas identificadas neste subsolo.

Quadro 10 - Síntese das unidades geológicas encontradas no subsolo.

Unidades	Designação
<b>Cenozoico</b>	Solo orgânico, silto-arenoso, castanho.
	Silte arenoso, um pouco argiloso e lodoso
	Lodo silto-arenoso.
	Areias grosseiras a médias e média a fina, pouco lodosa com seixos lodosos e acastanhados.
	Cascalheira (clastos siliciosos e siltes micáceos muito carbonosos).
<b>Mesozoico-Triásico</b>	Areias e argilas siltosas.
	Areias grosseiras a médias.
	Siltitos brandos, micáceos, com zonas arenosas, cor de vinho, cinzentos ou acastanhados.
	Grés de grão grosseiro a médio, acinzentado e com alguma degradação.
	Grés silicioso fino a muito fino, de aspecto maciço, com passagens siltosas brandas, com fraturas espaçadas sub-rugosas acinzentadas.

Dos trabalhos realizados na prospeção geológico-geotécnica na zona onde foi construída a ponte Rainha Santa Isabel, foi encontrado apenas um extrato do relatório “Ponte Europa sobre o Rio Mondego, Projeto de Execução”, em 1999. Deste modo sabe-se apenas de uma das sondagens realizadas (S1\_RSI), pois não foi possível ter acesso às outras informações. Foram executados ensaios de penetração estática (CPTU), ensaios de penetração dinâmica (CPT) e foi quantificada a percentagem de recuperação.

#### 4.3.1 Caracterização geológica e geotécnica

De acordo com as características geológicas e geotécnicas encontradas, foi feito um zonamento geotécnico em profundidade:

- a) Zona geotécnica 1 (ZG1) – Aluviões (areias, cascalheira e lodos);
- b) Zona geotécnica 2 (ZG2) – Aluviões (areias e cascalheira)
- c) Zona geotécnica 2A (ZG2A) – Aluviões (areias e cascalheira)
- d) Zona geotécnica 3 (ZG3) – *Bed-Rock* (grés silicioso, areias e siltitos)
- e) Zona geotécnica 4 (ZG4) – *Bed-Rock* (grés silicioso e siltitos)

A zona geotécnica 1 (ZG1), sendo a primeira unidade a ser observada, ocorre em ambas as margens do rio e em toda a extensão do leito do rio. Esta zona é constituída por areias grosseiras a médias, pouco siltosas, com zonas de cascalheira acastanhada, areias finas siltosas e lodos areno-siltosos. Esta zona geotécnica encontra-se muito deformada e com baixa resistência, com valores de SPT inferior a 15 pancadas.

A zona geotécnica 2 (ZG2) e a zona geotécnica 2A (ZG2A), são ambas constituídas, quanto à litologia, por areias grosseiras, cascalheira de calhaus siliciosos, alguns silto-argilosos acastanhados, com areias siltosas médias a finas. A zona geotécnica 2 (ZG2) apresenta uma grande deformação e uma baixa resistência, com valores SPT entre 15 a 40 pancadas, ou seja, é uma zona medianamente compacta. A zona geotécnica 2A (ZG2A) tem uma deformação moderada e resistência moderada a baixa, com valores SPT superiores a 50 pancadas, ou seja, é uma zona muito compacta.

Sob estas zonas, aparece a zona geotécnica 3 (ZG3), composta por grés silicioso de grão médio a grosseiro acinzentado, compacto e resistente. Apresenta areias grosseiras a médias e siltitos brandos, com zonas arenosos, de cor cinzenta a acastanhada. Esta zona apresenta uma deformação e resistência moderadas, com valores de SPT de 60 pancadas, muito alterada e fraturada, com percentagem de recuperação inferior a 50%.

A última unidade é a zona geotécnica 4 (ZG4), constituída por grés silicioso de grão fino a médio, de aspeto maciço, muito consolidado, resistente, com passagens

siltíticas acinzentadas. Esta zona tem uma percentagem de recuperação superior a 80%, com resistência moderada a elevada, com alguma fracturação.

O quadro 11 apresenta uma síntese dos parâmetros geotécnicos analisados:

Quadro 11 - Resumo dos parâmetros geotécnicos analisados. Retirado do relatório “Ponte Europa sobre o Rio Mondego, Projeto de Execução”, 1999.

Unidades	Designação	Parâmetros Geotécnicos					
		Estado de alteração	Fracturação	Recuperação (%)	Deformação	Resistência	SPT
ZG1	Areias grosseiras a médias, com zonas siltosas e de cascalheira solta acastanhada. Areias finas siltosas e lodos moles.	-	-	-	Elevada	Baixa	<15
ZG2	Areias grosseiras, cascalheira silto-argilosa acastanhada, com passagens a areias médias a finas medianamente compactas.	-	-	-	Elevada	Baixa	15-40
ZG2A	Areias grosseiras, cascalheira siliciosa, acastanhados com passagens a areias médias a finas, siltosas, muito compactas	-	-	-	Moderada	Moderada a baixa	>50
ZG3	Grés silicioso de grão médio a grosseiro, degradado, acinzentado, compacto a muito compacto e resistente. Areias grosseiras a médias e siltitos, com zonas arenosas, cinzentas ou acastanhadas.	W4/W5	F4/F5	<50	Moderada	Moderada	60
ZG4	Grés silicioso de grão fino a médio, muito consolidado, resistente, com passagens siltíticas brandas, acinzentada.	W3/W4	F2/F3	>80	Baixa	Moderada a elevada	-

#### 4.4 Sondagens Ponte Pedro e Inês

No local da construção da Ponte Pedro e Inês, foi realizado um relatório “Elaboração de Prospecção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovia sobre o Rio Mondego”, realizado em julho de 2003. Foram realizadas ao todo 6 sondagens, 4 nas margens (S1\_PI, S2\_PI, S9\_PI e S10\_PI) com profundidades entre os 29,8m e os 41,4m e 2 sondagens na zona do leito do rio (S3\_PI e S4\_PI) com 33,26m e 34,6m respetivamente.

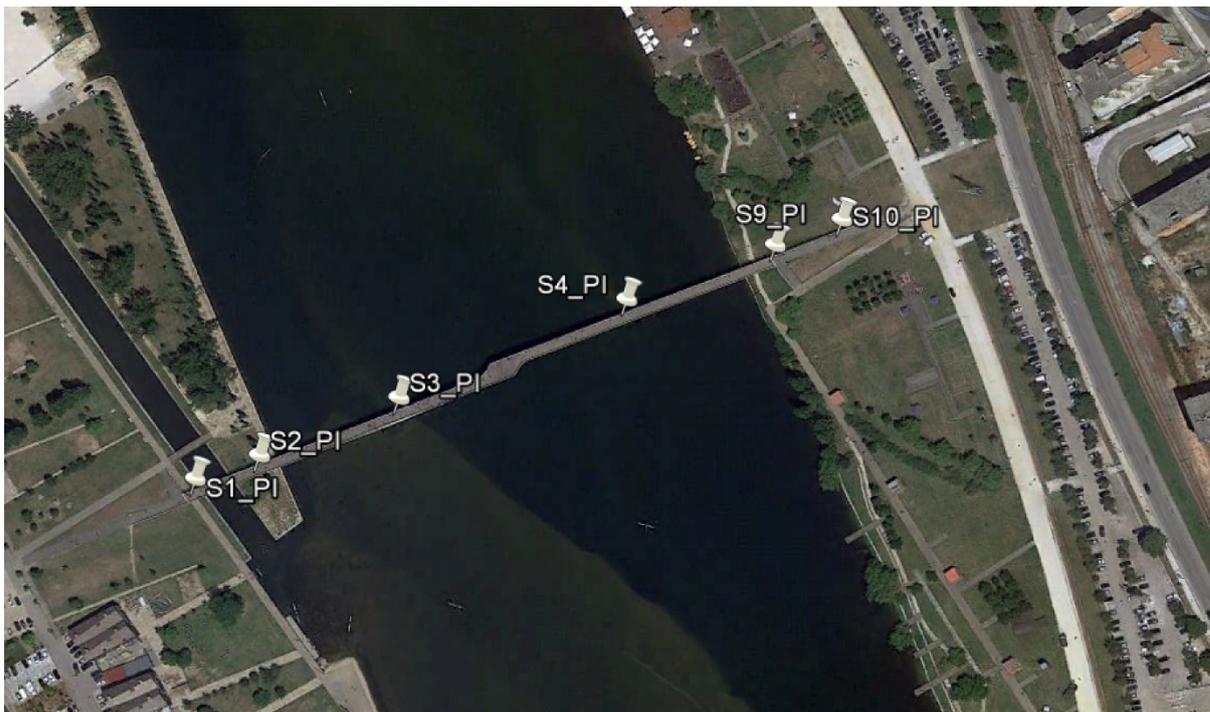


Figura 25 - Localização das sondagens na ponte Pedro e Inês (Google Earth, 2017).

Foram também realizados 2 furos (PM1 e PM2) para se poder fazer ensaios pressiométricos de Menard. Foi possível apresentar e identificar as seguintes unidades litoestratigráficas:

- a) Atual a Recente: depósitos superficiais (C1)
- b) Depósitos aluvionares (C2)
- c) Triássico: “bed-rock” (C3)

Os depósitos C1 são depósitos superficiais que correspondem ao recobrimento, de constituição areno-argilosa de cor amarelada, com profundidades de 3 a 7m.

Por baixo encontra-se depósitos aluvionares, constituídos por areias finas a médias siltsosas, com intercalações de fácies grosseiras e níveis de seixos espalhados (C2a), a profundidades de 4,5m a 12,5m.

Subjacente aparece um solo arenoso, com granulometria grosseira e com grandes níveis de calhaus espalhados (C2c) que ocorrem à profundidade entre 17m a 32m.

Foram identificados níveis lodosos, siltosos acastanhados a negros (C2b) nas sondagens S3\_PI, S4\_PI, S9\_PI e S10\_PI, com caracter lenticular e espessura variável. Estes níveis lodosos ocorrem como intercalações na unidade C2c.

Na base das formações aluvionares observam-se cascalheiras de várias dimensões, com alguma matriz arenosa (C2d), encontradas nas sondagens S1\_PI, S2\_PI, S3\_PI e S4\_PI, com espessuras a variar de 1,3m a 6m.

Estas unidades assentam sobre o “bed-rock” (C3) do triássico (Proterozoico Superior) constituído por argilitos cinzentos-escuros.

O quadro 12 apresenta uma síntese das unidades geológicas identificadas no subsolo.

Quadro 12 - Síntese das unidades geológicas identificadas.

<b>Unidades</b>		<b>Designação</b>
<b>Atual a Recente</b>	<b>C1</b>	Depósitos superficiais areno-argilosos com restos vegetais.
<b>Depósitos Aluvionares</b>	<b>C2a</b>	Areia fina a média siltosa acinzentada, por vezes com seixos dispersos.
	<b>C2b</b>	Lodo siltoso castanho a negro
	<b>C2c</b>	Areia grosseira acinzentada a amarelada com seixos e calhaus dispersos.
	<b>C2d</b>	Cascalheira muito grosseira amarelada, por vezes com matriz arenosa.
<b>Triássico</b>	<b>C3</b>	Argilitos cinzentos-escuros, com passagens de argila.

Estes furos foram realizados com trépano e limpadeira, com diâmetros a variar entre as 6 e as 8 polegadas. A furação nas formações mais grosseiras e na base da aluvião de fácies grosseiras foram realizadas à rotação com uma máquina EF130. Nas sondagens realizadas no leito do rio utilizaram-se máquinas perfuradoras rotativas de lagartas tipo “mustang”. Estas foram executadas à rotação e rotopercussão.

Durante estas sondagens, foram realizados também ensaios de penetração dinâmica SPT para caracterizar a compacidade dos terrenos atravessados; ensaios de absorção do tipo Lugeon nas sondagens S9\_PI e S2\_PI; ensaios pressiométricos de Menard (PM1 e PM2), utilizando equipamento com sonda pressiométrica de 60mm de diâmetro; 3 ensaios de compressão uniaxial nas sondagens S1\_PI, S9\_PI e S10\_PI e 2 ensaios de CPT (C3 e C4), utilizando um equipamento com capacidade de penetração de 200 kN.

Nos quadros seguintes (quadro 13 e 14) pode-se observar uma síntese dos trabalhos realizados.

Quadro 13 - Síntese das sondagens realizadas. (Adaptado do relatório “Elaboração de Prospecção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovia sobre o Rio Mondego” realizado em julho de 2003).

