



## **Modelações geológico-geotécnico tridimensionais**

**JOÃO PEDRO CAMPOS DA SILVA**

Outubro de 2023



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Modelações geológico-geotécnico tridimensionais**

**João Pedro Campos da Silva**



**isep** Instituto Superior de Engenharia do Porto

**P.PORTO**

**2023**



(página propositadamente em branco)



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Modelações geológico-geotécnico tridimensionais**

*Three-dimensional geological-geotechnical modelling*

**João Pedro Campos da Silva**

**1210166**

*Projeto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizado sob a orientação do Doutor António Agostinho Martins Mendonça, Professor Adjunto Convidado do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

## **Agradecimentos**

Esta dissertação é fruto de muito esforço e dedicação. Felizmente, pude sempre contar com o apoio de algumas pessoas que me auxiliaram ao longo de todo este percurso, às quais não posso deixar de expressar a minha gratidão.

Ao meu orientador, Doutor Agostinho Mendonça (DEG|ISEP), gostaria de agradecer por todos os conhecimentos transmitidos, pelo suporte incondicional, pelo acompanhamento ao longo de todo o período de realização desta dissertação e por reconhecer as minhas dificuldades enquanto trabalhador-estudante, nunca permitindo que perdesse o empenho.

À Sara Martins, ao Márcio Macieira e ao Ricardo Silva, meus colegas e amigos na ENGGE<sup>®</sup>, agradeço por todo o apoio, compreensão e ajuda nos momentos mais complicados, mas acima de tudo, por não permitirem que desistisse dos meus objetivos.

Aos meus pais, Luísa e Luís, agradeço-lhes toda ajuda incondicional, auxílio nas minhas dificuldades e compreensão nos momentos mais difíceis.

A todos, um muito obrigado!

(página propositadamente em branco)

## Palavras-chave

Modelação 3D, Autodesk Civil 3D, Modelação Geológico-Geotécnica, Formato AGS, Otimização

## Resumo

O presente trabalho tem como tema as modelações geológico-geotécnicas tridimensionais, onde o principal objetivo era avaliar a capacidade destes modelos na limitação de custos e otimização de custos em projetos geotécnicos. Começou por se fazer um breve levantamento dos *softwares* de modelação 3D, com maior importância no mercado atual, ilustrando-os com três aplicações reais. O Autodesk Civil 3D foi a ferramenta selecionada para o desenvolvimento da investigação. Em trabalhos com grandes volumes de dados, a padronização de resultados é um aspeto que revela grande importância, permitindo harmonizar as interações entre todas as informações disponíveis. O formato de dados da AGS foi escolhido pela sua versatilidade e suporte pelo *software* selecionado. Fruto de uma exaustiva experimentação prática, desenvolveu-se um procedimento baseado na extensão Geotechnical Modeler. Este inicia-se com o zonamento geológico-geotécnico e a criação da base de dados em formato padronizado. Segue-se a criação automática do modelo 3D, realizando-se os devidos ajustes. A campanha de prospeção geológico-geotécnica realizada no âmbito da construção do Shopping Cidade do Porto, foi o caso de estudo aplicado. Um total de 34 furos de sondagem complementados por ensaios SPT foram tratados de acordo com a metodologia. Quatro zonas geológico-geotécnicas foram propostas. Um primeiro modelo 3D foi gerado, porém, devido à existência de algumas incoerências interpretativas e ao facto do edifício em projeto ser mais abrangente que o modelo, um segundo foi elaborado. Realizaram-se algumas correções e extrapolaram-se dados, para que o modelo envolva-se todo o edifício. A comparação entre os perfis automáticos, conseguidos a partir do modelo gerado, e os perfis convencionais, expôs que embora os convencionais apresentem maior pormenorização, estes não têm qualquer influência das sondagens adjacentes. Esta revelou-se a grande vantagem da metodologia, trabalhando os dados como um conjunto, atingindo assim maiores precisões e, conseqüentemente, capaz de minorar os riscos associados, aprimorando a otimização.

(página propositadamente em branco)

**Keywords**

3D Modelling, Autodesk Civil 3D, Geological-Geotechnical Modelling, AGS Format, Optimization

**Abstract**

This work focuses on three-dimensional geological-geotechnical modelling, where the main objective is to evaluate the capacity of these models to limit risks and optimize costs in geotechnical projects. The study began with a brief survey of today's most critical 3D modelling software, illustrating them with three real applications. Autodesk Civil 3D was the one selected for the investigation. When working with large volumes of data, the standardization of results is crucial, making it possible to harmonize the interactions between all the information available. The AGS data format was chosen for its versatility and support by the selected software. As a result of exhaustive practical experimentation, a procedure was developed based on the Geotechnical Modeler extension. It begins with geological-geotechnical zoning and the creation of the database in a standardized format. It is followed by automatically creating the 3D model and making the necessary adjustments. The case study applied was the geological-geotechnical in situ investigations campaign carried out as part of the construction of Shopping 'Cidade do Porto'. A total of 34 boreholes complemented by SPT tests were treated according to the methodology. Four geological-geotechnical zones were proposed. A first 3D model was generated, but a second one was produced due to some interpretative inconsistencies and the building under design being more extensive than the model. Some corrections were made, and data was extrapolated so that the model included the entire building. The comparison between the automatic and conventional profiles obtained from the generated model showed that although they are more detailed, they do not influence the adjacent boreholes. This proved to be the most significant advantage of the methodology, working with the data as a whole, thus achieving greater precision and reducing the associated risks, improving optimization.

(página propositadamente em branco)

---

## Índice

Capítulo I .....	1
1. Introdução .....	3
1.1. Enquadramento do tema .....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
Capítulo II .....	7
2. Avaliação Geológico-Geotécnica: breve síntese .....	9
2.1. Caracterização Geotécnica .....	9
2.1.1. Propriedades do Terreno .....	11
2.1.2. Estados Limite.....	11
2.1.3. Relatório de Projeto Geotécnico .....	12
2.2. Prospecção Geotécnica .....	13
2.2.1. Prospecção Geofísica .....	15
2.2.2. Prospecção Mecânica.....	16
2.3. Zonamento Geotécnico .....	17
2.3.1. Métodos para Determinar as Propriedades do Solo e das Rochas .....	19
2.3.2. Propriedades do Solo .....	19
2.3.3. Propriedades das Rochas .....	20
2.3.4. Confiabilidade e Variabilidade.....	24
2.3.5. Seleção das Propriedades Geotécnicas .....	25
Capítulo III .....	27
3. Modelação Geotécnica 3D .....	29
3.1. Padronização dos Resultados .....	30
3.2. Ferramentas Comerciais.....	31
3.2.1. Autodesk Civil 3D.....	32
3.2.2. Bentley MicroStation.....	33
3.2.3. Bentley OpenGround.....	34
3.2.4. Seequent Leapfrog Geo .....	35
3.2.5. Projetos Geotécnicos por SIG .....	37
3.3. Aplicações de Estudo.....	39
3.3.1. Plataforma Logística de Nola (Itália) .....	40
3.3.2. Ara Damansara, Petaling Jaya, Malásia .....	42
3.3.3. Túnel de Silvertown, Londres (Reino Unido).....	44
3.4. Escolha do <i>software</i> para o desenvolvimento do trabalho.....	45
Capítulo IV .....	47
4. Procedimento Desenvolvido .....	49
4.1. Metodologia de Modelação 3D.....	49
4.2. Detalhe do Procedimento .....	50
Capítulo V .....	57
5. Caso de estudo .....	59
5.1. Enquadramento Geológico.....	60
5.2. Nível freático .....	62
5.3. Correlações para Estimar Propriedades do Solo e das Rochas .....	63
Capítulo VI .....	67
6. Aplicação Prática e Resultados.....	69
6.1. Zonamento geológico-geotécnico.....	69
6.2. Modelo Geológico-Geotécnico 3D .....	71
6.3. Modelo Provisório .....	71

---

6.4. Modelo Final.....	75
6.4.1. Perfis Geológico-Geotécnicos Interpretativos .....	82
6.5. Perfis Geológico-Geotécnico Interpretativos – Método Convencional 2D.....	85
Capítulo VII .....	89
7. Conclusões.....	91
7.1. Considerações Finais .....	91
7.2. Perspetivas Futuras .....	98
Capítulo VIII .....	99
Anexos .....	106
Anexo I – Planta dos Trabalhos de Prospecção .....	108
Anexo II – Perfis Convencionais .....	110
Anexo III – Furos de Sondagem: Classificação Litológica .....	117
Anexo IV – Zonamento Geológico-Geotécnico .....	119
Anexo V – Modelo Geológico-Geotécnico 3D.....	121

---

(página propositadamente em branco)

---

## Índice de figuras

Figura 1 – Propriedades de um maciço rochoso (Wyllie, 1999).....	22
Figura 2 – Categorias que caracterizam um maciço rochoso (Wyllie, 1999). ....	23
Figura 3 – Etapas no tratamento e processamento de dados na construção de um Modelo 3D (adaptado de Azaronak, 2015).....	29
Figura 4 – Ficha de apresentação do <i>software</i> Autodesk Civil 3D (Fonte: <a href="https://www.autodesk.pt/products/civil-3d">https://www.autodesk.pt/products/civil-3d</a> ). ....	32
Figura 5 – Modelo tridimensional gerado pela extensão Geotechnical Modeler do Autodesk Civil 3D (Morin, 2015). ....	33
Figura 6 – Ficha de apresentação do <i>software</i> MicroStation (Fonte: <a href="https://bentley.com/software/microstation/">https://bentley.com/software/microstation/</a> ). ....	34
Figura 7 – Ficha de apresentação do <i>software</i> OpenGround (Fonte: <a href="https://bentley.com/software/openground/">https://bentley.com/software/openground/</a> ). ....	34
Figura 8 – Modelo tridimensional gerado pelo <i>software</i> OpenGround (Chandler, 2022).....	35
Figura 9 – Ficha de apresentação do <i>software</i> OpenGround (Fonte: <a href="https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/">https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/</a> ).....	36
Figura 10 – Modelo geológico 3D por Webber & Kijek (2022). A) Modelo Tridimensional. B) Interpretação do Modelo gerado.....	37
Figura 11 - Modelo geológico gerado pelo RockWorks (RockWare, 2015). ....	38
Figura 12 – Modelos Geotécnicos combinados com a Resistência de Ponta (a); Módulo Elástico (b); Módulo de Deformação (c); Resistência Lateral (d); (e) Coeficiente de Compressibilidade (Petrone et al., 2023). ....	42
Figura 13 – Modelos 3D criados por Chia et al., 2021. A – Geologia; B – Dados Generalizados; C – Camadas de Solo e Camadas Compactas; D – Nível Freático. ....	43
Figura 14 – Modelo Geotécnico 3D do Túnel de Silvertown, Londres (Fonte: Transport of London). ....	45
Figura 15 – Fluxo de trabalho adotado para Modelação 3D de caracterização geológico-geotécnica. ....	49
Figura 16 – Ambiente de trabalho do AGS4-validator-beta-v0_1_1.....	51
Figura 17 – Preparação do ficheiro AGS em Excel. Descrição do zonamento geológico-geotécnico pelas várias sondagens, no grupo “GEOL – Field Geological Descriptions” .....	52
Figura 18 – Funcionalidades da extensão Geotechnical Modeler do Autodesk Civil 3D. ....	54
Figura 19 – Processo de adição de novos pontos às superfícies geradas automaticamente pelo Geotechnical Modeler.....	55
Figura 20 – Limite de implantação do edifício proposto e locais de execução dos furos de sondagem.....	59
Figura 21 – Enquadramento geológico do local em estudo. Extrato da Folha 9-C Porto da Carta Geológica de Portugal (Carrington da Costa & Teixeira, 1957). ....	61
Figura 22 – Distribuição espacial dos 34 furos de sondagem executados. Ilustração do zonamento geológico-geotécnico em cada uma das sondagens. ....	72
Figura 23 – Modelo Provisório. Distribuição das quatro superfícies geológico-geotécnicas geradas. ....	72
Figura 24 – Modelo Provisório. Modelo desprovido da camada ZG4.....	73
Figura 25 – Modelo Provisório. Modelo desprovido das camadas ZG4 e ZG3. ....	74
Figura 26 – Modelo Provisório. Modelo da distribuição da rocha granítica identificada nos <i>logs</i> de sondagem.....	74
Figura 27 – Modelo Provisório. Edifício projetado é muito superior ao modelo gerado. ....	75
Figura 28 – Modelo Geológico-Geotécnico Tridimensional, com edifício projetado (representado a cinzento).....	76

---

Figura 29 – Modelo Final.....	77
Figura 30 – Modelo Final. Desprovido da camada ZG4.....	77
Figura 31 – Modelo Final. Desprovido das camadas ZG4 e ZG3. ....	78
Figura 32 – Modelo Final. Modelo da distribuição da rocha granítica identificada nos <i>logs</i> de sondagem.....	78
Figura 33 – Modelo Final. Modelo da distribuição do nível freático. ....	79
Figura 34 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Sul.....	80
Figura 35 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Este.....	80
Figura 36 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Oeste. ....	81
Figura 37 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Norte. ....	81
Figura 38 – Planta de implantação dos furos de sondagens e identificação dos perfis geológico-geotécnicos interpretativos. ....	82
Figura 39 – Perfil geológico-geotécnico A-A' . ....	83
Figura 40 – Perfil geológico-geotécnico B-B'.....	83
Figura 41 – Perfil geológico-geotécnico C-C'.....	84
Figura 42 – Perfil geológico-geotécnico D-D'. Linha de cor azul marca o nível freático. ....	84
Figura 43 – Perfil geológico-geotécnico E-E'. Linha de cor azul marca o nível freático.....	85
Figura 44 – Perfil geológico-geotécnico F-F'. Linha de cor azul marca o nível freático. ....	85
Figura 45 – Perfil A-A' pelo método convencional. Linhas a cor vermelha, representam os limites entre zonas geotécnicas do respetivo perfil automático.....	87
Figura 46 – Perfil C-C' pelo método convencional. Linhas a cor vermelha, representam os limites entre zonas geotécnicas do respetivo perfil automático.....	87
Figura 47 – Modelo 3D escavado. Vista de planta. Fundo de escavação marcado pela presença das zonas geológico-geotécnicas, ZG1 à direita e ZG2 à esquerda. ....	93
Figura 48 – Modelo 3D escavado. Vista Norte. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara. ....	94
Figura 49 – Modelo 3D escavado. Vista Este. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara. ....	94
Figura 50 – Modelo 3D escavado. Vista Sul. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara. ....	95
Figura 51 – Modelo 3D escavado. Vista Noroeste. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara. ....	95
Figura 52 – Nível freático (Superfície Azul) é superior à cota de implantação do edifício proposto (Superfície Cinzenta). ....	97
Figura 53 – Nível freático (Superfície Azul) acima da cota de implantação do edifício projetado (Superfície Cinzenta). ....	97

---

(página propositadamente em branco)

---

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Propostas de expressões para o fator de correção da tensão efetiva de recobrimento, ensaio SPT, segundo Eurocódigo 7 (2010). .....	20
Tabela 2 – Descrição das propriedades que descrevem um maciço rochoso (ISRM, 1981; Sabatini et al., 2002).....	24
Tabela 3 – Comparação das capacidades técnicas dos vários <i>softwares</i> disponíveis no mercado. 39	
Tabela 4 – Enumeração e respetiva descrição dos grupos presentes no formato AGS, empregues na construção do modelo tridimensional proposto (AGS V4.1.1., 2022). .....	53
Tabela 5 – Cota e profundidade de reconhecimentos dos furos de sondagem. ....	60
Tabela 6 – Posição do nível freático.....	62
Tabela 7 – Classificação de solos arenosos quanto à sua compacidade, através da relação com o $N_{60}$ (Terzaghy & Peck, 1948).....	63
Tabela 8 – Correlação entre o resultado do SPT e o peso específico dos solos arenosos (Godoy, 1972; Cintra et al., 2003).....	63
Tabela 9 – Correlação entre o resultado do SPT e o ângulo de atrito interno (Meyerhof, 1956). ..	63
Tabela 10 – Classificação do espaçamento entre descontinuidades, em maciços rochosos ASTM (1988). .....	64
Tabela 11 – Classificação do índice RQD, proposta por Deere et al. (1966). .....	65
Tabela 12 – Proposta de zonamento geológico-geotécnico. ....	70
Tabela 13 – Volumes totais estimados de escavação, nas várias zonas geológico-geotécnicas. ....	96

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Índice de abreviaturas**

AGS – Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists

ASTM – American Society for Testing and Materials

CPT – Cone Penetration Test

DEG – Departamento de Engenharia Geotécnica

DP – Penetrómetro Dinâmico

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISRM – International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SPT – Standard Penetration Test

WSDT – Washington State Department of Transportation

WST – Weight Sounding Test

---

(página propositadamente em branco)



---

## **Capítulo I**

### **Introdução**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## **1. Introdução**

A presente dissertação de mestrado (formato projeto) enquadra-se no âmbito da unidade curricular Dissertação, do segundo ano do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Politécnico do Porto (P. Porto). A mesma tem o propósito de dar conclusão ao ciclo de estudos do corrente ano letivo 2022/2023 e de servir com objeto de obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

### **1.1. Enquadramento do tema**

Atualmente, o recurso a modelos tridimensionais do subsolo são uma base fundamental para a engenharia geotécnica. Os modelos geológico-geotécnicos tridimensionais são um passo essencial na otimização de custos e na limitação dos riscos associados, permitindo mais facilmente encontrar potenciais falhas ou fraquezas nas condições do terreno.

A modelação 3D das condições geológico-geotécnicas de um dado local, visa reconhecer os materiais geológicos e a suas respetivas propriedades físicas e mecânicas (Petrone et al., 2023), são, portanto, modelos que representam uma interpretação do subsolo. Com efeito, os dados recolhidos nas campanhas de prospeção e nos resultados laboratoriais devem ser tratados e registados, de forma, padronizada para que possam ser prontamente relacionados e inseridos nas bases de dados que suportam os modelos.

Os modelos gerados por este meio, permitem aos projetistas antecipar e prever potenciais impactos, que possam ocorrer no decurso da fase construtiva do projeto. Desta forma, os modelos tridimensionais permitem uma vista geral de todas as variantes intrínsecas ao local de estudo (Webber & Kijek, 2022), produzindo vantagens ao nível da:

- capacidade em visualizar todas a informação disponível para o local de estudo;
- aumentar a eficiência do projeto;
- melhor a capacidade de comunicação entre todos os intervenientes no projeto.

---

## 1.2. Objetivos

Numa primeira fase, com este trabalho de investigação, realizou-se um breve levantamento dos *softwares* de modelação 3D em maior utilização no mercado atual. Procedendo-se à justificação para o *software* escolhido. Foi, ainda, elaborado um fluxo de trabalho que visa ilustrar todos os passos necessários para a criação de modelos tridimensionais deste tipo.

Em seguida, deu-se destaque aquele que era o principal objetivo desta dissertação, a realização de uma avaliação da utilidade e facilidade na criação de modelos geológico-geotécnicos tridimensionais em projetos de engenharia civil e geotécnica. Para o efeito, após a definição da metodologia, um caso de estudo foi escolhido para a aplicação prática. Com isto, foi possível dar resposta aos seguintes pontos essenciais:

- acessibilidade na geração do modelo geológico-geotécnico tridimensional;
- capacidade do modelo gerado exprimir corretamente as características dos materiais geológicos locais;
- facilidade na incorporação de dados no modelo tridimensional;
- alterar e manipular o modelo criado;
- interpretar o modelo, do ponto de vista geológico-geotécnico;
- confrontar os resultados obtidos com os métodos convencionais.

## 1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos. Apresenta-se em seguida, de forma sucinta todos os capítulos, referindo os aspetos mais importantes de cada um deles:

### Capítulo I – Introdução

Este capítulo serve de justificativa às motivações da atual dissertação. Faz referência ao conceito do tema escolhido e aos objetivos que o compõem.

### Capítulo II - Avaliação geológico-geotécnica

Neste segundo capítulo tecem-se alguns conceitos básicos sobre a caracterização geológico-geotécnica. Desenvolve-se, ainda, um pouco sobre os vários tipos de prospeção geotécnica mais

---

correntes disponíveis, destacando-se a sua utilidade. Posto isto, elabora-se sucintamente relativamente aos procedimentos para o zonamento geológico-geotécnico.

### **Capítulo III - Modelação Geotécnica 3D**

Neste terceiro capítulo, começa por se abordar a importância da padronização de resultados. Seguindo o objetivo principal do mesmo, fazer-se um reconhecimento dos vários *softwares* disponíveis para a modelação tridimensional do subsolo. Procurando-se avaliar as suas potencialidades, a fim de encontrar aquele que servirá melhor o propósito da dissertação. Ainda neste capítulo, descrevem-se alguns exemplos da literatura consultada de casos em que este tipo de modelação tenha sido empregue em trabalhos de engenharia geotécnica.

### **Capítulo IV – Procedimento Desenvolvido**

Após a consulta da bibliografia disponível, neste quarto capítulo explicita-se aquelas que são as metodologias a serem empregue no caso prático. Aproveita-se o mesmo, para fazer uma breve descrição da metodologia proposta, tecendo-se algumas considerações que a justificam.

### **Capítulo V – Caso de Estudo**

Neste mesmo capítulo, será apresentado o caso de estudo selecionado para aplicação prática das metodologias de modelação tridimensional e respetiva comparação com os métodos convencionais 2D de caracterização geológico-geotécnica de terrenos. Pretende-se com este capítulo dar a conhecer o caso de estudo escolhido para a aplicação prática revelando-se as principais características e condicionantes deste.

### **Capítulo VI – Aplicação prática e resultados**

Este sexto capítulo inicia-se com o zonamento geológico-geotécnico definido para o local de estudo. Em seguida elabora-se sobre a aplicação prática do caso de estudo, dando a conhecer alguns dos resultados obtidos. Fazem-se as respetivas interpretações e comparações com as metodologias convencionais procurando deste modo responder aos objetivos da dissertação.

---

## **Capítulo VII – Considerações Finais e perspectivas futuras**

Neste último capítulo esboçam-se as conclusões e as respostas obtidas no decurso da pesquisa e aplicação prática da problemática. No final fazem-se algumas referências a possíveis desenvolvimentos futuros e aplicações deste tipo de metodologia.

---

## **Capítulo II**

### **Avaliação Geológico-Geotécnica: breve síntese**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## **2. Avaliação Geológico-Geotécnica: breve síntese**

As obras ou estruturas geotécnicas compreendem as construções ou partes destas, cuja sua concepção e dimensionamento são essencialmente controladas pelo comportamento mecânico, de deformabilidade e hidráulico dos maciços terrosos ou rochosos, onde estas se implantam (Matos Fernandes, 2015). Os projetos de engenharia civil induzem, nos maciços terrosos e rochosos, estados de tensão e de deformação capazes de alterar mais ou menos profundamente os estados de repouso destes maciços. Neste seguimento, os dimensionamentos das estruturas geotécnicas devem utilizar metodologias que garantam o cumprimento dos requisitos de estabilidade e funcionalidade das construções projetadas.

### **2.1. Caracterização Geotécnica**

A caracterização geotécnica de um local, onde está conjeturada a elaboração de um projeto de engenharia civil, é o primeiro passo para o correto dimensionamento da estrutura geotécnica a implantar. Esta caracterização insere-se na área de atuação da Geologia da Engenharia, prevendo a identificação da sequência de camadas ou estratos que compõem os terrenos, tanto em termos geológicos como geotécnicos (Matos Fernandes, 2015). A caracterização física, mecânica, de deformação e hidráulica dos solos, bem como as condições de água no terreno, são também propriedades que constituem a devida caracterização do local em estudo. A profundidade máxima de investigação é definida pelo tipo de estrutura a construir e pelo próprio maciço de implantação.

De acordo com o Eurocódigo 7: Parte 1 (2010), para cada projeto geotécnico deve verificar-se que nenhum estado limite é excedido, tal como se define na norma EN 1990:2002. Fatores como as condições de estabilidade do local, natureza e tamanho da estrutura, condições do subsolo, nível freático e sismicidade regional, devem ser considerados para a definição do contexto geotécnico. A avaliação dos estados limite é feita através de cálculos, modelos experimentais e/ou pelo método observacional. Em muitos casos é a experiência do Engenheiro responsável que ditará os estados limite que irão regular o dimensionamento geotécnico.

Segundo Sabatini et al. (2002) e o Manual de Projeto Geotécnico do Departamento de Transportes do Estado de Washington (WSDT, 2022) no desenvolvimento de um plano de prospeção deve ser tido em contas os seguintes itens:

- tipo de projeto (edificação, ponte, barragem, talude, etc.);

- 
- dimensão do projeto;
  - cargas impostas no solo de fundação;
  - tipos de cargas (estáticas ou dinâmicas);
  - período útil do projeto;
  - tolerâncias críticas;
  - topografia do local;
  - singularidades do solo;
  - datas-limite e orçamento;
  - definição das propriedades específicas ao projeto.

A caracterização geotécnica deve avaliar a capacidade de o terreno suportar a estrutura projetada, no que concerne à estabilidade global e às deformações e aos movimentos do mesmo. A caracterização precisa de ser detalhada na identificação das várias zonas de solo, rocha ou elementos construtivos, envolvidos no modelo de cálculo. Especificações quanto à inclinação dos estratos, existência de cavidades, natureza do ambiente (efeitos da corrosão, meteorização, congelação, variação do nível freático, *etc.*), sensibilidade da estrutura a deformações e efeito da mesma em estrutura já existentes deverão ser incluídas no projeto (Eurocódigo 7, 2010). O tempo de vida útil necessita, também, de ser tido em consideração.

Em concordância com o Eurocódigo 7 (2010), a caracterização geotécnica baseada no cálculo implica a consideração de:

- forças e deslocamentos impostos, devido ao movimento do terreno;
- propriedade dos solos e rochas;
- grandezas geométricas;
- valores limite das deformações.

Os modelos de cálculo devem descrever o comportamento do terreno para os estados limite. Caso o modelo não seja confiável para um dado estado limite, um outro precisa de ser avaliado, utilizando coeficientes que assegurem que a ultrapassagem do estado limite é altamente improvável. Em recurso, modelos experimentais e ensaios de carga deverão ser impostos. Os conhecimentos das condições do terreno são dependentes da qualidade das campanhas de

---

prospecção. A qualidade de execução destas campanhas, têm mais importância que a precisão dos modelos de cálculo.

### 2.1.1. Propriedades do Terreno

De acordo com o Eurocódigo 7 (2010), “As propriedades dos maciços de solo ou de rocha, quantificadas, para os cálculos de dimensionamento, através de parâmetros geotécnicos, devem ser obtidas de resultados de ensaios, seja diretamente seja recorrendo a correlações, a teorias ou a formulações empíricas, e de outros dados relevantes”.

Os resultados dos ensaios realizados necessitam de ser conscientemente interpretados pois as diferenças entre as propriedades do terreno e os respetivos parâmetros geotécnicos obtidos por ensaio são passíveis de ocorrer (Eurocódigo 7, 2010) em virtude de fatores como:

- muitos parâmetros não são constantes, pois dependem do nível de tensão e do modo de deformação;
- efeitos climatéricos;
- efeitos da percolação de água;
- fragilidade das rachas ensaiadas;
- qualidade da execução dos terrenos colocados artificialmente;
- da própria atividade construtiva.

Dos resultados dos ensaios executados, valores característicos dos parâmetros geotécnicos devem ser escolhidos e complementados por uma experiência bem estabelecida. A escolha do valor característico tem de constituir uma estimativa cuidada do valor que condiciona a ocorrência do estado limite considerado. A variabilidade dos valores medidos, a amplitude dos estudos de caracterização, o tipo e número de amostras, bem como, a capacidade da estrutura em transferir cargas para zonas desfavoráveis do terreno, são fatores fundamentais na escolha dos valores característicos.

### 2.1.2. Estados Limite

A ultrapassagem dos estados limite provoca perdas de equilíbrio da estrutura ou do próprio terreno, rotura excessiva da estrutura e dos elementos estruturais (sapatas, estacas e muros de

---

suporte entre outros) e a deformação do terreno, com influência na capacidade resistente do mesmo (Eurocódigo 7, 2010). A perda do equilíbrio da estrutura e/ou terreno, por levantamento global originário na pressão da água e o levantamento hidráulico, com consequências ao nível da erosão interna, são outros aspetos resultantes da superação dos estados limite.

### 2.1.3. Relatório de Projeto Geotécnico

Essencialmente, um relatório de projeto geotécnico deve registar as hipóteses, os dados, os métodos de cálculo e os resultados da verificação de segurança. O nível de pormenor de relatório varia em função da complexidade do projeto em análise. Segundo o Eurocódigo 7 (2010), este relatório deve incluir os seguintes elementos:

- descrição do local e da sua envolvente;
- descrição das condições do terreno;
- descrição da obra;
- valores de cálculo das propriedades do terreno e a respetiva justificação;
- indicação dos códigos e normas aplicados;
- considerações sobre a adequabilidade do local tendo em atenção a obra proposta e o nível dos riscos admissíveis;
- cálculos e peças desenhadas do projeto geotécnico;
- recomendações relativas ao projeto de fundações;
- nota sobre os aspetos a verificar durante a construção ou que requeiram manutenção ou observação.

Este mesmo relatório deverá, ainda, incluir um capítulo dedicado à caracterização geotécnica. Devendo consistir essa, segundo o próprio Eurocódigo 7 (2010) na:

- apresentação de toda a informação geotécnica disponível, incluindo aspetos geológicos e outros dados relevantes;
- avaliação, do ponto de vista geotécnico, da informação disponível com indicação das hipóteses adotadas na interpretação dos resultados dos ensaios.

---

## 2.2. Prospeção Geotécnica

O Eurocódigo 7 (2010) declara que “os estudos de caracterização geotécnica devem fornecer dados suficientes relativos ao terreno e à água do terreno, no local da obra e na sua vizinhança, para uma descrição correta das principais propriedades do terreno e para uma avaliação fiável dos valores característicos dos parâmetros do terreno a utilizar nos cálculos de projeto”. O Eurocódigo 7: Parte 2 (2010) esclarece quanto às quantidades e composições dos estudos geotécnicos a executar, que devem estes estar adequados à fase particular do estudo. É essencial o acompanhamento de todo o processo construtivo, com inspeções visuais periódicas, como forma de se confirmarem as hipóteses propostas.

De um modo geral, a prospeção geotécnica é precedida de um reconhecimento superficial preliminar no qual um levantamento geral das características do terreno é realizado. Esta primeira recolha de informação é auxiliada pela consulta antecipada peças escritas e desenhadas, de cartas topográficas e geológicas e, quando disponíveis, cartas geotécnicas (Matos Fernandes, 2015). A pesquisa por trabalhos de geotecnia realizados nas imediações do local em estudo, são também uma enorme fonte de conhecimento para o desenrolar da campanha de prospeção. O Eurocódigo 7 (2010) destina, também, esta fase preliminar à:

- avaliação do terreno ao projeto;
- comparação com locais alternativos;
- estimar o impacte da obra;
- planear a campanha de prospeção geológico-geotécnica.

Um estudo de caracterização de terreno para o dimensionamento de um projeto geotécnico tem, obrigatoriamente, de assegurar que este abrange todas as formações, de natureza geológica, intersetadas, prestando particular atenção aos seguintes aspetos (Eurocódigo 7, 2010):

- perfil do terreno;
- cavidades naturais ou devidas à ação humana;
- degradação de rochas, solos ou materiais de aterro;
- efeitos hidrogeológicos;
- falhas, as diaclases e outras discontinuidades;
- maciços de solo ou rocha sujeitos a fenómenos de fluência;

- 
- solos e as rochas expansíveis ou colapsáveis;
  - presença de resíduos ou de materiais manufaturados.

Na execução de uma campanha de prospeção geológico-geotécnica, previamente à interpretação de resultados dos ensaios, deve, de forma clara, identificar-se a natureza e a constituição básica dos terrenos em análise. Dever-se-á começar por uma caracterização geológica do local, examinando o material presente, descrevendo-o de acordo com a nomenclatura reconhecida (Eurocódigo 7, 2010). Por sua vez, as rochas têm de ser classificadas em função da qualidade do material sólido e do diaclasamento. O Eurocódigo 7: Parte 2 (2010) faz uma enumeração de diversos ensaios de classificação, de identificação e de avaliação quantitativa dos solos e rochas, como:

Solos:

- granulometria;
- peso volúmico;
- porosidade;
- teor em água;
- forma dos grãos;
- rugosidade superficial dos grãos;
- índice de compacidade;
- limites de consistência;
- expansibilidade;
- teor de carbonatos;
- teor de matéria orgânica;

rochas:

- mineralogia;
- petrografia;
- teor de água;

- 
- peso volúmico;
  - porosidade;
  - velocidade de propagação do som;
  - absorção rápida de água;
  - expansibilidade;
  - índice de desgaste;
  - resistência à compressão simples.

A prospeção geotécnica divide-se, na sua generalidade, em duas partes: prospeção geofísica e; prospeção mecânica. Nos subcapítulos seguintes tecem-se algumas considerações sobre estas duas componentes da prospeção geotécnica.

#### 2.2.1. Prospeção Geofísica

A prospeção geofísica tem a sua mais-valia em grandes áreas de estudo, como são exemplo os projetos de construção de uma barragem e as obras lineares (obras viárias). Este tipo de prospeção precede, na maioria dos casos, a prospeção mecânica, como recurso à redução de custos. Assim a prospeção geofísica, possibilita um mais rápido reconhecimento de toda a área de estudo permitindo identificar as principais características do terreno que, posteriormente, poderão ser detalhadas como o recurso a métodos mecânicos.

Os principais exemplos de prospeção geofísica são: os métodos sísmicos, em que são induzidas ondas elásticas no terreno; e os métodos eletromagnéticos, em que se induz no terreno corrente elétrica ou ondas eletromagnéticas (dependendo se se trata de um ensaio de resistividade elétrica ou de georadar). Todos estes métodos podem ter diversas aplicações, sendo vulgarmente utilizados para identificar e dimensionar camadas/estratos, avaliar a espessura de alteração de um maciço rochoso, estimar a profundidade do firme, identificação de eventuais acidentes tectónicos (falhas), localizar cavidades no subsolo, etc. (Matos Fernandes, 2015).

Os resultados provenientes de toda a campanha de prospeção e o tratamento da globalidade da informação deverá ser reunida e analisada, de acordo com o Eurocódigo 7, na forma de um relatório que será a base da fase de estudo prévio ou de viabilidade da obra.

---

### 2.2.2. Prospeção Mecânica

A prospeção mecânica é muitas vezes utilizada em obras relativamente concentradas, como a construção de edifícios e pontes. É ainda, usualmente empregue como auxílio à prospeção geofísica, permitindo corroborar os dados por esta previamente obtidos. A prospeção mecânica, quando em maciços terrosos, compreende: à execução de poços e valas; sondagens de furação e; sondagens de penetração (Matos Fernandes, 2015).

A execução de poços e valas são um método de prospeção que apresenta vantagens ao nível da inspeção dos terrenos atravessados e maior facilidade em recolher amostras, tanto remexidas como indeformadas, para posterior análise em laboratório. De acordo com Folque (1987), é ainda possível através desta técnica realizarem-se estudos de escorregamento e localizar o firme sob uma camada mais branda. Este meio de prospeção é limitado pelas condições do terreno no que diz respeito à resistência dos materiais que o compõe e à presença de nível freático. O equipamento utilizado na escavação constitui também limitação a esta técnica.