<b>Sondagens</b>	<b>Localização</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Tipo de sondagem</b>	<b>Ensaios</b>
S1	Margem esquerda	32,40	Percussão e Rotação	SPT + Compressão uniaxial
S2	Margem esquerda	29,80	Percussão e Rotação	SPT + Absorção do tipo Lugeon
S3	Leito do rio	33,26	Rotopercussão e Rotação	SPT + CPT
S4	Leito do rio	34,60	Rotopercussão e Rotação	SPT + CPT
S9	Margem direita	38,40	Percussão e Rotação	SPT + Absorção do tipo Lugeon + Compressão uniaxial
S10	Margem direita	41,40	Percussão e Rotação	SPT + Compressão uniaxial

Quadro 14 - Síntese dos furos realizados. (Adaptado do relatório “Elaboração de Prospecção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovia sobre o Rio Mondego” realizado em julho de 2003).

<b>Furos</b>	<b>PM1</b>	<b>PM2</b>
<b>Localização</b>	Margem esquerda	Margem direita
<b>Profundidade (m)</b>	18,30	17,80
<b>Ensaio</b>	Pressiométricos de Menard	Pressiométricos de Menard

#### 4.4.1 Caracterização geotécnica

Com os resultados obtidos dos ensaios de penetração dinâmica SPT, indicam que para a areia fina a média siltosa (C2a) apresenta valores de 0 a 4 pancadas, por vezes superiores, o que verifica uma consistência mole destes materiais. O lodo siltoso (C2b) tem valores de SPT de 6 a 8 pancadas, por vezes superiores. Os valores SPT para a areia grosseira (C2c) ficaram entre as 8 e as 50 pancadas, o que corresponde a solos com compactidade relativa, desde soltos a medianamente compactos. Estes valores com diferenças muito variáveis devem-se provavelmente devido à presença de seixos e calhaus em grandes quantidades em algumas zonas, pelo que não se pode considerar estes valores fidedignos. Para a unidade (C2d) não foram medidos os valores SPT. Os argilitos (C3) apresentam valores de SPT superiores a 60, sendo solos resistentes, com valores superiores aos do topo.

Os ensaios de absorção do tipo Lugeon foram apenas realizados na sondagem S9\_PI, com o valor de zero em todas as leituras feitas, dos 33,5m aos 36,5m e dos 35,6m aos 38,6m de profundidade.

Em relação aos ensaios de compressão uniaxial, devido às características dos tarolos recuperados não cumprirem os requisitos mínimos para uma boa execução dos ensaios, foram apenas feitos 3 ensaios. No quadro seguinte podemos observar os resultados obtidos nos ensaios.

Quadro 15 - Resultados dos Ensaio de Compressão Uniaxial. (Adaptado do relatório “Elaboração de Prospecção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovia sobre o Rio Mondego” realizado em julho de 2003).

<b>Sondagem</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Secção (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga de rotura (kN)</b>	<b>Tensão de rotura (MPa)</b>
<b>S1</b>	572	28,27	2,4	0,8
<b>S9</b>	814	28,27	5,5	1,9
<b>S10</b>	972	28,27	48,3	17,1

No quadro 16 estão apresentados os valores obtidos nos ensaios pressiométricos tipo Menard, em que através destes resultados é possível obter os módulos pressiométricos que caracterizam a elasticidade os materiais. Não foi possível determinar a pressão limite em todas as profundidades devido a ter sido ultrapassada a capacidade do equipamento.

Quadro 16 - Síntese dos resultados obtidos nos ensaios pressiométricos tipo Menard.

<b>Sondagem</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>Módulo Pressiométrico (MPa)</b>	<b>Pressão Limite (MPa)</b>	<b>Observações</b>
<b>PM1</b>	2	4,6	-	
	5	3,5	0,3	
	8	2,9	0,3	
	11	3,6	0,3	
	15	-	-	Não se realizou devido à litologia
	20	-	-	Não se realizou devido à litologia
<b>PM2</b>	2	3,2	0,5	
	5	5	-	
	8	-	-	Condicionado pela litologia
	11	2,5	0,4	
	15	-	-	Condicionado pela litologia
	20	4,8	0,5	

Para interpretar os resultados obtidos nos ensaios CPT é necessário ter algumas reservas devido à heterogenia litológica do local. Estes ensaios foram feitos sobre uma plataforma flutuante, o que também se deve ter em conta.

Foram identificadas várias unidades, resultantes do estudo das características geológicas e geotécnicas encontradas:

Caracterização Geológico-Geotécnica do vale do rio Mondego entre a Ponte do Açude Ponte Rainha Santa Isabel em Coimbra

- a) Zona geotécnica 1 (ZG1) – Depósitos superficiais (areno-argilosos com restos de vegetais)
- b) Zona geotécnica 2 (ZG2) – Aluviões (areia fina a média siltosa por vezes com alguns calhaus dispersos)
- c) Zona geotécnica 3 (ZG3) – Aluviões (lodo siltoso castanho a negro)
- d) Zona geotécnica 4 (ZG4) – Aluviões (grés silicioso e siltitos)
- e) Zona geotécnica 5 (ZG4) – Aluviões (areia grosseira com seixos e calhaus dispersos)
- f) Zona geotécnica 6 (ZG4) – “Bed-Rock” (argilitos com passagens argilificadas e filonetes gipsíferos)

Quadro 17 - Síntese dos parâmetros geotécnicos.

Unidades	Designação	Parâmetros Geotécnicos		
		Recuperação (%)	Resistência	SPT
<b>ZG1</b>	Depósitos superficiais areno-argilosos com restos vegetais.	-	-	-
<b>ZG2A</b>	Areia fina a média siltosa, de consistência mole acinzentadas, por vezes com seixos dispersos.	-	Baixa	0 – 4
<b>ZG2B</b>	Lodo siltoso castanho a negro de consistência mole.	-	Moderada a baixa	6 – 8
<b>ZG2C</b>	Areia grosseira acinzentada amarelada com seixos e calhaus dispersos, medianamente compactas.	-	Moderada a baixa	8 – 50
<b>ZG2D</b>	Cascalheira muito grosseira, amarelada, por vezes com matriz arenosa.	Varia entre 30 a cerca de 90%	Moderada a elevada	-
<b>ZG3</b>	Argilitos cinzentos-escuros, compactos a muito compactos, com passagens argilificadas e filonetes gipsíferos.	Cerca de 90%	Moderada a elevada	>60

#### 4.5 Sondagens de Março 2010 (“Escada de Peixes”)

Estas sondagens foram realizadas no âmbito da “Construção da Nova Escada de peixes do Açude-Ponte de Coimbra” (Quinta-Ferreira, 2010), em que resultaram na avaliação da resistência da fundação situando-se junto à ponte Açude, na margem esquerda do rio.

Em março de 2010 foram realizadas três sondagens à rotação (S1\_EP a S3\_EP), com realização de ensaios SPT (Standard Penetration Test) a cada 1,5 metros de profundidade.

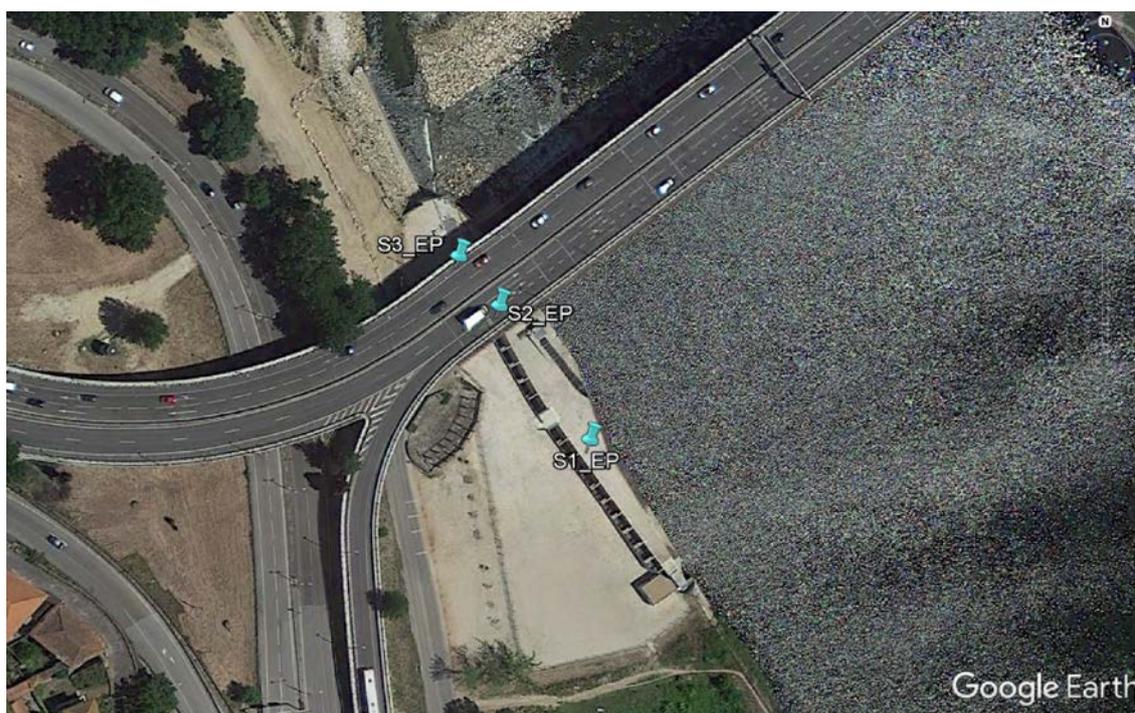


Figura 26 - Sondagens realizadas na ponte Açude. (Google Earth, 2017).

As sondagens realizadas atingiram os 12,0m de profundidade nas sondagens S1\_EP e S2\_EP e os 28,5m de profundidade na sondagem S3\_EP.

Os ensaios SPT foram realizados durante o avanço da furação.

As sondagens intersectaram inicialmente uma camada de aterro, com espessura variável entre os 2,0m e os 3,5m, constituída por areia siltosa de cor acastanhada, com cascalho, calcário e, nas sondagens S1 e S2 com níveis de argila. Os valores SPT obtidos variam muito, tendo de 6 a 22 pancadas.

De seguida temos níveis de areia com diferentes granulometrias, com frações siltosas ou siltosas orgânicas, com seixos e cascalho. Na sondagem S2\_EP foi detetado um nível lodoso intercalar a cerca de 6m de profundidade (aluviões arenosas). Na sondagem S3\_EP, próxima à cota da soleira de descarga do Açude, foi encontrado

areias, sendo o solo aluvionar utilizado no enchimento das escavações realizadas para a Obra da Ponte do Açude.

As sondagens S1\_EP e S2\_EP terminam aos 12,0m de profundidade em areias, com valores SPT obtidos a variar entre as 7 e as 19 pancadas (S1\_EP) e as 5 e 11 pancadas (S2\_EP).

Na sondagem S3 os valores SPT obtidos até aos 7,5m de profundidade variam entre 3 e 7 pancadas, o que revelam serem inferiores aos registados nas outras sondagens (S1\_EP e S2\_EP) a cotas semelhantes. Subjacente a esta unidade, aos 8m de profundidade encontram-se um enrocamento associado à construção da Ponte do Açude com 1,5m de espessura, constituído por blocos calcários e onde os valores de SPT não poderem ser obtidos, com as 60 pancadas sem ocorrer a cravação de 30cm, e com uma percentagem de recuperação de 40% e RQD de 25%.

Até ao fim da sondagem S3\_EP, aos 28,5m, ocorre uma alternância de níveis arenosos de origem aluvionar, onde os valores vão crescendo com o aumento da profundidade.

O nível freático foi medido 24 horas após a conclusão das sondagens, sendo detetado a 1,5m de profundidade nas sondagens S1\_EP e S2\_EP e 5,1m na sondagem S3\_EP.

#### **4.5.1 Zonamento Geotécnico**

Foi feito e interpretado a distribuição das características geológicas e geotécnicas dos terrenos onde forem realizadas as sondagens.

Foram identificadas as seguintes unidades geotécnicas (Quinta-Ferreira, 2010):

##### **a) Zona geotécnica 1 – Aterro (ZG1)**

Esta zona geotécnica é considerada um aterro constituído por areia siltosa de cor acastanhada, por vezes orgânica, com cascalho, calcário e alguns níveis de argila.

A sondagem S2\_EP apresenta uma espessura de 3,5m e valores de SPT variáveis, de 6 a 22 pancadas. A jusante deste local, no interior da estrutura da Ponte do Açude, a espessura de aterro tem cerca de 8m, sendo bastante superior.

Para além de materiais de aterro, encontram-se solos aluvionares arenosos utilizados no enchimento das escavações realizadas para a obra da Ponte do Açude, com valores de SPT de 3 a 7 pancadas.