As sondagens de furação dividem-se, essencialmente, em três tipos: i) à percussão; II) à rotação e; III) à rotopercussão. As sondagens de furação à percussão são empregues em todos os tipos de solos e rochas brandas, baseando-se numa técnica de desagregação por fadiga, em que a ação de desagregação é conseguida por meio de impactos sucessivos. As sondagens de furação à rotação permitem também a utilização deste método em terrenos muito resistentes, com solos muito duros e maciços rochosos competentes. Estas sondagens baseiam-se no atrito provocado por uma ferramenta abrasiva, que corta a superfície a furar por desgaste. Por fim, as sondagens de furação por rotopercussão consistem numa combinação das duas técnicas anteriores. Durante qualquer etapa da furação é possível parar o processo para a recolha de amostras ou para a execução de ensaios *in situ*, tal como o Ensaio SPT (*Standard Penetration Test*).

As sondagens de penetração distinguem-se das anteriores por atravessarem o terreno sem a extração de solo. Não permitem, desta maneira, a recolha de amostras para análise. Este meio de prospeção consiste numa vara metálica dotada de ponta cónica que penetra no solo por meio de percussão ou de forma contínua, por força da ação de macacos hidráulicos. Esta técnica estuda a resistência do solo à penetração da ponteira cónica, estando limitada pela dureza do solo. Nesta classe é comum observar-se a realização de ensaios *in situ* para a avaliação da resistência do solo em profundidade, tais como o CPT (*Cone Penetration Test*) e o DP (Penetrómetro Dinâmico).

---

Os ensaios supracitados são aqueles que dominam o mercado atual, pela sua versatilidade e fácil utilização, produzindo vastos e confiáveis resultados. Contudo, existem muitos outros ensaios, também eles, capazes de alcançar caracterizações geotécnicas competentes, tais como:

- ensaio de corte rotativo;
- ensaio WST (*Weight Sounding Test*);
- ensaio pressiométrico;
- ensaio com dilatômetro plano;
- ensaios de compactação.

### **2.3. Zonamento Geotécnico**

A construção de um modelo do solo é umas das mais importantes tarefas da geologia e geotecnia. A qualidade e detalhe do modelo será crucial para as decisões a tomar nas fases de projeto e construção de determinada infraestrutura. O zonamento permite uma análise quantitativa da interação entre o solo e a estrutura a construir que possibilitará chegar-se a soluções estruturais e a métodos de construção mais eficazes e otimizados ao local (Pavlovic, 2006).

Segundo Povlovic (2006), o zonamento geotécnico é um processo iterativo e complexo derivado de um conjunto de atividades. O modelo geotécnico evolui no tempo com as sucessivas campanhas de prospeção. Começa como um modelo simples composto por informação superficial e termina como um modelo pormenorizado da área de interesse.

A execução de um modelo do solo prevê a divisão em pequenas porções de toda a área de interesse. Cada uma destas zonas deve apenas incluir massas de rocha e solo que sejam estatisticamente homogêneas, considerando-se uma determinada propriedade (Pavlovic, 2006). O critério para o zonamento geotécnico tem de permitir determinar as condições predominantes em cada umas das zonas identificadas como homogêneas.

A escolha do parâmetro ou conjunto de parâmetros que melhor caracterizam uma determinada área de estudo é um processo complexo. As características e os objetivos da obra em propósito, irão ter influência direta nesta escolha. Também a experiência do projetista pode ser considerada como fator fundamental para a seleção das propriedades em causa. O número de parâmetros selecionados deverá ser suficiente para descrever o solo, estando em número ótimo para que não crie um modelo complexo, carregado de informação, tornando-se assim difícil a sua interpretação.

---

As propriedades a utilizar para o zonamento geotécnico devem ser baseadas nos resultados obtidos pela prospeção, usando para o efeito os resultados dos ensaios de campo e de laboratório, em separado ou em combinação. O Engenheiro Geotécnico é responsável pela designação das propriedades críticas ao zonamento, socorrendo-se da sua experiência e informações disponíveis (WSDT, 2022).

A título de exemplo, na construção de uma barragem, é de elevada importância a utilização de parâmetros que permitam classificar os materiais constituintes do solo, com base na permeabilidade. Por outro lado, em obras de contenção de terrenos é relevante distinguir as zonas com diferentes deformabilidades. Nas obras de escavação e desmonte, importa avaliar as características de resistência do terreno.

De acordo com o Manual de Projeto Geotécnico do Departamento de Transportes do Estado de Washington (WSDT, 2022) a avaliação e respetiva seleção dos parâmetros geotécnicos para um determinado projeto resultam, em muito, na identificação das camadas geológicas do local. As camadas geológicas são compostas por materiais de génese semelhante, com históricos de pressão e perturbação idênticos. Estas apresentam ainda uma densidade continua e igual comportamento hidrogeológico. Os autores do referido Manual, sublinham a importância de reunir toda a informação existente do local em estudo, tanto dos ensaios de campo e laboratório, como todo o conhecimento pré-existente do local, bem como de locais adjacentes. Estes dados podem assim ser devidamente comparados e interpretados para a determinação mais eficaz dos parâmetros geotécnicos que melhor descrevem o local e mais corretamente se ajustam às necessidades da infraestrutura a executar.

O plano de prospeção deve ser elaborado em acordo com os objetivos do estudo e com as obrigações recomendadas pelo Eurocódigo 7. Desta forma, para a obtenção do zonamento geotécnico devem seguir-se quatro etapas (Pavlovic, 2006):

- análise da informação disponível;
- zonamento preliminar;
- seleção dos parâmetros e critérios específicos;
- zonamento final;
- validação e verificação.

---

Esta última etapa é de elevada importância uma vez que permitirá adaptar o zonamento proposto às condições reais encontradas no decorrer do projeto. Com efeito, o modelo do solo resultante estará em constante atualização, pode assim considerar-se um modelo ativo.

### 2.3.1. Métodos para Determinar as Propriedades do Solo e das Rochas

A determinação das propriedades dos solos e rochas é conseguida por dois processos distintos, sendo estes a realização de ensaios *in-situ* durante a campanha de prospeção e os ensaios de laboratório de amostras recolhidas.

Os ensaios laboratoriais são essenciais às investigações geotécnicas. Estes permitem a utilização de procedimentos repetíveis capazes de refinar e validar os ensaios de campo realizados, e ainda de entender o comportamento do solo e das rochas sobre determinadas condições impostas (WSDT, 2022). A complexidade dos ensaios laboratoriais é inerente às dificuldades do projeto, devendo ser selecionados os ensaios que preconizem as informações necessárias da forma mais económica possível. Os ensaios devem ser os mais representativos das várias unidades geológicas locais, como das áreas críticas. Entendem-se por áreas críticas os locais onde os resultados laboratoriais podem trazer mudanças significativas ao projeto.

### 2.3.2. Propriedades do Solo

Como referido anteriormente, os dois ensaios *in-situ* mais utilizados para avaliação das propriedades do solo, são o SPT (*Standard Penetration Test*) e o CPT (*Cone Penetration Test*). O número de pancadas do ensaio SPT ( $N_{SPT}$ ), devido a discrepâncias no equipamento utilizado, bem como à experiência do operador, deverá ser corrigido para que possa corretamente ser utilizado na deliberação das propriedades dos solos. Somente em 1988 foi publicado um documento a estabelecer os procedimentos de referência para os ensaios SPT – “*Standard Penetration Test: International Reference Test Procedure*” (Decourt *et. al.* (1988)).

Vários são os fatores corretivos a aplicar aos ensaios SPT, sendo que o primeiro está relacionado com a energia de cravação ( $ERr/60$ ), que relaciona a eficiência do martelo, em percentagem, com um valor padrão de 60%. Esta relação é depois multiplicada pelo valor de  $N_{SPT}$ , obtendo-se um valor corrigido designado por  $N_{60}$ . Os restantes fatores corretivos estão relacionados com o comprimento das varas, diâmetro do furo e, por fim, o efeito da tensão efetiva em profundidade. Este último deve apenas ser considerado para solos arenosos. Quando em uso, o ensaio passa a ser designado por  $(N_1)_{60}$ . O Eurocódigo 7 (2010) tece algumas propostas de expressões para o

fator de correção da tensão efetiva de recobrimento ( $C_N$ ), baseando-se na compacidade relativa ( $I_D$ ) da areia (Tabela 1).

Tabela 1 – Propostas de expressões para o fator de correção da tensão efetiva de recobrimento, ensaio SPT, segundo Eurocódigo 7 (2010).

Tipo de areia	Compacidade relativa - $I_D$ (%)	$C_N$
Normalmente consolidadas	40 a 60	$2/(1+\sigma'_v)$
	60 a 80	$3/(2+\sigma'_v)$
Sobreconsolidadas		$1,7/(0,7+\sigma'_v)$
<b>NOTAS:</b>	$\sigma'_v$ em kPa * $10^{-2}$ , assim para uma tensão efetiva de recobrimento de 100 kPa tem-se $\sigma'_v=1$ e $C_N=1$ . Não são recomendáveis valores de $C_N$ superiores a 2.	

Deste modo, a correção dos valores de  $N_{SPT}$  é dada pela seguinte expressão:

$$(N1)60 = \frac{ERr}{60} * N * \lambda 1 * \lambda 2 * CN \quad (1)$$

Onde:  $\lambda 1$  e  $\lambda 2$  são os fatores corretivos do comprimento das varas e do diâmetro do furo, respetivamente. Estes valores podem ser consultados na publicação de 1986 de A. W. Skempton (*“Standard Penetration Test Procedures and the Effect in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation”*).

### 2.3.3. Propriedades das Rochas

As propriedades das rochas correspondem ao maciço rochoso como um todo, dando especial atenção às descontinuidades nesta presentes. As propriedades das rochas, no seu estado intacto, são determinadas com a realização ensaios laboratoriais por meio da análise de provetes de rocha ou afloramentos. Com estes ensaios é possível classificar as rochas com base na sua capacidade de carga, resistência à compressão, resistência ao corte, etc.

De acordo com o Eurocódigo 7 (2010), “Na avaliação da qualidade e das propriedades das rochas e dos maciços rochosos deve ser feita uma distinção entre o comportamento do material rochoso, tal como é medido em amostras intactas obtidas com sonda de rotação, e o comportamento de maciços rochosos a uma escala muito maior, que inclui superfícies de descontinuidade

---

estruturais, tais como planos de estratificação, diáclases, zonas de rotura por corte e cavidades produzidas por dissolução.”

A descrição do maciço rochoso está dependente do acesso ao local, da existência de afloramentos e do tipo de estrutura a construir (Sabatini et al., 2002). As propriedades do maciço rocho são determinadas com base numa inspeção visual e descrição das descontinuidades socorrendo-se por o efeito da metodologia proposta pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981). Esta metodologia, e outras metodologias descritas na ASTM D5878, permitem avaliar o maciço rochoso de forma quantitativa e qualitativa.

Para melhor entender a metodologia ISRM (1981), uma série de tabelas e figuras foram desenvolvidas com o objetivo de fornecer uma definição padronizada dos termos empregues. Na Figura 1, ilustra-se um maciço rochoso onde se identificam treze propriedades capazes de a descrever detalhadamente. Na Figura 2, identificam-se estas mesmas propriedades divididas em cinco diferentes categorias. Na Tabela 2, apresenta-se uma breve descrição das propriedades propostas. Na avaliação das propriedades das rochas, podem, ainda, ser considerados outros aspetos como, o estado de tensão *in-situ*, pressão na água, variações das propriedades entre diferentes estratos (Eurocódigo 7, 2010).

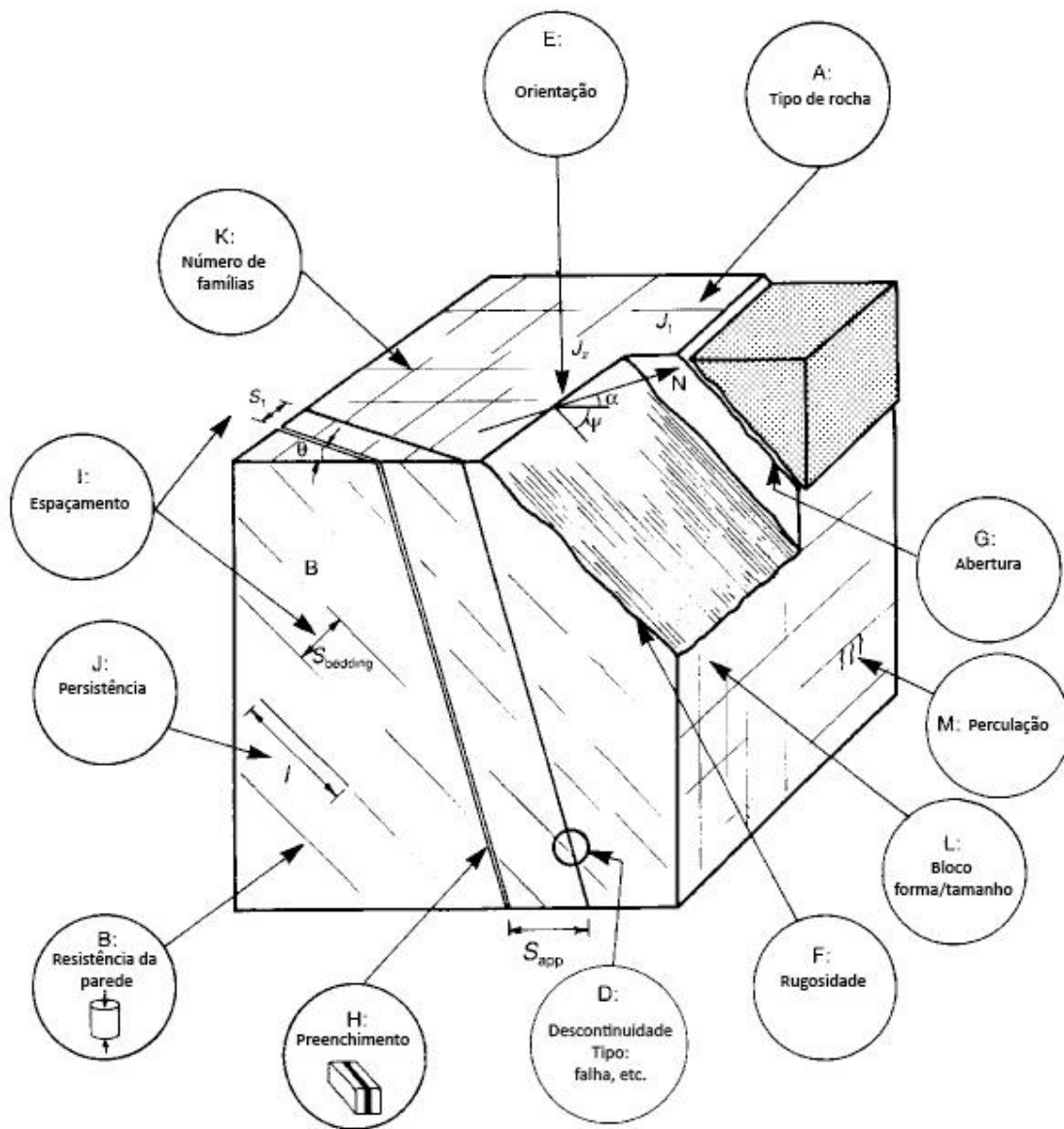


Figura 1 – Propriedades de um maciço rochoso (Wyllie, 1999).

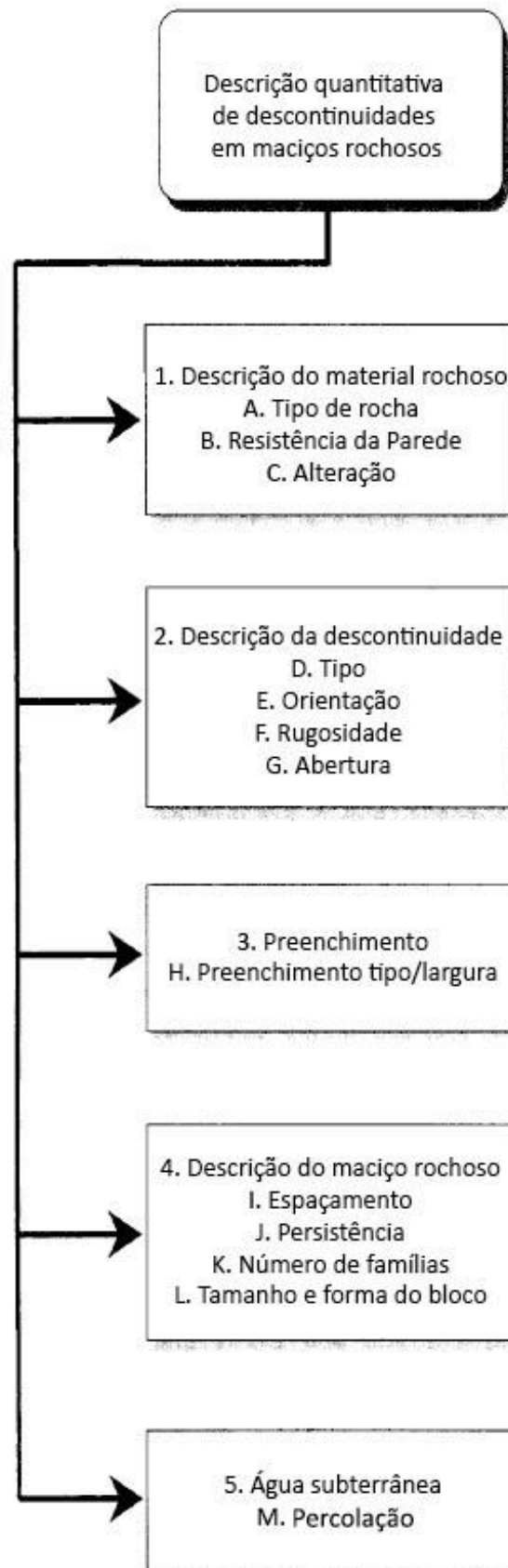


Figura 2 – Categorias que caracterizam um maciço rochoso (Wyllie, 1999).

Tabela 2 – Descrição das propriedades que descrevem um maciço rochoso (ISRM, 1981; Sabatini et al., 2002).

Símbolo	Termo	Descrição
A	Tipo de Litologia	Origem da rocha (ígneia, metamórfica ou sedimentar), textura, tamanho do grão (de bloco a partículas de silte).
B	Resistência da parede	A resistência à compressão das descontinuidades da rocha irá ter influência direta na resistência ao corte e à deformabilidade.
C	Alteração	A redução da resistência da rocha devido à alteração reduzirá a resistência ao corte das descontinuidades, bem como reduzirá a resistência ao corte do maciço rochoso devido à resistência reduzida da rocha intacta.
D	Tipo de descontinuidade	O tipo de descontinuidade inclui falhas, foliação, clivagem, xistosidade e camadas.
E	Orientação da descontinuidade	A descrição da orientação das descontinuidades é dada pela direção e mergulho da superfície.
F	Rugosidade	A rugosidade deve ser medida no campo, em superfícies expostas com comprimentos de pelo menos 2 metros.
G	Abertura	A abertura corresponde à distância perpendicular entre as paredes de uma determinada descontinuidade.
H	Tipo de preenchimento	O tipo de preenchimento corresponde à descrição e identificação do material que se encontra a encher as descontinuidades.
I	Espaçamento	Espaçamento entre descontinuidades.
J	Persistência	Mede a continuidade de uma dada descontinuidade.
K	Número de famílias	Número de famílias que se intersectam irá influenciar a forma como o bloco rochoso se deforma.
L	Tamanho e forma do bloco	Mede o tamanho e descreve a forma do bloco rochoso em estudo.
M	Percolação	Observação da escorrência de água nas descontinuidades.

#### 2.3.4. Confiabilidade e Variabilidade

A seleção dos parâmetros para um determinado zonamento geotécnico deverá ser realizada com base num estudo de confiabilidade e variabilidade dos dados. Existe sempre a necessidade de certificar que os resultados obtidos nos diversos ensaios efetuados transmitem as características intrínsecas aos terrenos em estudo, permitindo reconhecer todas as nuances e singularidades do mesmo. Qualquer inconsistência nos dados obtidos deverá ser identificada, determinado as possíveis causas e avaliando uma possível mitigação quando estas não se apresentem como naturais da área, minimizando assim o seu efeito nos resultados. Sabatini et al., (2002) aprimorou um conjunto de etapas a executar na avaliação das informações obtidas em campo:

1. Validação – determinar a precisão dos resultados de laboratório de ensaios de campo;
2. Comparação histórica – comparar os resultados com registos históricos de estudos anteriores, tanto no próprio local em estudo como nas envolvências;
3. Comparação desempenho – avaliar os resultados obtidos tendo por comparação os valores históricos expectáveis para as estruturas locais e para os maciços similares;

- 
4. Calibração de correlações – desenvolver correlações para o local em estudo avaliando se estas correlações se enquadram nos valores típicos das correlações históricas propostas para a várias propriedades em análise;
  5. Influência da complexidade dos ensaios – nesta última etapa pretende-se perceber se eventuais anomalias são resultado da complexidade dos ensaios empregues. Avalia-se a possibilidade de estes não terem sido executados nas melhores condições ou do equipamento não estar corretamente calibrado.

O escrutínio dos resultados, com base nestas cinco etapas, irá permitir inferir a confiabilidade dos dados obtidos. Quando na presença de valores inválidos ou questionáveis, estes deverão ser descartados das conclusões finais. Dos resultados válidos garante-se que as propriedades apresentam variabilidade vertical e/ou horizontal admissível (WSDT, 2022).

A influência e a quantidade de variabilidade de determinada propriedade numa unidade geológica são também de importante avaliação. Sabatini et al., (2002) enumera três técnicas que permitem isto mesmo:

1. Experiência – resulta da experiência acumulada do engenheiro geotécnico, que o torna capaz de identificar um valor típico ou o valor mais adequado para determinado parâmetro;
2. Estatística – esta técnica pode ser utilizada quando na região existam trabalhos em número suficiente para que possam ser tratados estatisticamente. A variabilidade é desta forma obtida matematicamente;
3. Estabelecer o melhor e o pior caso – consiste em estabelecer limites para os melhores e piores cenários possíveis para a propriedade em análise (esta é também uma técnica que depende muito da experiência do engenheiro geotécnico).

#### 2.3.5. Seleção das Propriedades Geotécnicas

Com os estudos de variabilidade e avaliação do grau de confiabilidade dos dados obtidos nos diversos trabalhos propostos pelo plano de prospeção é possível passar-se à seleção final das propriedades que melhor caracterizam os terrenos em estudo. A maioria dos casos estudados obriga a que a escolha final das propriedades, a usar no zonamento geotécnico, seja realizada com base na experiência do projetista. A vasta proveniência de informação, de diferentes fontes,

---

como os ensaios em laboratório, ensaios de campo e dados de registos históricos, inviabiliza geralmente a utilização fiável de métodos estatísticos.

Segundo o Manual de Projeto Geotécnico do Departamento de Transportes do Estado de Washington (WSDT, 2022) o zonamento, e os valores dos parâmetros geotécnicos neste contidos, devem sempre primar pela relação custo-benefício e pela construtibilidade do projeto. Por vezes, zonamentos demasiado conservativos inviabilizam a construção projetada, obrigando a gastos excessivos na criação das condições ideais.

Sabatini et al., (2002), defendem a escolha final das propriedades a partir de três possíveis técnicas:

1. Processo semi-determinístico – em que o engenheiro faz estimativas com base na sua vasta experiência do local;
2. Processo estatístico e analítico – para além da experiência é também uma seleção baseada nas análises estatísticas da variabilidade das propriedades;
3. Processo de análise probabilística – esta é uma técnica referida por Duncan (2000) que estima probabilisticamente a possibilidade de baixo desempenho do terreno realizando cálculos de desempenho com os valores máximos e mínimos de cada uma das propriedades.

Estes autores acreditam que a utilização de qualquer uma destas técnicas é conveniente para determinadas condições concretas. De um modo geral, estes defendem que valores estatísticos devem ser minimamente utilizados servindo apenas como complemento à experiência do Engenheiro Geotécnico.

---

## **Capítulo III**

### **Modelação Geotécnica 3D**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

### 3. Modelação Geotécnica 3D

O recurso à modelação a três dimensões (3D) geotécnica de terrenos permite diversas aplicações aos projetos de construção. Habitualmente, para garantir a funcionalidade dos mesmos, os projetos têm de ser adaptados às características geotécnicas locais. A utilização destes modelos em fases iniciais do projeto permite alcançar uma maior otimização da construção, diminuindo o risco e os custos. Desta forma, os modelos geotécnicos 3D podem ser empregues nos cálculos de dimensionamento de estruturas geotécnicas, ou outras deles diretamente dependentes, podem também servir de base para o planeamento de produção, cálculos de volumes e custos (Azaronak, 2015).

O processamento de uma modelação 3D do terreno, de uma forma genérica, está dependente de um conjunto de etapas a executar (Figura 3), que visam a metodologia da recolha de dados e o tratamento destes dados. A forma como estas etapas são executadas influenciarão diretamente o resultado do Modelo 3D.

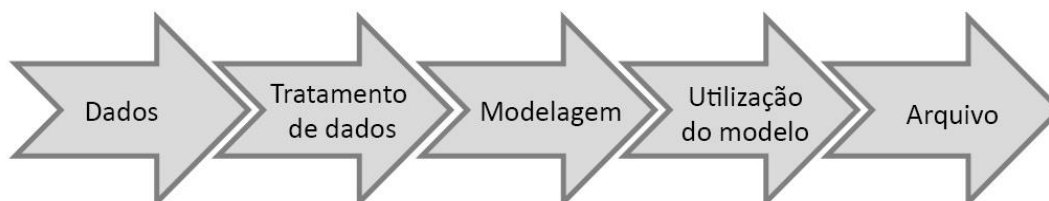


Figura 3 – Etapas no tratamento e processamento de dados na construção de um Modelo 3D (adaptado de Azaronak, 2015).

A recolha de dados está sujeita às características do projeto e à sua empregabilidade na área de estudo. Como referido no capítulo anterior, as propriedades em objetivo de estudo são muito diversificadas, podendo ser obtidas por diferentes metodologias e equipamentos. Segue-se a etapa de tratamento de dados. É nesta fase que os valores obtidos na campanha de prospeção da etapa anterior são convertidos em parâmetros geotécnicos que, posteriormente, serão utilizados na modelação das camadas do Modelo 3D e em cálculos de condições geotécnicas. Todos os resultados obtidos devem ser reunidos em bases de dados, existindo diversas atualmente disponíveis, promovendo com isto uma mais fácil integração dos mesmo na fase seguinte de modelação. Como

---

forma de evitar erros e conflitos de informação, os resultados devem ainda ser armazenados de forma padronizada.

Bases de dados como a *OpenGround Cloud* (Bentley Systems), *RSLog* (Rocscience Inc.), *RockWorks – Borehole Manager* (RockWare, Inc.), *etc.*, permitem uma continuada integração de dados possibilitando que estas possam depois ser exportados em formato AGS.

Após as etapas de recolha e tratamento de dados, pode iniciar-se a modelação geotécnica do terreno. Para o efeito, as sondagens deverão ter associadas as coordenadas (latitude (X) e longitude (Y)), bem como a respetiva cota (Z), do local onde foram executadas. As várias camadas de terreno identificadas numa determinada sondagem serão definidas com base na cota.

Os modelos criados podem ter várias utilizações possíveis, permitindo responder às mais diversas questões do projeto. Um Modelo 3D deverá ser um elemento ativo, capaz de incorporar novas informações e dados, mantendo-se em constante atualização. Este quer-se ainda versátil podendo-se a qualquer momento alterar o modo de representação, alterando os parâmetros em apresentação, permitindo uma resposta útil a todas as situações do projeto.

Os modelos criados, como forma de manterem a sua utilidade, deverão ser guardados em arquivos capazes de serem consultados e reutilizados em projetos futuros. A interoperabilidade é dos aspetos mais importantes neste tipo de modelos. Este conceito refere-se à capacidade de um sistema comunicar de forma transparente com um outro sistema independente, permitindo-lhe utilizar essa informação (Robson, 2004). Significando isto, que os modelos podem ser facilmente reproduzidos e alterados por diferentes *softwares*, permitindo uma troca de informação mais eficiente, sem perdas e ao alcance de todos os intervenientes, independentemente dos recursos em utilização.

### **3.1. Padronização dos Resultados**

Os grandes projetos de construção utilizam as informações geotécnicas, no sentido de garantir o melhor uso destas, fazendo a sua implementação nas plataformas BIM. Para tal a padronização dos resultados é dos aspetos mais importantes na construção de modelos geotécnicos a três dimensões pois permite melhor e harmonizar a forma como os dados geotécnicos são incorporados nos projetos (Sibaii et. al., 2020).

---

Em projetos de pequena dimensão é viável a criação de uma padronização própria, no sentido em que o volume e a origem das informações será reduzida. Sibaii et. al. (2020) apresentou no 3º Congresso Português de *Building Information Modelling* um trabalho no qual propõe uma “*Product Data Templates*” (PDT) como ficha para armazenamento de dados de sondagens em formato *Excel* tornando-a acessível a todas as partes. Estes autores dividiram esta ficha de sondagem em cinco categorias distintas. A primeira categoria identifica o projeto, a localização da sondagem e as condições em que esta foi efetuada. A segunda e terceira categorias dizem respeito à descrição das camadas geológicas intersetadas. A quarta categoria apresenta a classificação dos resultados, bem como os ensaios de laboratório. Por fim, na quinta categoria enumera-se os resultados dos ensaios *in situ*.

Projetos como o da construção do Túnel de Silvertown, em Londres, comportam um volume de dados muito superiores aos últimos. Nestes a pormenorização do modelo geotécnico é fundamental do ponto de vista económico e de risco associado. É, então, elevado o interesse na agregação de todas as informações geotécnicas possíveis, sendo que estas proveem muitas vezes de diferentes fontes e de níveis históricos diversos. São várias as ferramentas computacionais que permitem a criação de uma base de dados, contudo, no que concerne à padronização de informação a AGS (*Association of Geotechnical & Geoenvironmental Specialists*) tem vindo, desde 1992, a desenvolver um formato de ficheiro de texto, de extensão “.ags”, que permite de forma viável a transferência eletrónica de dados geotécnicos entre organizações. Na sua página de internet a AGS (<https://www.ags.org.uk/data-format/>) defende que “O formato de dados AGS permite partilhar continuamente informações entre diferentes *softwares* usados na indústria da geotecnia/geoambiental”.

A transferência eletrónica de dados, por meio de um formato padronizado, tem trazido às organizações uma diminuição no tempo de tratamento de informação, no custo da operação e, ainda, na eventualidade de se cometerem erros durante todo o processo (AGS V4.1.1., 2022). Para além disto, esta permite uma constante atualização da informação sendo facilmente incorporados dados de diferentes origens e contexto histórico. Descrições detalhadas das camadas geológicas intersetadas, dos resultados de ensaios *in situ*, das análises laboratoriais e dos valores de monitorização podem ser facilmente partilhados e tratados em diferentes *softwares*.

### **3.2. Ferramentas Comerciais**

Com a explosão tecnológica novas ferramentas CAD (*Computer-Aided Design* – Desenho Assistido por Computador), nos últimos anos, tem sido observado um crescendo nos produtos dedicados à

---

modelação 3D. Atualmente, o mercado é dominado pela Autodesk Inc. e pela Bentley systems, incorporated. Apresentam-se em seguida alguns dos principais *softwares* no mercado para utilização na modelação tridimensional de projetos geotécnicos.

### 3.2.1. Autodesk Civil 3D

O Civil 3D é um *software* desenvolvido pela Autodesk Inc., com suporte BIM e recursos integrados que visam melhorar a documentação de desenhos, projetos e de construção (Figura 4). É um produto dedicado à Engenharia Civil com suporte ao projeto de edifícios, estradas, linhas ferroviárias, etc. (Civil 3D, 2023).

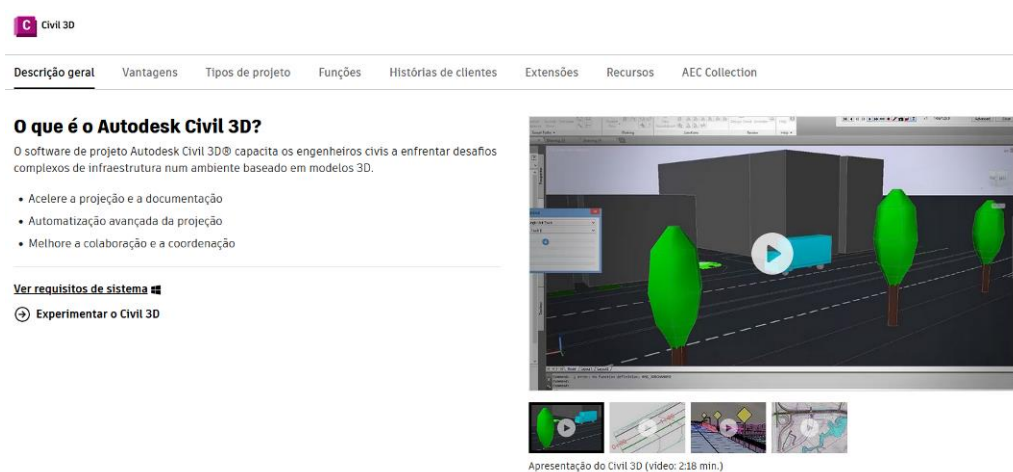


Figura 4 – Ficha de apresentação do *software* Autodesk Civil 3D (Fonte: <https://www.autodesk.pt/products/civil-3d>).

Este *software* pretende agilizar a colaboração entre equipas multidisciplinares, prometendo reduzir o número de erros na partilha de dados, respeitando as normas e mantendo a precisão. É assim possível para todos os intervenientes trabalhar nas mesmas bases do modelo de terreno, podendo cada um fazer as suas alterações sem danificar a integridade do modelo.

O Civil 3D apresenta de raiz diversos recursos, contudo, este permite a incorporação de extensão para trabalhos específicos, como se trata do *Geotechnical Modeler* (Keynetix). Esta extensão permite visualizar e analisar informação geotécnica diretamente no ambiente do Civil 3D. O *Geotechnical Modeler* apresenta ferramentas para gerar facilmente modelos de camadas, criar visualizações de dados geotécnicos em perfil e transpor as informações para uma vista tridimensional. O fluxo de trabalho é idêntico ao do Civil 3D, pois esta extensão usa os mesmos objetos e estilos. A maior versatilidade desta extensão é a sua capacidade para integrar diretamente dados em formato padrão AGS (Help Civil 3D, 2023). Na Figura 5 apresenta-se um

---

modelo tridimensional gerado com o Geotechnical Modeler. O modelo é criado a partir de um conjunto de sondagens em profundidade, em que a informação que estas representam são as mais variadas. Desta forma, podem gerar-se modelos litológicos, modelos que representem a distribuição de um dado parâmetro geotécnico ou, então, modelos capazes de reproduzir todas as características do terreno, através de um zonamento geológico-geotécnico.