##### **b) Zona geotécnica 2 – Aluvião (ZG2)**

Subjacentes à unidade anterior, e até ao final das sondagens, surgem areias de granulometria variada, tratando-se de solos aluvionares *in situ*, com ensaios SPT a variar entre os valores de 5 a 19 pancadas. Na sondagem S3\_EP, sendo a mais

profunda com 28,5m, com o crescimento dos valores de SPT à medida que há aumento da profundidade, traduz uma tendência de aumento da resistência dos materiais, ou seja, quanto mais profundidade, maior resistência dos materiais.

### **c) Enrocamento**

Na sondagem S3\_EP, a cerca de 8m de profundidade, encontra-se um enrocamento, com 1,5m de espessura, proveniente da construção da Ponte do Açude, sendo constituído por blocos calcários com valores de SPT a atingirem nega. Os valores da percentagem de recuperação são de 40% e o RQD de 25%.

## **4.5.2 Conclusões**

Foram encontrados aterros e aluviões, sendo que perto da ponte Açude existe um enrocamento constituído por blocos calcários. Nesta zona pode-se encontrar solos aluvionares *in situ* e solos aluvionares remexidos, devido ao enchimento de escavações.

O enrocamento encontrado tem grande probabilidade de continuar até ao limite do perfil geotécnico, sendo muito difícil estabelecer os limites deste enrocamento com os dados disponíveis.

O nível freático tem profundidade variável, tendo sido detetado aos 1,5m nas sondagens S1\_EP e S2\_EP e aos 5,1m na sondagem S3\_EP.

Comparando com as prospeções geotécnicas realizadas na ponte do Açude feitas em março 1978, através da revista "*Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 22, 65-82" (Neves, 1978), os primeiros resultados da campanha de prospeção geológica e geotécnica mostraram a existência de formações aluvionares constituídas por areia e calhaus, por vezes com intercalações argilosas, sobre um "bed-rock" de calcários e margas. O maciço aluvionar possui uma espessura muito variável atingindo cerca de 40m, de constituição heterogénea e elevada deformabilidade o que pode provocar grande assentamentos diferenciais. A formação aluvionar é muito heterogénea, constituída por materiais arenosas, mais ou menos grosseiros, com ocorrência de blocos que chegam a atingir os 0,50m.

Os estratos do "bed-rock" apresentam-se muito fraturados e os calcários que nele alternam com margas são do tipo dolomítico e argiloso. De acordo com os ensaios realizados, o "bed-rock" é constituído por materiais susceptíveis de suportarem fundações diretas, transmitindo tensões superiores a 10Kgf/cm<sup>2</sup> e apresentam módulos de deformabilidade superiores a 1000Kgf/cm<sup>2</sup>.

De acordo com a "*Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 31, 89-97" (Dias, 1978), o "bed-rock", na margem direita, localiza-se cerca de 15m acima relativamente à margem esquerda, tendo sido também detetado um estrato siltoso relativamente extenso do lado da margem direita, pelo o que foi realizada uma

prospecção geotécnica complementar, visando a determinação da continuidade desse estrato.

Foram realizadas 5 sondagens à percursão que revelaram a não continuidade do estrato siltoso. O terreno é constituído, até aos 11-12m de profundidade, por areia solta a média, constituindo aluviões modernas de granulometria grosseira a muito grosseira; dos 12m aos 18m por areão e areia argilosa com seixos rolados, de consistência média a compacta; a partir dos 18m de profundidade aparecem calcários e argilas margosas constituindo o tecto do “bed-rock”.

#### 4.6 Sondagens entre Parque Manuel Braga e Ponte Açude

Apresentam-se também as sondagens feitas em 2011 entre o parque Manuel Braga e a ponte açude. (Quinta-Ferreira et al., 2011). Foram executadas quatro sondagens à rotação com trado oco, com realização de ensaios SPT a cada 1,5m de profundidade.



Figura 27 - Localização das sondagens. (Google Earth, 2017).

Estas 4 sondagens foram até aos 20 metros de profundidade, sendo que a sondagem S2 foi executada na margem esquerda. Nas sondagens S3 e S4 a partir dos 2m e do 1m de profundidade, encontraram-se blocos de calcário com argamassa hidráulica numa espessura de 4,5m a 5m, que fazem parte dos muros de suporte construídos na margem do rio.

Estes terrenos artificiais estão acima dos depósitos aluvionares, constituídos por composições arenosas com intercalações de lodo argiloso e siltoso. Em maior

profundidade encontra-se cascalheira, seixos e areia, a partir dos 9,5m na sondagem S2 e dos 14m e 15m nas outras sondagens S1, S3 e S4.

Nas sondagens da margem direita do rio (S1, S3 e S4) foram detetados restos de madeira pertencentes às estacas construídas como fundação para os muros de suporte das margens do Mondego, de constituição areno-siltosa ou lodosa. Na Sondagem S2, realizada na margem esquerda do rio não foram detetados resto de madeira.

No quadro apresentado de seguida (quadro 10), estão inseridas as profundidades a que foi detetado o nível freático, após a conclusão das sondagens S1 a S4.

Quadro 10 - Profundidade do nível freático em cada sondagem.

<b>Sondagem</b>	<b>Nível Freático (m)</b>
S1 agosto/2011	3,0
S2 agosto/2011	3,7
S3 agosto/2011	3,6
S4 agosto/2011	3,4

Para a elaboração desta dissertação, além destas sondagens, foram tidas em consideração outras sondagens, realizadas na zona em estudo em março de 2009 para a empresa Águas do Mondego, (Nogueira, Pinheiro & Vergas, 2009) cedidas pela Câmara Municipal de Coimbra.

Foram realizadas oito sondagens referentes ao Sistema Adutor da Boavista (SAB), designadamente S1\_SAB, S2\_SAB, S3\_SAB, S4\_SAB, S5\_SAB, S6\_SAB, S7\_SAB e S8\_SAB, sendo que as mais relevantes são as sondagens entre S5\_SAB e S8\_SAB pois estão inseridas na zona de estudo e mais próximas das margens do Rio que vão ser requalificadas, mas é importante mostrar todas as sondagens para percebermos melhor o perfil geológico o que facilita o estudo da reconstrução das margens pois existem mais elementos muito próximos que devem ter tidos em conta.

A primeira sondagem (S1\_SAB) foi feita com trado oco à exceção de todas as outras sondagens, atingindo os 28,5m de profundidade, atravessando areias argilosas grosseiras e finas até aos 3,5m, sendo provavelmente um aterro e aluviões até ao fim da sondagem.

As sondagens S2\_SAB a S8\_SAB atingiram os 9 m de profundidade com ensaios SPT a cada 1,5m de profundidade.

É possível observar no quadro 11 as profundidades a que foi detetado o nível freático, posteriormente à realização das sondagens.

Quadro 11 - Nível freático detetado em cada sondagem.

<b>Sondagem</b>	<b>Nível Freático (m)</b>
S1_SAB março/2009	3,8
S2_SAB março/2009	4,0
S3_SAB março/2009	4,1
S4_SAB março/2009	5,0
S5_SAB março/2009	Sem registo
S6_SAB março/2009	4,0
S7_SAB março/2009	3,6
S8_SAB março/2009	1,6

Com base na informação disponível das sondagens interpretou-se as características geológicas e geotécnicas dos terrenos no local em estudo, onde foram encontrados terrenos artificiais, entulho, aluviões com areias e lodos e por fim cascalheira a uma maior profundidade.

No quadro 12 estão representadas todas as sondagens referidas anteriormente:

Quadro 12 - Síntese de todas as sondagens realizadas entre o parque Manuel Braga e Ponte do Açude.

<b>Sondagens</b>	<b>Localização</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Tipo de Sondagem</b>	<b>Ensaios</b>
S1_SAB (2009)	Margem direita	28,5	Rotação	SPT
S2_SAB (2009)	Margem direita	9,0	Rotação	SPT
S3_SAB (2009)	Margem direita	9,0	Rotação	SPT
S4_SAB (2009)	Margem direita	9,0	Rotação	SPT
S5_SAB (2009)	Margem direita	9,0	Rotação	SPT
S6_SAB (2009)	Margem direita	9,0	Rotação	SPT
S7_SAB (2009)	Margem direita	9,0	Rotação	SPT
S8_SAB (2009)	Margem direita	9,0	Rotação	SPT
S1 (2011)	Margem direita	15,0	Rotação	SPT
S2 (2011)	Margem esquerda	10,5	Rotação	SPT
S3 (2011)	Margem direita	16,5	Rotação	SPT
S4 (2011)	Margem direita	20,0	Rotação	SPT

Os materiais existentes são, de uma maneira geral, arenosos devido ao nível freático ser relativamente próximo à superfície, o que pode ter provocado alguma instabilidade durante os trabalhos de perfuração. Este terreno é constituído por formações recentes, que são maioritariamente arenosas e submersas, o que dificulta a obtenção de amostras, como por exemplo a quantidade de amostras recolhidas nos ensaios SPT terem sido menores relativamente ao número de ensaios realizados. Estes depósitos recentes são pouco consolidados, com materiais não coesivos que, se saturados, podem impossibilitar a recolha da amostra, sendo mais frequente na presença de areias finas.



Figura 28 - Localização das sondagens entre o parque Manuel Braga e ponte Açude. (Google Earth, 2017).

Apesar de os furos de sondagem estarem distantes, o modelo geológico tende a ser bastante homogéneo, tendo sido identificadas algumas unidades geológico-geotécnicas (Nogueira, Pinheiro & Vergas, 2009):

### **Holocénico**

Unidade 4 (UN4) – Existência de uma camada superficial de aterro, de constituição areno-argilosa e argilo-arenosa acastanhada, misturada com cascalheira, seixos, calcário e algum lixo.

Esta camada assenta sobre aluviões arenosos. Na sondagem S8\_SAB, junto ao Açude-Ponte foram perfurados apenas materiais de aterro ao longo dos 9m de

profundidade. Os ensaios SPT nesta unidade resultaram em valores entre 2 a 11 pancadas, o que indica solos pouco compactos.

Unidade 3 (UN3) – Esta unidade foi detetada nas sondagens S1\_SAB aos 4,5 m e 6,0m de profundidade e na S2\_SAB aos 6,0m, onde se observou um solo silto-argiloso, de aspeto lodoso, de cor castanho-escuro, com areia fina siltosa que serve de transição para as aluviões.

Os ensaios SPT resultaram em valores com apenas 2 a 4 pancadas, o que revela a baixa resistência destes materiais.

### **Holocénico (Depósitos de Aluvião)**

**Unidade 2 (UN2):** as sondagens S1\_SAB, S2\_SAB, S3\_SAB, S4\_SAB e S5\_SAB revelaram um terreno aluvionar de composição arenosa. Nos ensaios SPT as amostras obtidas são inferiores ao número de ensaios realizados devido a estes depósitos serem constituídos maioritariamente por areias grosseiras por vezes misturada com areias finas e médias que apresentam níveis lodosos, seixos, cascalho e níveis lodosos intercalares.

Os ensaios SPT realizados, com o avanço da profundidade, revelaram a presença de um topo superficial mais descomprimido, com solos muito pouco compactos, onde se obtiveram valores SPT de 1, 2, 3 e 9 pancadas (UN2C). Na zona intermédia, subjacente a este nível superficial, os valores de SPT foram de 10, 12, 16, 17, 18 e 20, indicando solos medianamente compactos (UN2B), observados até aos 13,0m de profundidade. Na sondagem S1\_SAB, sendo a única que foi além dos 9m de profundidade, a partir dos 13,5m observa-se um aumento de resistência, com valores de SPT de 21, 22, 23, 25, 29, 32, 36, 40, 56 e 60 pancadas, sendo que estes valores mais elevados foram provavelmente devido à existência de níveis de seixos e cascalheira. Admitindo que os valores desta resistência entre 20 a 40 pancadas, caracteriza-se este solo como medianamente compacto a compacto (UN2A).

### **Holocénico (Depósitos de Coluvião)**

**Unidade 1 (UN1):** A partir dos 9m de profundidade na sondagem S4\_SAB, fica implícito o aterro encontrado nas sondagens S6\_SAB e S7\_SAB, onde se observa um terreno arenoso com seixos e cascalhos correspondentes a depósitos de coluvião. São solos maioritariamente arenosos com granulometria grosseira a fina de cor acastanhada com frações siltosas, misturadas com seixos, cascalho e fragmentos de outros tipos de rochas. Esta unidade apresenta um aspeto heterogéneo, com algum grau de consolidação e uma maior percentagem de finos. Os ensaios SPT nesta unidade

resultaram em valores de 8, 11, 17, 19, 22 e 23 pancadas, classificando este solo como pouco compacto a medianamente compacto.