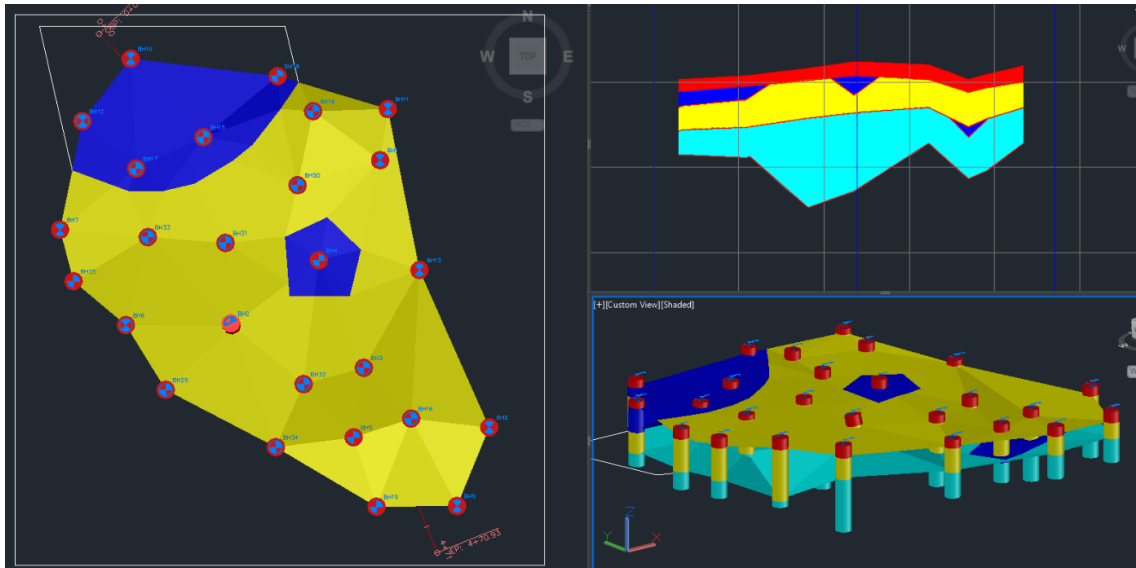


Figura 5 – Modelo tridimensional gerado pela extensão Geotechnical Modeler do Autodesk Civil 3D (Morin, 2015).

### 3.2.2. Bentley MicroStation

O MicroStation é um *software* em tudo semelhante ao Civil 3D, desenvolvido pela concorrente Bentley systems (Figura 6). Este produto permite a criação de desenhos georreferenciados 2D e 3D, possuindo ferramentas de modelação que facilitam o fluxo de trabalho. O regime de interoperabilidade do MicroStation permite uma fácil incorporação de informação de diferentes origens sem necessitar de conversões de formato (MicroStation CONNECT Edition, 2022).

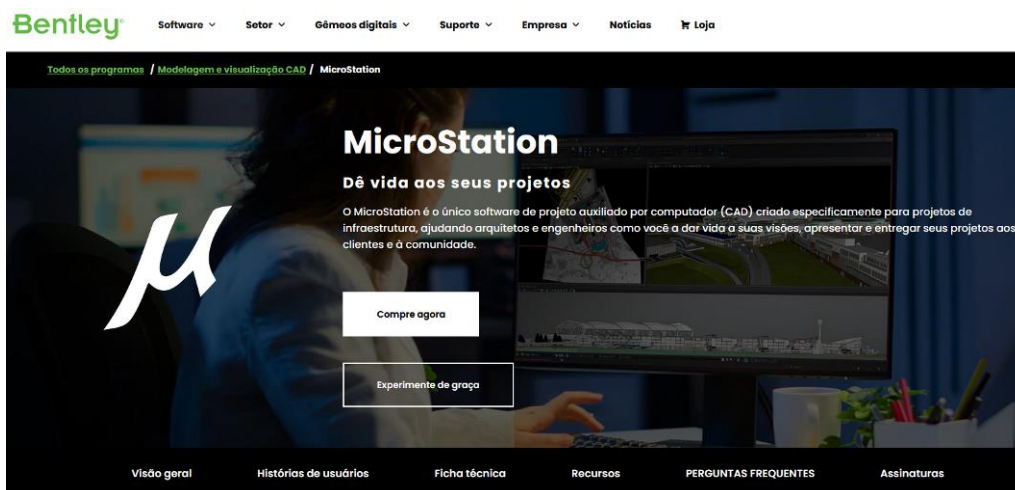


Figura 6 – Ficha de apresentação do *software* MicroStation (Fonte: <https://bentley.com/software/microstation/>).

### 3.2.3. Bentley OpenGround

O *OpenGround* é um software também desenvolvido pela Bentley systems especificamente para projetos de Engenharia Geotécnica (Figura 7). Este software promete ser o mais capaz do mercado no arquivo, processamento de dados do projeto e gestão do fluxo de trabalho, permitindo ainda, produzir detalhados boletins de sondagem, relatórios e rigorosas interpretações. A extensão do *OpenGround* para o Civil 3D possibilita que os seus dados de arquivo e interpretações sejam facilmente incluídos no processamento BIM e em desenhos CAD. Este é o software que veio substituir o antigo HoleBASE SI muitas vezes descrito na bibliografia da especialidade. Na Figura 8 ilustra-se um modelo geológico-geotécnico gerado pelo referido *software*.

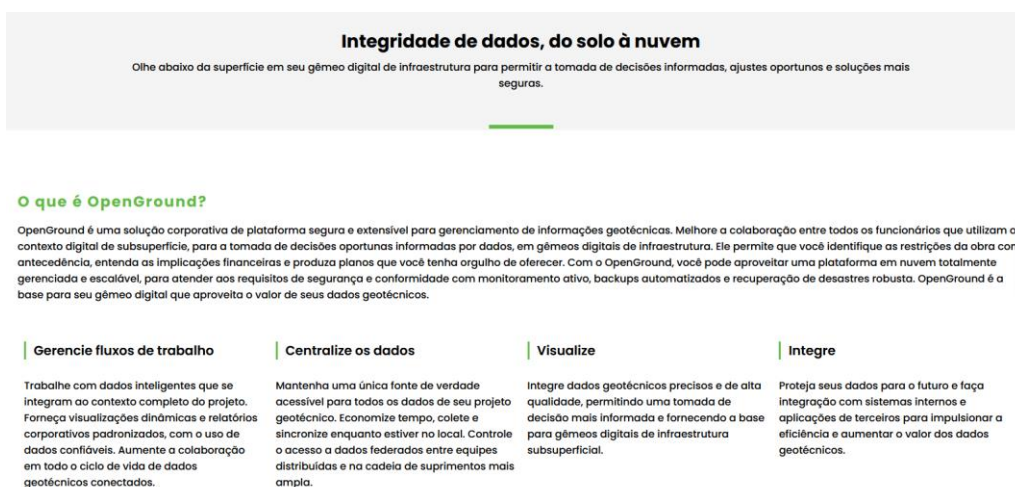


Figura 7 – Ficha de apresentação do *software* OpenGround (Fonte: <https://bentley.com/software/openground/>).

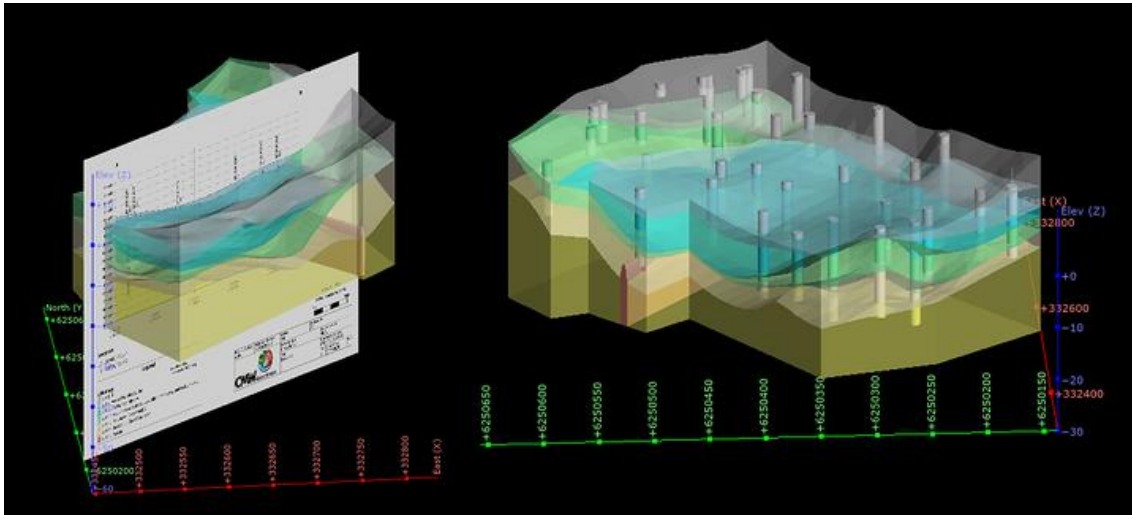


Figura 8 – Modelo tridimensional gerado pelo *software* OpenGround (Chandler, 2022).

#### 3.2.4. Seequent Leapfrog Geo

O Leapfrog Geo, desenvolvido por Seequent, The Bentley Subsurface Company, é um *software* de interpretação dados geológicos com capacidade de modelação tridimensional (Figura 9). Em semelhança com os *softwares* anteriormente apresentados, este permite igualmente o tratamento de grandes volumes de dados, possibilitando uma constante atualização do modelo. À medida que se adicionam dados ao projeto, estes são inseridos diretamente no modelo tridimensional de acordo com as regras e parâmetros definidos previamente.

## Invista tempo em geologia e não em dados

A modelagem geológica do Leapfrog foi desenvolvida por geólogos e para geólogos.

Fluxos de trabalho intuitivos, processamento rápido de dados e ferramentas de visualização reúnem equipes e permitem discussões que orientam decisões.

### Economia de tempo para dedicar-se à interpretação

Crie e refine modelos geológicos com ferramentas fáceis de usar. Inclua grandes conjuntos de dados e crie modelos com rapidez a partir desses dados e sem a necessidade de wireframing, que é um processo lento. Visualize rapidamente seus dados geológicos em 3D e obtenha insights visuais para orientar suas interpretações.

À medida que você adiciona novos dados a um modelo, as regras e os parâmetros já definidos são aplicados automaticamente. Faça uma alteração em um modelo e todos os modelos dependentes são atualizados instantaneamente; isso mantém os modelos sempre atualizados.

A análise de dados é rápida e intuitiva se você usar os recursos do Leapfrog Geo, como a análise exploratória de dados, a função de distância, a modelagem estrutural, a modelagem de veios e as ferramentas de interpolação por indicador.

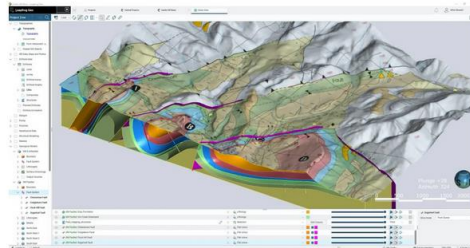


Figura 9 – Ficha de apresentação do *software* OpenGround (Fonte: <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/>).

Embora este produto seja sobretudo direcionado para o tratamento e interpretação de dados geológicos é possível a sua utilização em projetos de Engenharia Geotécnica de pequeno a médio tamanho. Este foi o software eleito por Webber & Kijek (2022) nos seus trabalhos que pretendiam demonstrar a importância dos Modelos Geotécnicos Tridimensionais em trabalhos geotécnicos. Os casos de estudo pertenciam à Região de Victoria, Austrália, tendo os autores conseguido com estes modelos expandir o conhecimento das condições geotécnicas e hidrogeológicas dos locais, bem como, identificar potenciais riscos geológicos associados. Os casos de estudo aplicados a locais com deslizamentos de terras e à exploração mineira, comprovam assim a grande polivalência deste tipo de modelos com aplicação a diferentes tipos de projetos. A Figura 10 trata um dos modelos elaborados por estes autores. Em A) observa-se o modelo geológico tridimensional gerado, já em B) é apresentada uma interpretação 2D do anterior.

A)

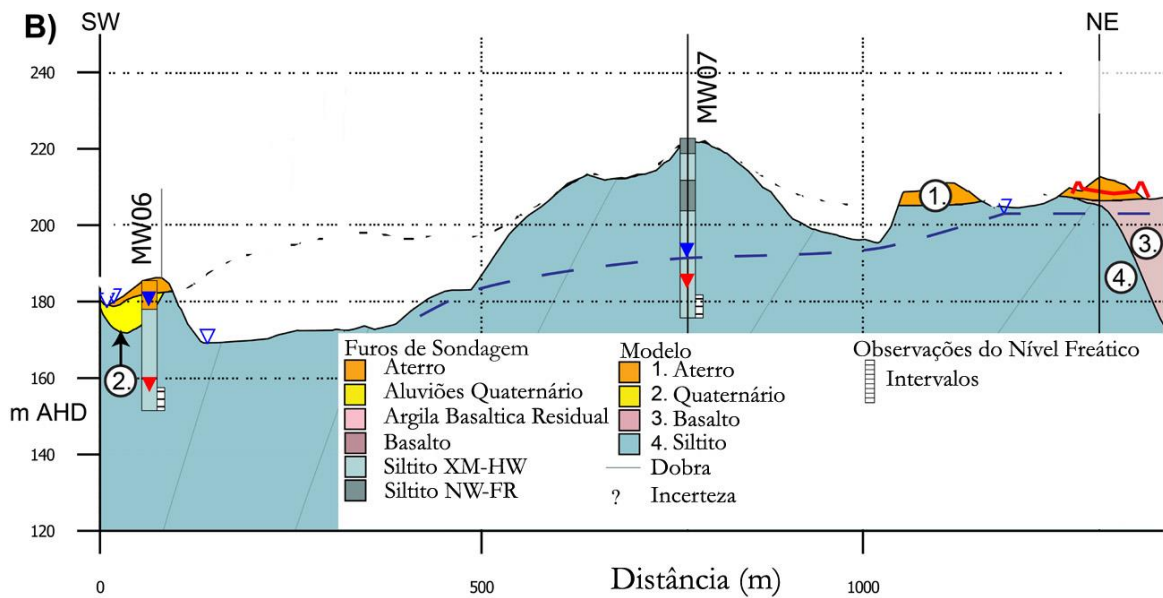
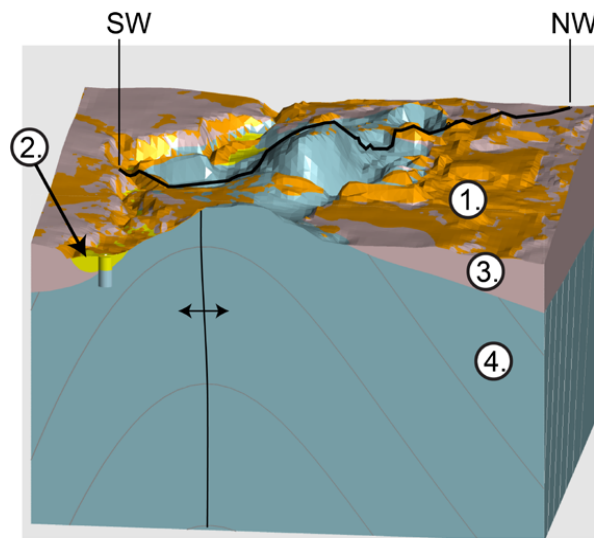


Figura 10 – Modelo geológico 3D por Webber & Kijek (2022). A) Modelo Tridimensional. B) Interpretação do Modelo gerado.

### 3.2.5. Projetos Geotécnicos por SIG

As aplicações SIG (Sistemas de Informação Geográfica) têm surgido com grande potencialidade para a utilização em meio geotécnico. Aplicações como o ArcGIS Pro, desenvolvido pela Esri, permite a visualização de dados, análise avançada e a manutenção de dados, em 2D e 3D (Esri-Portugal, 2023). Esta ferramenta apresenta uma série de funcionalidades que permitem trabalhar de melhor forma os dados e parâmetros geotécnicos. A sua versão *open source*, o QGIS, permite ainda que estas possam ser alteradas e criadas a fim do objetivo final. A grande desvantagem

destas aplicações prende-se com a complexidade do fluxo de trabalho, obrigando, em alguns casos, a um conhecimento aprofundado em computação.

O RockWorks, desenvolvido pela RockWare, é um outro *software* que utiliza o recurso a ferramentas SIG. Esta aplicação foi inicialmente concebida para a indústria petrolífera, contudo, facilmente se perceberam capacidades ao nível da indústria ambiental, geotécnica e mineira (RockWare, 2015). A funcionalidade *Borehole Manager* (Gestor de Sondagens) permite criar internamente uma base de dados com as informações obtidas no decorrer da campanha de prospeção. Esta pode também ser importada a partir de ficheiros padronizados, como é exemplo o formato AGS. A Figura 11 ilustra um modelo exemplificativo da potencialidade do *software* em processar as informações provenientes das campanhas de prospeção.

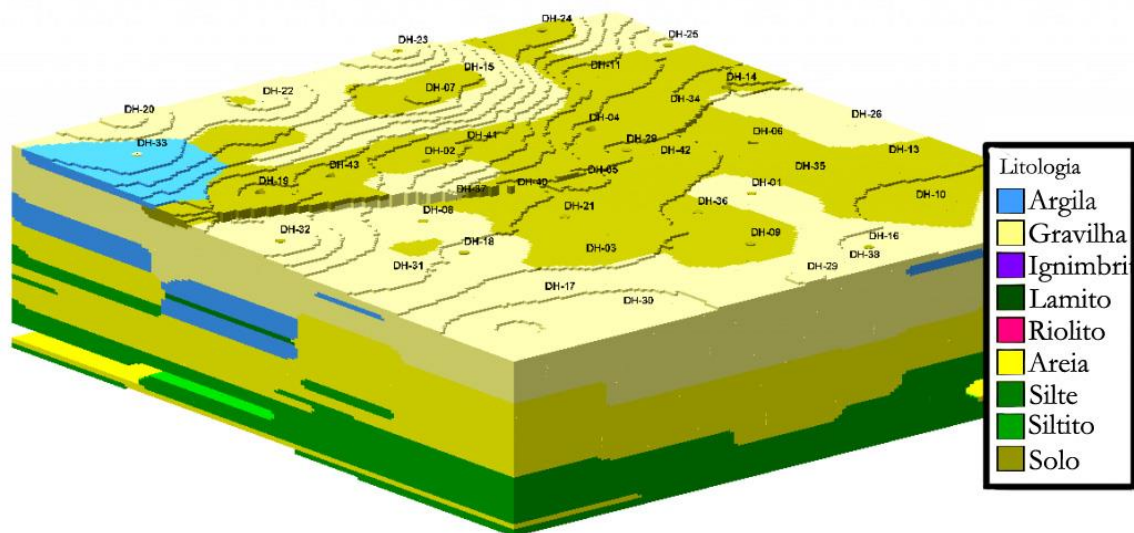


Figura 11 - Modelo geológico gerado pelo RockWorks (RockWare, 2015).

Na Tabela 3 apresenta-se um conjunto de características técnicas dos vários *softwares* supracitados. Importa realçar que o valor anual definido para o Autodesk Civil 3D, é referente a um conjunto de várias aplicações incluídas numa só licença, pelo que o seu valor unitário é impossível de se calcular, mas seria certamente inferior a qualquer outro dos *software* enumerados.

Tabela 3 – Comparação das capacidades técnicas dos vários *softwares* disponíveis no mercado.

	Civil 3D	MicroStation	OpenGround	LeapFrog Geo	RockWorks
Formatos de dados padronizados	Suporta formato .ags	Não permite	Suporta formato .ags	Suporta formato .ags	Suporta formato .ags
Modelação 3D	TIN-triangulation	TIN-triangulation	-	-	Vários algoritmos
Conectividade com base de dados	Possível com recurso a extensões pagas (HoleBASE)	Possível	Possível	Possível	Possível, com a licença avançada
Extensões	Geotechnical Modeler (gratuito)	Não requer	Não requer	Não requer	Não requer
Preço (€/ano)	3207	2702	1569	1900	2720

### 3.3. Aplicações de Estudo

Ao longo dos últimos anos são vários os trabalhos realizados no campo da Modelação Geológico-Geotécnica Tridimensional. Através do *British Geological Survey* diversos modelos geológicos 3D foram publicados (Lelliott et al., 2006, 2009; Robins et al., 2008; Royse et al., 2009). Um modelo multicamadas tridimensional foi desenvolvido pelo The General Inspectorate of Quarries of France, de toda a cidade de Paris (Thierry et al., 2009). Modelos geológicos foram construídos, no sudoeste da Alemanha, para reconhecimento de volumes exploráveis de minerais em depósitos do Quaternário (Kostic et al., 2007). Apenas mais recentemente, a Engenharia da Geologia tem feito uso deste tipo de modelos, recorrendo a dados de sondagens geotécnicas e geofísicas e socorrendo-se de *softwares* como o Leapfrog (Rose et al., 2018; Whiteman 2021). O aumento da capacidade computacional, permitindo a incorporação de um maior número de dados geológico-geotécnicos nos modelos, tornando-os mais precisos e detalhados, facilitando a avaliação de potenciais riscos e incertezas dos projetos. Foi este avanço tecnológico que permitiu a Culshaw (2005) passar de um modelo conceptual a um modelo realístico, através da combinação das propriedades físicas e geotécnicas com as respetivas informações espaciais.

---

De acordo com Baynes et al. (2020), o problema da incerteza destes modelos poderá ser ultrapassado mediante uma mistura interligada de modelos conceituais e dados observados, em que quanto maior for a percentagem de dados observados maior será a precisão do modelo. A precisão estará, ainda, dependente da estrutura dos dados que determinarão o algoritmo de modelação e a visualização (Wang, 2021).

Apresentam-se em seguida três caso de estudo.

### 3.3.1. Plataforma Logística de Nola (Itália)

Petrone et al. (2023) desenvolveram o presente caso de estudo numa tentativa de demonstrar a importância dos Modelos Geotécnicos 3D na projeção de edifícios e infraestruturas, especialmente em regiões de grande complexidade geológica. Para o efeito, os autores, restringiram as suas investigações a um setor da Planície de Nola (Região de Campania, sul de Itália), que no final da década de 70, do século XX, havia sido identificada como local para construção de várias plataformas logísticas e comerciais. Em resultado, grandes e detalhadas campanhas de prospeção geológico-geotécnicas foram realizadas neste local compondo atualmente uma vasta base de dados estratigráficos e geotécnicos.

O enquadramento geológico-estrutural local é uma consequência dos mecanismos genéticos da Planície de Campania, controlada pelas fortes interações vulcânicas, tectónicas e sedimentares ocorridas no Quaternário (e.g., Ippolito et al., 1973; Ortolani e Aprile 1985; Romano et al., 1994; Brancaccio et al., 1995; Aprile et al., 2004), resultando em depósitos piroclásticos-aluviais de grande complexidade geométrica.

A base de dados utilizada na construção dos modelos tridimensionais era composta por:

- 41 testemunhos de sondagem;
- 107 ensaios SPT;
- 93 ensaios CPT;
- 73 resultados laboratoriais de amostras de solos não perturbados.

Os modelos foram concebidos por meio do *software* RockWorks. O modelo litológico foi elaborado a partir dos dados das litologias observadas nas sondagens executadas. Os resultados dos ensaios geotécnicos laboratoriais permitiram estimar os parâmetros de compressibilidade, utilizados na computação dos modelos geotécnicos. Aos resultados dos ensaios SPT e CPT equivalentes para o solo investigado, várias fórmulas empíricas, reconhecidas pela literatura científica, foram empregues a fim de estimar os parâmetros geotécnicos característicos em estudo.

---

A escolha do algoritmo para a interpolação dos dados baseou-se no tipo de modelo pretendido. Assim o modelo litológico foi concebido com recurso ao algoritmo *Lithobleding*, disponibilizado pela RockWare, Inc., dedicado à extrapolação de dados litológicos. Este algoritmo baseia-se na metodologia Geoespacial do vizinho mais próximo. Os modelos geotécnicos foram concebidos por meio do algoritmo de Inverso da Distância, tendo este apresentado resultados mais razoáveis quando em comparação com outros conhecidos algoritmos, como a Triangulação e Krogagem.

Para além do modelo litológico, cinco outros geotécnicos foram concebidos. Um procedimento estatístico foi aplicado no sentido de definir os valores representativos dos cinco parâmetros em estudo: Resistência de Ponta (CPT); Resistência Lateral (CPT); Módulo Elástico; Módulo de Deformação; e Coeficiente de Compressibilidade. A abordagem centrou-se numa análise de frequências, em que os resultados eram representados pelo percentil de valores de 25%, 50% e 75%.

A interpretação conjunta dos modelos permitiu aos autores definirem três Unidades Geotécnicas. A Unidade Geotécnica do Tipo A é caracterizada por siltes pouco comprimidos, enquanto na Unidade do Tipo B, os siltes já se apresentam bastante comprimidos e consolidados. A Unidade Geotécnica do Tipo C consiste em tufos de grão fino, caracterizados por valores elevados de resistência de ponta e do módulo de elasticidade. A partir desta interpretação os modelos foram reconstruídos (Figura 12).

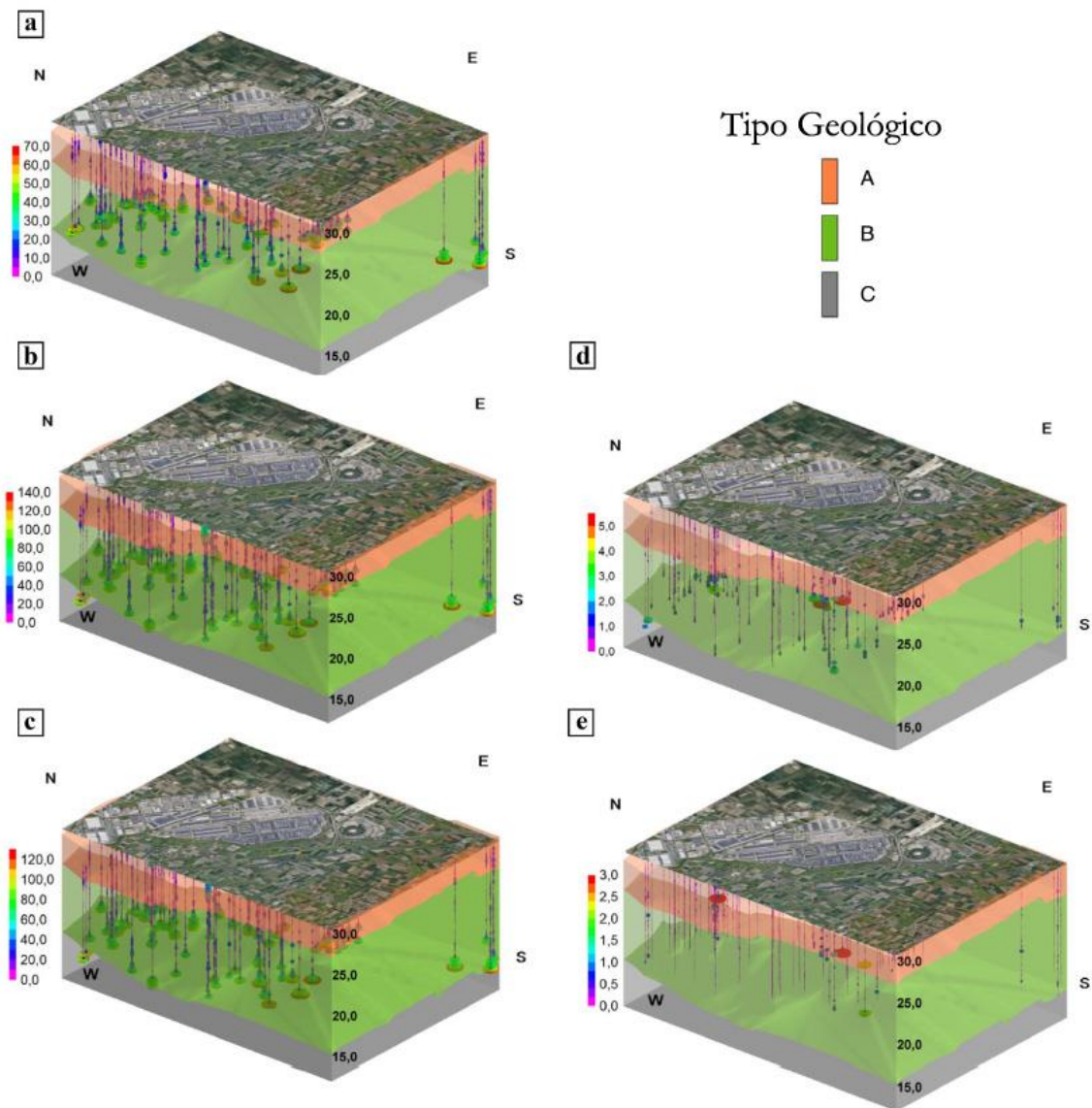


Figura 12 – Modelos Geotécnicos combinados com a Resistência de Ponta (a); Módulo Elástico (b); Módulo de Deformação (c); Resistência Lateral (d); (e) Coeficiente de Compressibilidade (Petrone et al., 2023).

### 3.3.2. Ara Damansara, Petaling Jaya, Malásia

Chia et al. (2021) com a presente publicação procuram implementar um ambiente BIM ao subsolo, numa tentativa de reduzir as incertezas associadas ao estudo das condições geotécnicas. O local de estudo selecionado pelos autores insere-se na parte Oeste de Ara Damansara, Petaling Jaya, Malásia. Do ponto de vista geológico o local é caracterizado por rochas ígneas do Jurássico, podendo conter granitos como rocha-mãe e alguns granodioritos subjacentes à camada de solo. Após a campanha de prospeção, os dados das camadas litológicas identificadas, bem como as suas espessuras e coordenadas, foram extraídas dos seis *logs* de sondagem disponíveis e guardadas em formato de extensão “.CSV”. Um total de doze tipos de solo foram reconhecidos,

---

sendo que o dominante se trata de um solo areno-siltoso localizado na parte Este do local de estudo.

O Autodesk Civil 3D com recurso às extensões HoleBASE SI (Keynetix) e *Geotechnical Module* (Keynetix) foi a aplicação utilizada no desenvolvimento dos modelos 3D do subsolo. A extensão HoleBASE SI permite que o Civil 3D se conecte a uma base de dados externa locada *online*, por sua vez a *Geotechnical Module* obriga a que a base de dados esteja criada no próprio computador. A partir da informação disponível quatro modelos foram elaborados (Figura 13). O primeiro resulta unicamente dos dados geológicos (Figura 13 - A), o segundo apresenta uma generalização dos dados (Figura 13 - B) útil para a gestão de incertezas e projeção de estruturas geotécnicas. O terceiro modelo resulta da interpretação dos resultados dos ensaios SPT (Figura 13 - C), em que valores superiores a 50 pancadas foram considerados como materiais compactos, não solo. Por fim, o quarto modelo demonstra a distribuição espacial do nível freático (Figura 13 - D).

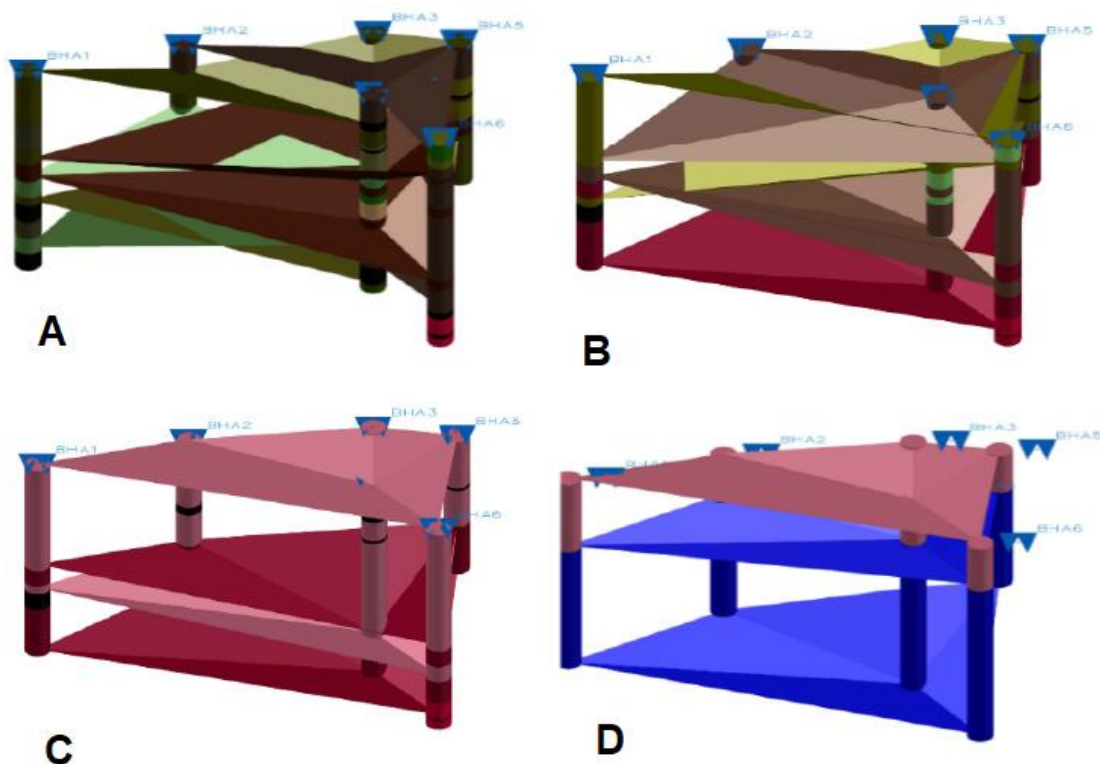


Figura 13 – Modelos 3D criados por Chia et al., 2021. A – Geologia; B – Dados Generalizados; C – Camadas de Solo e Camadas Compactas; D – Nível Freático.

Os autores consideram que o fluxo de trabalho utilizado facilitou a elaboração dos modelos. Consideram, ainda, que estes modelos melhoram a partilha de informações e contribuem para o

---

manuseamento dos dados. Contudo, a análise dos modelos pode, por vezes, ser um pouco complexa tornando-se demorada. Identificar limites entre camadas sobrepostas dificulta o processo de análise, justificando-se a grande importância da experiência e conhecimento local do Engenheiro Geotécnico. A falta de padronização dos dados revelou-se igualmente um problema para os autores.

### 3.3.3. Túnel de Silvertown, Londres (Reino Unido)

O Túnel de Silvertown, cuja construção iniciou-se em março de 2021, estando a sua conclusão planeada para o ano de 2025. Trata-se uma passagem rodoviária inferior ao Rio Tamisa, na parte ocidental da cidade de Londres (Reino Unido). Devido às grandes condicionantes do projeto, este é um dos maiores exemplos dos recursos à modelação 3D de terrenos. Nas duas margens do Rio, próximo da implantação do túnel, existem fundações indiretas para as colunas de sustentação do teleférico local – Emirates Air Line. Na margem Norte, existem as antigas docas Royal Victoria, onde permanecem muitas das fundações de edifícios agora demolidos. Por sua vez, a margem Sul encontra-se ainda com resquícios de poluição apesar dos esforços recentes para a sua eliminação. Para além destas condicionantes, o túnel irá atravessar ainda zonas altamente industrializadas com as mais variadas condições do solo. Por todas estas razões, a empresa responsável pelo projeto – Atkins, decidiu que, para reduzir o custo da obra e para minimizar o risco, a melhor solução seria visualizar e entender as condições do subsolo, seria recorrer a uma projeção 3D das informações disponíveis (Morin et al., 2017).

Os Engenheiros Geotécnicos responsáveis pelo projeto sabiam da existência de mapas históricos locais e de informações digitais de trabalhos geotécnicos mais recentes. Desde já há alguns anos que a Atkins faz uma gestão dos dados geotécnicos das suas obras, procurando utilizar métodos e processos padrão. O uso de dados padronizados permitiu recolher informações de projetos anteriores na área de estudo que puderam ser utilizados em conjunto com outros dados de empresas concorrentes em formato AGS. A gestão de informações foi conseguida por meio da base de dados HoleBASE SI. A utilização do mesmo sistema de coordenadas foi sempre uma grande preocupação para a combinação de dados.