#### 4.6.1 Caracterização Hidrogeológica

Tendo em conta o resultado das sondagens realizadas, pode-se constatar que, passando a zona mais superficial de aterro e de transição (UN4 e UN3), o maciço de fundação é constituído principalmente por depósitos arenosos (UN2 e UN1), o que corresponde a meios de boa condutividade hidráulica na sua maioria, com alguns níveis lodosos de menor condutividade como os depósitos aluvionares (UN2).

Quadro 13 - Parâmetros geotécnicos de cada Unidade. (Nogueira, Pinheiro & Vergas, 2009)

Unidade Geológica	Litologia	N <sub>SPT</sub>	Massa específica (KN/m <sup>3</sup> )	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)	Módulo de deformabilidade (MPa)
UN4	Aterro	2 – 11	-	-	-	-
UN3	Silte argiloso orgânico	2 – 4	12 - 25	-	-	< 3
UN2	UN2C	1 – 9	-	25 - 28	25 - 28	4 – 8
	UN2B	10 – 20	-	29 - 31	29 - 31	9 - 14
	UN2A	21 – 40	-	32 - 35	32 - 25	16 - 27
UN1	Areias (coluvião)	8 – 23	-	29 - 33	29 - 33	8 - 17

Devido a este estudo, pode-se concluir que até nas profundidades máximas atingidas predominam horizontes granulares, o que faz antecipar uma boa condutividade hidráulica por parte do maciço de fundação.

O quadro seguinte apresenta uma síntese do perfil observado na zona da sondagem S1\_SAB.

Quadro 13 - Síntese do perfil observado na zona da sondagem

Profundidade (m)	Formação	Litologia	N <sub>SPT</sub>	Unidade Geotécnica
0.0 – 3.8	Aterro	Areia argilosa e argila arenosa com fragmentos calcários, seixos, cascalho e algum lixo	5 - 8	UN4
3.8 – 7.0	Topo do Aluvião	Silte argiloso orgânico	2	UN3
7.0 – 10.5	Aluvião	Areias muito pouco a pouco compactas	3 – 9	UN2C
10.5 – 13.0		Areias medianamente compactas	16 – 20	UN2B
13.0 – 28.5		Areias medianamente compactas a compactas	21 - 60	UN2A

#### 4.6.2 Interpretação e análise das características geológicas e geotécnicas

Com base na informação disponível, interpretou-se a distribuição das características geológicas e geotécnicas dos terrenos na zona em estudo e definiu-se o ser zonamento em profundidade onde foram identificadas várias unidades com propriedades diferentes:

##### a) Terrenos artificiais

Nesta zona, estão englobados os terrenos artificiais intersectados em todas as sondagens, sendo compostos por: Pavimento tout-venant e coroamento, aterro heterogéneo e blocos calcários com argamassa hidráulica.

Esta camada de terrenos artificiais apresenta uma espessura variável entre os 3,5m e os 6,5m.

A camada superficial de pavimento, tout-venant e coroamento, com espessura a variar entre os 0,2 m e os 0,7m foi intersectada nas sondagens S2 de agosto de 2011 e S5\_SAB, S6\_SAB e S7\_SAB de março de 2009.

Os blocos de calcário com argamassa hidráulica, que constituem os muros de suporte construídos na margem do rio, foram detetados nas sondagens S3 e S4 de agosto 2011, a partir dos 2,0m e do 1,0m de profundidade. Estes apresentam uma espessura de 4,5m a 5,0m, com os ensaios SPT a atingirem as 60 pancadas sem ocorrer cravação de 30 cm, não se podendo medir os valores de SPT. A percentagem de recuperação varia entre os 7% e os 97%.

O aterro heterogéneo é constituído por areias com granulometrias variáveis (média a fina, grosseira a média e fina a média) de cor acastanhada a bege, misturada com fragmentos rochosos ou resíduos de construção. Foram encontrados ainda solos areno-siltosos ou areno-argilosos.

Os valores com o ensaio SPT são baixos, tendo entre 2 a 9 pancadas, o que traduz um aterro mal compactado e com baixa capacidade de resistência.

#### **b) Zona geotécnica 1 (ZG1) – Aluviões (areias e lodos)**

Esta zona é uma zona subjacente à unidade constituída por terrenos artificiais, sendo constituída por depósitos aluvionares arenosos e lodosos que ocorrem entre os 9,5m e os 15,0m em alguns locais.

Nas aluviões estão expressas camadas de lodo argilo-siltoso de cor cinzenta escura, areias siltosas finas a grosseiras acastanhadas e areia de várias granulometrias, desde grosseiras a finas, com seixos e cascalheira, de cor cinzenta a castanho.

Na sondagem S5, de março de 2009 foi registado um valor de SPT de 1 pancada aos 6,0m de profundidade, e noutras sondagens obtiveram-se valores de N mais elevados, entre 16 e 31, normalmente em extractos com cascalheira e seixos, com os valores de SPT obtidos nesta zona geotécnica a variar de um modo geral entre as 5 e as 11 pancadas, indicando a presença de solos pouco compactos. As intercalações lodosas constituem níveis de menor resistência e maior compressibilidade nas areias, que estão inseridas nas aluviões.

#### **c) Zona geotécnica 2 (ZG2) – Aluviões (cascalheira)**

Esta zona geotécnica 2, é designada por aluviões (cascalheira), sendo a zona de aluvião que se encontra a maior profundidade, constituída por cascalheira, seixos e areia de granulometria média a grosseira. Esta zona foi detetada apenas nas sondagens de 2011, devido às sondagens realizadas em março 2009 não terem ultrapassado os 9,0m de profundidade.

Os valores registados nos ensaios SPT são muito variáveis, de 7 a 60 pancadas, o que traduz uma zona geotécnica constituída por materiais com graus de compactidade variando de pouco compacto a muito compacto. No entanto, os valores de SPT mais altos poderão ser devido à presença de seixos ou blocos rochosos.

Os valores obtidos da percentagem de recuperação são de 5% e 11%.

Quadro 14 - Síntese dos parâmetros geotécnicos (Quinta-Ferreira, M. et al, 2011).

Unidade	Designação	Parâmetros Geotécnicos			
		SPT (nºpanc.)	Ângulo de atrito interno ( $\varphi$ )	Coesão (c)	Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )
Terreno Artificiais	Pavimento, tout-venant e coroamento	----	----	----	----
	Blocos calcários com argamassa hidráulica	60	----	----	----
	Aterro heterogéneo	2 – 9	29 – 30	0	<1,8
ZG1	Aluviões – areias e lodos	5 – 11	29 – 30	0	1,6 – 1,8
ZG2	Aluviões - Cascalheira	7 – 39 56 – 60	30 – 38 ----	0 ----	1,8 – 2,0 ----

#### 4.6.3 Conclusões

Os dados obtidos com base no estudo geológico e durante realização dos trabalhos de prospeção permitiram representar a distribuição das unidades geotécnicas consideradas. O zonamento constitui uma síntese e interpretação dos dados recolhidos nesta dissertação, podendo ocorrer variações que não foram detetadas.

Embora a zona de estudo seja extensa e a distância entre os pontos de prospeção considerável, verifica-se genericamente a existência de duas zonas distintas, sendo uma constituída por terrenos artificiais e outra de aluvião, nas duas margens do rio.

Os terrenos artificiais englobam pavimentos, “tout-venant” e coroamento, aterro heterogéneo e blocos calcários com argamassa hidráulica, que constituem os muros de suporte constituídos na margem do rio, apresentando uma espessura de cerca de 3,5m junto à ponte açude, atingindo um máximo na zona entre as sondagens S3 e S4, de agosto de 2011, onde a base da unidade se encontra alinhada proximamente aos 6,5m

(Quinta-Ferreira, Oliveira, Henriques & Sá, 2011). No Parque Manuel Braga, no local de realização da sondagem S1, de agosto de 2011, a camada de terrenos artificiais chega aos 5,0m de espessura e na margem esquerda do rio Mondego tem 4,0m, no local da sondagem S2 de agosto de 2011, a Oeste da ponte de Santa Clara.

A camada de aterro é heterogénea, sendo constituída por areias de granulometria extensa, por vezes argilosa ou areno-siltosa, com fragmentos rochosos e entulho em alguns locais. Trata-se de um aterro mal compactado, com baixa resistência, com valores SPT entre 2 e 9 pancadas.

As aluviões são de composição arenosa de um modo geral, com intercalações de lodo argilo-siltoso que passa em profundidade a cascalheira, seixos e areia, sendo consideradas duas zonas geotécnicas (ZG1 e ZG2).

Na zona geotécnica 1 os valores SPT obtidos variam de um modo geral entre as 5 e 11 pancadas, o que indica solos pouco compactos. Apresenta ainda níveis lodosos intercalados com areias, constituindo níveis menos resistentes e mais compressíveis.

Na margem direita do rio Mondego, em algumas sondagens realizadas, foram detetados restos de madeira pertencentes à estrutura das estacas construídas como fundação dos muros de suporte das margens do rio, que surgem entre os 6,5m e os 7,5m, o que corresponde à transição entre os terrenos artificiais e as aluviões subjacentes.

Na zona geotécnica 2 foi apenas intersectada nas sondagens realizadas em agosto de 2011, que foram mais profundas. Na margem direita do rio encontram-se as aluviões – cascalheira, a partir de uma profundidade entre os 14,0m e os 15,0m. Na margem esquerda esta zona foi intersectada aos 9,5m de profundidade.

As aluviões da zona geotécnica 2 (cascalheira) tendem a apresentar melhores condições de resistência, embora os valores dos ensaios SPT sejam muito variáveis, com 7 a 60 pancadas.

O nível freático medido após a conclusão das sondagens, foi detetado entre os 1,6m e os 4,0m de profundidade, o que corresponde ao nível da água na albufeira da Ponte do Açude, sendo que as areias dos depósitos aluvionares estão saturadas.

Em todas as sondagens realizadas, foi detetado um nível superficial de aterro, depositado sobre depósitos aluvionares arenosos com intercalações de lentículas lodosas (S1\_SAB, S2\_SAB, S3\_SAB, S4\_SAB e S5\_SAB) e sobre depósitos de coluvião arenosos (S6\_SAB e S7\_SAB). Na Sondagem S8\_SAB as amostragens obtidas indicam a existência de aterro ao longo de toda a profundidade.

Os ensaios SPT realizados nos depósitos aluvionares permitem classificar os corpos como muito soltos a medianamente compactos ( $N_{SPT}$  1 – 30 pancadas, em

areias) ou com consistência muito mole ( $N_{SPT}$  2 – 4 pancadas, nos níveis silto-argilosos orgânicos) o que revela um aumento de compactidade com o avanço da profundidade.

Nos depósitos de coluvião detetados, pode-se classificar os corpos como pouco compactos a medianamente compactos ( $N_{SPT}$  8 – 23 pancadas), sendo moderadamente plásticos.

#### 4.7 Sondagens perto do Mosteiro de Santa Clara

Segundo o relatório, pedido pelas Águas de Coimbra, no âmbito do projeto “Construção de duas estações elevatórias de águas pluviais em Santa Clara” (Quinta-Ferreira, Oliveira, Henriques & Carvalho, 2017) foram feitas duas sondagens perto do Mosteiro de Santa Clara, com ensaios SPT, sendo que nestas duas foram colocados piezómetros no final das sondagens. A caracterização geológica e geotécnica destes terrenos é importante para a minha dissertação pois também se encontra na minha zona de estudo e permite avaliar as características destes terrenos.

As duas sondagens (S1\_AC e S2\_AC) foram realizadas de 3 a 23 de janeiro de 2017, sendo a sondagem S1 a cerca de 45m da entrada sul para o mosteiro de Santa Clara, e a sondagem S2 a cerca de 30m a noroeste das bombas da CEPESA, no jardim, junto à passagem inferior de acesso à praça da Canção.

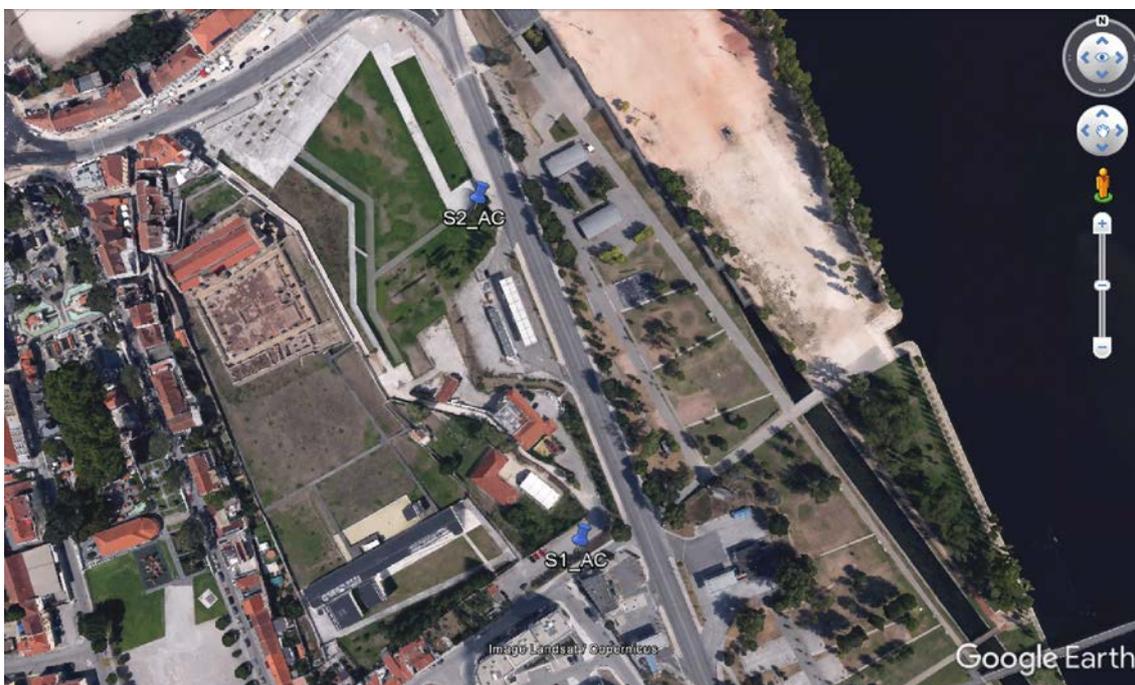


Figura 29 - Localização das sondagens. (Google Earth, 2017).

Estes depósitos aluvionares, resultam de acumulações de materiais devido à dinâmica fluvial, com areias no topo e areias com seixos na base.

As duas sondagens mecânicas à rotação atingiram os 21,0m (S1\_AC) e 30,0m (S2\_AC) de profundidade. Foram realizados ensaios SPT a cada 1,5m de profundidade e recolha de amostras de solo para ensaios laboratoriais.



Figura 30 - Localização das sondagens com sobreposição da carta geológica (Google Earth, 2017).

As duas sondagens começaram por intersectar terrenos superficiais, com espessuras de 4,4m (S1\_AC) e 2,0m (S2\_AC). Na sondagem S1\_AC estes terrenos são constituídos por argila por vezes siltosas com areia e na sondagem S2\_AC por areia argilosa. Estes terrenos apresentam cor acastanhada, com material orgânico e fragmentos rochosos de calcário.

Na sondagem S1\_AC são intersectadas aluviões entre os 4,4m e os 16,0m, de composição arenosa na parte superior e cascalheira e seixos de vários tamanhos na base. Na sondagem S2\_AC encontra-se argila lodosa de cor castanha e cinzenta entre os 2,0m e os 4,7m. Entre os 4,7m e os 12,5m são intersectadas areias com intercalações de argilas lodosas, com espessuras entre os 0,3m e os 1,5m. Entre os 16,0m e os 26,6m, são detetadas areias com seixos.

Foram detetados fragmentos de calcário com o solo argiloso aos 16,0m (S1\_AC) e aos 26,6m (S2\_AC).

Depois do solo argiloso são detetadas margas de cor cinzenta até ao fim das sondagens, a partir dos 17,5m (S1\_AC) e 28,0m (S2\_AC) respetivamente. Na sondagem S1\_AC a unidade apresenta fragmentos de calcário e margas.

Após as sondagens foi colocado um tubo piezométrico para monitorizar os níveis de água. Cada piezómetro é constituído por um tubo de PVC, ranhurado na zona produtiva e envolvido por areão. As cabeças dos tubos são seladas com betão e é colocada uma tampa de proteção para evitar infiltrações.



Figura 31 – Piézometro na S1\_AC.



Figura 32 - Perfuração à rotação da S1\_AC.

No quadro seguinte pode-se ver as profundidades a que foi detetado o nível freático, após a conclusão das sondagens.

Quadro 18 - Profundidade de deteção do nível freático em cada.

Sondagem	Nível freático (m)
S1_AC	2,0m
S2_AC	1,9m

#### 4.7.1 Ensaios de Laboratório

Foram realizados vários ensaios laboratoriais para os solos em quatro amostras recolhidas nos trabalhos de prospeção:

- Análise granulométrica por peneiração húmida, segundo a norma LNEC E 239:1970;
- Limites de consistência, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), segundo a norma NP-143:1969;
- Determinação da percentagem orgânica de solos, segundo a norma J.A.E.: S.9-53.

A amostra recolhida na sondagem S1\_AC é designada por 17/A3, tendo sido retirada entre os 1,5m e os 3,0m de profundidade. Na sondagem S2\_AC foram recolhidas a amostra 17/A4 entre os 3,5m e os 4,5m, amostra 17/A5 entre os 6,0m e os 7,5m e a amostra 17/A6 aos 13,5m de profundidade.

A amostra 17/A3 foi recolhida nos solos artificiais, enquanto as amostras 17/A4, 17/A5 e 17/A6 representam o topo das aluviões, sendo constituídas por areias finas a médias, com intercalações lodosas.

O esquema do plano de amostragem está representado no quadro 19.

Quadro 19 - Esquema do plano de amostragem dos solos e dos ensaios realizados. (Quinta-Ferreira, Oliveira, Henriques & Carvalho, 2017).

Amostra	Recolha		Ensaio		
	Local	Profundidade (m)	Análise Granulométrica (peneiração húmida)	Limites de Consistência	Determinação da Percentagem Orgânica
17/A3	Sondagem S1_AC	1,5 - 3,0	X	X	X
17/A4	Sondagem S2_AC	3,5 - 4,5	X	X	X
17/A5	Sondagem S2_AC	6,0 - 7,5	X	X	X
17/A6	Sondagem S2_AC	13,5	X	X	X

Depois dos ensaios de laboratório foi feita a classificação das amostras utilizando a classificação para fins rodoviários (LNEC E 240: 1970) e a classificação unificada de solos (ASTM D 2487-93).

Segundo a classificação unificada de solos, a amostra 17/A3 é uma argila magra arenosa (CL), a amostra 17/A4 é uma silte arenosa (ML) e as amostras 17/A5 e 17/A6 são classificadas como areias siltosas (SM).

A percentagem de matéria orgânica presente nos solos ensaiados varia entre 0,7% (amostra 17/A6), 0,9% (amostra 17/A5) e 1,5% (amostras 17/A3 e 17/A4), sendo muito baixa.

No quadro 20 é apresentado o resumo dos ensaios realizados sobre as amostras recolhidas, apresentando os valores da granulometria, limites de consistência, percentagem orgânica de solos e a classificação dos solos.

Quadro 20 - Resumo dos Resultados dos ensaios de laboratório de solos. (Quinta-Ferreira, Oliveira, Henriques & Carvalho, 2017).

<b>Amostra</b>	<b>17/A3</b>	<b>17/A4</b>	<b>17/A5</b>	<b>17/A6</b>
<b>Unidade</b>	<b>Solos superficiais</b>	<b>Aluvião</b>	<b>Aluvião</b>	<b>Aluvião</b>
<b>Parâmetros Granulométricos (% passados)</b>				
<b>19 mm</b>	100	100	100	100
<b>9,5 mm</b>	100	100	99,0	100
<b>4,75 mm</b>	99,5	99,9	96,2	99,0
<b>2 mm</b>	94,7	97,4	83,3	95,3
<b>0,850 mm</b>	86,5	87,7	66,3	76,7
<b>0,425 mm</b>	79,5	79,0	50,1	62,3
<b>0,250 mm</b>	75,8	76,2	41,2	55,0
<b>0,106 mm</b>	69,0	68,4	31,2	38,1
<b>0,075 mm</b>	65,7	61,6	26,2	33,8
<b>Limites de Consistência (%)</b>				
<b>LL</b>	34	28	N. P.	N. P.
<b>LP</b>	24	24	N. P.	N. P.
<b>IP</b>	10	4	N. P.	N. P.
<b>Percentagem Orgânica de Solos (%)</b>				
<b>Matéria orgânica</b>	1,5	1,5	0,9	0,7
<b>Classificação</b>				
<b>Classif. Fins Rodoviários</b>	A – 4 (6)	A – 4 (5)	A – 2 – 4 (0)	A – 2 – 4 (0)
<b>Classif. Unificada de Solos</b>	CL	ML	SM	SM

#### 4.7.2 Análises químicas da água do solo

Foram também recolhidas duas amostras da água do solo, tendo sido as análises químicas feitas no Centro de Estudos de Águas (CEA), do Instituto de Engenharia do Porto. Estas amostras foram recolhidas nas duas sondagens (S1\_AC e S2\_AC), no dia 24 de janeiro de 2017.

Foram realizados, em cada amostra de água, os seguintes ensaios:

- Alcalinidade total, segundo o especificado no SMEWW 2320 B;
- Azoto amoniacal, segundo o especificado SMEWW 4500-NH<sub>3</sub> C;

- Dióxido de carbono agressivo, segundo o especificado na EN 13577:1999;
- Magnésio, segundo o especificado no CEA-PE063, SMEWW 3030E e CEA-PE120;
- pH, segundo o especificado no SMEWW 4500-H+ B;
- Sulfatos, segundo o especificado no CEA-PE099.

O resumo destes resultados é apresentado no quadro 21 com a amostra recolhida na sondagem S1\_AC (amostra: 49726) e a amostra recolhida na sondagem S2\_AC (amostra: 49727).

Quadro 21 - Resumo dos resultados das análises químicas da água.

	<b>S1_AC 49726</b>	<b>S2_AC 49727</b>
<b>Alcalinidade (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	124	107
<b>Azoto amoniacal (mg/L NH<sub>4</sub>)</b>	< 2,6	< 2,6
<b>Dióxido de carbono agressivo (mg/L CO<sub>2</sub>)</b>	<5	< 5
<b>Magnésio (mg/L Mg)</b>	11	8,4
<b>pH (unidades de pH)</b>	7,5	7,6
<b>Sulfatos (mg/L SO<sub>4</sub>)</b>	20	42

O Centro de Estudos de Águas (CEA) referiu que, segundo o quadro 2 da norma NP EN 206-1 2007, a água caracterizada não pertence a nenhuma das classes indicadas de exposição para ataque químico, concluindo que não é considerada agressiva para o betão.

#### **4.7.3 Zonamento Geotécnico**

Com base nos resultados da prospeção foram definidas quatro unidades geotécnicas:

- **Zona geotécnica 1 – solos superficiais**

Estes solos superficiais são constituídos por argila arenosa (S1\_AC) e areia argilosa de aterro (S2\_AC). Nas duas sondagens os terrenos apresentam cor castanha,

materia orgânica e fragmentos rochosos de calcário. As espessuras são de 4,4m (S1\_AC) e 2,0m (S2\_AC).

Os valores do ensaio SPT variam entre 1 e 6 pancadas, o que traduz terrenos com baixa resistência. A percentagem de recuperação (IR) varia entre 21% e 72%.

Uma das amostras recolhida na sondagem S1\_AC entre os 1,5 m e os 3,0 m de profundidade, denominada por amostra 17/A3, foi classificada como solo A-4 (6) (classificação para fins rodoviários) e como argila magra arenosa CL (classificação Unificada), tratando-se de um material plástico (IP=10).

- **Zona geotécnica 2 - aluvião (subzonas 2A e 2B)**

Por baixo da unidade de solos superficiais encontram-se depósitos aluvionares soltos, arenosos e lodosos (subzona 2A) e areias com cascalheira e seixos de dimensões variadas com valores de SPT altos (subzona 2B).

- a) **Aluvião 2A** – lodos e areias com valor SPT baixo

Esta aluvião 2A tem uma espessura de 14,0m (entre os 2,0m e os 16,0m de profundidade na S2\_AC), sendo constituída por areias com intercalações lodosas que apresentam espessuras de 2,7m (entre 2,0m e os 4,7m de profundidade) e 1,5m (entre os 9,5m e os 11,0m de profundidade). Os valores SPT nesta subzona são baixos, com valores entre 0 e 13 pancadas. A percentagem de recuperação simples (IR) varia entre os 0% e os 55%. Esta subzona foi identificada apenas na sondagem S2\_AC.