Após reunir toda a informação disponível, esta foi combinada com o modelo tridimensional das condições do subsolo obtendo-se o Modelo Geotécnico 3D pretendido. A equipa responsável pela modelação tridimensional criou, também, diversos modelos das estruturas existentes e futuras, para posterior apresentação conjunta com o modelo geotécnico 3D elaborado. Todos estes modelos foram realizados com recurso ao *software* Autodesk Civil 3D (Figura 14). Como já mencionado anteriormente, este *software* permite trabalhar dados diretamente da base de dados

HoleBASE SI. O modelo criado ajudou a visualizar e avaliar projeto, identificando potenciais obstruções à construção e a determinar as investigações adicionais necessárias.



Figura 14 – Modelo Geotécnico 3D do Túnel de Silvertown, Londres (Fonte: Transport of London).

### 3.4. Escolha do *software* para o desenvolvimento do trabalho

A consulta *online* de vários *softwares* vocacionados para a modelação tridimensional do subsolo, permitiu fazer uma comparação entre as várias características técnicas dos mesmos permitindo-se, assim, avaliar aquele que traria melhores resultados tendo em vista os objetivos do presente trabalho. Na Tabela 3 apresentou-se essa comparação de características. As importantes capacidades para o presente trabalho seriam o suporte de formatos padronizados e a facilidade de criar modelos tridimensionais.

A análise comparativa entre as várias ferramentas apresentadas (Tabela 3) revela, que o MicroStation e o Civil 3D são em tudo semelhantes, com a única diferença de o primeiro não suportar formatos padronizados do tipo AGS, o que poderá complicar os objetivos do estudo. O OpenGround e o LeapFrog Geo são *softwares* muito idênticos, quase em completo dedicados à modelação geológica tridimensional. O RockWorks é uma aplicação muito versátil, com diversos

---

algoritmos de modelação 3D. Qualquer um destes três últimos *softwares* seriam uma excelente escolha para o desenvolvimento do trabalho.

Contudo, a escolha do *software* recaiu sobre o Autodesk Civil 3D. Este é um *software* bastante versátil, com muitas outras funcionalidades para além das aqui necessárias. Por esta grande versatilidade, que o capacitam para atuar em áreas multidisciplinares, é frequente encontrar, o Civil 3D, em gabinetes de projeto e de estudos geotécnicos. Esta polivalência justifica o seu preço acrescido em relação às restantes aplicações apresentadas. O recurso a extensões dedicadas, como a Geotechnical Modeler, permite facilmente importar dados geológico-geotécnicos e criar modelos tridimensionais do terreno, como o ilustrado na Figura 5. Comparando com os modelos produzidos por outros *softwares* inteiramente dedicados à modelação 3D de terrenos geológicos, Figura 8, Figura 10 e Figura 11, este é um pouco mais retilíneo, sem grande suavidade. Contudo, aparenta grande capacidade na definição das fronteiras geológico-geotécnicas e na produção de perfis bidimensionais. Existem outras extensões disponíveis na *App Store* da Autodesk, que servem o mesmo propósito, porém estas carecem de um pagamento adicional, pelo que se optou por continuar a investigação com esta de livre acesso e, por conseguinte, mais económica.

---

## **Capítulo IV**

### **Procedimento Desenvolvido**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 4. Procedimento Desenvolvido

No desenvolvimento deste capítulo pretende-se dar a conhecer aquelas que foram as metodologias de trabalho aplicadas, procurando-se fundamentar devidamente todas as escolhas efetuadas.

### 4.1. Metodologia de Modelação 3D

Em resultado da pesquisa bibliográfica e fruto de uma exaustiva experimentação prática de diversos procedimentos, concluiu-se, que para a utilização do *software* Autodesk Civil 3D, com recurso à extensão *Geotechnical Modeler*, nos moldes definidos pelos objetivos do presente estudo, o fluxo de trabalho que melhor resultado produz é o que se apresenta na Figura 15. Em seguida enumera-se as várias etapas, procedendo-se a uma breve descrição e justificação das mesmas.



Figura 15 – Fluxo de trabalho adotado para Modelação 3D de caracterização geológico-geotécnica.

---

## 4.2. Detalhe do Procedimento

### 1ª etapa

O primeiro passo para a elaboração de um modelo geológico-geotécnico tridimensional, começa na elaboração de um zonamento geológico-geotécnico capaz de expressar corretamente todas as características do terreno identificadas na campanha de prospeção, bem como, de todos os ensaios realizados. Este deve, também, ter em conta os parâmetros geotécnicos a avaliar em função do tipo de projeto a ser executado.

O zonamento, na metodologia para este estudo desenvolvida, será a componente que atribuirá ao modelo todos os dados disponíveis com a capacidade de fazer salientar aqueles que mais importam para o projeto.

### 2ª Etapa

Na segunda etapa da metodologia, é objetivo a transcrição do zonamento elaborado para uma base de dados, quer seja através da criação de uma nova ou adaptação de uma base de dados pré-existente.

Como já mencionado em capítulos anteriores, a padronização dos resultados é um dos aspetos mais importantes na construção deste tipo de modelos. O recurso ao formato AGS, possibilitou, no presente estudo, uma melhor transcrição dos dados para um formato digital. O ficheiro “.ags”, posteriormente utilizado na criação do modelo tridimensional, foi gerado respeitando todas as regras definidas na publicação da AGS do documento *“Electronic Transfer of Geotechnical Data Edition 4.1.1”*, em março de 2022. A validação final do ficheiro foi conseguida com a utilização do validador (AGS4-validator-beta-v0\_1\_1), disponibilizado pela AGS. Este permite detetar eventuais erros na produção do ficheiro, nas versões 4.0.3, 4.0.4 e 4.1. A Figura 16 exhibe o aspeto geral do funcionamento do validador de formato AGS.

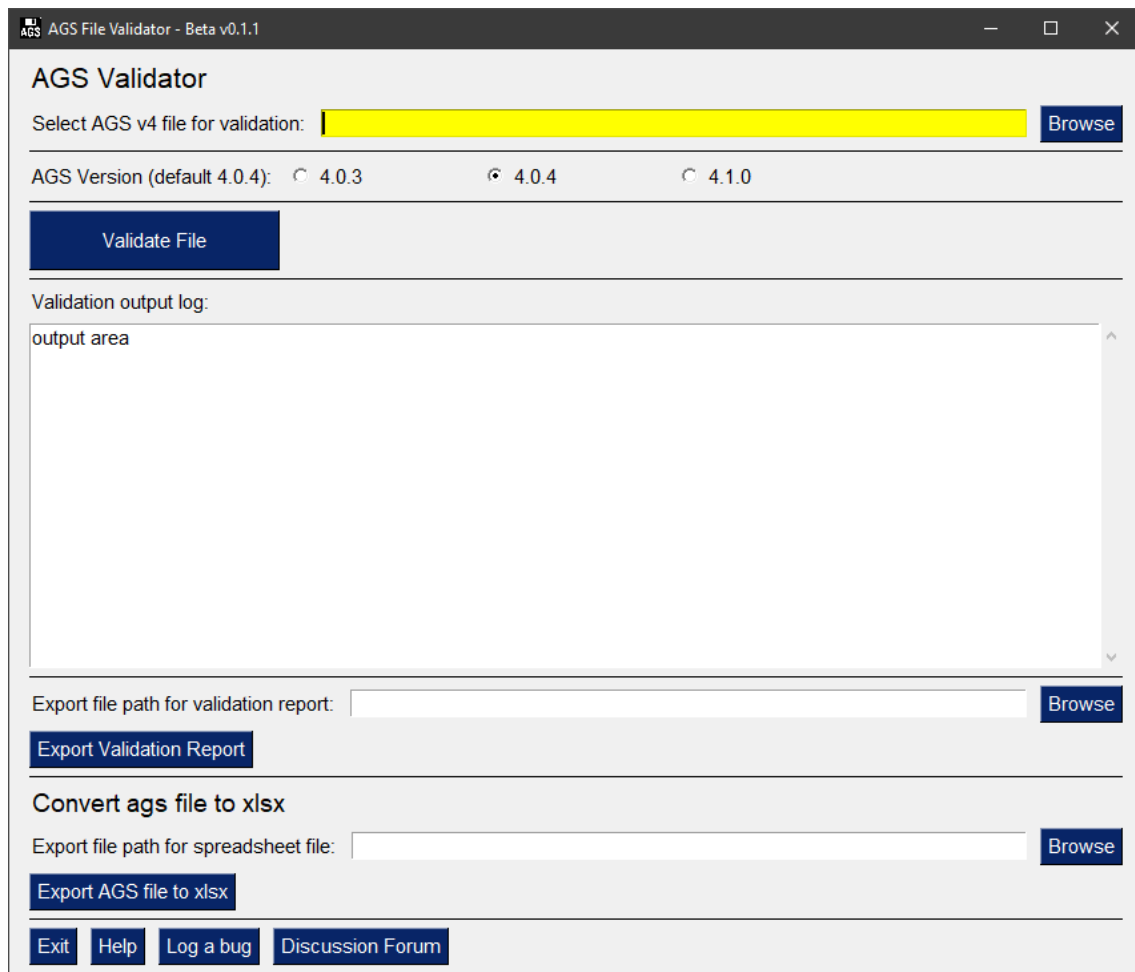


Figura 16 – Ambiente de trabalho do AGS4-validator-beta-v0\_1\_1.

A produção do ficheiro foi concebida, inicialmente, em Excel no formato típico “.xlsx”. Na Figura 17, ilustra-se um exemplo de como os dados são catalogados com recurso a esta aplicação. Neste ficheiro cada uma das folhas corresponde a um dado grupo definido na versão 4.1.1 do formato de dados AGS. Nas folhas, as colunas representam os vários cabeçalhos (*Headings*) a ser descritos, sendo que as linhas que descrevem os valores e resultados das sondagens e ensaios. Concluída a elaboração do documento, é necessário proceder-se à sua conversão ao formato de dados “.ags”. Para o efeito contou-se com a biblioteca Python *AGS Python Library*<sup>1</sup>, desenvolvida por Asitha Senanayake, com o auxílio de Roger Chandler e Tony Daly. Atualmente, esta biblioteca é mantida com suporte da vasta comunidade no repositório de *software* GitLab. Graças à adição de uma ferramenta CLI (*Command Line Interface*), na versão 0.2.0, esta biblioteca pode facilmente ser utilizada através da linha de comandos com simples códigos.

<sup>1</sup> <https://gitlab.com/ags-data-format-wg/ags-python-library/-/wikis/home>

Apesar das várias valências que este formato apresenta, optou-se por utilizar o grupo “GEOL – Field Geological Descriptions” para fazer a descrição detalhada, por sondagem, do zonamento geológico-geotécnico proposto. A Figura 17 exemplifica esta mesma descrição. No domínio do cabeçalho “GEOL\_GEOL”, que corresponde ao código geológico, optou-se por identificar o código da zona, ZGi (“i” correspondendo a um número entre 1 e 4), conforme o definido aquando do zonamento. A Tabela 4 expõe todos os grupos do formato AGS utilizados, fazendo uma breve referência à sua utilidade.

1	HEADING	LOCA_ID	GEOL_TOP	GEOL_BASE	GEOL_DESC	GEOL_LEG	GEOL_GEOL	GEOL_STAT	GEOL_BGS	GEOL_FORM	GEOL_REM
2	UNIT	ID	m	m	X	PA	PA	X	PA	X	X
3	TYPE	20P	20P								
4	DATA	51	0.00	5.15	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
5	DATA	51	5.15	11.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
6	DATA	51	11.50	16.43	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
7	DATA	52	0.00	4.70	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
8	DATA	52	4.70	16.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
9	DATA	52	16.50	19.14	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
10	DATA	53	0.00	5.80	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
11	DATA	53	5.80	7.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
12	DATA	53	7.50	9.06	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
13	DATA	53	9.06	10.00	Rocha granítica		2G1				
14	DATA	54	0.00	4.50	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
15	DATA	54	4.50	14.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
16	DATA	54	14.50	18.08	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
17	DATA	55	0.00	2.20	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
18	DATA	55	2.20	11.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
19	DATA	55	11.50	15.06	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
20	DATA	56	0.00	5.50	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
21	DATA	56	5.50	14.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
22	DATA	56	14.50	18.15	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
23	DATA	56	18.15	19.00	Rocha granítica		2G1				
24	DATA	57	0.00	1.90	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
25	DATA	57	1.90	4.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
26	DATA	57	4.50	6.50	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
27	DATA	57	6.50	7.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
28	DATA	57	7.50	8.60	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
29	DATA	57	8.60	9.00	Rocha granítica		2G1				
30	DATA	58	0.00	5.15	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
31	DATA	58	5.15	4.50	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
32	DATA	58	4.50	6.90	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
33	DATA	58	6.90	7.50	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
34	DATA	58	7.50	9.00	Rocha granítica		2G1				
35	DATA	59	0.00	1.00	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
36	DATA	59	1.00	6.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				
37	DATA	59	6.50	12.18	Granito - Mais de 51 pancadas.		2G2				
38	DATA	510	0.00	1.40	Aterro, terra vegetal ou aluvião.		2G4				
39	DATA	510	1.40	4.50	Granito - inferior a 50 Pancadas		2G3				

Figura 17 – Preparação do ficheiro AGS em Excel. Descrição do zonamento geológico-geotécnico pelas várias sondagens, no grupo “GEOL – Field Geological Descriptions”.

Tabela 4 – Enumeração e respectiva descrição dos grupos presentes no formato AGS, empregues na construção do modelo tridimensional proposto (AGS V4.1.1., 2022).

Formato AGS	
AGS4	
Nome do Grupo	Conteúdo
PROJ	Todas as informações referentes ao projeto.
TRAN	Informações relativas à transcrição de dados.
ABBR	Descrição das abreviaturas.
UNIT	Descrição das unidades em utilização.
TYPE	Informação sobre o tipo de dados.
LOCA	Detalhes sobre a localização das sondagens e ensaios efetuados.
GEOL	Descrição dos materiais geológicos.
HDIA	Descrição do diâmetro do furo de sondagem.
HDPH	Descrição da profundidade atingida pelo furo de sondagem.
HORN	Descrição da orientação e inclinação do furo de sondagem

### 3ª Etapa

A terceira etapa da metodologia trata a integração e, conseqüente modelação tridimensional dos dados. A utilização do Autodesk Civil 3D, prevê o recurso à extensão Geotechnical Modeler. A Figura 18 ilustra, de um modo geral, as várias opções de trabalho disponíveis nesta extensão. O procedimento de trabalho com esta extensão é simplificado pela disposição das várias opções. Assim, para a execução de modelo, deve seguir-se as opções da Figura 18 da esquerda para a direita, ou seja:

*“Manage Data” --> “Build Stratum Surfaces” --> “Stratum Surfaces Display” --> “Subsurface Profiles”*

Os dados no formato AGS podem, então, ser importados para o *software* através da opção *“Manage Data”*. A criação das superfícies dos vários estratos presentes na base de dados importada é feita pela opção *“Build Stratum Surfaces”*. Por sua vez, a exibição do modelo criado poderá ser controlada pela opção *“Stratum Surfaces Display”*. Existem ainda outras opções, como a *“2D Sticklogs”* e *“3D Boreholes”*, para exposição dos dados por furo de sondagem. Por fim, com recurso a alinhamentos predefinidos é possível com a opção *“Subsurface Profiles”* fazerem-se os perfis 2D do modelo. Tanto o modelo, como os perfis criados, podem facilmente ser manipulados

---

com as ferramentas típicas do Civil 3D. Estes alinhamentos devem ser criados previamente com a funcionalidade “*Alignment*” do Civil 3D.

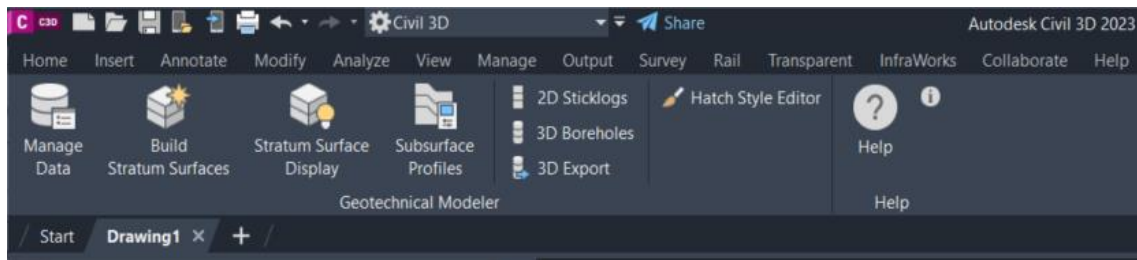


Figura 18 – Funcionalidades da extensão Geotechnical Modeler do Autodesk Civil 3D.

#### 4º Etapa

Esta etapa prevê a correção e ajuste do modelo gerado. Assim, com o modelo tridimensional criado, é sempre necessário proceder-se a algumas correções e ajustes. Para o efeito, poderá ser preciso adicionar pontos de suporte nas várias superfícies definidas a fim de se obter um modelo mais consistente e próximo de um modelo real que, por sua vez, é mais fácil de interpretar e analisar.

Para o efeito, utilizam-se os recursos do Civil 3D. Com a opção “CreatePoints” é possível criar manualmente pontos, que inicialmente não foram identificados pelo algoritmo da extensão. Estes devem ser gerados sobre a correta descrição, para que seja praticável a sua inserção na superfície desejada. Porém, antes deve ser criado um grupo de pontos “*Point Groups*” que reúna todos os pontos de uma dada descrição. Os grupos de pontos são depois adicionados em “*Surfaces*” > Superfície desejada > “*Definition*” > “*Point Groups*”, tal como exemplifica a Figura 19. De forma automática, a superfície será atualizada.

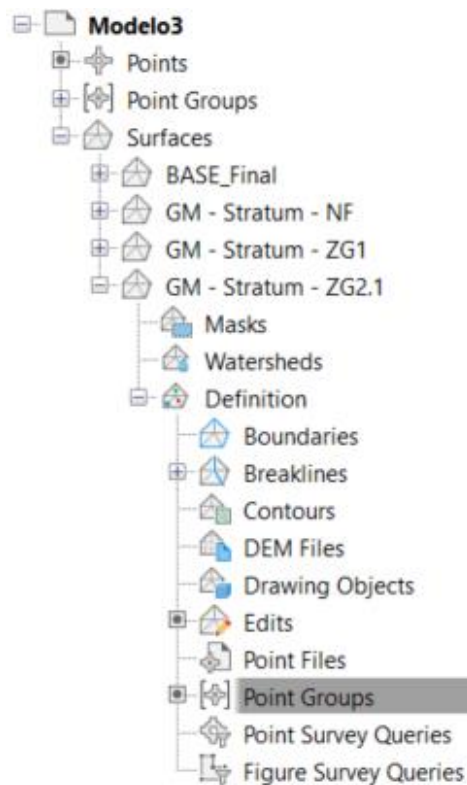


Figura 19 – Processo de adição de novos pontos às superfícies geradas automaticamente pelo Geotechnical Modeler.

### 5ª Etapa

Por fim, a última etapa, compreende à exportação do modelo num formato que permita a interoperabilidade do mesmo, podendo este ser facilmente cedido e aberto em diferentes *softwares*. A exportação do modelo com recurso ao IFC (*Industry Foundation Classes*), desenvolvido pela buildingSMART, trata o câmbio de informações através de um esquema de dados padronizado. Embora esta tecnologia esteja sobretudo ligada à área BIM para construção de edifícios, pode ser também utilizada neste tipo de modelos, assegurando-se que não existam perdas de informação e que o modelo estará sempre ativo para novas alterações e atualizações.

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo V**

### **Caso de Estudio**

---

---

(página propositadamente em branco)

## 5. Caso de estudo

A campanha de prospeção geológico-geotécnica realizada no âmbito da construção do Shopping Cidade do Porto, foi o caso de estudo escolhido para a aplicação prática da problemática tratada pelo presente trabalho de investigação. Esta campanha de prospeção decorreu em 1992, tendo sido executada pela Divisão de Sondagens da Sociedade de Construções Soares da Costa S.A..

Com o propósito de reconhecer o local interessado pelo estudo geológico-geotécnico – um terreno situado na Praça do Bom Sucesso, na Cidade do Porto – foram executados trinta e quatro furos de sondagem complementados pela execução de ensaios SPT. Os locais de concretização dos furos de sondagens encontram-se assinalados na Figura 20 e no Anexo I, bem como o limite de implantação do edifício a construir.

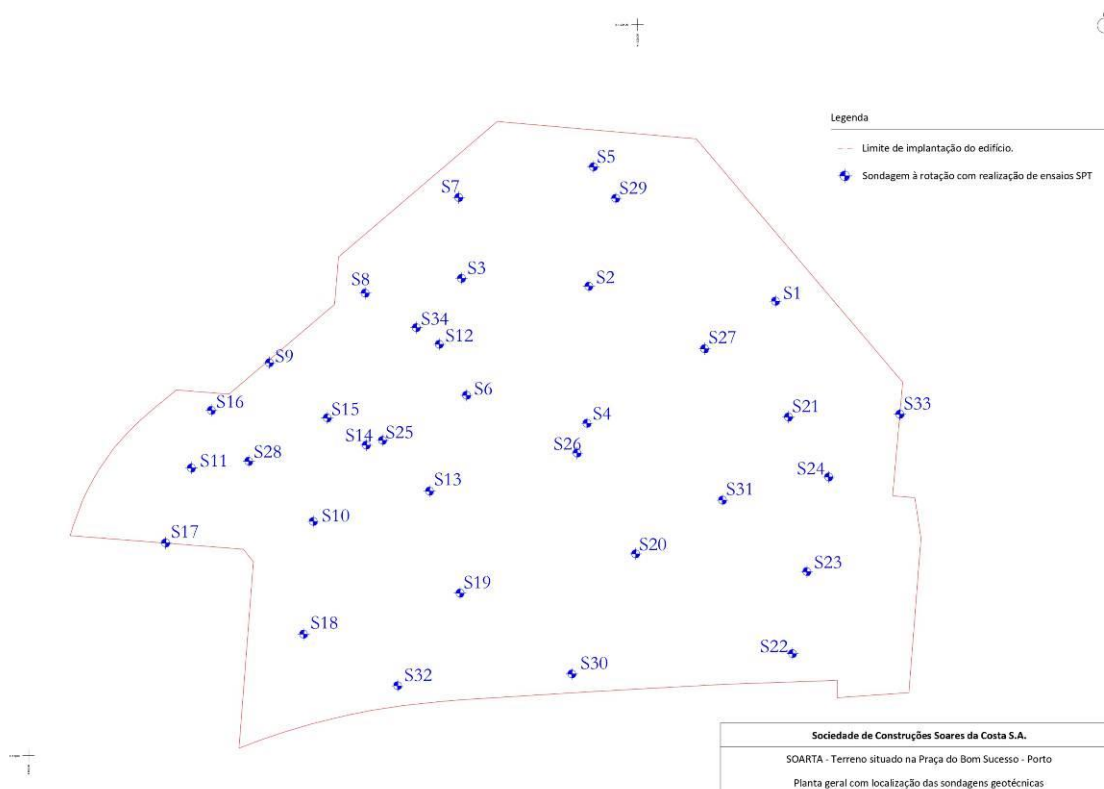


Figura 20 – Limite de implantação do edifício proposto e locais de execução dos furos de sondagem.

O respetivo processamento e conseqüente interpretação dos *logs* de sondagem permitiu estabelecer, aquele, que na opinião do autor, define o zonamento geológico-geotécnico, que melhor se adequa aos objetivos do projeto de construção e ao próprio objeto de investigação do

presente estudo. A Tabela 4 sintetiza algumas informações relativas aos furos de sondagem. O Anexo III constitui uma ilustração da classificação litológica, encontrada nos *logs* de sondagem disponibilizados.

Tabela 5 – Cota e profundidade de reconhecimentos dos furos de sondagem.

Furo de sondagem	Cota (m)	Profundidade atingida (m)	Furo de sondagem	Cota (m)	Profundidade atingida (m)
S1	43,44	16,43	S18	43,72	10,00
S2	43,81	19,14	S19	43,24	22,48
S3	44,28	10,00	S20	42,78	20,98
S4	43,36	18,08	S21	43,38	9,80
S5	44,12	15,06	S22	42,70	18,75
S6	44,05	19,00	S23	42,60	21,10
S7	44,67	9,00	S24	43,30	25,04
S8	44,77	9,00	S25	35,50	21,05
S9	44,93	12,18	S26	35,40	26,95
S10	44,39	8,25	S27	35,60	25,56
S11	45,09	12,18	S28	36,40	10,10
S12	44,40	13,00	S29	35,90	18,15
S13	44,20	15,08	S30	42,90	20,70
S14	44,30	12,11	S31	42,80	22,94
S15	44,50	10,76	S32	43,50	21,80
S16	45,50	3,60	S33	44,90	24,00
S17	45,50	9,00	S34	35,40	12,54

### 5.1. Enquadramento Geológico

Do ponto de vista geológico, o local de estudo insere-se no granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto) -  $\gamma_m$ , conforme se encontra representado na Folha 9-C Porto da Carta Geológica de Portugal de Carrínton & Teixeira (1957), (Figura 21). Importa referir que subjacentemente a esta formação, podem ocorrer aterros resultantes da ocupação antrópica dos terrenos, e aluviões resultantes da decorrência de linhas de água. Esta sobreposição ao granito de uma camada de aterros e solos de cobertura é visível nos *logs* de sondagem que constituem o Anexo III.



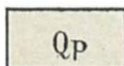
0 500 m

Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06, EPSG 3763

Legenda:

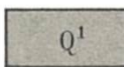


Local em estudo.



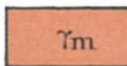
Qp

Formação areno-pelítica de cobertura.



Q<sup>1</sup>

Depósitos de praias antigas e de terraços fluviais.



7m

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

Figura 21 – Enquadramento geológico do local em estudo. Extrato da Folha 9-C Porto da Carta Geológica de Portugal (Carrington da Costa & Teixeira, 1957).

De acordo com a notícia explicativa da Folha 9-C Porto (Carrington da Costa et al., 1957), o Granito do Porto apresenta-se em extensa área, dominando quase por completo a geologia da Cidade do Porto. Este granito forma numerosas manchas rodeadas por xistos metamórficos, distinguindo-se dos mesmos pela sua tonalidade mais clara e pela granulometria, geralmente, menos grosseira. No topo do granito podem ocorrer depósitos da Formação Areno-Pelítica de Cobertura (Q<sub>p</sub>). Segundo a mesma notícia explicativa, esta formação, de cor amarelada, foi cartografada no Cemitério de Agramonte (próximo do local em estudo), onde a sua ocorrência produz uma ocultação dos Depósitos de Praias Antigas (Q<sup>1</sup>).

Na elaboração do presente trabalho, pela sua antiguidade, não foi possível a observação das amostras recolhidas nas campanhas de prospeção geológico-geotécnicas. Com efeito, da análise dos *Logs* de sondagem é admissível a presença de granitos no local em estudo. Quanto às duas

restantes formações (acima mencionadas) cartografadas nas imediações do terreno, não se consegue dizer qual delas está presente na área, ou mesmo se alguma ocorre. Dos *Logs* de sondagem regista-se a presença de Argila com calhaus e de Areia Siltosa com calhaus sobre os granitos. Poderá isto ser uma indicação da presença das duas formações, uma vez que a notícia explicativa refere que a Formação Areno-Pelítica de Cobertura é descrita como Argilas amareladas e os Depósitos de Praias Antigas poderão ser constituídos por areias e cascalheiras. Importa realçar, uma vez mais, que sem a observação direta das amostras não se consegue fazer a avaliação mais fidedigna das litologias locais.

## 5.2. Nível freático

Presente nos *logs* das sondagens executadas, surge a indicação das profundidades a que foi detetada a presença de água, havendo-se assumido que essa corresponderia ao nível freático. Este nível foi identificado em dezoito dos trinta e quatro furos de sondagem executados. Na Tabela 6 apresenta-se uma síntese das profundidades a que o nível freático foi encontrado.

Tabela 6 – Posição do nível freático.

Furo de sondagem	Profundidade	Cota	Furo de sondagem	Profundidade	Cota
	(m)			(m)	
S1	6,00	37,44	S10	7,60	36,79
S2	7,00	36,81	S11	9,00	36,09
S3	7,00	37,28	S12	8,70	35,70
S4	7,00	36,36	S13	8,22	35,98
S5	8,00	36,12	S14	8,15	36,15
S6	8,00	36,05	S15	7,50	37,00
S7	8,00	36,67	S17	7,80	37,70
S8	8,00	36,77	S18	5,90	37,82
S9	9,20	35,73	S21	5,27	38,11

Embora exista um grupo próprio no formato de dados AGS para a inserção dos resultados da monitorização dos níveis freáticos, por uma questão de maior facilidade na elaboração do modelo tridimensional, optou-se por fazer um modelo distinto para o nível freático procedendo-se posteriormente à sua combinação com o modelo principal. Com efeito, elaborou-se um segundo

ficheiro “.ags” em que as superfícies criadas, descritas no grupo GEOL, dizem respeito ao nível da água.

### 5.3. Correlações para Estimar Propriedades do Solo e das Rochas

Quando não obtidos diretamente, é prática comum estimarem-se parâmetros geotécnicos a partir dos resultados obtidos nos ensaios *in-situ* e laboratoriais utilizando-se para o efeito correlações conhecidas. Uma vez que as propriedades resultantes de correlações apresentam maior variabilidade (Phoon et al., 1995) é aconselhável que estas se baseiem em múltiplos resultados para cada uma das unidades geológicas em estudo. Em resultado da natureza dos dados do corrente trabalho de investigação usaram-se as correlações a seguir descritas para estimar as propriedades dos solos e rochas para suporte à elaboração do zonamento geológico-geotécnico.

Os ensaios SPT são aqueles que apresentam maior literatura sobre correlações. Consultando a literatura é necessária especial atenção, pois alguns autores apoiam-se em valores corrigidos  $(N_1)_{60}$  e, outros em valores não corrigidos N. Nestas correlações está patente a distinção entre o tipo de solo, arenoso ou argiloso. Uma vez, que os solos em estudo são sobretudo de aparência arenosa, utilizaram-se as seguintes tabelas para estimar a compactidade (Tabela 7), o peso específico (Tabela 8) e o ângulo de atrito (Tabela 9).

Tabela 7 – Classificação de solos arenosos quanto à sua compactidade, através da relação com o  $N_{60}$  (Terzaghy & Peck, 1948).

Compactidade					
$N_{60}$	Muito solta	Solta	Medianamente compacta	Compacta	Muito compacta
	<4	4 - 10	10 - 30	30 - 50	>50

Tabela 8 – Correlação entre o resultado do SPT e o peso específico dos solos arenosos (Godoy, 1972; Cintra et al., 2003).

$N_{SPT}$	Peso específico ( $kN/m^3$ )		
	Areia seca	Areia húmida	Areia saturada
<5	16	18	19
5 – 8	16	18	19
9 – 18	17	19	20
19 – 40	18	20	21
>40	18	20	21

Tabela 9 – Correlação entre o resultado do SPT e o ângulo de atrito interno (Meyerhof, 1956).

$N_{SPT}$	Ângulo de atrito ( $^{\circ}$ )
-----------	---------------------------------

≤4	<30
5 – 10	30 – 35
11 – 30	35 – 40
31 – 50	40 – 45
>50	>45

O espaçamento das descontinuidades é um dos aspectos fundamentais para a correta descrição de um maciço rochoso, desta forma, a ISRM elaborou uma classificação para o espaçamento entre descontinuidades observadas num maciço rochoso. A Tabela 10 regista essa classificação. O RQD é a Designação da Qualidade da Rocha, criado em 1964 por Deere. De forma simples, este é determinado pela percentagem de recuperação de pedaços do testemunho de sondagem com mais de 100 mm de comprimento. O mesmo autor propôs uma tabela de classificação (Tabela 11). O RQD é definido pelo quociente da seguinte expressão:

$$RQD (\%) = \frac{\text{Soma de testemunhos} > 100 \text{ mm}}{\text{Totalidade da manobra}} * 100 \quad (2)$$

Tabela 10 – Classificação do espaçamento entre descontinuidades, em maciços rochosos ASTM (1988).

Símbolo	Designação	Espaçamento (m)
F1	Muito afastadas	> 200
F2	Afastadas	60 – 200
F3	Medianamente afastadas	20 – 60
F4	Próximas	6 – 20
F5	Muito próximas	< 6

---

Tabela 11 – Classificação do índice RQD, proposta por Deere et al. (1966).

RQD (%)	Qualidade do maciço rochoso
0 – 25	Muito fraco
25 – 50	Fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 -100	Excelente

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo VI**

### **Aplicação Prática e Resultados**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 6. Aplicação Prática e Resultados

Conforme referido nos capítulos anteriores, a aplicação prática do caso de estudo requer a elaboração de dois ficheiros “.ags”. O primeiro é referente aos materiais geológico-geotécnicos encontrados nas sondagens de prospeção mecânica, dispostos em concordância com o zonamento geológico-geotécnico previamente definido. Por sua vez, o segundo ficheiro é em todo idêntico a este último, porém apenas se refere ao nível freático.

### 6.1. Zonamento geológico-geotécnico

A definição do zonamento geológico-geotécnico teve por base a interpretação dos dados que a campanha de prospeção permitiu obter, aliado às necessidades e condicionantes do projeto. Com efeito, o critério adotado na definição das várias unidades, que constituem este zonamento, baseou-se em diferentes aspetos dos quais se destacam:

- unidades litoestratigráficas;
- características dos solos e rochas, nomeadamente, presença de contaminação orgânica, granulometria, estado de alteração e índice RQD;
- resultado dos ensaios SPT;
- características do projeto.

O edifício projetado prevê a cota de implantação aos 31,8 m. Analisando as cotas do terreno, aquando da realização dos furos de sondagens, verifica-se a carência de trabalhos de escavação, em que alguns locais poderão chegar aos 14 m. O zonamento é proposto sustentando-se nestas mesmas necessidades, fazendo a distinção entre as camadas superficiais de aterro, terra vegetal e aluvião, e as restantes camadas de granito decomposto e de rocha granítica. A proposta de um zonamento simplificado, concerne sobretudo, em uma maior facilidade na construção e interpretação do modelo tridimensional e descomplicando as suas comparações com o método convencional bidimensional. Contudo, esta simplificação não invalida a utilidade deste no projeto em questão, continuando a ser possível ajustar os métodos de escavação e determinar os tipos de fundação cruciais ao edificado.

Na Tabela 12 encontram-se esquematizadas todas as unidades propostas pelo zonamento, bem como, uma breve descrição das mesmas. Da interpretação do presente autor, em concordância

com o estado de alteração de maciços rochosos definido segundo a classificação ISRM de 1981, sugere-se que a zona geológico-geotécnica, ZG3, corresponderá a W<sub>5</sub> (decomposto), por sua vez a ZG2, equivalerá a W<sub>5</sub>-W<sub>4</sub> (decomposto a muito alterado) e, por último, a ZG1, representará W<sub>4</sub>-W<sub>3</sub> (muito alterado a medianamente alterado) podendo assumir um comportamento de W<sub>2</sub> (pouco alterado) em locais com índice RQD superior a 75%.