- b) **Aluvião 2B** – areias, cascalheiras e seixos com SPT elevado

Na sondagem S1\_AC, esta subzona 2B é constituída por areia média a grosseira, cascalheira e seixos de várias dimensões, com uma espessura de 11,6m. Os valores SPT variam entre as 21 pancadas e a nega do ensaio (60 pancadas). A percentagem de recuperação simples (IR) varia entre 7% e os 56%. Na sondagem S2\_AC esta subzona encontra-se apenas a partir dos 16m, com uma espessura de 10,6m (entre os 16,0m e os 26,6m de profundidade), sendo constituída por areias médias a finas, seixos e cascalheira de várias dimensões. Os valores de SPT são mais elevados variando entre 39 pancadas e a nega do ensaio (60 pancadas). A percentagem de recuperação simples (IR) varia entre 11% e os 58%.

Foram feitos ensaios em três amostras representativas da aluvião 2A intersetada na sondagem S2\_AC. A amostra 17/A4, foi recolhida entre os 3,5m e os 4,5m de profundidade foi classificada como um solo A-4 (5) (classificação para fins rodoviários) e como silte arenoso ML (classificação unificada). A amostra 17/A5, recolhida entre os 6,0m e os 7,5m de profundidade, caracteriza esta zona com intercalações de areias com os níveis lodosos, classificada como seixo e areia siltosos ou argilosos A-2-4 (0) (classificação para Fins Rodoviários) e areia siltosa SM (classificação unificada). A

amostra 17/A6, recolhida entre os 13,5m de profundidade, caracteriza a zona sem a presença dos níveis lodosos, classificada como seixo e areia siltosos ou argilosos A-2-4 (0) (classificação para fins rodoviários) e areia siltosa SM (classificação unificada).

Dos materiais nesta unidade apenas a amostra 17/A4 apresenta plasticidade (IP=4), ou seja, as restantes amostras não são plásticas.

- **Zona geotécnica 3 – solo argiloso**

Esta zona geotécnica 3 representa o solo argiloso entre os depósitos aluvionares e as margas, estando presente nas duas sondagens. Apresenta 1,5m de espessura aos 16m de profundidade (S1\_AC) e 1,4m de espessura aos 26,6m de profundidade (S2\_AC).

Os valores no ensaio SPT são de 60 pancadas nas duas sondagens e apresentam uma taxa de recuperação simples entre os 0% e os 53%.

- **Zona geotécnica 4 – margas**

Esta zona, estando subjacente à unidade anterior, aparecem margas. Na sondagem S1\_AC surgem margas com fragmentos de calcário. As duas sondagens realizadas terminaram nesta unidade geológica, tendo sido interetada entre os 17,5m e os 21,0m de profundidade (S1\_AC) e os 28,0m e os 30,0m (S2\_AC).

Os valores SPT atingiram sempre a nega (60 pancadas), com percentagem de recuperação simples entre os 33% e os 48% (S1\_AC) e 11% (S1\_AC).

No quadro 22 estão resumidos os resultados obtidos com as sondagens, com os ensaios SPT (*Standart Penetration Test*), IR (Índice de recuperação) e RQD (Índice de qualidade da rocha).

Quadro 22 - Síntese dos resultados obtidos com as sondagens para as zonas geotécnicas consideradas.

Zona Geotécnica	Descrição	SPT (nº pancadas)	IR (%)	RQD (%)
ZG1	Solos superficiais: argila por vezes siltosa com alguma areia, com conteúdo orgânico e com fragmentos calcários	1 – 6	21 – 72	0
ZG2	Aluvião 2A: areia média a fina com intercalações lodosas.	0 – 13	0 – 55	0
	Aluvião 2B: areia média a fina, cascalheira e seixos de dimensões variadas.	21 – 60	11 – 58	0
ZG3	Solo argiloso: margoso, por vezes com fragmentos de calcário	60	0 - 53	0
ZG4	Margas de cor cinza, por vezes com fragmentos de calcário;	60	11 - 48	0

SPT: "Standard Penetration Test"; IR: Índice de Recuperação; RQD: Índice de Qualidade da Rocha.

#### 4.7.4 Parâmetros Geotécnicos e Permeabilidade

Os parâmetros geotécnicos para as unidades descritas anteriormente foram estimados em função dos valores de N obtidos nos ensaios SPT e das litologias atravessadas, como se pode ver no quadro 23.

Quadro 23 - Estimativa dos parâmetros geotécnicos para cada zona geotécnica identificada.

Zona Geotécnica (ZG)	Litologia	Parâmetros Geotécnicos					
		SPT (nº panc.)	Angulo de atrito interno ( $\Phi$ )	Coesão (MPa)	Modulo de deformabilidade (MPa)	Tensão admissível* $\sigma_{adm}$ (MPa)	Peso específico $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
ZG1	Solos superficiais	1-6	28-30	0,01-0,1	5-20	0,05-0,4	< 1,8
ZG2	Aluvião 2A	0-13	27-32	0,01-0,1	0-15	0,01-0,25	1,4-2,3
	Aluvião 2B	21-60	30-36	0,01-0,1	5-50	$\geq 0,8$	1,8-2,3
ZG3	Solo argiloso	60	29-30	0,01-0,1	5-50	0,35-0,8	1,8-2,1
ZG4	Margas	60	35-45	10-30	> 50	> 0,8	2,3-2,6

\* Considerando os menores valores dos ensaios SPT e uma sapata de 2m de largura.

A estimativa da permeabilidade dos terrenos foi feita com base na classificação dos solos, com os resultados dos ensaios laboratoriais das amostras recolhidas da zona geotécnica 1 (sondagem S1\_AC) e da zona geotécnica 2 (sondagem S2\_AC), como se pode ver no quadro 24.

Quadro 24 - Estimativa da permeabilidade dos solos ensaiados, com base na sua classificação.

Amostra	Classificação	Estimativa da permeabilidade (k) (m/s)	Drenagem
17/A3	CL Argila magra arenosa	Entre $10^{-9}$ e $10^{-7}$	Boa a fraca
17/A4	ML Silte arenoso	Entre $10^{-9}$ e $10^{-7}$	Boa a fraca
17/A5	SM Areia siltosa	Entre $10^{-7}$ e $10^{-5}$	Boa
17/A6	SM Areia siltosa	Entre $10^{-7}$ e $10^{-5}$	Boa

Estes valores são correspondentes apenas às amostras recolhidas, na sua análise real, tem de ser ter em conta a presença, por vezes abundante, de seixos e blocos, o que tende a aumentar a permeabilidade do terreno.

#### **4.7.5 Conclusões**

Como foi explicado em cima, no local em estudo, foram encontrados terrenos artificiais, constituídos por argila arenosa com conteúdo orgânico e fragmentos rochosos de calcário, constituindo a zona geotécnica 1 (ZG1). Os depósitos aluvionares (ZG2) são diferenciados em duas subzonas: 2A, constituídas por areias com intercalações lodosas com SPT baixos; e a 2B, constituída por areias, cascalheira e seixos de várias dimensões com SPT elevados. O solo argiloso entre a rocha e as aluviões constitui a zona geotécnica 3 (ZG3). As margas com fragmentos de calcário constituem a zona geotécnica 4 (ZG4).

A zona geotécnica 1 (ZG1) tem uma composição heterogénea, tratando-se de materiais de aterro na sondagem S2\_AC e materiais de argila arenosa na sondagem S1\_AC.

A zona geotécnica 2 (ZG2) corresponde aos depósitos aluvionares, com características distintas nos dois locais de sondagens. Na sondagem S2\_AC, a subzona 2A, entre os 2,0m e os 16,0m tiveram valores do ensaio SPT entre 0 e 13 pancadas, apresentando baixo resistência e por vezes intercalações lodosas com valores de SPT de 0. A subzona 2B, entre os 16,0m e os 26,6m com valores de SPT entre 39 e 60 pancadas, já apresenta boas condições de fundação, com mais resistência. A sondagem S1\_AC apenas intersetou a subzona 2B, com valores SPT entre 21 pancadas e a nega do ensaio (60 pancadas), tendo também uma boa resistência.

A zona geotécnica 3 é uma alteração entre o maciço calcário e os depósitos aluvionares, com valores de SPT de 60 pancadas, constituída por solos argilosos.

A zona geotécnica ZG4 é a zona com melhores condições de fundação, com um maciço rochoso pouco alterado, tendo sido intersetada a profundidades entre os 17,5m (S1\_AC) e os 28m (S2\_AC) e com nega (60 pancadas) no ensaio SPT. Pode, no entanto, existir em certas zonas, alterações em alguns preenchimentos de argila, o que pode resultar em solos argilosos menos resistentes.

O material de laboratório relativamente aos solos superficiais da ZG1, foi recolhido na sondagem S1\_AC e das aluviões da ZG2, recolhido da sondagem S2\_AC. As amostras foram sujeitas a vários ensaios de identificação como análise granulométrica, limites de consistência e determinação da percentagem orgânica dos solos. O material recolhido na sondagem S1\_AC, amostra 17/A3 e na sondagem S2\_AC, amostra 17/A4 apresentam um comportamento plástico, com uma maior

percentagem de elementos finos. As amostras restantes 17/A5 e 17/A6 foram recolhidas a maior profundidade da subzona 2A (S2\_AC), com uma constituição arenosa e comportamentos não plásticos.

Os valores relativos às amostras ensaiadas não representam o maciço no seu todo, pois o maciço parece ser mais permeável do que as amostras ensaiadas, pois possui granulometria mais grosseira.

Relativamente aos ensaios às águas recolhidas nas sondagens S1\_AC e S2\_AC, o CEA – Centro de Estudos de Águas, refere nos seus boletins de ensaio que, segundo o quadro 2 da norma NP EN 206-1 2007 a água caracterizada não pertence a nenhuma classe de exposição para ataque químico, referindo ainda que não é considerada agressiva.

#### 4.8 Sondagens no parque da Segurança Social (Av. Fernão Magalhães)

Este estudo geológico e geotécnico foi requerido pela ARS – Administração Regional de Saúde do Centro no âmbito de “Construção do Centro de Saúde Fernão de Magalhães”. (Quinta-Ferreira, Carvalho & Henriques, 2017)

Foram realizadas cinco sondagens de prospeção (S1\_FM, S2\_FM, S3\_FM, S4\_FM, S5\_FM) de 5 a 23 de dezembro de 2016 até aos 21 metros com recolha de testemunho e sondagens SPT na rua Fernão de Magalhães, na zona do Parque de estacionamento da Segurança Social, parque esse situado em frente à Telepizza.

Na figura seguinte podemos ver o local onde foram realizadas as sondagens.

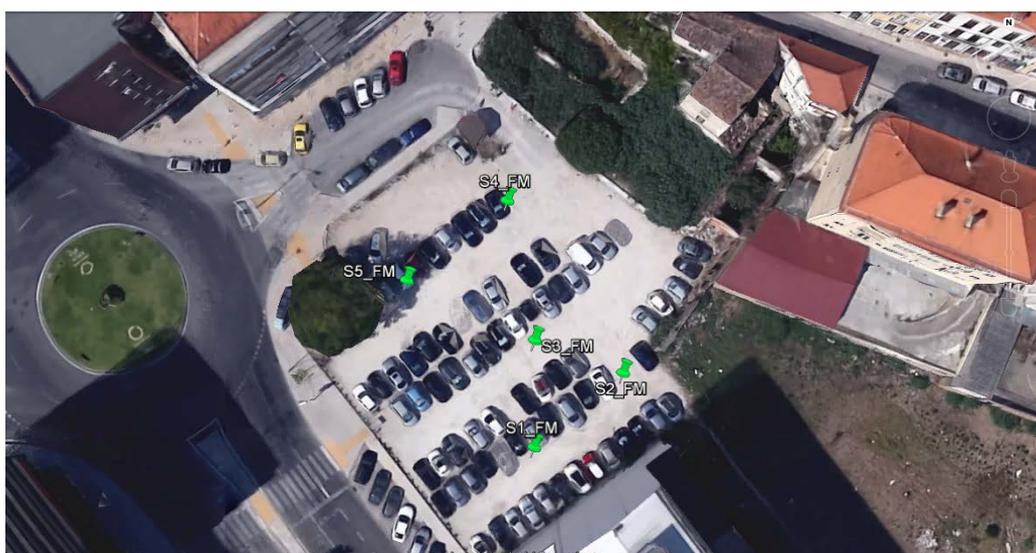


Figura 33 - Localização das sondagens realizadas. (Google Earth, 2017).

As sondagens foram feitas à rotação, com ensaios SPT (Standart Penetration Test) a cada 1,5m de profundidade, com os locais assinalados na figura. Estas

sondagens ficaram ao encargo de G.S.G – Gabinete de Serviços Geotécnicos, Lda, acompanhados na execução pelo IPN Labgeo e pelo Arqueólogo Pedro Roquinho.