Com os resultados dos ensaios SPT é possível tecerem-se algumas correlações. A ZG3, para um solo arenoso seco, corresponderá a um peso específico de 17 kN/m<sup>3</sup> e um ângulo de atrito próximos dos 40°. Por sua vez, a ZG2 apresentará um peso específico de 18 kN/m<sup>3</sup> e um ângulo de atrito superior aos 45°. Estas correlações foram efetuadas em concordância com os dados apresentados nas Tabelas 8 e 9, relativos ao peso específico e ângulo de atrito de solos arenosos, respetivamente. Quanto à rocha granítica, ZG1, na sua maioria manifesta RQD inferior a 75%, o que revela um maciço de qualidade muito fraca a razoável, justificando a atribuição de um estado de alteração entre muito alterado e medianamente alterado. Por vezes, os *Logs* de sondagem revelam uma qualidade superior, acima dos 75%, boa a excelente (Tabela 11). Isto evidencia, que o maciço apresenta locais onde o seu comportamento é melhor que o W<sub>4</sub>-W<sub>3</sub> definido. Tal afirmação é sobretudo factual em profundidade, em que a qualidade do maciço rochoso melhora no final das sondagens. Infelizmente, os *Logs* atribuídos ao presente caso de estudo, não esclarecem quanto ao estado de fracturação do maciço, pelo que não foi possível elaborar quaisquer considerações sobre o mesmo.

Tabela 12 – Proposta de zonamento geológico-geotécnico.

Zona geológico-geotécnica		Descrição	
Simbologia	Designação		
	ZG4	Aterro, terra vegetal ou aluvião	Camada superficial de solo muito heterogéneo.
	ZG3	Granito, com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.	Granito decomposto, muito solto a compacto.
	ZG2	Granito, com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.	Granito decomposto a muito alterado, muito compacto.
	ZG1	Rocha granítica	Rocha granítica, com nega no ensaio SPT ou menos de 5 cm de penetração na 1ª fase. Índice RQD assume valores compreendidos entre 0% e 100%

---

No Anexo IV observa-se o conjunto das trinta e quatro sondagem executadas, complementadas pelo respetivo zonamento.

A camada de Aterros, solos de cobertura e/aluvião (ZG4) é observada em todos os furos de sondagem, com a exceção das sondagens S25, S26, S27, S28, S29 e S34, executadas numa fase complementar, após uma escavação prévia. Subjacente a esta camada, de um modo generalizado, surge um granito decomposto com resultados do ensaio SPT muito fracos (ZG3). Por vezes, no interior desta camada observa-se a ocorrências de pequenas porções da ZG2. Por norma, a ZG2, aparece abaixo da ZG3. A rocha granítica (ZG1) ocorre no final dos furos de sondagens, sem que se tenha detetado em todos dos furos realizados. Na sondagem S30 não se identificou a presença de ZG3, tal como em conjunto não se detetou nas S33 e S34. Na S33, após a camada de aterro, encontra-se de imediato a rocha granítica. Por sua vez, na S34 apenas existe rocha granítica. A sondagem S10 apresenta uma particularidade, no sentido em que existe uma porção de ZG1 entre as camadas ZG3 e ZG2, podendo significar a presença de uma pequena bola de granito, algo muito típico desta litologia.

## **6.2. Modelo Geológico-Geotécnico 3D**

Em concordância com o que havia sido definido no fluxo de trabalho (Figura 15) apresentado anteriormente, foi elaborado um primeiro modelo geológico-geotécnico 3D, designado por Modelo Provisório. Este é o resultado bruto da inserção no *software* dos dados compilados. Isto traduz-se num modelo inconclusivo e difícil de interpretar, que carece de correções manuais com o intuito de o deixar mais próximo da realidade. Com efeito, um segundo modelo é conseguido sendo este o modelo final do terreno.

## **6.3. Modelo Provisório**

A análise ao modelo provisório revela, tal como já era esperado, um modelo complexo, com falta de informação e com alguns erros de interpretação algorítmica. A Figura 22 mostra a disposição de todos os furos de sondagem realizados, bem como, o respetivo zonamento em cada um deles. Na Figura 23, observa-se, com uma cor verde, a superfície de topo. Nesta superfície é perceptível algumas depressões, provocadas pela cota de topo das sondagens S25, S26, S27, S28, S29 e S34, executadas numa fase mais tardia, coincidindo com uma parte do terreno possivelmente já escavado. Estas depressões foram corrigidas retirando as cotas de topo destas sondagens dos dados que constituem a superfície do terreno.

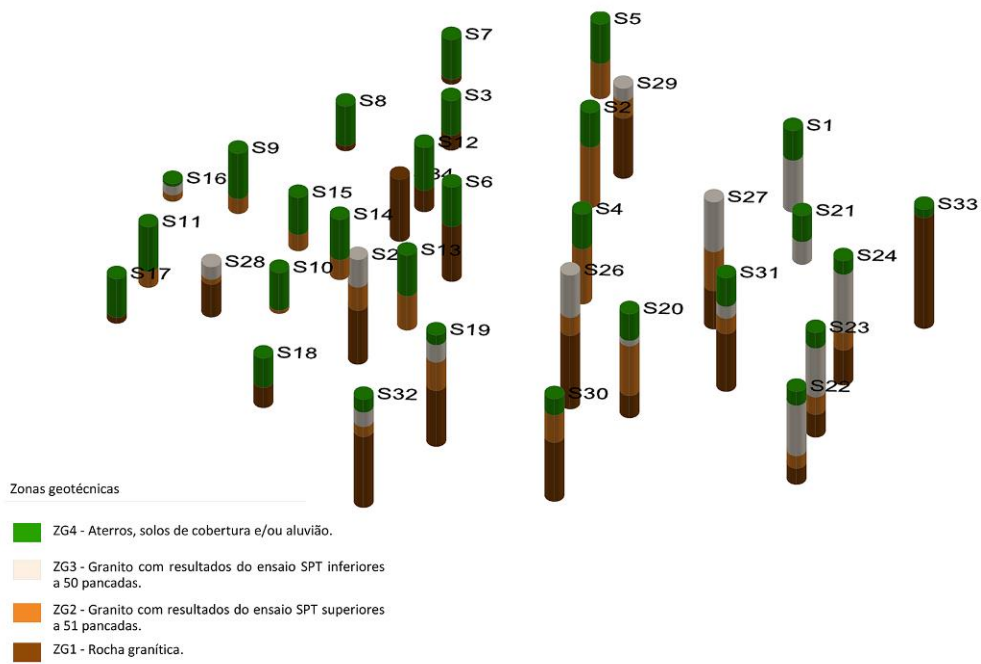


Figura 22 – Distribuição espacial dos 34 furos de sondagem executados. Ilustração do zonamento geológico-geotécnico em cada uma das sondagens.

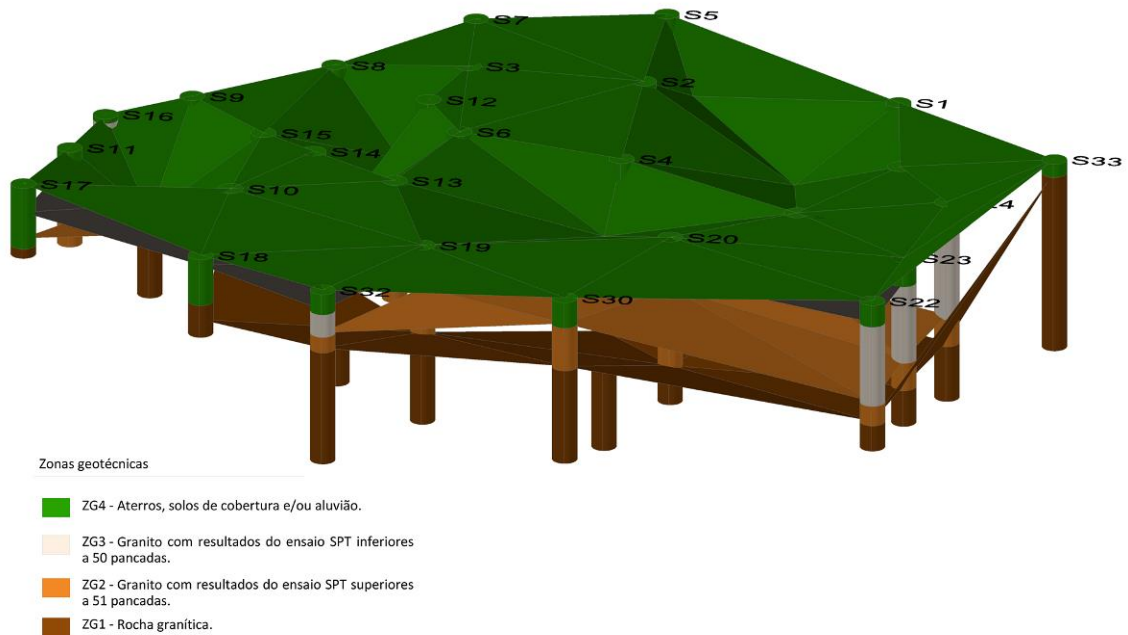


Figura 23 – Modelo Provisório. Distribuição das quatro superfícies geológico-geotécnicas geradas.

A análise das restantes superfícies geradas no modelo, Figuras 24, 25, e 26, revela ainda a presença de alguns hiatos. Estes são originados pela dificuldade que o *software* possui em detetar os pontos de transição entre uma zona geológico-geotécnica e outra. Esta dificuldade é sobretudo perceptível na ZG1 com muito pontos por identificar, levando a que o *software* crie duas superfícies distintas para esta zona. Um outro detalhe, que se pode observar neste modelo, é que as superfícies não se intersejam, simplesmente deixam de existir assim que são cortadas. Isto, num meio natural, não será totalmente verdadeiro uma vez que é possível reconhecer na natureza transições entre diferentes camadas. Por exemplo, é bastante comum observarem-se as camadas de rocha a cortar as camadas mais alteradas, resultando muitas vezes em afloramentos.

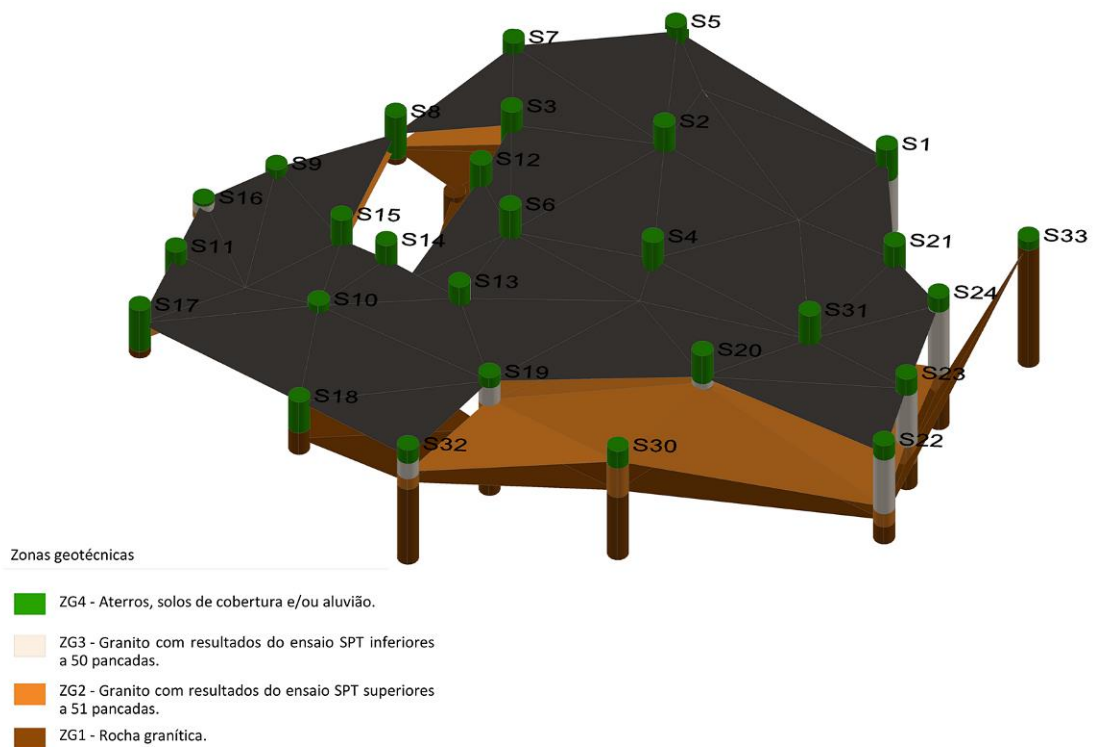


Figura 24 – Modelo Provisório. Modelo desprovido da camada ZG4.

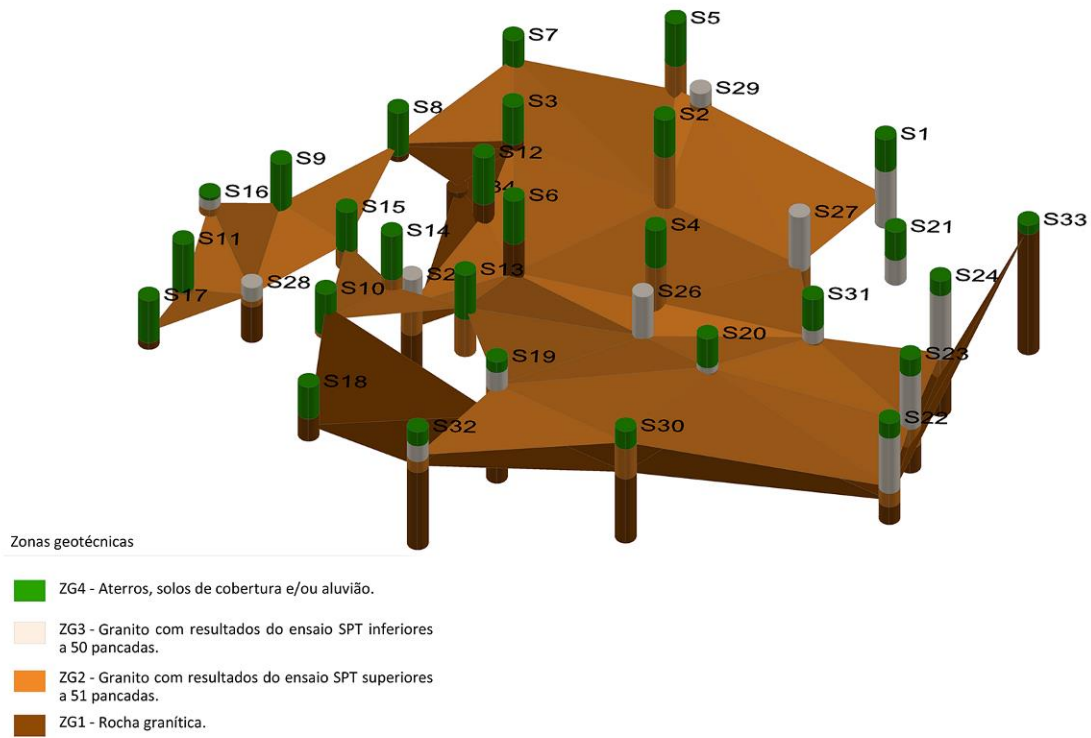


Figura 25 – Modelo Provisório. Modelo desprovido das camadas ZG4 e ZG3.

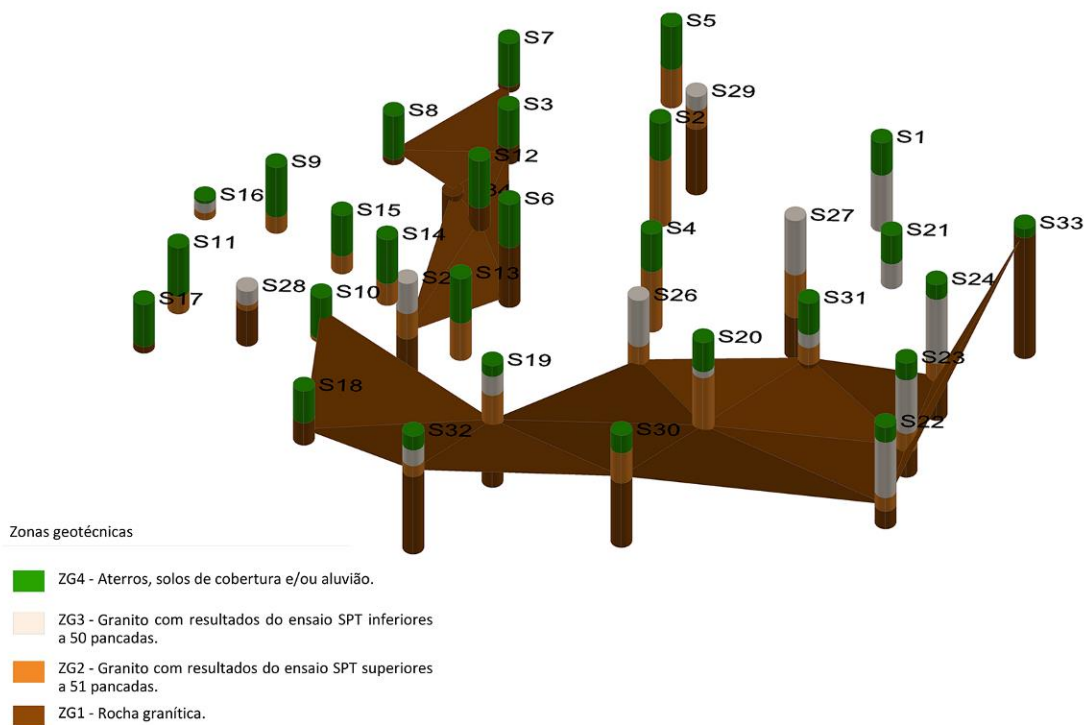


Figura 26 – Modelo Provisório. Modelo da distribuição da rocha granítica identificada nos logs de sondagem.

---

O tamanho do modelo gerado é um outro problema que deve ser ultrapassado na execução das correções para o modelo final. Tal como exemplifica a Figura 27, o modelo gerado é inferior á área do edifício a construir, pelo que será essencial que se extrapole os dados das sondagens mais externas para o exterior do edifício. Neste caso, optou-se por extrapolar os dados 20 metros para o exterior do modelo inicial, garantindo que todo o edifício se encontrava assim dentro do modelo do terreno. No que concerne o estudo geológico-geotécnico, ao realizar esta tarefa, é admitido que o terreno não apresenta grandes variações de materiais até às fronteiras do modelo. Importa referir que o edifício foi implantado à cota de 31,8 m tal como se encontrava descrito no respetivo projeto.

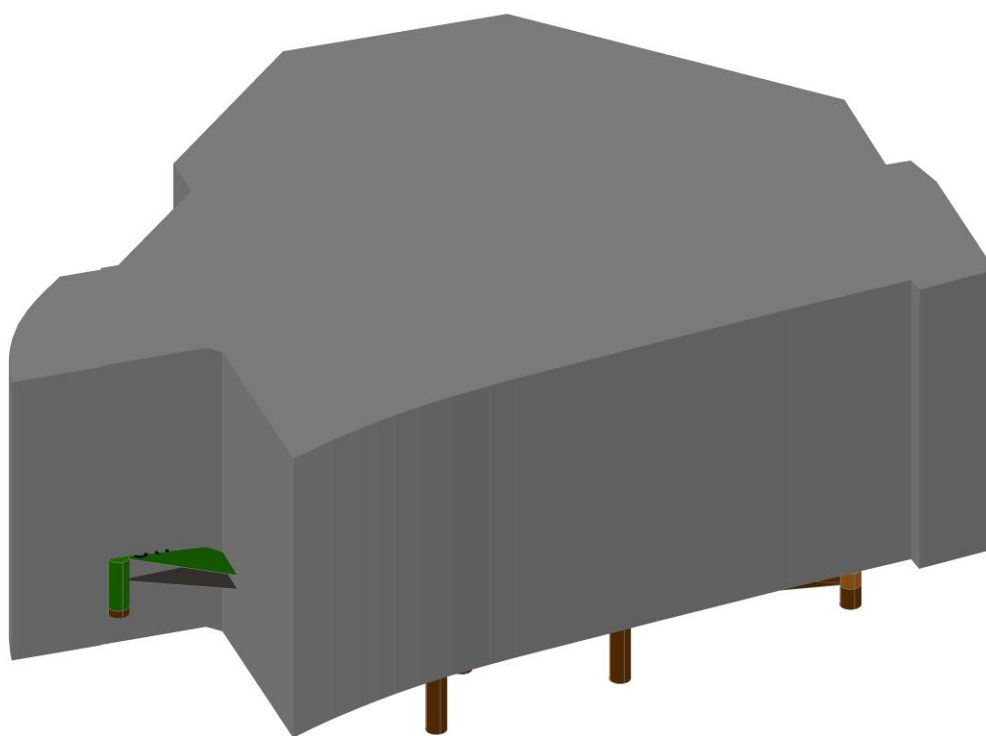


Figura 27 – Modelo Provisório. Edifício projetado é muito superior ao modelo gerado.

#### **6.4. Modelo Final**

A elaboração do modelo geológico-geotécnico tridimensional final consistiu na criação, e correta identificação, de pontos entre zonas geotécnicas, permitindo assim, eliminar erros e incoerências do terreno. Aproveitou-se também esta fase do estudo para adicionar a superfície do nível freático. E ainda, uma superfície da base do modelo, plana, estabelecida a uma cota ligeiramente inferior que a sondagem mais profunda, fazendo deste modo o remate final do modelo. A

---

extrapolação dos dados das sondagens permitiu gerar um modelo que engloba todo o edifício projetado, Figura 28.

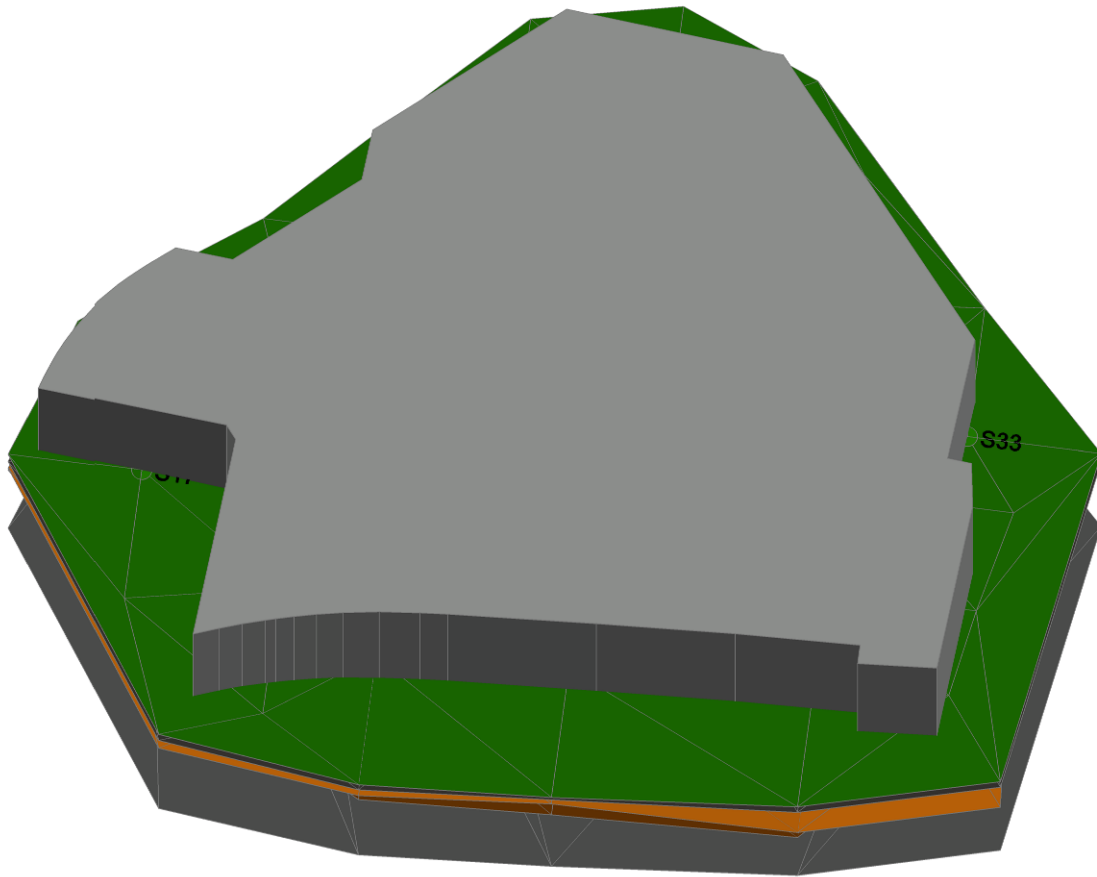
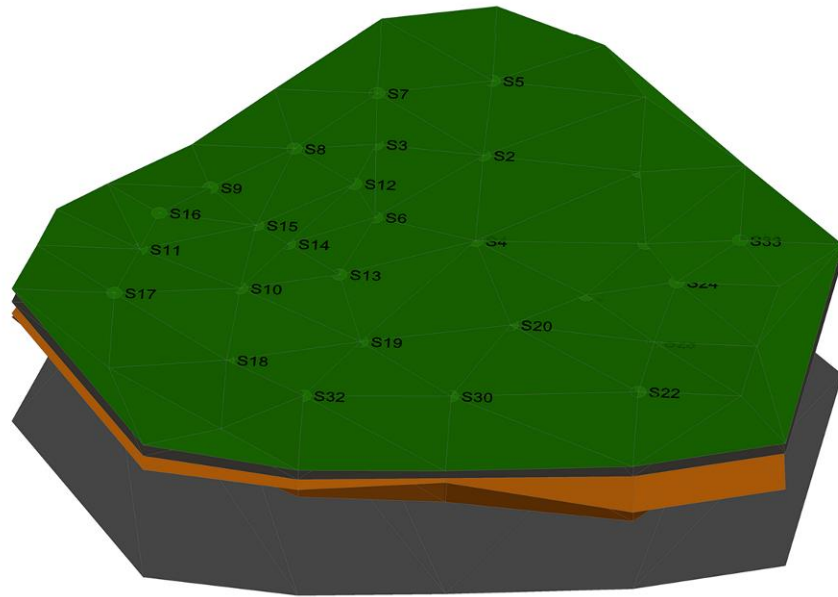


Figura 28 – Modelo Geológico-Geotécnico Tridimensional, com edifício projetado (representado a cinzento).

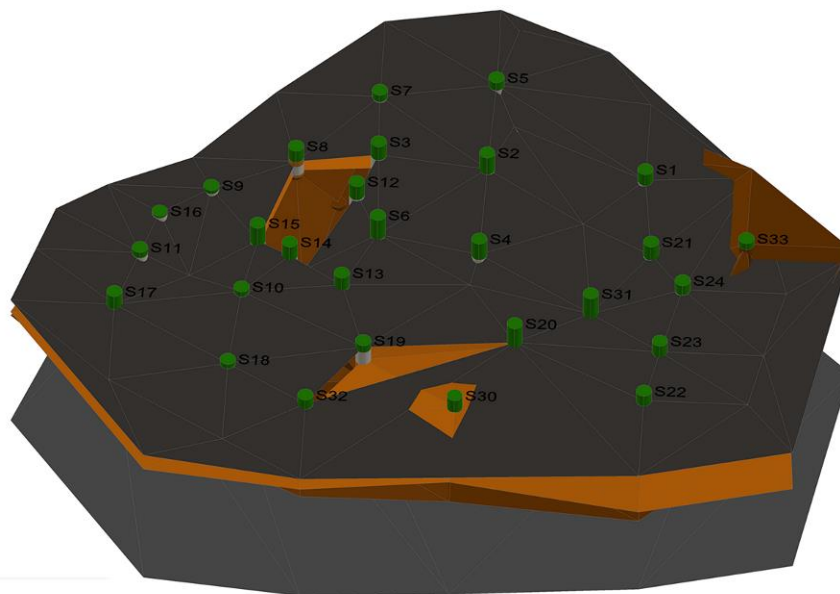
A observação da superfície do topo, Figura 29, apresenta agora um aspeto regular, mais natural e sem as depressões constatadas anteriormente. Quanto às restantes superfícies, Figuras 30, 31 e 32, continuam a existir alguns hiatos. Contudo, as superfícies estão mais próximas de um traçado natural e coerente com o interpretado nos *logs* de sondagem. As zonas são mais perceptíveis, facilitando a sua interpretação, e permitem-se intersestar pelas várias superfícies. Na Figura 33 representa-se a distribuição do nível freático. No Anexo V ilustra-se todas superfícies que constituem o Modelo 3D do terreno em estudo.



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

Figura 29 – Modelo Final.



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

Figura 30 – Modelo Final. Desprovido da camada ZG4.

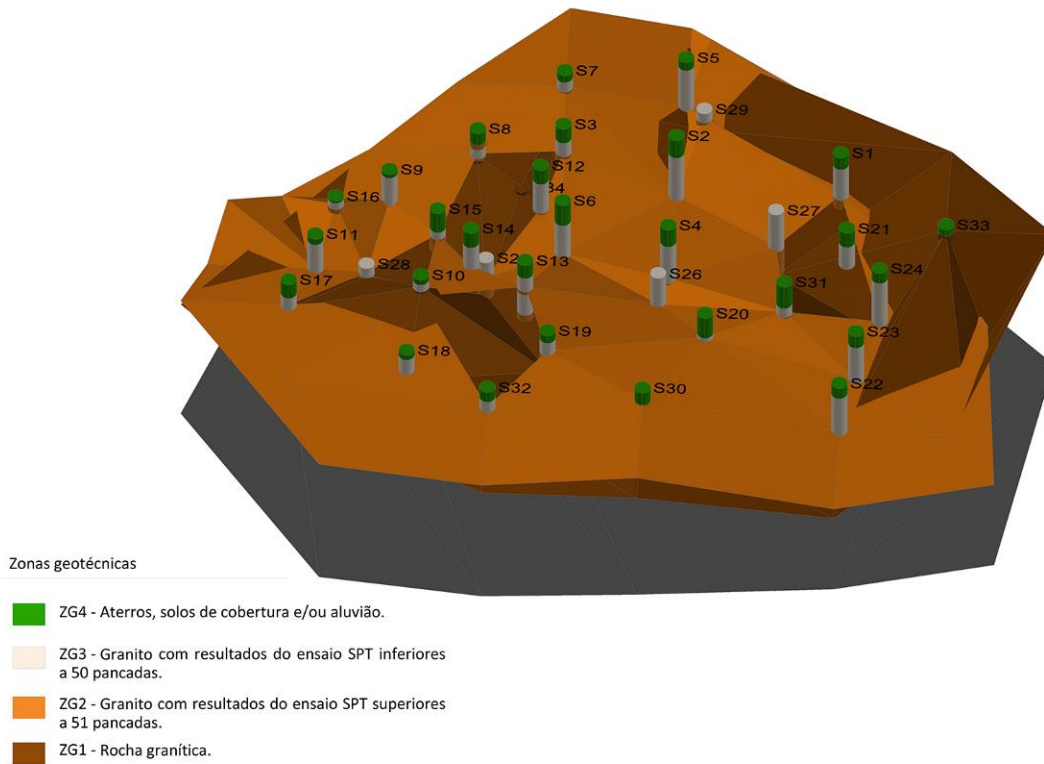


Figura 31 – Modelo Final. Desprovido das camadas ZG4 e ZG3.

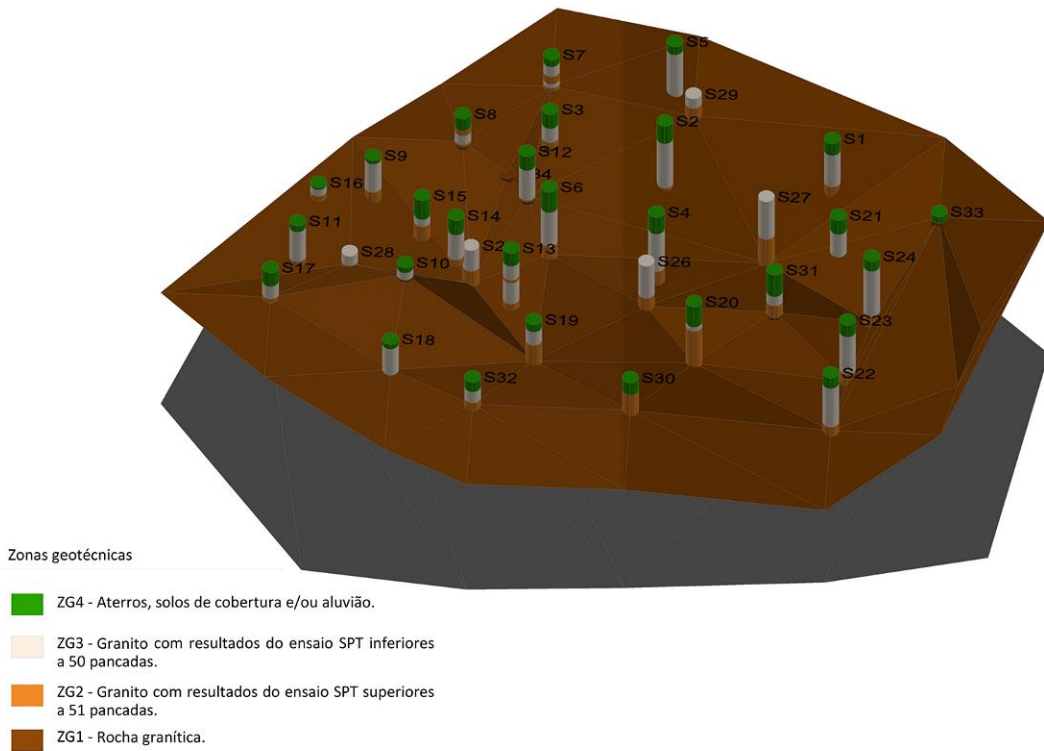


Figura 32 – Modelo Final. Modelo da distribuição da rocha granítica identificada nos logs de sondagem.

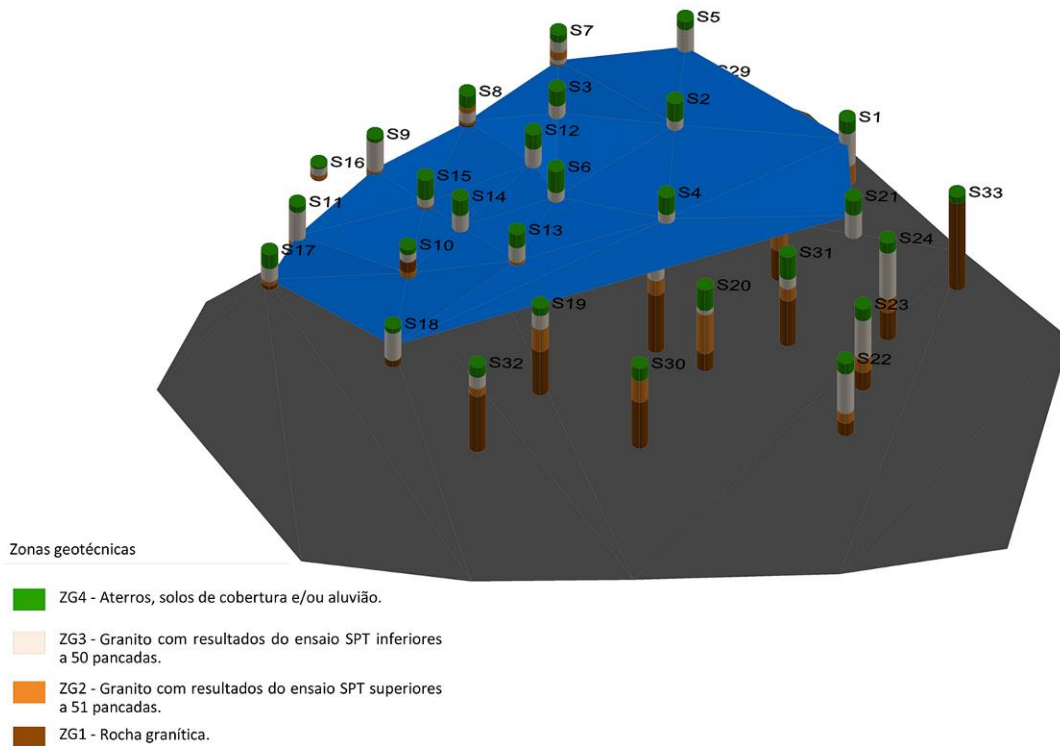


Figura 33 – Modelo Final. Modelo da distribuição do nível freático.