#### 4.8.1 Sondagens

Estas sondagens atingiram a profundidade de 21m (S2\_FM e S5\_FM) e 24m (S1\_FM, S3\_FM e S4\_FM). Nas zonas de constituição rochosa foi considerada a percentagem de recuperação simples (IR) e valores de RQD (Rock Quality Designation), com percentagem de recuperação modificada, pois apenas foram contabilizados os tarolos com mais de 10 cm de comprimento.

No início de todas as sondagens, foram intersetados terrenos artificiais (aterro) com espessuras entre os 9,5m e os 12,8m. Esta camada é constituída por areias de várias granulometrias, por vezes argilosas, com fragmentos de construção e demolição, sendo heterogénea.

Nestas zonas de aterro foram encontrados fragmentos de estruturas arqueológicas entre os 1,8m e os 8m (sondagens S1\_FM, S2\_FM e S5\_FM), provavelmente relacionadas com o antigo Hospital dos Lázaros, que se localizava no mesmo local.

As aluviões são de composição arenosa, com algumas intercalações argilosas, que com a profundidade passa a cascalheira, seixos, blocos quartzíticos e areia grosseira. As profundidades variam entre os 9,5m e os 16,5m.

Sob as aluviões, existe solo argiloso acastanhado, com fragmentos de calcário, entre os 15,3m e os 18m de profundidade (S5\_FM).

Após o solo argiloso e até ao fim de todas as sondagens, foram detetadas intercalações de calcário com vários níveis de carsificação com margas, de cor acastanhada e cinzenta, com preenchimento argiloso.

Foi colocado um tubo piezométrico na sondagem S3\_FM, para monitorizar os níveis da água, com os valores medidos após o fim das sondagens, com os valores apresentados no quadro seguinte.

Quadro 25 - Níveis freáticos de cada sondagem.

Sondagem	Nível Freático (m)
S1_FM	3,4
S2_FM	---
S3_FM	3,5
S4_FM	4,2
S5_FM	---

#### 4.8.2 Zonamento Geológico e Geotécnico

Com base na informação disponível definiu-se o zonamento em profundidade, onde foram definidas quatro unidades geotécnicas:

##### a) Zona geotécnica 1 (ZG1) – aterro

Nesta zona estão englobados os solos superficiais de aterro, encontrados em todas as sondagens. Estes solos são constituídos por argila, por vezes lodosa, fragmentos rochosos de calcário e resíduos de construção. Esta camada de aterro apresenta uma espessura entre os 9,5m e os 12,8m.

Os valores dos ensaios SPT são variáveis (entre 1 e 20 pancadas) o que traduz um aterro heterogéneo e mal compactado, com valores de percentagem de recuperação entre os 0% e os 87%.

Nas sondagens S1\_FM, S2\_FM, S3\_FM e S5\_FM, entre os 1,8m e os 8,0m de profundidade, foram encontradas estruturas, possivelmente com contextos geológicos para estudar o património do sítio.

##### b) Zona geotécnica 2 (ZG2) – aluvião

Sob a unidade geotécnica constituída por aterro, aparecem os depósitos aluvionares, constituídos por arenito, por vezes argiloso e com uma espessura que varia entre os 3,2m e os 7,5m. Estas aluviões possuem areias com intercalações argilosas de cor acastanhada, seixos de várias dimensões e blocos quartzitos.

Os valores SPT nesta unidade variam entre 7 e nega do ensaio (60 pancadas). Estes valores mais elevados podem ser devido à presença de seixos ou blocos rochosos de várias dimensões, o que não permite calcular a capacidade real da resistência da unidade na sua totalidade. A percentagem de recuperação simples (IR) varia entre os 0% e os 93%.

##### c) Zona geotécnica 3 (ZG3) – solo argiloso

Esta zona é considerada solo argiloso, que está entre os depósitos aluvionares e os calcários. Esta zona aparece em todas as sondagens com espessuras que variam entre os 0,6m (S4\_FM) e os 4,7m (S2\_FM).

Os ensaios SPT obtiveram valores entre 19 pancadas e a nega (60 pancadas), com uma percentagem de recuperação simples entre os 0% e os 63%.

##### d) Zona geotécnica 4 (ZG4) – margas e calcários

A última unidade, sob a unidade anterior (solo argiloso), surge margas e calcário, por vezes carsificado com preenchimento argiloso. Todas as sondagens realizadas intersetaram esta unidade, a profundidades entre os 16,5m e os 17,0m, e todas terminaram nesta unidade, aos 21,0m (S2\_FM e S5\_FM) e aos 24,0m (S1\_FM, S3\_FM, S4\_FM).

Os ensaios SPT deram sempre nega (60 pancadas), com percentagens de recuperação simples elevadas, atingindo aos 200% nas sondagens S1\_FM e S4\_FM.

No quadro seguinte é apresentado uma síntese dos resultados das sondagens, com os ensaios SPT, IR e RQD para as zonas geotécnicas consideradas.

Quadro 26 - Síntese dos resultados dos ensaios (SPT, IR e RQD). (Quinta-Ferreira, Carvalho & Henriques, 2017).

<b>Zona Geotécnica</b>	<b>Descrição</b>	<b>SPT (nº pancadas)</b>	<b>IR (%)</b>	<b>RQD (%)</b>
<b>ZG1</b>	Aterro: solos de areia com argila, por vezes lodosa, fragmentos de calcário e resíduos de construção;  Possíveis estruturas com contexto arqueológico.	1 – 20	0 – 87	0
<b>ZG2</b>	Aluvião: areias com zonas argilosas, seixos de várias dimensões e blocos quartzíticos.	7 - 60	0 - 93	0
<b>ZG3</b>	Solo argiloso: solo margoso com fragmentos de calcário.	19 - 60	0 – 63	0
<b>ZG4</b>	Calcário carsificado com preenchimentos argilosos; Marga acinzentada.	60	33 - 100	0

#### 4.8.3 Conclusões

Em função das litologias atravessadas e dos valores de N obtidos nos ensaios SPT, foi feito um quadro com uma estimativa dos parâmetros geotécnicos para cada zona geotécnica considerada (ZG1, ZG2, ZG3, ZG4).

Estes dados obtidos no estudo geológico, permitiram a distribuição destas unidades geológicas consideradas.

Na zona geotécnica 1 (ZG1) foram encontrados terrenos superficiais de aterro, com solos de areia com argila, fragmentos de calcário e resíduos de construção. A zona geotécnica 2 (ZG2) é constituída por aluvião com seixos de várias dimensões, com blocos quartzíticos. Já a zona geotécnica 3 (ZG3) é constituída por solo argiloso e a zona geotécnica 4 (ZG4) por calcário, por vezes carsificado e margas.

Quadro 27 - Estimativa dos parâmetros geotécnicos para cada zona geotécnica. (Quinta-Ferreira, Carvalho & Henriques, 2017).

Zona Geotécnica (ZG)	Litologia	Parâmetros Geotécnicos					
		SPT (nº panc.)	Ângulo de atrito interno ( $\Phi$ )	Coesão (Mpa)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Tensão admissível* $\sigma_{adm}$ (MPa)	Massa Volúmica ( $g/cm^3$ )
<b>ZG1</b>	Aterro	1-20	29-30	0,01-0,1	5-50	0,05-0,4	<1,8
<b>ZG2</b>	Aluvião	7-60	29-36	0,01-0,1	5-50	0,1-0,6	1,8-2,0
<b>ZG3</b>	Solo argiloso	19-60	29-30	0,01-0,1	5-50	0,35-0,8	1,6-2,1
<b>ZG4</b>	Margas e Calcário	60	35-45	10-30	>50	>0,8	2,3-2,6

\*Considerando os valores menores dos ensaios SPT e uma sapata de 2m de largura.

Este zonamento é uma síntese da interpretação dos dados recolhidos através das sondagens, podendo existir variações que não foram detetadas.

Tendo em conta os dados obtidos, a zona geotécnica 1 (ZG1) tem uma composição heterogénea, constituída essencialmente por materiais de aterro, com comportamento não uniforme. A zona geotécnica 2 (ZG2) já apresenta uma maior resistência perto do maciço calcário embora os ensaios SPT sejam variáveis, entre 7 e 60 pancadas. A zona geotécnica 3 (ZG3) é a zona de alteração entres o maciço calcário e os depósitos aluvionares, constituída por solos argilosos. A zona geotécnica 4 (ZG4) corresponde a rocha pouco alterada, atingindo nega (60 pancadas) no ensaio SPT, ou seja, esta zona tem boa capacidade de resistência podendo, no entanto, existir zonas de alteração, com preenchimentos argilosos menos resistentes espalhados na zona dos calcários.

O nível freático detetado nas sondagens S1\_FM, S3\_FM e S4\_FM foi aos 3,4m, 3,5m e 4,2m, respetivamente, não tendo sido intersetado nas sondagens S2\_FM e S5\_FM.

Estas sondagens estão inseridas na mesma camada, servem para melhor perceber a geologia e a dinâmica geológica da zona neste ano 2017 e se poder fazer uma análise mais ampla da geologia local para a reconstrução requalificação das margens do Mondego, de forma mais eficaz e económica.

As operações de preparação da requalificação dos muros, para as cotas que se situem abaixo do nível freático deverão, de preferência, ser realizadas em período seco, minimizando-se assim os problemas resultantes da água nas fundações ou os requisitos de rebaixamento.

Em relação ao acompanhamento do arqueólogo Pedro Roquinho, conclui o seguinte: “Através da observação das amostras, há alguns aspetos que podem ser garantidos com alguma certeza, como a existência de estruturas preservadas no subsolo entre os 2,5 e os 8m de profundidade, assim como os eventuais níveis arqueológicos associados, atestados pelo espólio retirado.”

## 5 Análise da intervenção nas margens do Mondego

### 5.1 Objetivos

O principal objetivo é abordar a geologia e o enchimento aluvionar do vale do Mondego em Coimbra e as suas implicações.

Procura-se reconstruir e requalificar as margens degradadas do rio Mondego entre a Ponte do Açude e ponte de Santa Clara devido às correntes fluviais e aos próprios sedimentos transportados e depositados pelo rio, que juntamente com a geologia do terreno provoca assoreamentos.

### 5.2 Metodologia

Para a identificação e caracterização detalhada, nas sondagens em estudo procedeu-se à perfuração e à recolha de dados dos testemunhos para o armazenamento e tratamento de dados relativos ao grau de alteração, à percolação, à profundidade e ao tipo de rocha como possíveis discontinuidades e fraturas. Foi possível assistir às sondagens na Rua Fernão Magalhães e nas sondagens junto ao Mosteiro Santa Clara, das quais possibilitou também apresentar as imagens seguintes.



Figura 34 - Caixa com material de perfuração e SPT's.



Figura 35 - Material recolhido dos SPT.

Foram utilizadas coroas de carboneto de tungsténio e coroas diamantadas para as profundidades onde o material era mais duro, sendo mais eficaz.



Figura 37 - Perfuração à rotação.



Figura 36 - Coroa diamantada (esquerda) e coroa de tungsténio (direita).

### 5.3 Soluções

Tendo em conta este ambiente geológico aluvionar em que a obra de requalificação se irá desenvolver, tem de ser ter em consideração as areias saturadas, com o nível freático relativamente próximo da superfície, com pressões hidrostáticas elevadas nas zonas mais profundas o que apresenta risco de liquefação dos solos durante um sismo.

Para a realização da requalificação e reconstrução das margens do Mondego deve ser previsto um processo de construção de acordo com as condições geotécnicas e geológicas que permita a instalação das estruturas em segurança, durante a obra, que garanta a sua funcionalidade e estabilidade.

De um modo geral, tem de se ter em conta as condições geotécnicas como as areias no subsolo, com o nível freático próximo à superfície, de modo a assegurar o desenvolvimento dos trabalhos de reconstrução em segurança e a funcionalidade e estabilidade das estruturas a ser implantadas (muros).

As operações de preparação das fundações para os muros, devem ser realizadas durante um período seco para que as cotas do nível freático se situem o mais abaixo possível, minimizando os problemas e riscos associados à água e a necessidade de rebaixamento.

Devem ser feitos previamente ensaios de bombagem, para se ter uma caracterização mais real da permeabilidade do terreno.

Devido à geologia do vale aluvionar onde está incluído o troço em estudo, é importante serem adotadas metodologias de trabalho que evitem grandes descompressões, pressões hidrostáticas elevadas ou a liquefação de solos.

Com isto, é necessário um reconhecimento geológico-geotécnico muito rigoroso e um bom conhecimento das condições de fundação. Poderá ser necessário recorrer a medidas tais como a injeção de cimento em fundações, a execução de uma laje de betão, a utilização de micro estacas e pedras de grandes dimensões.