A inserção do modelo genérico do edifício projetado, permite melhor entender quais são as zonas geológico-geotécnicas que este irá interseccionar. As Figuras 34, 35, 36 e 37 ilustram a implantação do edifício a cortar o modelo tridimensional. Em virtude das capacidades de cálculo do Autodesk Civil 3D, é possível fazer uma estimativa muito aproximada do volume total de escavação, bem como, do volume em cada uma das zonas geotécnicas. Isto será especialmente útil, na otimização dos métodos e recursos de escavação a implementar.

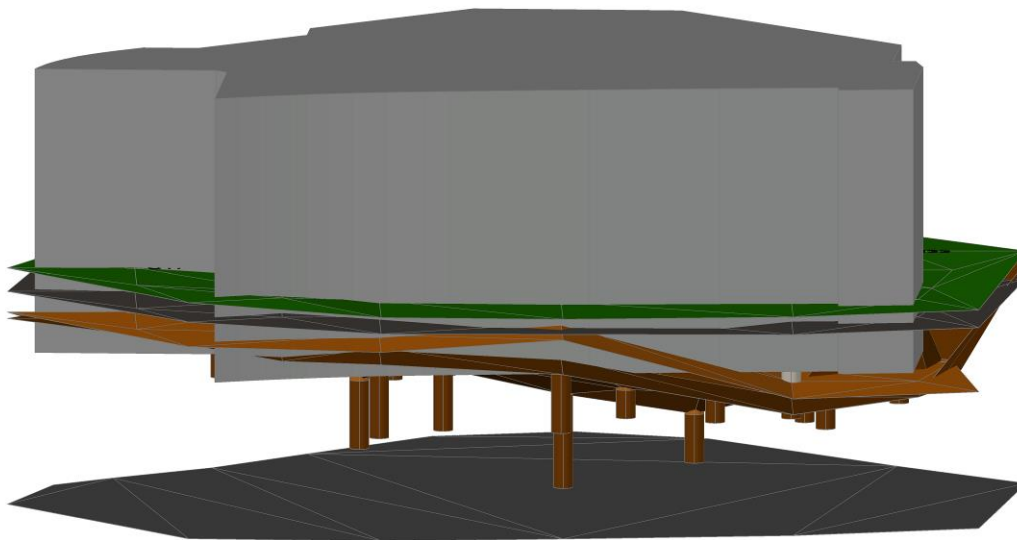


Figura 34 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Sul.

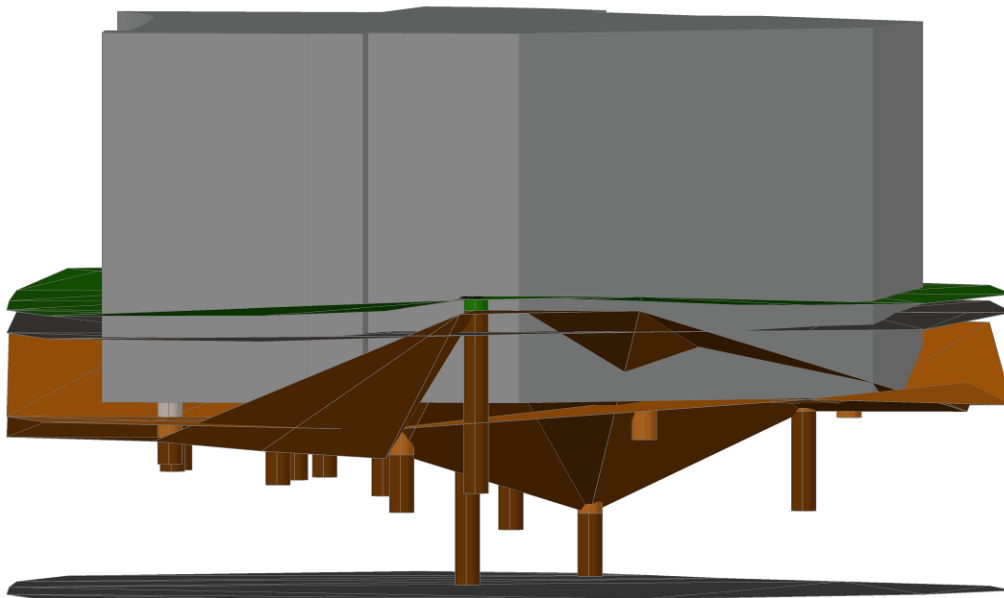


Figura 35 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Este.

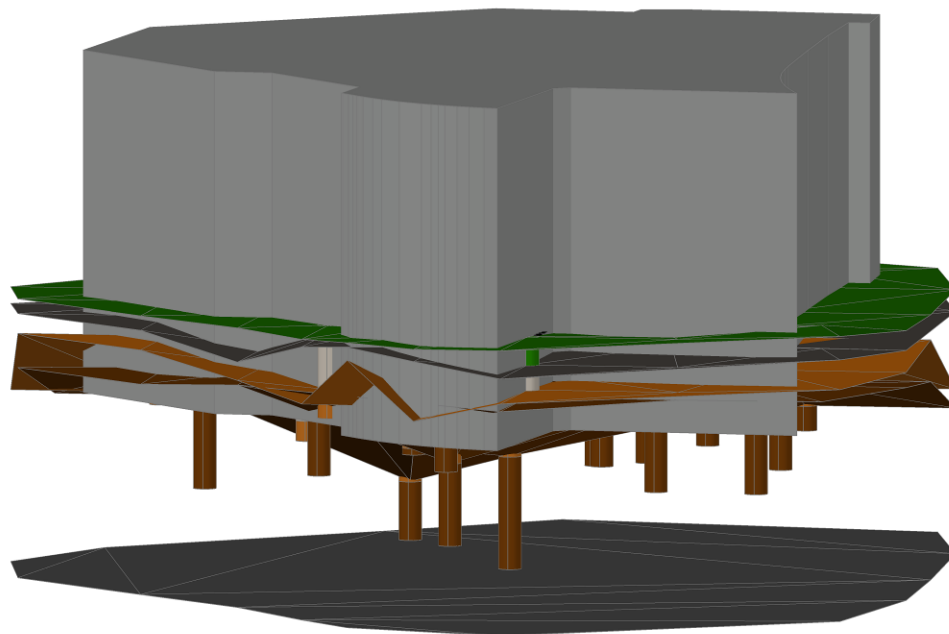


Figura 36 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Oeste.

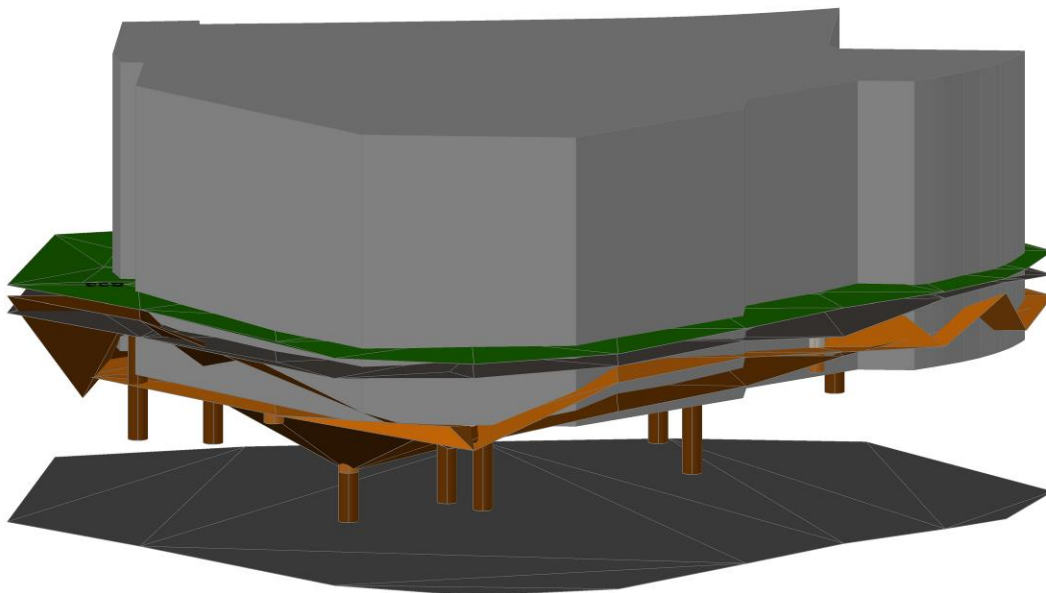


Figura 37 – Implantação do edifício sobre modelo tridimensional. Vista Norte.

### 6.4.1. Perfis Geológico-Geotécnicos Interpretativos

A partir do modelo tridimensional é possível executarem-se perfis geológico-geotécnicos automáticos 2D que ilustrem o comportamento esperado do terreno ao longo daqueles alinhamentos. Posto isto, definiram-se 6 alinhamentos nos quais se pretendia conhecer mais pormenorizadamente a atitude das camadas geotécnicas definidas no modelo. Na Figura 38 e Anexo I apresentam-se os traçados em planta destes perfis, realçando-se a existência de três perfis em cada uma das direções: Oeste - Este e Sul - Norte.

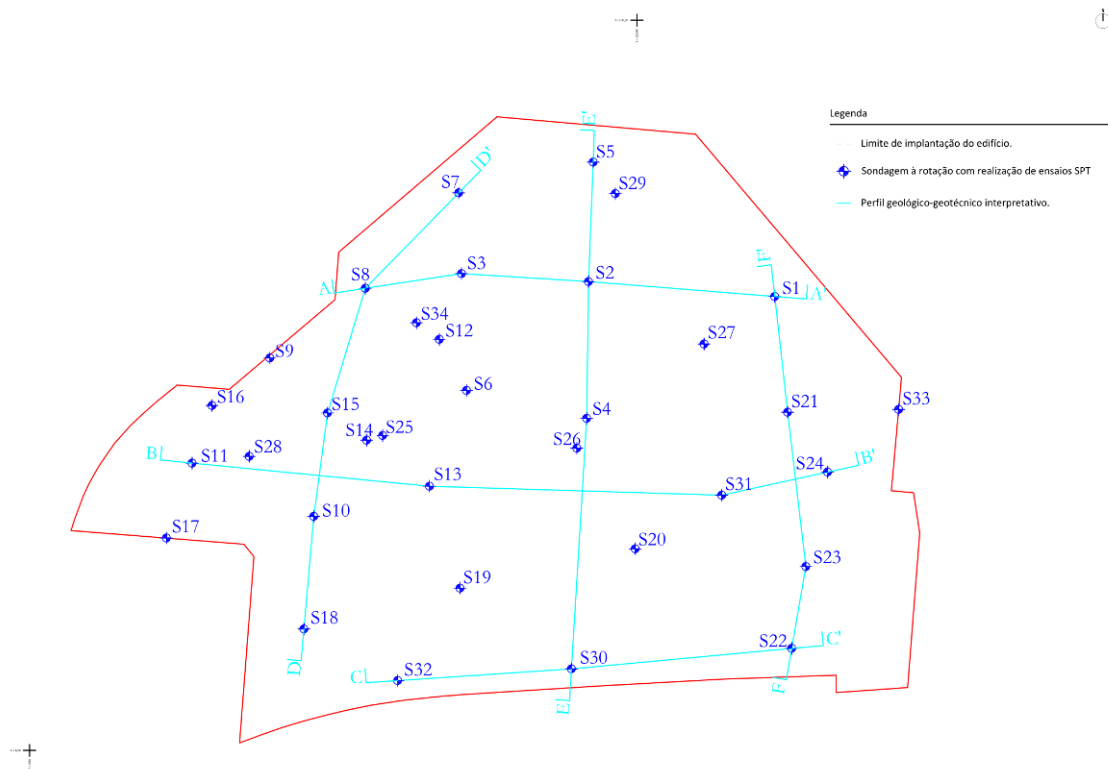


Figura 38 – Planta de implantação dos furos de sondagens e identificação dos perfis geológico-geotécnicos interpretativos.

A interpretação dos perfis automáticos permite que se teçam algumas conclusões. No perfil A-A' (Figura 39), a rocha granítica (ZG1) desenvolve-se ao longo de todo o perfil, embora apenas seja intersetada nas sondagens S8 e S3, reduzindo a espessura da camada ZG2 nas sondagens S2 e S1. O facto da ZG1 ser visível em todo o perfil será resultado da influência das sondagens adjacentes, mostrando assim, que estes perfis são uma repercussão não só das sondagens que o compõem, como da interpretação das sondagens mais próximas. Isto é igualmente observável no perfil B-B' (Figura 40), onde a rocha granítica também se desenvolve ao longo do perfil. Neste perfil é ainda de apontar, que existem zonas interpretadas nas sondagens que não têm representatividade lateral. Acontece na sondagem S13, que a ZG3 a cota inferior não tem continuidade nesta direção.

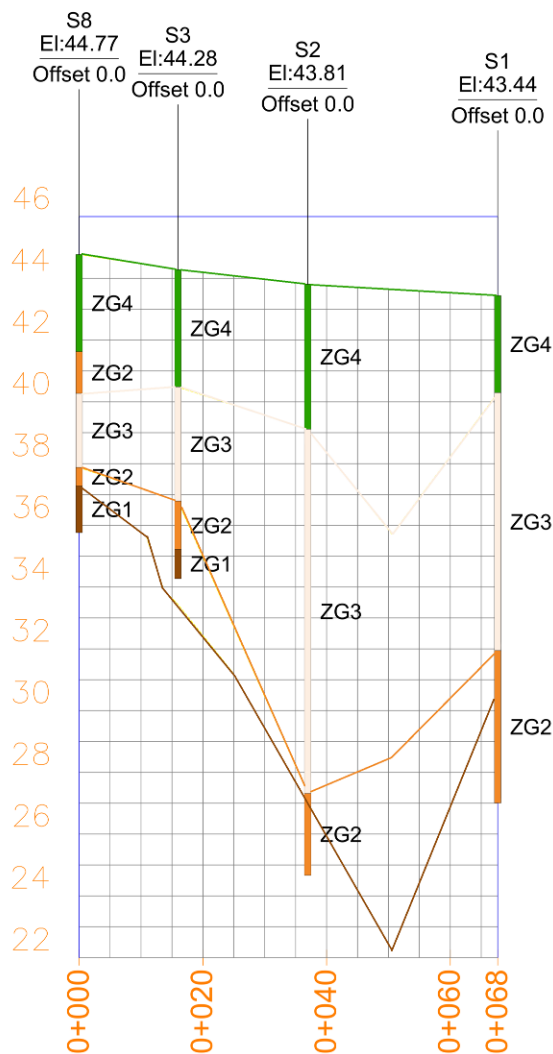


Figura 39 – Perfil geológico-geotécnico A-A'.

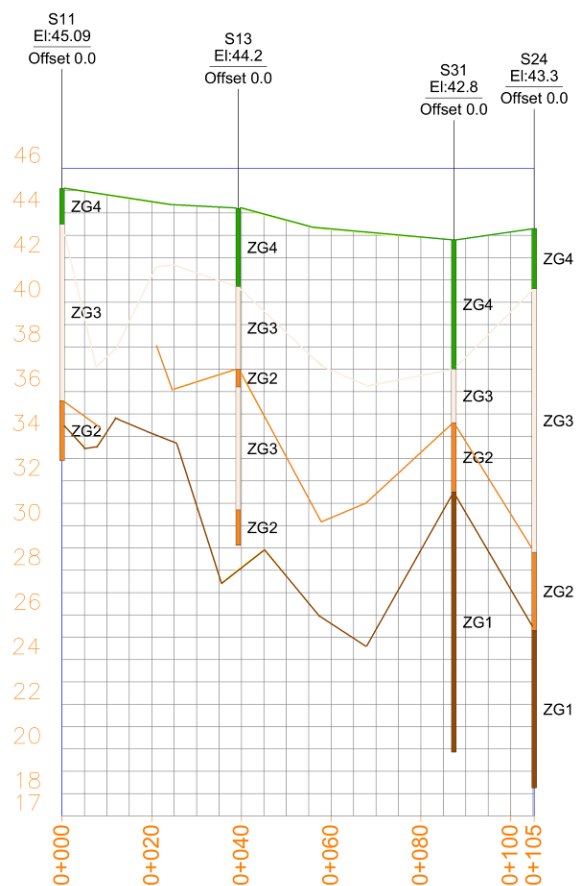


Figura 40 – Perfil geológico-geotécnico B-B'.

No perfil C-C' (Figura 41) é apenas de registar que a ZG3 é cortada pela ZG2, a meio do perfil, em resultado da primeira não ter sido identificada na sondagem S30. Por sua vez, no perfil D-D' (Figura 42) é a ZG1 que surge a cortar a ZG2, próximo da sondagem S10. Também neste perfil a rocha granítica acompanha todo o desenvolvimento do perfil, sendo que no local da S15 está calculado que apenas seja intersetado a uma coata muito inferior, próxima dos 28 m. Quanto ao nível freático fixa-se num intervalo de cotas compreendido entre os 38 m e os 36 m. O perfil E-E' (Figura 43) tem uma interpretação muito semelhante a este último, tal como, o perfil F-F' (Figura 44).

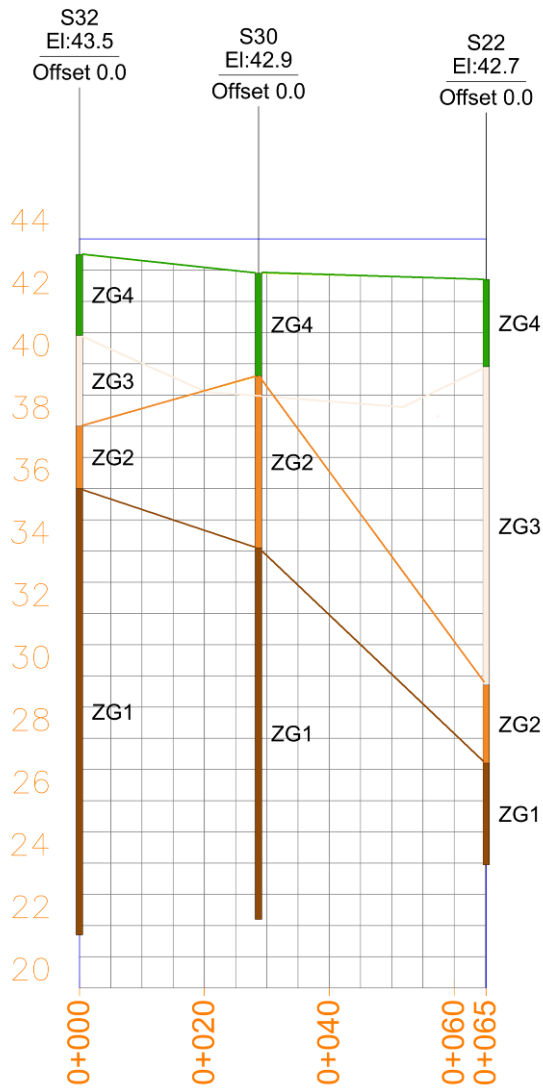


Figura 41 – Perfil geológico-geotécnico C-C'.

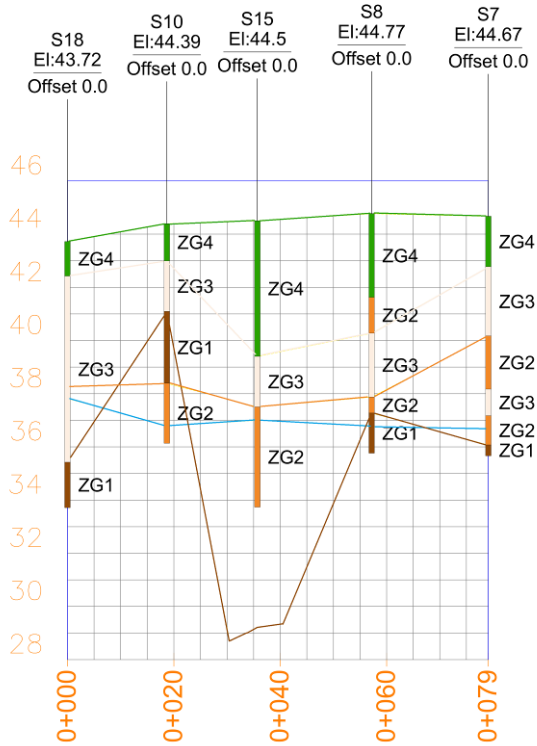


Figura 42 – Perfil geológico-geotécnico D-D'. Linha de cor azul marca o nível freático.

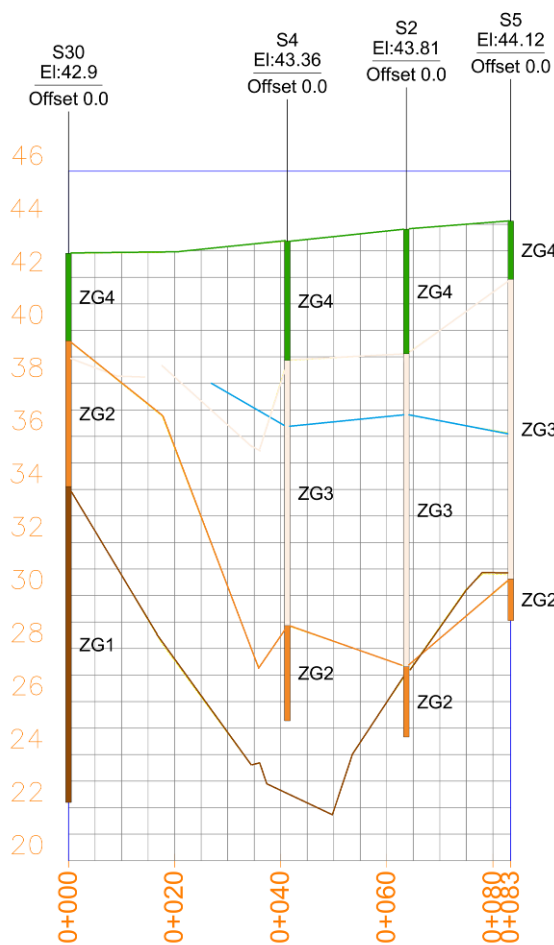


Figura 43 – Perfil geológico-geotécnico E-E'. Linha de cor azul marca o nível freático.

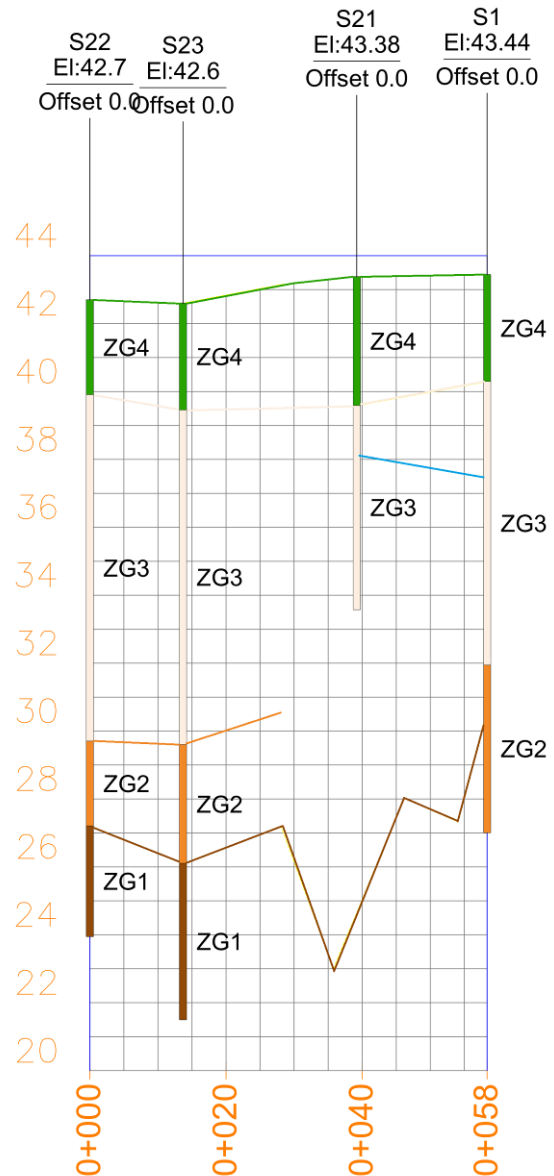


Figura 44 – Perfil geológico-geotécnico F-F'. Linha de cor azul marca o nível freático.

### 6.5. Perfis Geológico-Geotécnico Interpretativos – Método Convencional 2D

Com o objetivo de melhor entender e interpretar o modelo geológico-geotécnico tridimensional, e os respectivos perfis, optou-se por traçar os mesmos seis perfis, porém recorrendo à metodologia convencional. Para o efeito, utilizou-se o mesmo zonamento anteriormente definido. Isto servirá de comparação e avaliação à execução tridimensional de projetos como este. Para

---

uma mais correta comparação, procedeu-se à sobreposição das linhas que definem as transições entre zonas geotécnicas, dos perfis automáticos sobre os perfis pelo método convencional.

Os seis perfis obtidos constituem o Anexo II. Em seguida serão apresentadas duas figuras ilustrativas dos perfis convencionais com a sobreposição das linhas limite dos perfis automático. As restantes figuras elaboradas poderão ser consultadas no respetivo anexo. Estes perfis convencionais, quando comparados com os perfis do modelo tridimensional, genericamente são semelhantes, porém algumas diferenças são notadas. Desde logo, se compreende que os convencionais são um pouco mais pormenorizados, contudo, apresentam-se com diminuta influência dos dados fora do plano. Isto é, as sondagens nas imediações do perfil não traduzem qualquer efeito no mesmo. Tal não acontece nos perfis do modelo, em que estes surgem com grande influência da interpolação das sondagens adjacentes, como foi anteriormente explicado.

No perfil A-A' (Figura 45) convencional a rocha granítica está confinada ao início do perfil, dado que esta não havia sido identificada nas sondagens S2 e S1. Por consequência, a ZG2 acaba por ter maior expressão neste perfil convencional. Confrontando com as linhas dos perfis automáticos, a rocha granítica estende-se por todo o perfil, em resultado da influência das sondagens adjacentes a este. O mesmo acontece no perfil B-B', em que a rocha granítica está mais confinada. Neste perfil percebe-se ainda, que a interpretação à sondagem S13 é um pouco diferente. A maior capacidade dos perfis convencionais em pormenorizar, acaba por definir melhor o desenrolar do maciço rochoso neste caso em concreto, definindo uma zona pontual para a ZG2.

O perfil C-C' (Figura 46) é em tudo semelhante nos dois métodos, tal como demonstram as linhas limite entre zonas geotécnicas. Aponta-se, apenas, entre as sondagens S30 e S22, que a ZG3 é um pouco mais prolongada no perfil automático, consequência de uma interpolação com um maior número de pontos. Por outro lado, o final do perfil D-D' apresenta-se com uma interpretação diferente para as sondagens S8 e S7. O perfil E-E' é também ele muito semelhante em ambos os métodos. Contudo, na sondagem S5, no perfil do modelo percebe-se que esta é intersetada pela ZG1 fruto da influência lateral que estes perfis permitem. Por fim, no perfil F-F' é visível uma outra diferença entre métodos, enquanto o perfil automático faz uma extrapolação dos dados no local da sondagem S21, dado ser mais curta que as restantes, no perfil convencional esta não é realizada.

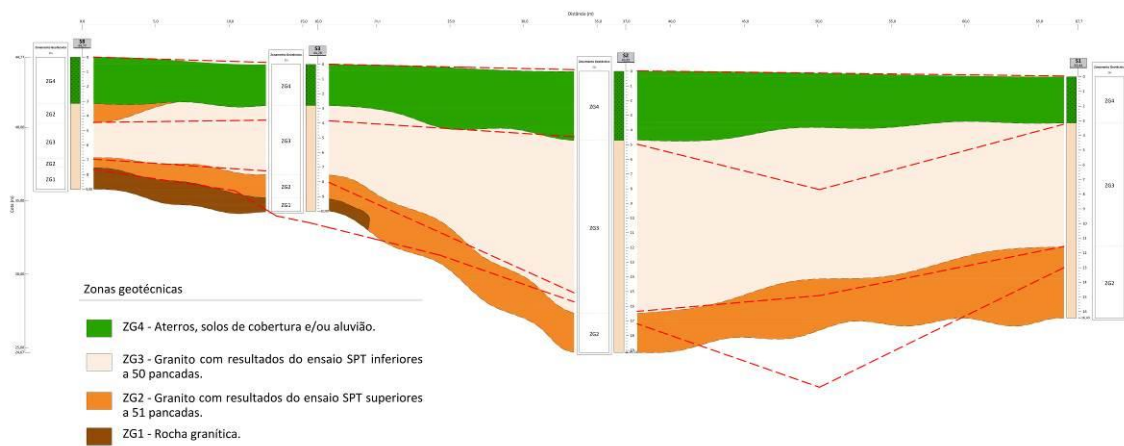


Figura 45 – Perfil A-A' pelo método convencional. Linhas a cor vermelha, representam os limites entre zonas geotécnicas do respetivo perfil automático.

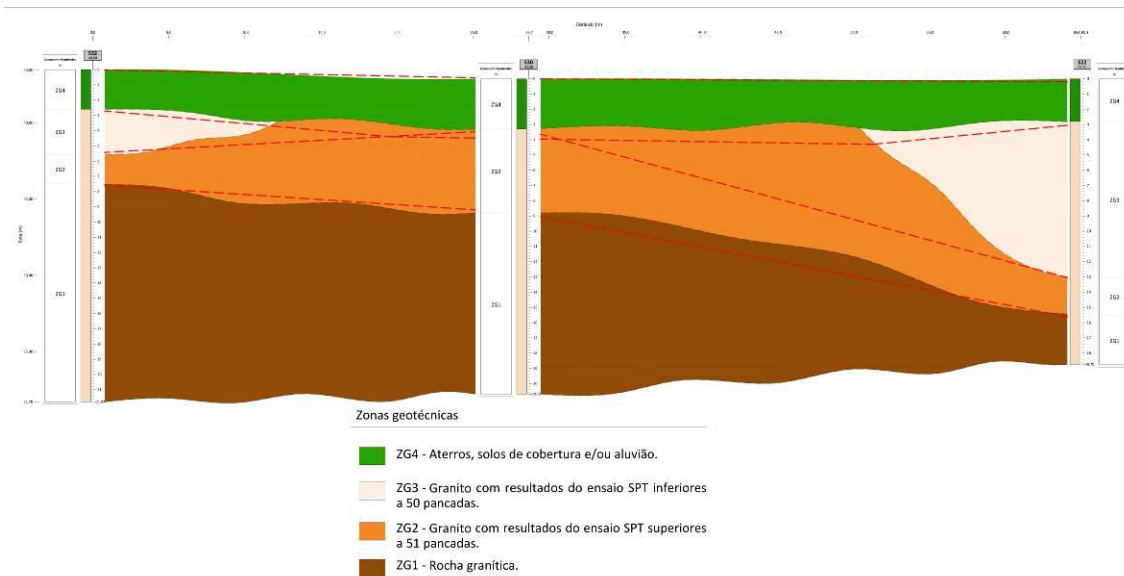


Figura 46 – Perfil C-C' pelo método convencional. Linhas a cor vermelha, representam os limites entre zonas geotécnicas do respetivo perfil automático.

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo VII**

### **Conclusões**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 7. Conclusões

### 7.1. Considerações Finais

A metodologia aplicada e os resultados obtidos permitiram compreender a enorme mais-valia dos modelos tridimensionais na caracterização geológico-geotécnica de locais de construção. Demonstrou-se, que projetos desenvolvidos assentes em modelos deste tipo, apresentam uma maior fiabilidade podendo-se antecipar potenciais complicações com o dimensionamento das fundações da estrutura a construir, da escavação, da contenção ou do aterro. Os projetos são mais rigorosos, avançando com menos incertezas e reduzindo o risco de incorrer em paragens forçadas por condições insatisfatórias não previstas. Economicamente, consegue-se diminuir os custos totais de projeto. Tudo isto terá especial efeito em projetos complexos, onde se potencializa as capacidades dos modelos tridimensional no auxílio à compreensão, tanto da geometria do projeto, como das condições geológico-geotécnicas do local.

A metodologia apresentada revelou-se simples e intuitiva, conseguindo-se facilmente colocá-la em prática. As faculdades do *software* Autodesk Civil 3D, com o recurso à extensão Geotechnical Modeler, permitem que a execução do modelo seja praticamente automática após a inserção dos dados. O mesmo permite ao operador que edite e corrija eventuais erros na interpretação automática do modelo. A metodologia foi também desenvolvida com o intuito de ser possível a qualquer momento adicionar nova informação, resultante de novas campanhas de prospeção, ou mesmo, durante o desenrolar da construção ou mesmo na fase de serviço. Desta forma, tem-se um modelo ativo, em constante atualização, conseguindo-se aumentar o rigor do mesmo com o avançar dos trabalhos.

Os resultados obtidos pela aplicação prática confirmaram todas estas valências dos modelos tridimensionais. A interpretação geológico-geotécnica do modelo tridimensional é muito bem conseguida, quando em comparação direta com o método tradicional. O confronto entre perfis permitiu concluir que os de origem automática têm em conta a interpretação 3D realizada, sendo assim, um reflexo das 3 direções que compõem o modelo. Por outro lado, nos perfis convencionais, não se observa a influência das sondagens adjacentes ao plano de análise. Assim, concluiu-se que os modelos 3D apresentam-se com maior rigor, fruto de um maior alcance dos dados, onde a interpolação resulta da combinação de todos os dados disponíveis.

As figuras seguintes, ilustram o modelo após a escavação das caves do edifício projetado. Desta forma, responde-se ao principal objetivo do caso de estudo apresentado, compreender como a escavação para as caves do edifício interage com o subsolo local. A execução destes modelos de

---

escavação, demonstram mais uma das grandes versatilidades da metodologia proposta. Na Figura 47, observa-se a complexa geometria de escavação, bem como, o fundo da mesma. O fundo da escavação encontra-se à cota de 31,8 m, tal como, está definido pelo projeto do edifício a construir. A sua observação permite concluir que este é dominado pela rocha granítica, representada pela Zona Geológico-Geotécnica 1. Por sua vez, o fundo de escavação na parte oriental consistirá num granito mais alterado, de menor qualidade geotécnica, representado pela Zona Geológico-Geotécnica 2. Isto importa no ponto de vista das fundações, indicando uma clara distinção nas condições das mesmas nas partes ocidentais e orientais do edifício.