As águas assoreadas afetam o escoamento, podendo provocar erosões nas fundações das obras e nos muros, ou seja, tem de se analisar frequentemente a evolução dos leitos de escoamento e evitar assentamentos devido à sobrecarga nas aluviões.

## 6 Considerações Finais

Este trabalho teve como finalidade conhecer as características geológicas do vale do Mondego, em particular na zona urbana da cidade de Coimbra, avaliar possíveis situações problemáticas associadas às obras existentes e antever situações de instabilidade que requeiram uma intervenção de requalificação.

Após a consulta e análise de vários estudos geológico-geotécnicos e através do estudo apresentado para cada secção da zona em estudo e de todo o vale Mondego na zona de Coimbra, foi possível fazer uma distribuição e análise de todas as unidades geológicas encontradas observadas.

A unidade dos depósitos aluvionares resulta da acumulação de materiais associados à dinâmica fluvial, correspondendo a depósitos terrígenos com evidente estruturação interna, traduzindo a evolução do leito aluvial do rio Mondego.

A montante do Açude-Ponte, as aluviões são constituídas por areias no topo e areias com seixos e calhaus na base, com intercalações lenticulares de lodos e argilas menos significativas, quer em espessura quer em extensão.

A espessura das aluviões é variável, tendo sido observada na zona da Quinta da Boavista, a montante da área a intervencionar, uma espessura de 25m e na zona do Açude-Ponte rondando os 40m.

Estes depósitos aluvionares apresentam uma fraca resistência, constituindo solos muito deformados e com pouca capacidade de carga, associada à posição do nível freático ser relativamente próximo da superfície, o que pode provocar problemas relacionados com a instabilidade em futuras escavações e problemas devido às pressões hidrostáticas causadas pela posição elevada do nível freático.

As Camadas de Coimbra que constituem uma das unidades rochosas que delimitam o enchimento do vale aluvionar na zona de Coimbra, são essencialmente de natureza dolomítica, sendo constituídas por dolomitos e calcários dolomíticos espessos, homogéneos e muito fraturados.

A colina de Santa Clara, constituída pelos calcários das Camadas de Coimbra, encontra-se na margem esquerda do rio Mondego. Na margem direita afloram calcários e arenitos, com a transição localizada entre as duas unidades na zona do Parque Manuel Braga.

Foram encontrados fragmentos de calcário e material orgânico nas sondagens perto do Mosteiro de Santa Clara (AC), da Ponte do Açude (EP) e nas sondagens entre o Parque Manuel Braga e Ponte do Açude (SAB) presentes no vale do Mondego, o que tende a indicar que este vale é uma zona com comportamentos não uniformes e difíceis de prever.

Os solos aluvionares do vale do Mondego apresentam características distintas, devido aos processos de sedimentação hidrodinâmicos serem diferentes ao longo do vale. Através do zonamento geotécnico estudado em cada secção, foi possível verificar vários zonamentos diversificados, com aumento de heterogeneidade devido à variação da velocidade do escoamento.

A geometria e distribuição das aluviões que enchem o vale do Mondego, essencialmente desde a ponte Rainha Santa Isabel até ao Açude-Ponte, condicionaram o seu enchimento após a erosão das últimas glaciações. Todos os aspectos geológico-geotécnicos falados serviram de base para a interpretação de todo este vale e dos problemas associados ao rio (assoreamento) e nas margens (problemas nas estruturas de engenharia aplicadas). Toda esta análise serviu como base para se encontrar soluções adequadas às condições naturais existentes.

A maior problemática associada às requalificações que viram a ser feitas nestes solos aluvionares, que são constituídos por areias lodos e cascalheira na sua generalidade, é a probabilidade de se gerarem assentamentos, devido à deficiente capacidade de suporte dos solos de fundação.

As fendas observadas em vários locais dos muros das margens são o resultado do assentamento e basculamento provocado pela deformação das fundações dos muros. No tardo dos muros encontram-se aterros soltos, com valores de SPT entre 2 a 9, pelo que existe probabilidade de ocorrer assentamentos, podendo danificar pavimentos e passeios nas zonas junto aos muros, devido ao terreno ser mal compactado e com baixa resistência na maioria dos terrenos estudados no vale do Mondego na zona de Coimbra.

Há necessidade de proteger o leito aluvionar dos efeitos das perturbações traduzidas por erosões localizadas, devido à construção das pontes e dos muros, quer a montante quer a jusante das pontes (Dias, 1978).

Devido à distância entre os solos observados e estudados não é possível estabelecer-se uma caracterização exata das aluviões, prevalecendo a heterogeneidade.

A variabilidade natural destes terrenos pode permitir a ocorrência de situações que não foram detetadas nas sondagens ou análises estudadas, pelo que alguns valores interpretados podem ter algum afastamento à realidade dos terrenos.

## 7 Referências Bibliográficas

- Aktarakçi, H. (2008). *Resistivity Imaging*. Seminar on resistivity imaging. Madrid.
- Alarcão, J. (2012). *As Pontes que se afogaram no Rio*. Coimbra, Ed. Ordem dos Engenheiros da Região Centro, Coimbra.
- Ayala-Carcedo, F. e Andreu Posse, F. (1987). *Manual de Taludes* (1ªedição). Instituto Geologico y Minero de España.
- Bessa, C. (2009). *Caracterização Mecânica dos maciços através de ensaios “In Situ”* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior.
- Cassan, M. (1982). *Los ensayos “in Situ” en la Mecanica del Suelo – tomo I Su Ejecucion e Interpretacion*. Editores técnicos asociados, S.A., Barcelona.
- Cavalcante, E. H. (2002). *Investigação teórico-experimental sobre o SPT*. Tese de Doutoramento. Universidade do Rio de Janeiro, Brasil.
- Coelho, P. & Lemos, L. (2001, julho). Caracterização geológica e geotécnica do local experimental da quinta da Foja, situado no depósito de solos moles do Baixo Mondego. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 17-32.
- Coelho, S. (1996). *Tecnologia de Fundações*. Edições E.P.G.E, Amadora
- Cruz, N. (2010). *Modelling Geomechanics of Residual Soils with DMT Tests*.
- Duarte, I. (2002). *Solos Residuais de Rochas Granitoides a Sul do Tejo – Características Geológicas e Geotécnicas*. Tese de Doutoramento. Universidade de Évora, Évora.
- Duarte, L. & Soares, A. (2002). Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico inferior da Bacia Lusitânica (Portugal). *Instituto Geológico e Mineiro*, 89, 135-154.
- Dias, H. (1978). Açude-Ponte de Coimbra- Cortina Delgada da Margem Direita. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 31, 89-97.
- EN ISO 22476-2. *Geotechnical investigation and testing — Field testing. Part 2: Dynamic probing (ISO 22476-2:2005)*.
- Ferruccio, C. (1990). *Prove Geotecniche in Sito*. Ed. GEO-GRAPH S.N.C, Segrate, Itália.
- Folques, J. (1992). Os ensaios SPT. Seminário Internacional de Ensaio In-Situ, LNEC, Lisboa.
- Fonseca, A. (1996). *Geomecânica dos Solos Residuais de Granito do Porto. Critérios para o Dimensionamento de Fundações Directas*. Tese de doutoramento da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- GEG – Gabinete De Estudos e Geotécnia LDA, GRID – Consultas, Estudos e Projetos De Engenharia, LDA (1999) – Ponte Europa sobre o Rio mondego, Projeto de Execução, ICOR.
- GEOSOC – Grupo A. Silva & Silva (2003) – *Elaboração de Prospecção Geotécnica da Ponte Pedonal e de Ciclovía sobre o Rio Mondego, Reconhecimento Geotécnico, Relatório*, Coimbra Polis.
- IGEOTEST (2004). *Ensayos Geotecnicos In Situ – su ejecución e interpretación*. Girona, Espanha.
- Kullberg, J., Rocha, J., Soares, A., Rey, J., Terrinha, P., Callapez, P. & Martins. L. (2006). *A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica*. In *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*.

- Lima, C. & Menezes, J. (2008) - *Textos de apoio de Geologia de Engenharia*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- LNEG (2017). <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html>, acedido em 20/09/2016
- Lopes, I. (2014). *Caracterização geológica-geotécnica dos solos aluvionares do Mondego em Coimbra* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências da Terra, Coimbra.
- Martinho, E. (2002). *Estudo Integrado de Problemas Ambientais por Métodos Geofísicos*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, p. 269.
- Matos Fernandes, M. (2011). *Mecânica dos Solos. Introdução à Engenharia Geotécnica*, Vol.2. Edições FEUP, Porto.
- Mayne, P., Christopher, B., & Dejong, J. (2002). *Subsurface Investigation – Geotechnical Site Characterization. Reference Manual*. National Highway Institute. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Mesquita Cardoso, E. & Franco Abreu, A. (1954). *A nova Ponte de Santa Clara sobre o rio Mondego em Coimbra*. Boletim da Ordem dos Engenheiros, vol (3) n. 21. Ministério das Obras Públicas, J.A.E.
- Neves, E. (1978). Aspectos Geotécnicos do Projecto do Açude-Ponte de Coimbra. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 22, 65-82.
- Nogueira, A. & Pinheiro, M. & Vergas, T. (2009) – Relatório Geotécnico definitivo do Sistema Adutor da Boavista – Sector Central I – Traçado Comum Com o Saneamento, Guia.
- Odebrech, E. (2003). *Medidas de energia do ensaio SPT*. Tese de Doutoramento. Universidade do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Oliveira, J. (2009). *Caracterização da Pluma de Contaminação numa Antiga Lixeira com o Método de Resistividade Elétrica*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Pereira, C. (2005). Fundações. AIST- Secção Folhas Soltas
- Proença Cunha, P., Dinis, J., Freire da Silva, A. & Nunes André, J. (1985). Evolução Estuarina Condicionada por intervenções portuárias: Modificações recentes no setor intermédio e distal do estuário do Mondego. *Memórias e Notícias*, nº 120, 95-120.
- Quigley, R. (1980). Geology, mineralogy and geochemistry of soft soils and their relationship to geotechnical problems. *Canadian Geotechnical Journal*, 17 (2), 261-285.
- Quinta-Ferreira, M. (2010). *Construção da Nova Escada de Peixes do Açude-Ponte de Coimbra – Estudo Geológico-Geotécnico*. Realizado para Tecnovia – Sociedade de Empreitadas, S.A.
- Quinta-Ferreira, Oliveira, Henriques & Carvalho (2017). *Construção de duas Estações Elevatórias de águas Pluviais em Santa Clara - Estudo Geológico e Geotécnico*. Realizado para Águas de Coimbra, IPNIlabgeo.
- Quinta-Ferreira, M., Oliveira, M., Henriques, J. & Sá, M. (2011). Estudo da Estabilidade das Margens do Mondego, entre o Parque Manuel Braga e o Açude-Ponte. IPNIlabgeo.

- Quinta Ferreira, M., Velho, J., Pereira, L. (2004). Avaliação das características evolutivas dos pelitos do Triássico em Coimbra. 9º Congresso Nacional de Geotecnia Passado, Presente e Futuro da Geotecnia, Vol. I, pp.39-50. Editado pela Universidade de Aveiro (ISBN: 972-789-115-2).
- Ribeiro, J. (2011). Avaliação e correlação de parâmetros físicos e mecânicos de um solo residual granítico. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Romão, J. C. (2005). *Cartografia Geológica: um instrumento do conhecimento para o desenvolvimento do território. Actas do XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros*, 377-386.
- Romão, J. C. & Cunha, T. (2012). *Cartografia geológica - Uma mais-valia para o desenvolvimento do território. Geonovas*, 25, 3-17.
- Sanches, R. (1996). *O problema secular do Mondego e a sua resolução*. LNEC, Lisboa.
- Soares, A., Marques, J. & Rocha, R. (1985). *Contribuição para o conhecimento geológico de Coimbra*. Memórias e notícias, nº 100, Publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra.
- Soares, A., Marques, J. & Sequeira, A. (2007). *Carta Geológica de Portugal, escala 1/50.000*. Notícia explicativa da folha 19-D (Coimbra-Lousã), INETI, Departamento de geologia, Lisboa.
- Soares, A., Marques, F. & Rocha, R. (1987). *Carta Geológica de Coimbra (Norte)*. Folha nº 230 - Coimbra.
- Thomas, E. (2005). *Esclerómetro – Nota de aulas*. Brasília.
- Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid.
- Viana da Fonseca, A. *Projeto Geotécnico Assistido por Ensaios de Laboratório e In Situ*. Texto de apoio, FEUP, Porto.