Nas Figuras 48, 49, 50 e 51, ilustram-se as principais vistas do modelo, que concernem maiores singularidades. Optou-se por identificar o fundo de implantação do edifício a cor cinzento-clara, para mais facilmente se concluir quais as superfícies intersectadas. De um modo geral, a Zona Geológico-Geotécnica 3 desenvolve-se abaixo da camada de aterro e solos de cobertura, com diferentes espessuras. Pelas vistas de Norte e Sul, percebe-se que a ZG3 é mais significativa na parte oriental do modelo, onde se regista a rocha granítica a profundidades superiores. A vista de Este, corrobora estas mesmas afirmações. Nesta mesma vista, é visível que a ZG2 praticamente não tem expressão. Por outro lado, a ZG1 tem grande importância ao centro da vista, desenvolvendo-se até próximo da superfície, cortando a ZG3. Com efeito, o modelo elaborado identifica competentemente, que as contenções a desenvolver para este local devem antever um solo granítico de muito fraca qualidade, com a particularidade da existência de massas rochosos, com dimensões bastante significativas. As vistas Noroeste e, a parte oeste da Sul, mostram que parte da escavação acontecerá em meio rochoso. Nesta parte ocidental do modelo, a ZG3 tem menor expressão, e mesmo a ZG2 apresenta com pouca espessura. Posto isto, revela-se que também as soluções de contenção, para uma maior otimização, terão necessariamente de ser distintas. Todas estas afirmações prestadas são ilustradas nos perfis geológico-geotécnico executados automaticamente a partir do modelo 3D.

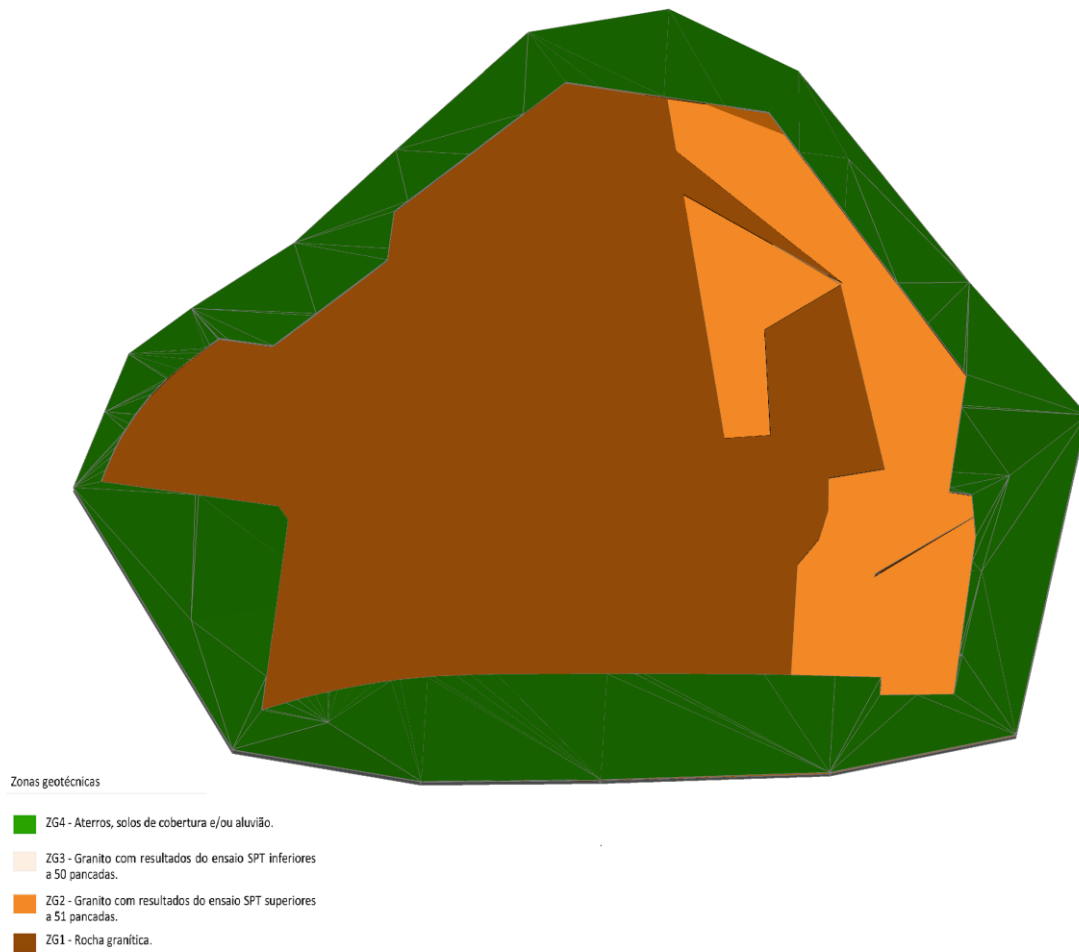
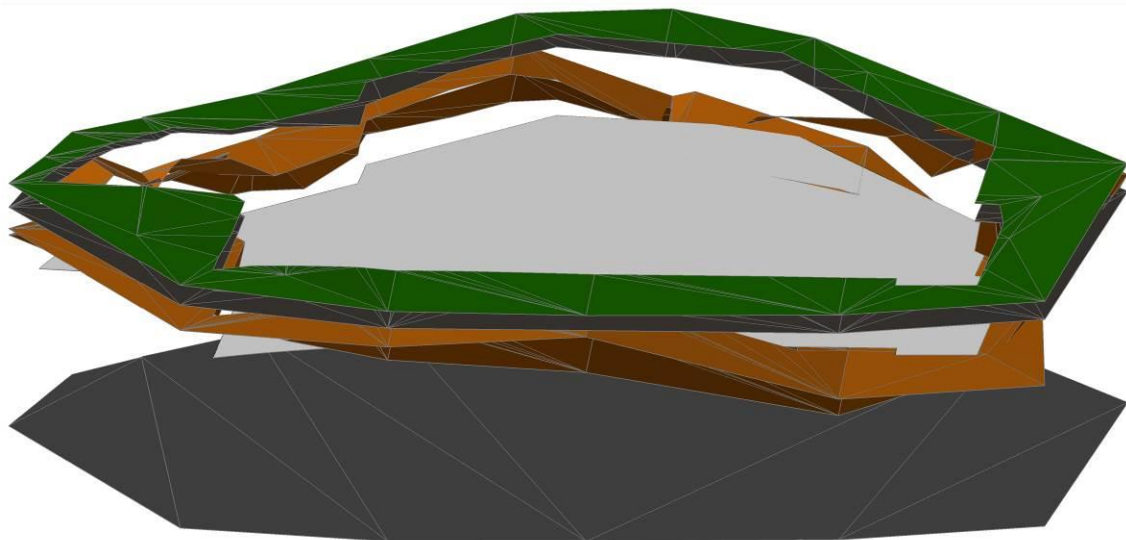


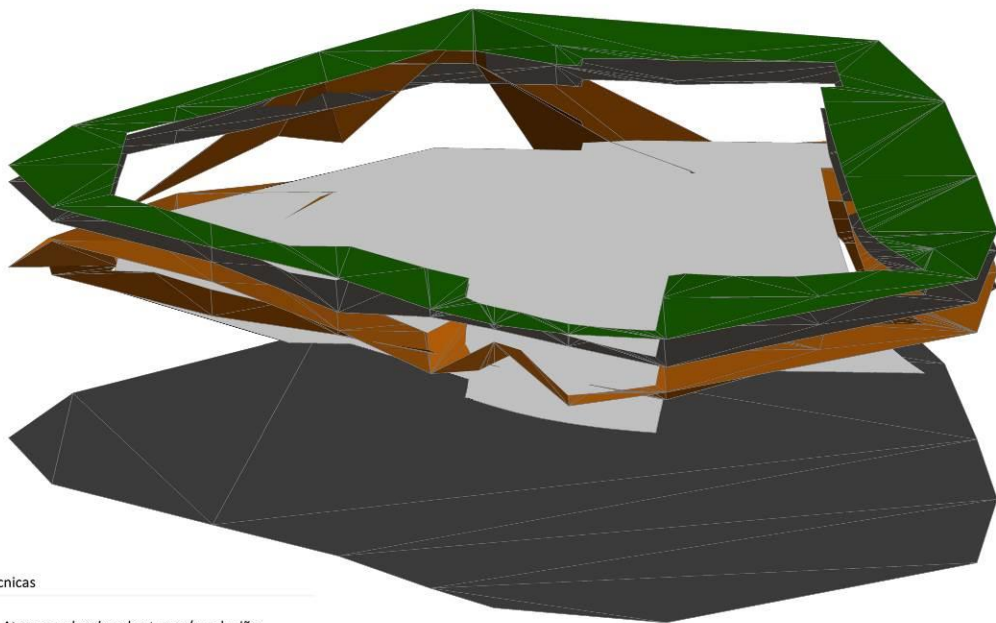
Figura 47 – Modelo 3D escavado. Vista de planta. Fundo de escavação marcado pela presença das zonas geológico-geotécnicas, ZG1 à direita e ZG2 à esquerda.



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

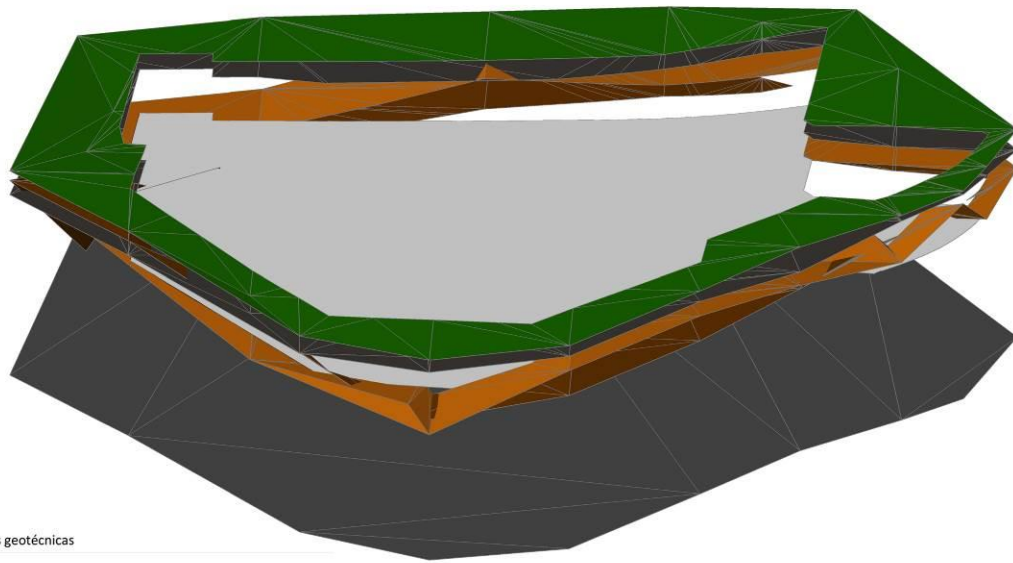
Figura 48 – Modelo 3D escavado. Vista Norte. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara.



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

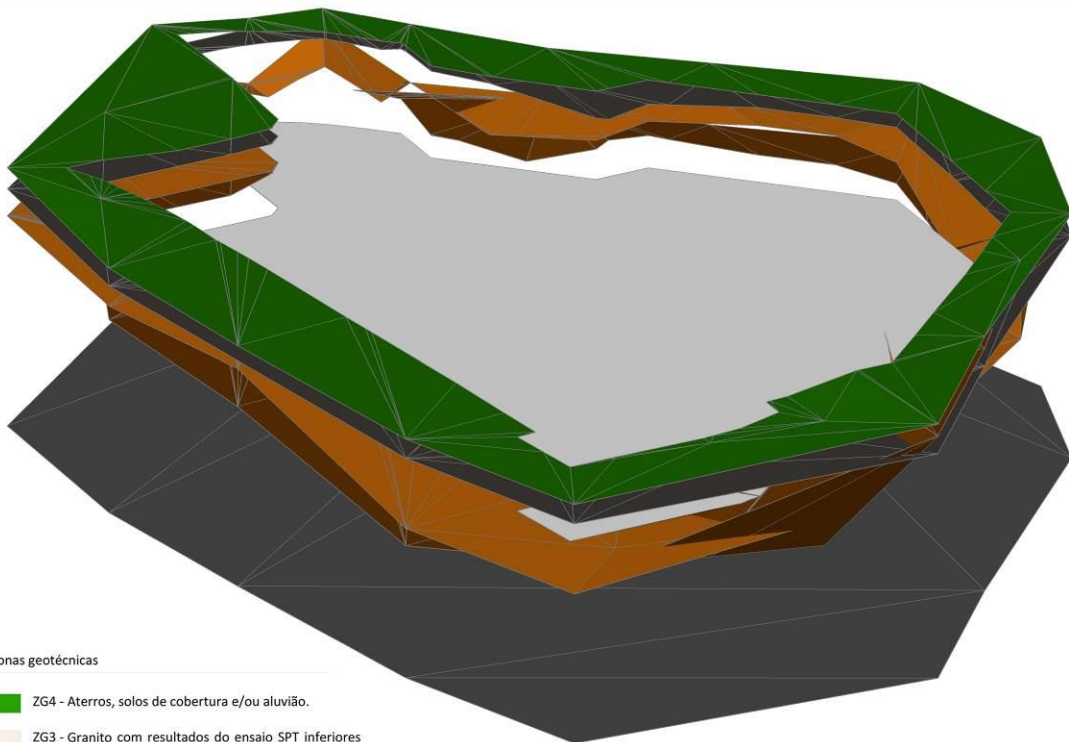
Figura 49 – Modelo 3D escavado. Vista Este. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara.



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

Figura 50 – Modelo 3D escavado. Vista Sul. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara.



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

Figura 51 – Modelo 3D escavado. Vista Noroeste. Cota de implantação do futuro edifício, identificada pela superfície de cor cinzento-clara.

---

Na Tabela 13 apresentam-se os volumes totais, em metros cúbicos, de escavação calculados para a implantação do edifício. Observando-se os resultados, verifica-se que a ZG3 será a zona que maior volume terá escavado, seguindo-se a ZG2 e a ZG1, respetivamente. A ZG4 terá menor volume de escavação, uma vez que será também a camada de menor espessura, correspondendo apenas ao aterro, terra vegetal e aluvião.

Tabela 13 – Volumes totais estimados de escavação, nas várias zonas geológico-geotécnicas.

<b>Zona Geológico-Geotécnica</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
ZG4	9069
ZG3	73552
ZG2	16427
ZG1	10714
<b>Total</b>	<b>109762</b>

Na fase de escavação, e conseqüente fase construtiva, o nível freático constitui uma grande preocupação para os projetistas. Com a metodologia desenvolvida é, também possível, a observação do comportamento deste no subsolo. As Figuras 52 e 53 ilustram a presença do nível freático no terreno e a sua interação com o edifício do caso de estudo. Verifica-se que este nível é superior à cota de implantação do edifício, cerca de 5 m, pelo que o projeto deverá antever, para o efeito, eficazes soluções construtivas, por exemplo, através do rebaixamento do nível freático e impermeabilização do ensoleiramento do respetivo edifício.

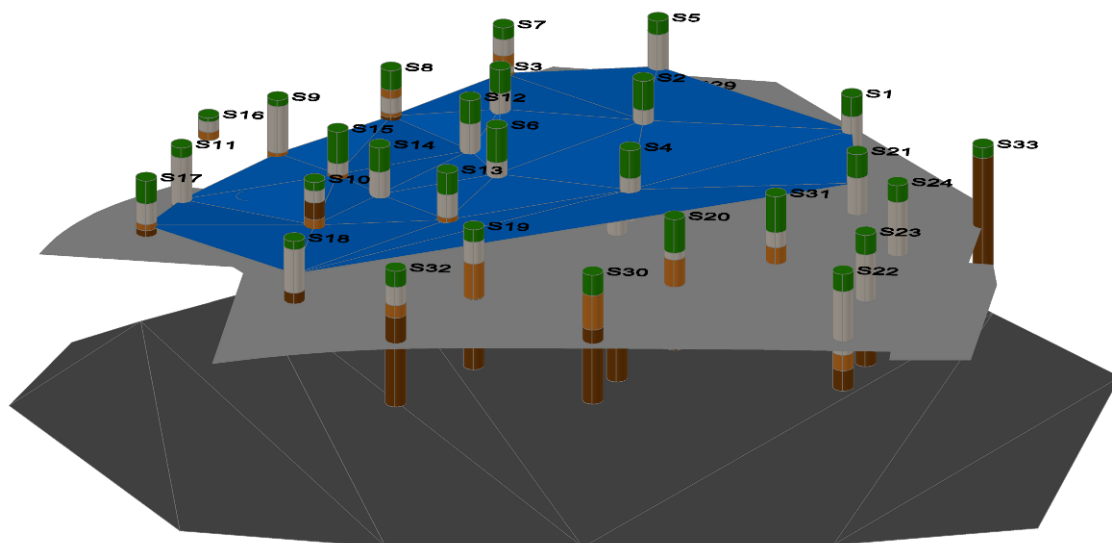


Figura 52 – Nível freático (Superfície Azul) é superior à cota de implantação do edifício proposto (Superfície Cinzenta).

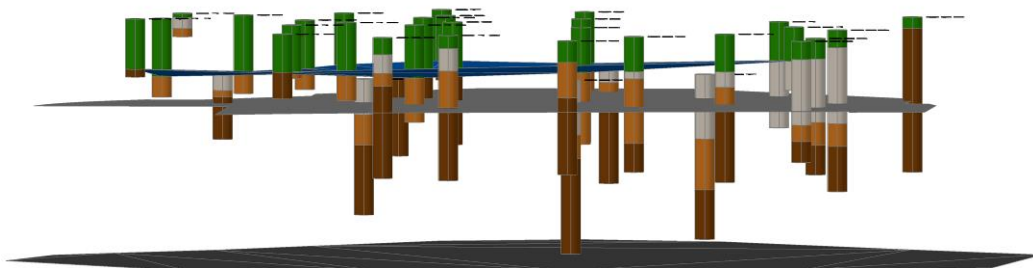


Figura 53 – Nível freático (Superfície Azul) acima da cota de implantação do edifício projetado (Superfície Cinzenta).

As numerosas vantagens desta metodologia superam largamente as limitações da mesma. O investimento inicial para este tipo de projeto pode ser elevado, sobretudo na requisição da licença do *software*. A necessidade de recursos humanos especializados, e a contínua formação dos mesmos, poderão aumentar os custos. Todas as informações recolhidas, tanto durante a campanha de prospeção como durante a fase construtiva, devem ser corretamente arquivadas, mantendo a padronização dos dados. Isto implica, que os operadores possuam uma correta formação. De uma forma geral, o tempo de produção de um modelo deste tipo também é elevado. Contudo, o seu longo alcance permite que estas desvantagens se diluam no desenrolar de todo o projeto.

---

Como nota final, importa salientar a forte contribuição humana para a elaboração de modelos deste tipo. Embora a metodologia proponha uma execução praticamente automática, ao longo de todo o trabalho, compreende-se a necessidade de uma sensibilidade geotécnica na interpretação e realização de pequenos ajustes.

## **7.2. Perspetivas Futuras**

O continuo desenvolvimento da metodologia é um dos grandes objetivos para o futuro. Devendo-se procurar simplificar e facilitar a incorporação dos dados no modelo, automatizando ainda mais a sua execução. Para o efeito, poder-se-á recorrer a uma extensão disponível no Autodesk Civil 3D denominada por Dynamo. Esta é uma extensão de programação, que permite ao utilizador criar um plano de operações que se repetem espontaneamente com a adição de novos dados ao projeto. Deste jeito, consegue-se um modelo em constante e automática atualização.

A realização de uma campanha de prospeção complementar ou, à vista de tal, recorrer a dados de sondagem executadas na envolvente do projeto permitiria reduzir a extrapolação de dados, contribuindo para um mais alto grau de pormenorização. Isto ganha especial importância no dimensionamento e definição da natureza das contenções. Uma vez que o projeto de estudo já está concluído, seria importante tentar saber junto da empresa construtora, quais foram as dificuldades geotécnicas encontradas. Poder-se-ia, desta forma, perceber se o modelo gerado traduziu, de alguma forma, estas mesmas contrariedades.

A utilização de dados geofísicos poderá ser uma enorme mais-valia, contribuindo para mais facilmente se conseguirem identificar as transições entre zonas geotécnicas. Será de grande interesse conseguir-se elaborar um modelo que combine tanto os dados das campanhas de prospeção mecânica como os da geofísica. Seguindo esta prática, será possível a geração de modelos com um mais significativo volume de dados, acrescentando rigor e detalhe ao mesmo.

---

## **Capítulo VIII**

### **Referências bibliográficas**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## Referências bibliográficas

- Aprile F., Sbrana A., Toccaceli R. M., 2004. Il ruolo dei depositi piroclastici nell'analisi cronostratigrafica dei terreni quaternari del sottosuolo della Piana Campana (Italia meridionale). *Il Quaternario* 17:547–554
- A.S.T.M. (1988). Rock classification systems for engineering purposes. American Society for Testing and Materials.
- A.S.T.M. D5878-19, 2019. Standard Guides for Using Rock-Mass Classification Systems for Engineering Purposes. Washington, D.C.
- Azaronak, N., 2015. Building 3D models from geotechnical data. Master of Science Thesis in Geoinformatics TRITA-GIT EX 15-010. School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm, Sweden.
- Baynes F.J., Parry S., Novotny J.N., 2020. Engineering geological models, projects and geotechnical risk. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 54.
- Brancaccio L., Cinque A., Romano P., Roskopf C., Russo F., Santangelo N., 1995. L'evoluzione delle pianure costiere della Campania: geomorfologia e neotettonica. *Mem. Soc. Geol. It.* 53:313–336
- Carrington da Costa, J., Teixeira, C. 1957. Notícia explicativa da Folha 9-C Porto da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Chia, k., Koo, C., Lau, H., Lee, M., 2021. A Case Study of Building Information Modelling (BIM) for subsurface in Malaysia. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 1144(1):012073.
- Cintra, J.C.A.; Aoki, N.; Albiero, J.H., 2003. *Tensão Admissível em Fundações Diretas*. São Carlos: Rima Editora.
- Culshaw M.G., 2005. From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface. *J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 38:231–284.
- Decourt, L., Muromachi, T., Nixon, I., Schmertmann, J., Thorburn, S., Zolkov, E., 1988. Standard Penetration Test: International Reference Test Procedure. 1<sup>st</sup> International Symposium on Penetration Test, ISOPT-1. Orlando.
- Deere, D., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1):16-22.
- Duncan, J.M. 2000. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4): 307-316.

- 
- Folque, J., 1987. Introdução à mecânica dos solos. LNEC, Lisboa.
- Ippolito F., Ortolani F., Russo M., 1973. Struttura marginale tirrenica dell'Appennino campano: reinterpretazione di dati di antiche ricerche di idrocarburi. Mem. Soc. Geol. It.,12:227–249.
- Karsten F. K., Robert O., Rolando D. P., Brian H., 2008. A three-dimensional insight into the Mackenzie Basin (Canada): implications for the thermal history and hydrocarbon generation potential of Tertiary deltaic sequences. AAPG Bull., 92:225–247.
- ISRM, 1981. Suggested Methods for the Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM Commission on Testing Methods, Pergamon Press, Oxford.
- Kostic B., Suess M., Aigner T., 2007. Three-dimensional sedimentary architecture of Quaternary sand and gravel resources: a case study of economic sedimentology (SW Germany). Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), 96:743–767.
- Lelliott M., Bridge D., Kessler H., Price S., Seymour K., 2006. The application of 3D geological modeling to aquifer recharge assessments in an urban environment. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol., 39:293–302.
- Lelliott M., Cave M., Wealthall G., 2009. A structured approach to the measurement of uncertainty in 3D geological models. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol., 42:95–106.
- Matos Fernandes, M., 2015. Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica. FEUP Edições. Vol. 2, 2a Edição.
- Meyerhof, G. G. 1956. Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. JSMFD, ASCE, vol. 82 No. SM1, pp. 866-1-866-19.
- MicroStation CONNECT Edition, 2022. Design, Model, and Manage Infrastructure. Product Data Sheet. Bentley Advancing Infrastructure. Bentley Systems, Incorporated.
- Morin, G., 2015. Modeling Complex Geology in AutoCAD Civil 3D. Autodesk University.
- Morin, G., Deaton, S., Chandler, R., Miles, S., Mice, C., 2017. Silvertown Tunnel, London, England—A Case Study Applying BIM Principles to the Geotechnical Process. Geotechnical Frontiers. GSP 277.
- NP EN 1997-1 - Eurocódigo 7 - Projeto geotécnico, Parte 1: Regras gerais. Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2010.
- NP EN 1997-2 - Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing. Caparica: European Committee for Standardization, 2007.

---

Ortolani F., Aprile F., 1985. Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana. *Boll. Soc. Geol. It.*, 104:195–206.

Pavlovic, N., 2006. Geotechnical zonation – principles, criteria, and procedures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. V. 21 pp. 228.

Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H., 1974. *Foundation Engineering*. John Wiley & Sons, 514p.

Petrone, P., Allocca, V., Fusco, F., 2023. Engineering geological 3D modeling and geotechnical characterization in the framework of technical rules for geotechnical design: the case study of the Nola's logistic plant (southern Italy). *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 82:12.

Phoon, K.-K., Kulhawy, F. H., Grigoriu, M. D., 1995. *Reliability-Based Design of Foundations for Transmission Line Structures*. Report TR-105000, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

Robins N., Davies J., Dumpleton S., 2008. Groundwater flow in the south Wales coalfield: historical data informing 3D modeling. *Q J Eng Geol Hydrogeol* 41:477–486.

Romano P., Santo A., Voltaggio M., 1994. L'evoluzione geomorfologica della pianura del Fiume Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene medio-superiore-Olocene). *Il Quaternario* 7:41–56.

Rose G., Kirk P., Gibbons C., Lander A., 2018. Three dimensional geological models in ground engineering: when to use, how to build and review, benefits and potential pitfalls. *Australian Geomechanics* 53(3):79–88

Royse K. R., Rutter H. K., Entwisle D.C., 2009. Property attribution of 3D geological models in the Thames Gateway, London: new ways of visualising geoscientific information. *Bull Eng Geol Environ* 68:1–16.

Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, T. E., Zettler, T. E., FHWAIF-02-034, 2002, Evaluation of soil and rock properties, *Geotechnical Engineering Circular No. 5*.

Senanayake, A., Chandler, R., Daly, T., 2021. *AGS Python Library*. GitLab.

Sibaii, M. E., Marques, C., Bidarra, L., Azenha, M., 2020. Rumo à modelação eficiente de parâmetros geotécnicos em BIM. 3º Congresso Português de *Building Information Modelling – ptBIM 2020*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Skempton, A. W., 1986. Standard Penetration Test Procedures and the Effect in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Over-Consolidation. *Géotechnique*, 36:425-447.

---

Terzaghi, K. and Peck, R.B. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley.

The Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists (AGS), (2022). Electronic Transfer of Geotechnical and Geoenvironmental Data. Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists (AGS). Edition 4.1.1. Reino Unido.

Thierry P., Prunier-Leparmentier A., Lembezat C., Vanoudheusden E., Vernous J., 2009. 3D geological modeling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: the Paris example (France). Eng Geol 105:51–64.

Wang L., Zheng Z., Zhu H., 2021. Construction and application of 3D model of engineering geology. International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence, Applications and Techniques in Cyber Intelligence (ATCI 2021) 2:512–518.

Washington State Department of Transportation, (2022). Geotechnical Design Manual. Materials Laboratory, Engineering and Regional Operations. M 46-03.16. Cap.5.

Webber, S., Kijek, k., 2022. Applying 3D Geological Modelling Techniques to Geotechnical Engineering Problems – Advantages, Pitfalls, and “Getting the Geology Right”. NZGS/AGS 14 YGP Conference. Rotorua, New Zealand.

Whiteman B.D., 2021. 3D ground modelling: geotechnical investigation for dolphin replacement and jetty strengthening at Cape Lambert A (CLA). Good grounds for the future. NZGS Symposium, Dunedin.

Wyllie, D.C., 1999. Foundations on Rock. Routledge, New York, N.Y., 401 pp.

### **Sítios da Internet**

Chandler, R., (2022). How Open Ground is helping CMW Geosciences improve analysis, be more competitive, and increase value. Blog Virtuosity. [https://blog.virtuosity.com/how-openground-is-helping-cmw-geosciences-improve-analysis-be-more-competitive-and-increase-value?utm\\_source=geoengineer&utm\\_medium=affiliate&utm\\_campaign=openground&utm\\_content=cmw](https://blog.virtuosity.com/how-openground-is-helping-cmw-geosciences-improve-analysis-be-more-competitive-and-increase-value?utm_source=geoengineer&utm_medium=affiliate&utm_campaign=openground&utm_content=cmw) (Consultado: 16 de setembro de 2023)

Esri-Portugal 2023. ArcGIS Pro. SIG de próxima geração para Desktop. <https://www.esri-portugal.pt/pt-pt/arcgis/produtos/arcgis-pro/overview> (Consultado: 04 de junho de 2023)

Robson, R., 2004. Reusable Learning - Enabling the Reuse of Learning Content. <http://www.reusablelearning.org/index.asp?id=28>

RockWare, 2023. RockWorks. RockWare, Inc. <https://www.rockware.com/product/rockworks/> (Consultado: 04 de junho de 2023)

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Anexos**

---

Anexo I – Planta dos Trabalhos de Prospecção

Anexo II – Perfis Convencionais

Anexo III – Furos de Sondagem: Classificação Litológica

Anexo IV – Zonamento Geológico-Geotécnico

Anexo V – Modelo Geológico-Geotécnico 3D

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Anexo I – Planta dos Trabalhos de Prospecção**

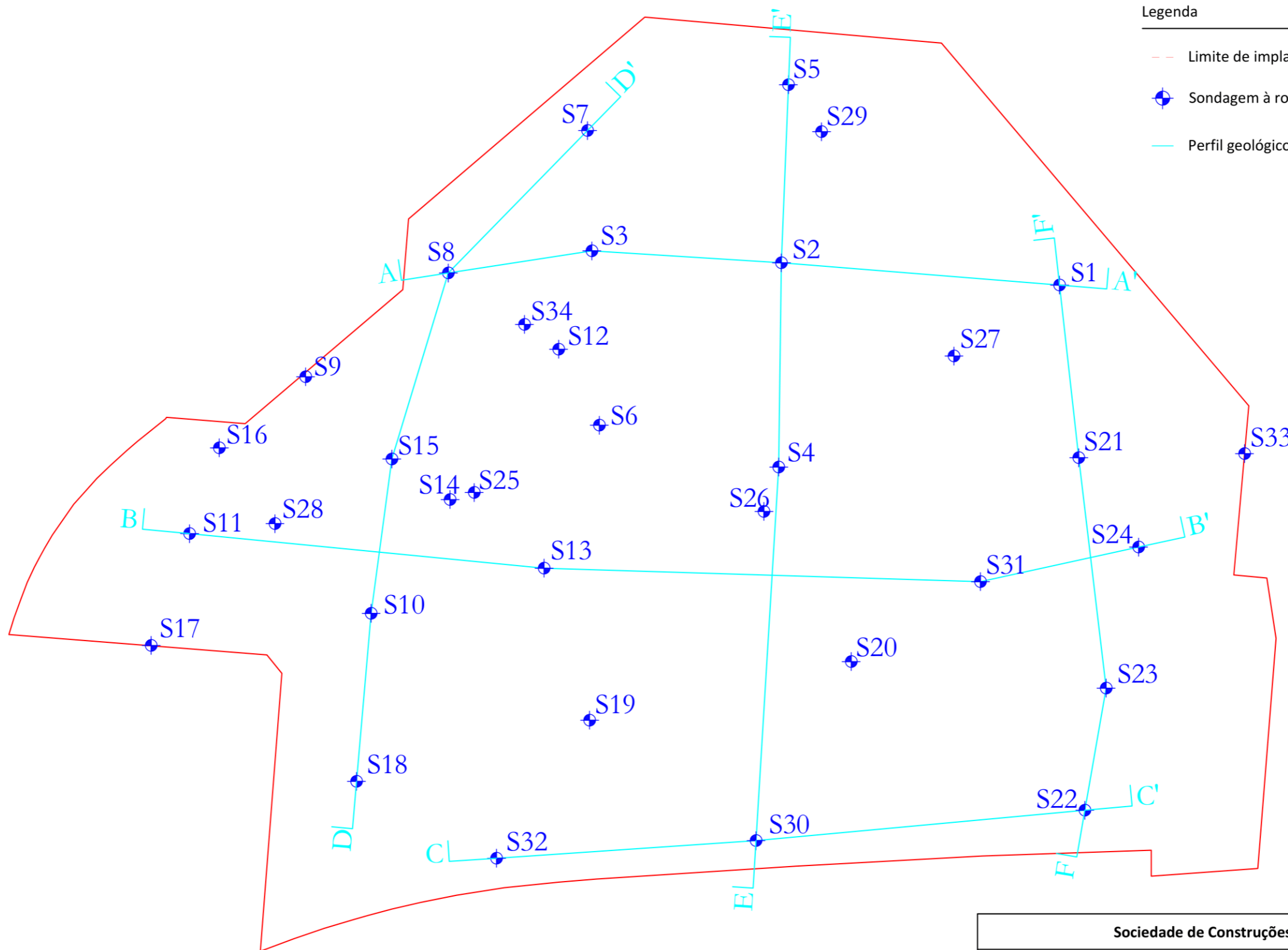
---

x = 100,00  
y = 100,00



Legenda

- Limite de implantação do edifício.
- Sondagem à rotação com realização de ensaios SPT
- Perfil geológico-geotécnico interpretativo.



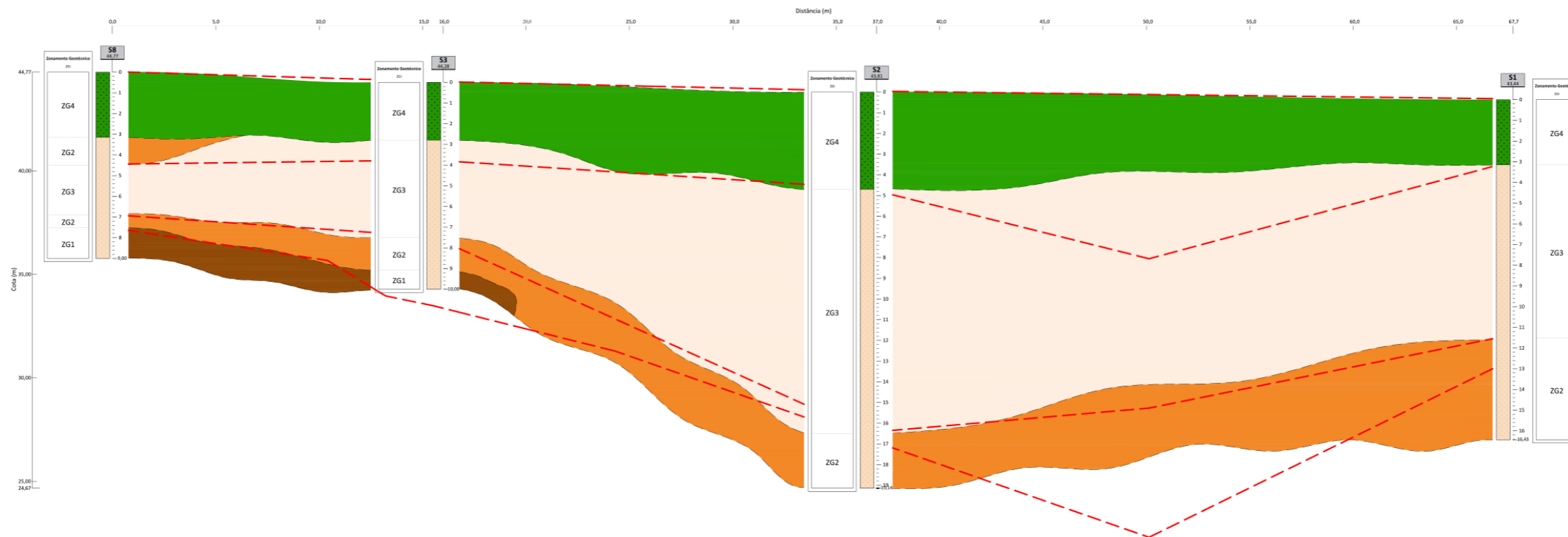
x = 0,00  
y = 0,00

<b>Sociedade de Construções Soares da Costa S.A.</b>		
SOARTA - Terreno situado na Praça do Bom Sucesso - Porto		
Planta geral com localização das sondagens geotécnicas		
Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:500
Pavimento térreo - Cota de pronto	31,8 m	

---

## **Anexo II – Perfis Convencionais**

---



### Simbologia

#### Holocénico-Recente:

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

#### Hercínico:

( $\gamma_m$ ) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

#### Zonas geotécnicas

ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.

ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.

ZG1 - Rocha granítica.

### Legenda

Si (cota)

Sondagem à rotação com realização de ensaios SPT.

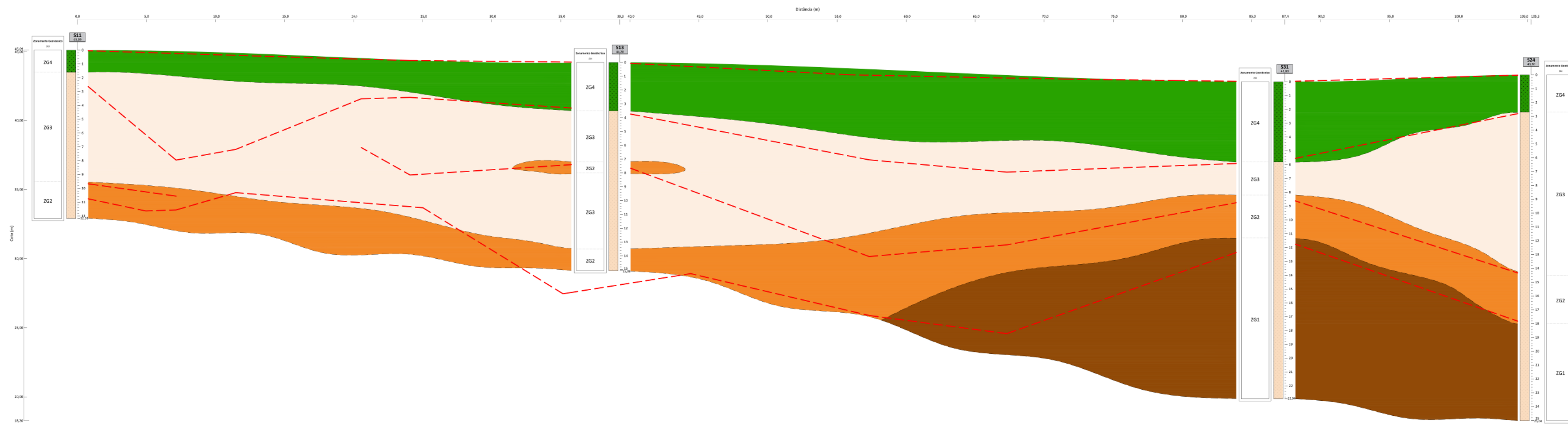
Possível limite geotécnico (interpretação, tendo por base a amostragem disponível).

Possível limite geotécnico (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

Nível freático (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

### Perfil geológico-geotécnico A-A'

Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:250



### Simbologia

#### Holocénico-Recente:

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

#### Hercínico:

( $\gamma_m$ ) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

#### Zonas geotécnicas

ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.

ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.

ZG1 - Rocha granítica.

### Legenda

S<sub>i</sub> (cota) Sondagem à rotação com realização de ensaios SPT.

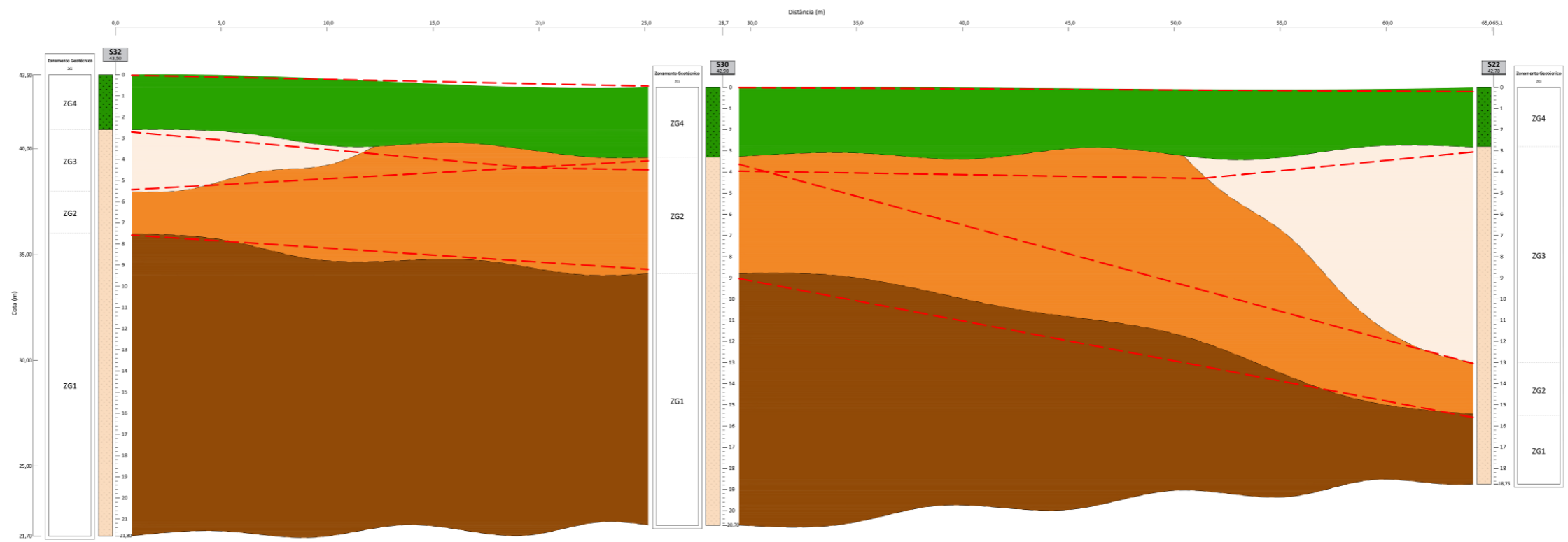
Possível limite geotécnico (interpretação, tendo por base a amostragem disponível).

Possível limite geotécnico (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

Nível freático (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

### Perfil geológico-geotécnico A-A'

Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:250



### Simbologia

#### Holocénico-Recente:

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

#### Hercínico:

( $\gamma_m$ ) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

#### Zonas geotécnicas

ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.

ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.

ZG1 - Rocha granítica.

### Legenda

Si  
(cota)

Sondagem à rotação com realização de ensaios SPT.

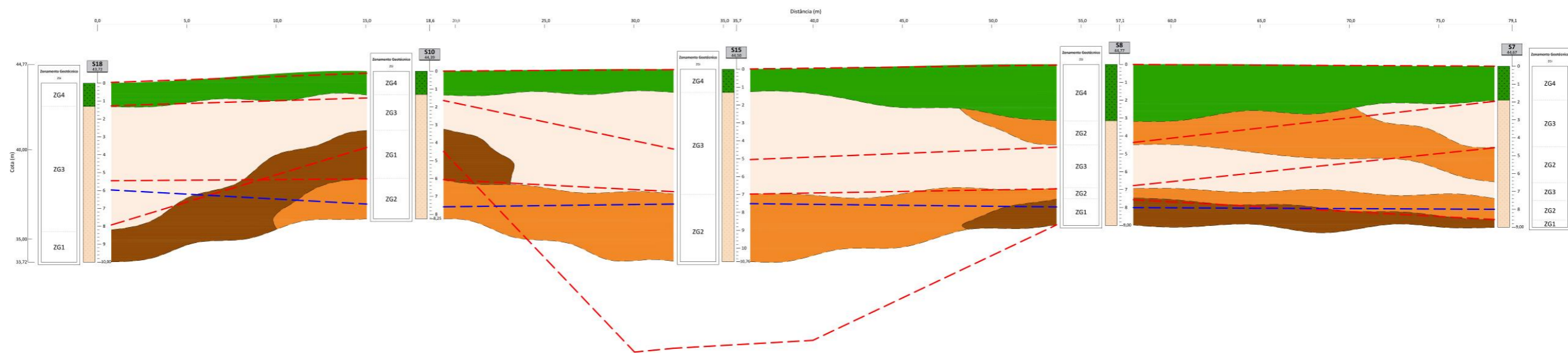
Possível limite geotécnico (interpretação, tendo por base a amostragem disponível).

Possível limite geotécnico (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

Nível freático (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

### Perfil geológico-geotécnico A-A'

Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:250



### Simbologia

Holocénico-Recente:

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

Hercínico:

( $\gamma_m$ ) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

Zonas geotécnicas

ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.

ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.

ZG1 - Rocha granítica.

### Legenda

Si (cota) Sondagem à rotação com realização de ensaios SPT.

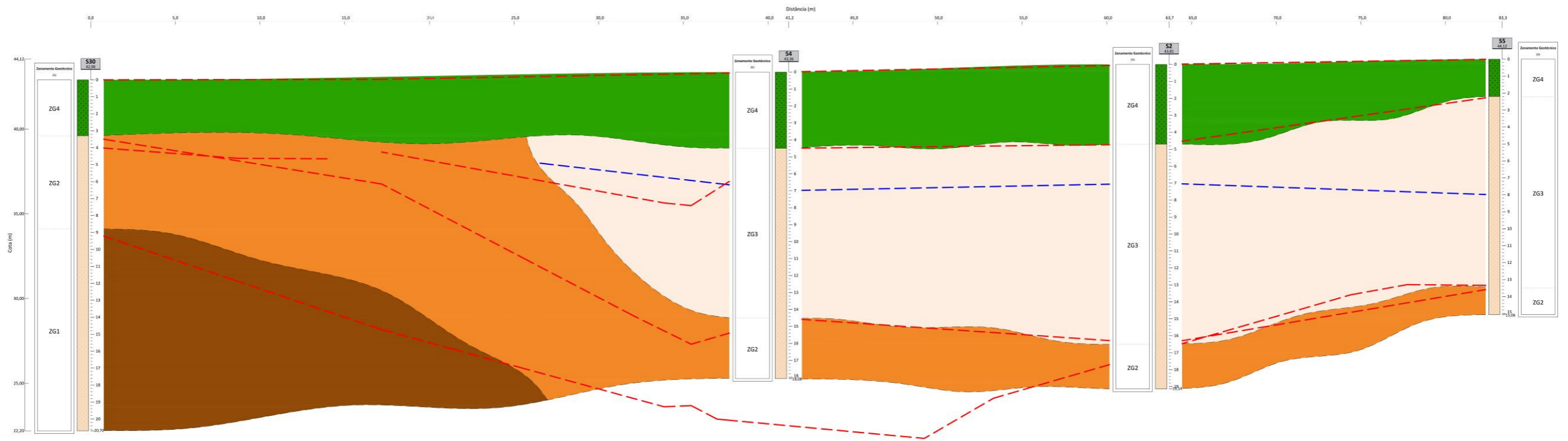
Possível limite geotécnico (interpretação, tendo por base a amostragem disponível).

Possível limite geotécnico (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

Nível freático (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

### Perfil geológico-geotécnico A-A'

Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:250



### Simbologia

Holocénico-Recente:

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

Hercínico:

( $\gamma_m$ ) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

Zonas geotécnicas

ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.

ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.

ZG1 - Rocha granítica.

### Legenda

Si (cota) Sondagem à rotação com realização de ensaios SPT.

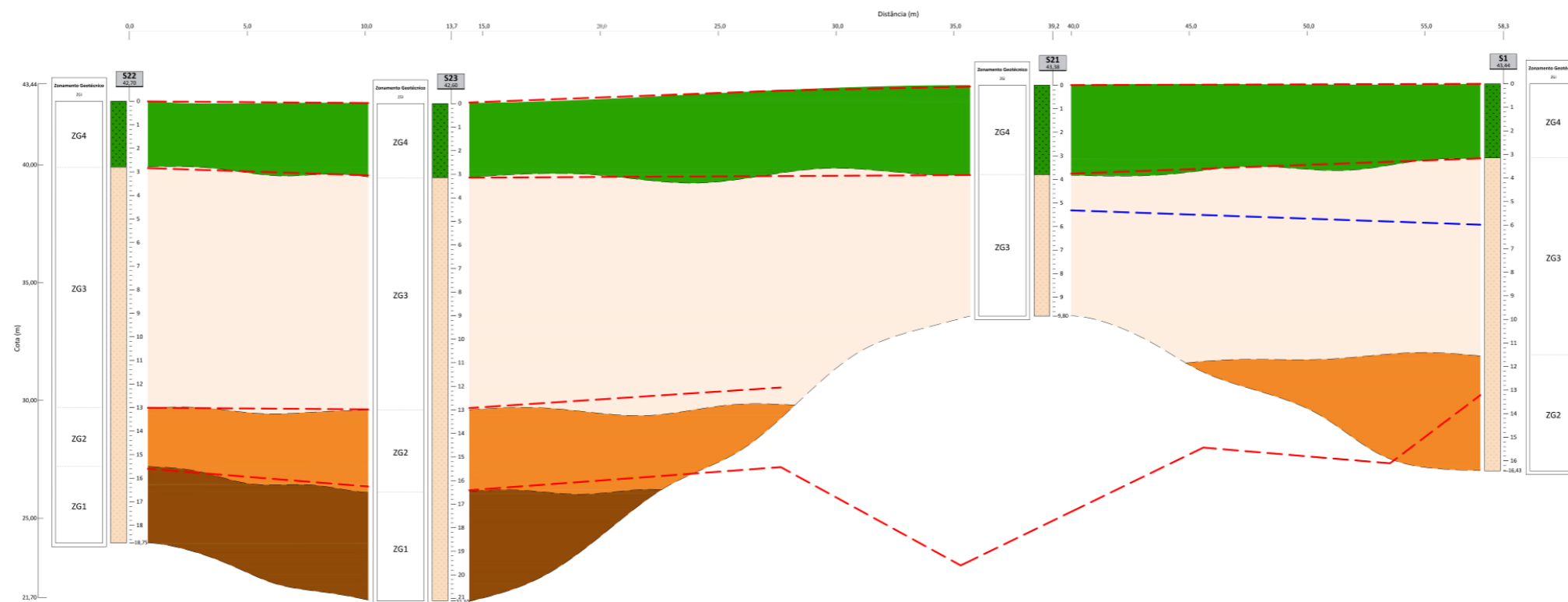
Possível limite geotécnico (interpretação, tendo por base a amostragem disponível).

Possível limite geotécnico (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

Nível freático (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

### Perfil geológico-geotécnico A-A'

Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:250



### Simbologia

#### Holocénico-Recente:

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

#### Hercínico:

( $\gamma_m$ ) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

#### Zonas geotécnicas

ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.

ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.

ZG1 - Rocha granítica.

### Legenda

Si  
(cota)

Sondagem à rotação com realização de ensaios SPT.

Possível limite geotécnico (interpretação, tendo por base a amostragem disponível).

Possível limite geotécnico (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

Nível freático (interpretação automática pelo Modelo Tridimensional).

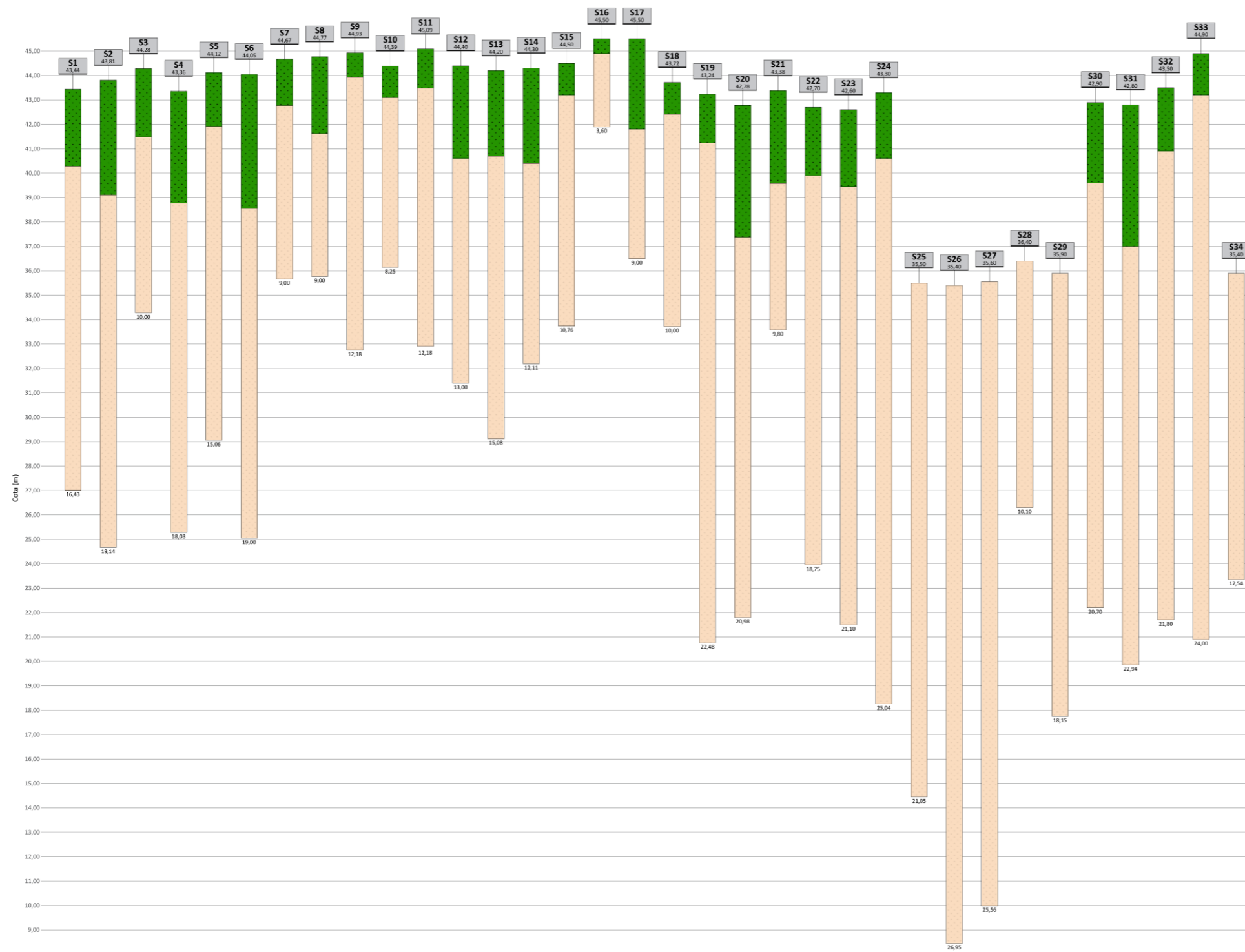
### Perfil geológico-geotécnico A-A'

Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:250

---

**Anexo III – Furos de Sondagem: Classificação Litológica**

---



**Simbologia**

Holocénico-Recente:

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

Hercínico:

(γm) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

**Sociedade de Construções Soares da Costa S.A.**

SOARTA - Terreno situado na Praça do Bom Sucesso - Porto

Planta geral com localização das sondagens geotécnicas

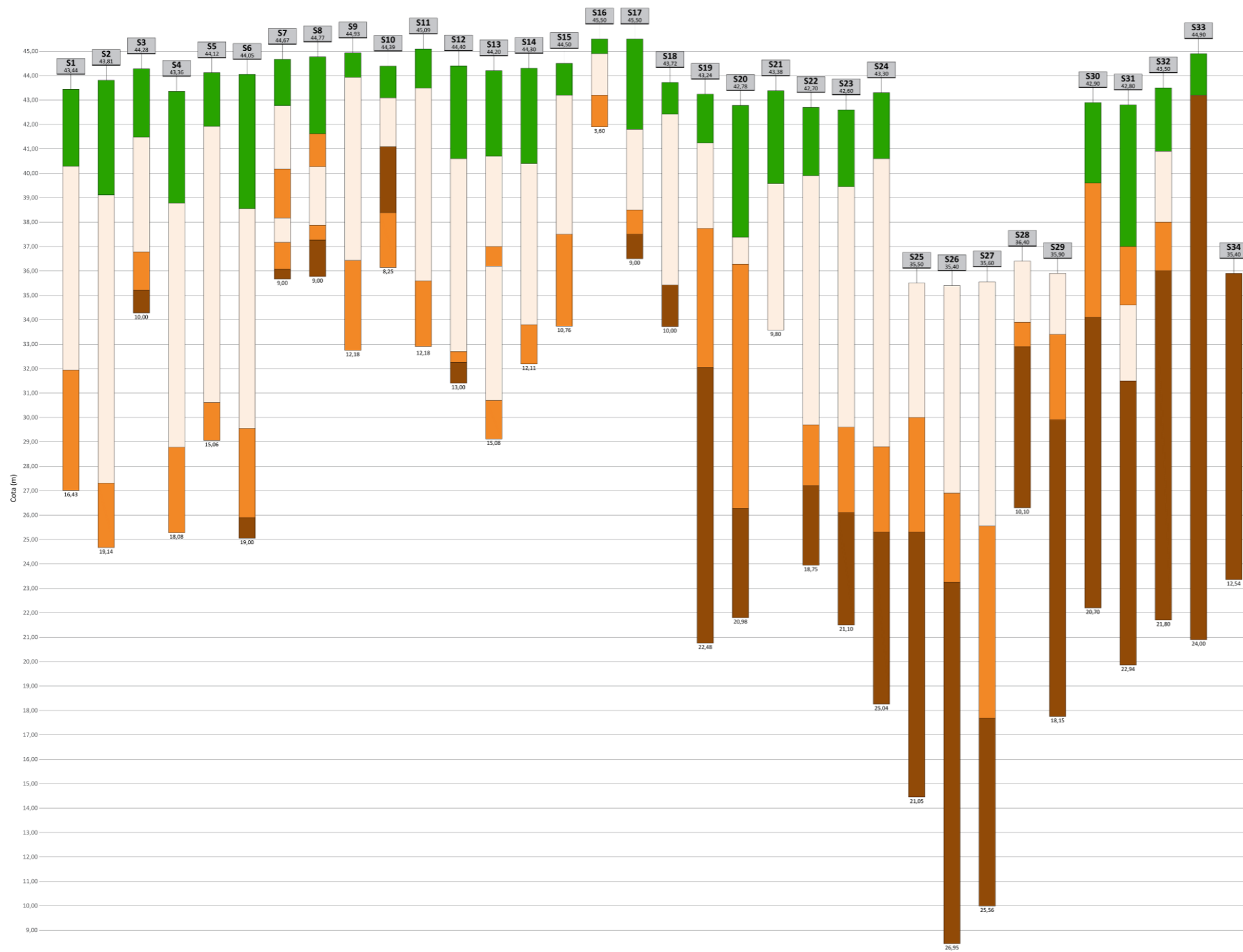
Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:200

**Zonamento Geológico-Geotécnico**

---

## **Anexo IV – Zonamento Geológico-Geotécnico**

---



**Simbologia**

**Holocénico-Recente:**

(at) Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

**Hercínico:**

(γm) Granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (Granito do Porto).

**Zonas geotécnicas**

ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.

ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.

ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.

ZG1 - Rocha granítica.

**Sociedade de Construções Soares da Costa S.A.**

SOARTA - Terreno situado na Praça do Bom Sucesso - Porto

Planta geral com localização das sondagens geotécnicas

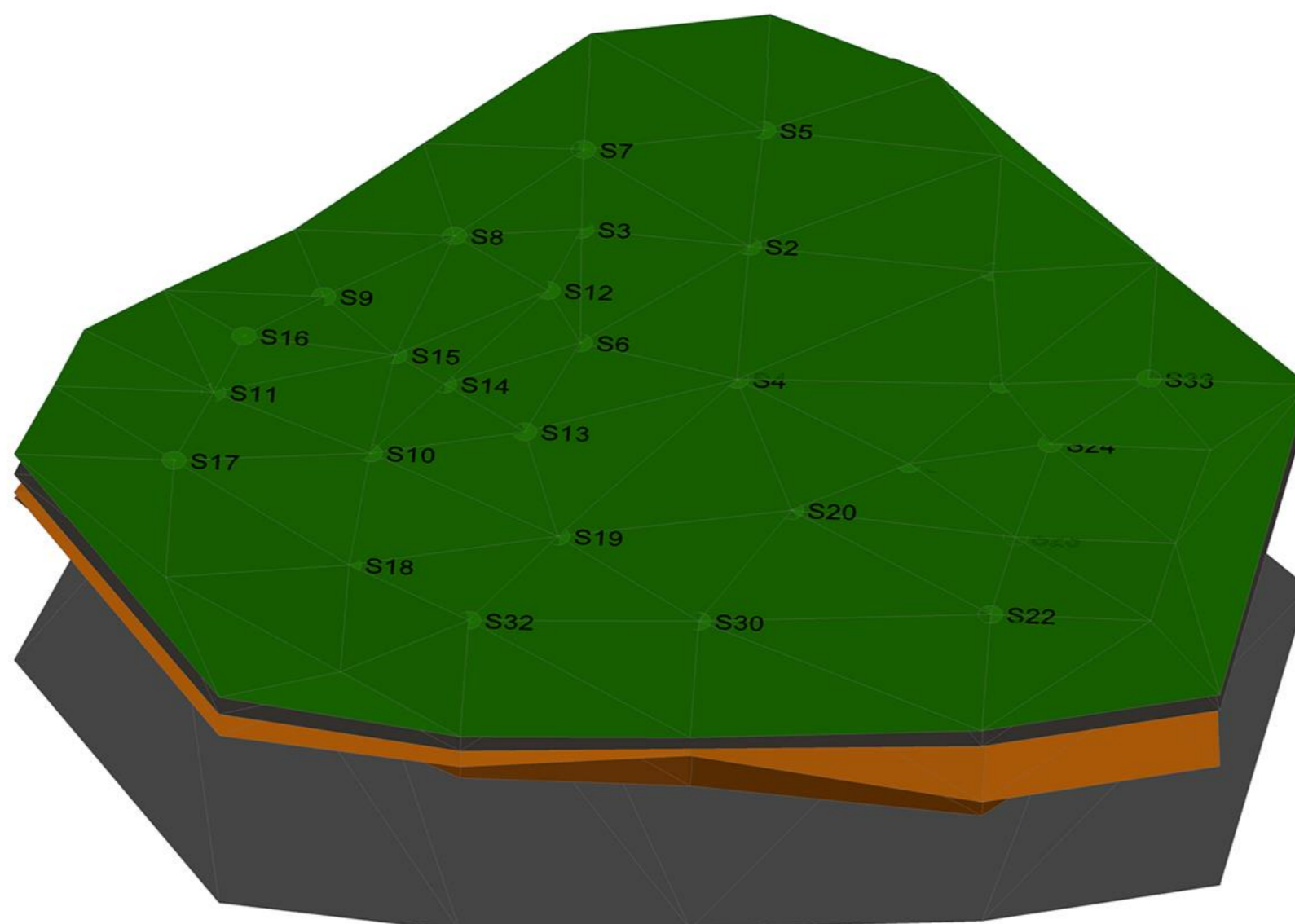
Descrição	Formato	Escala
Emissão do documento.	A3	1:200

**Zonamento Geológico-Geotécnico**

---

## **Anexo V – Modelo Geológico-Geotécnico 3D**

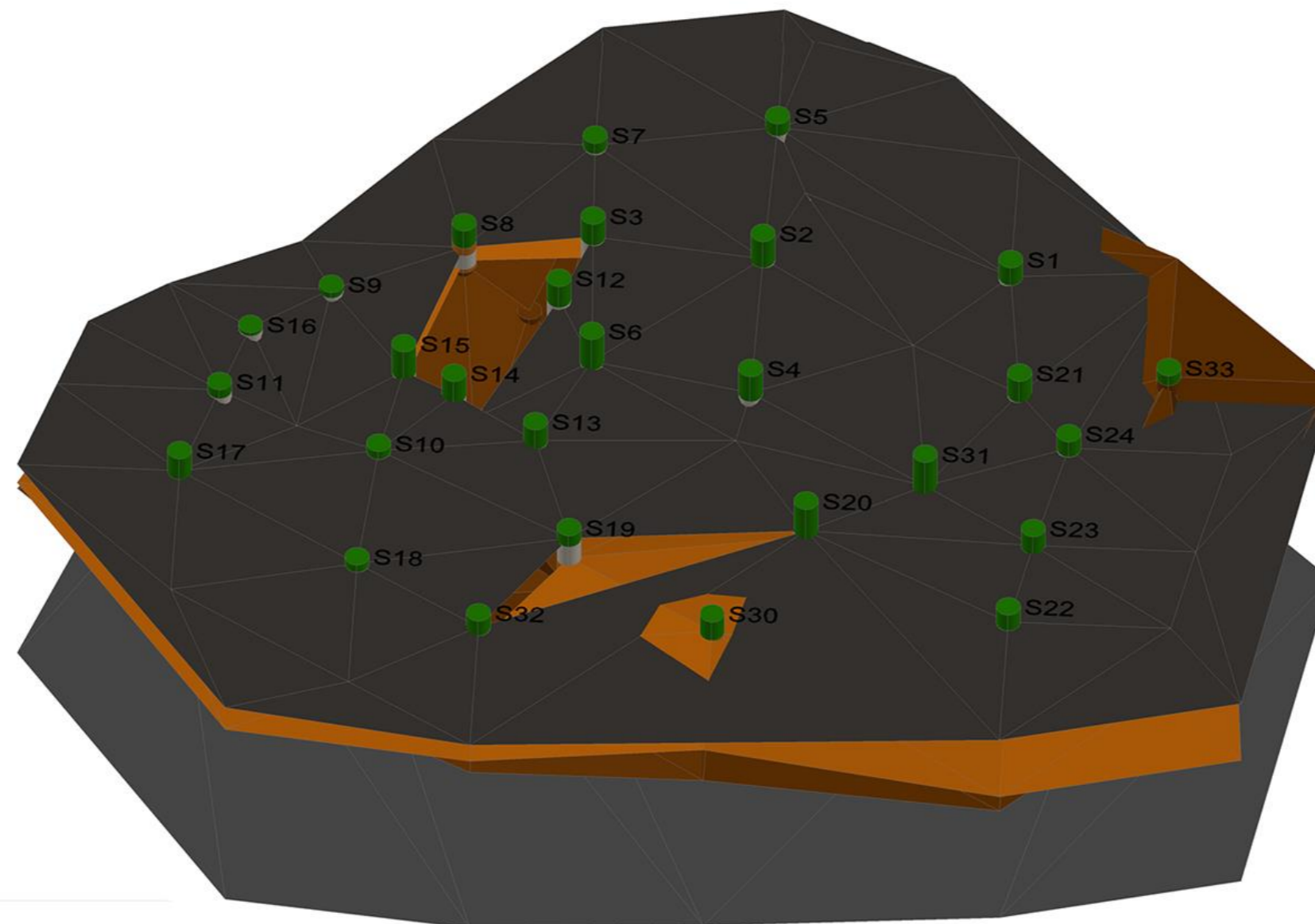
---



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

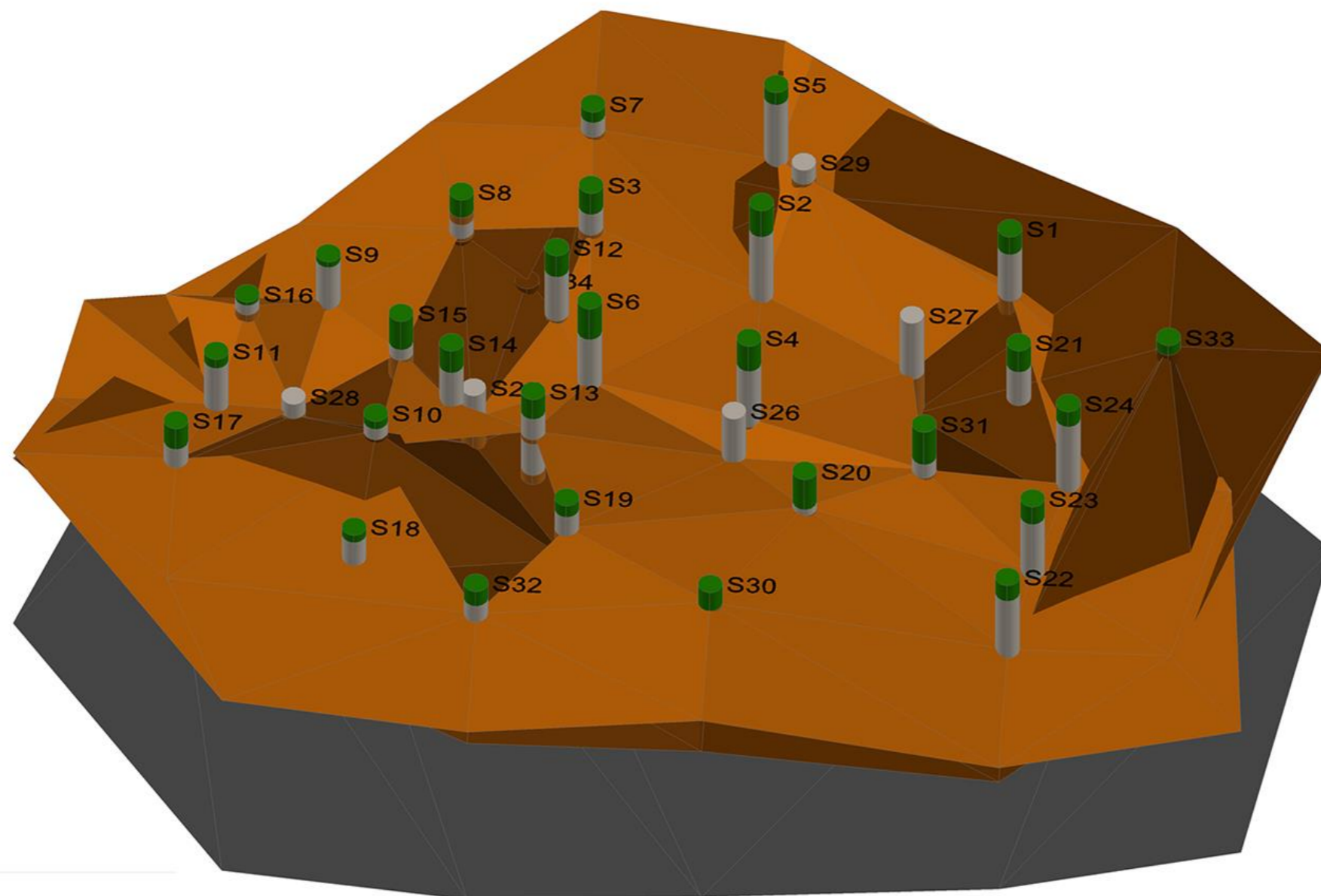
**Modelo 3D – ZG4**



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

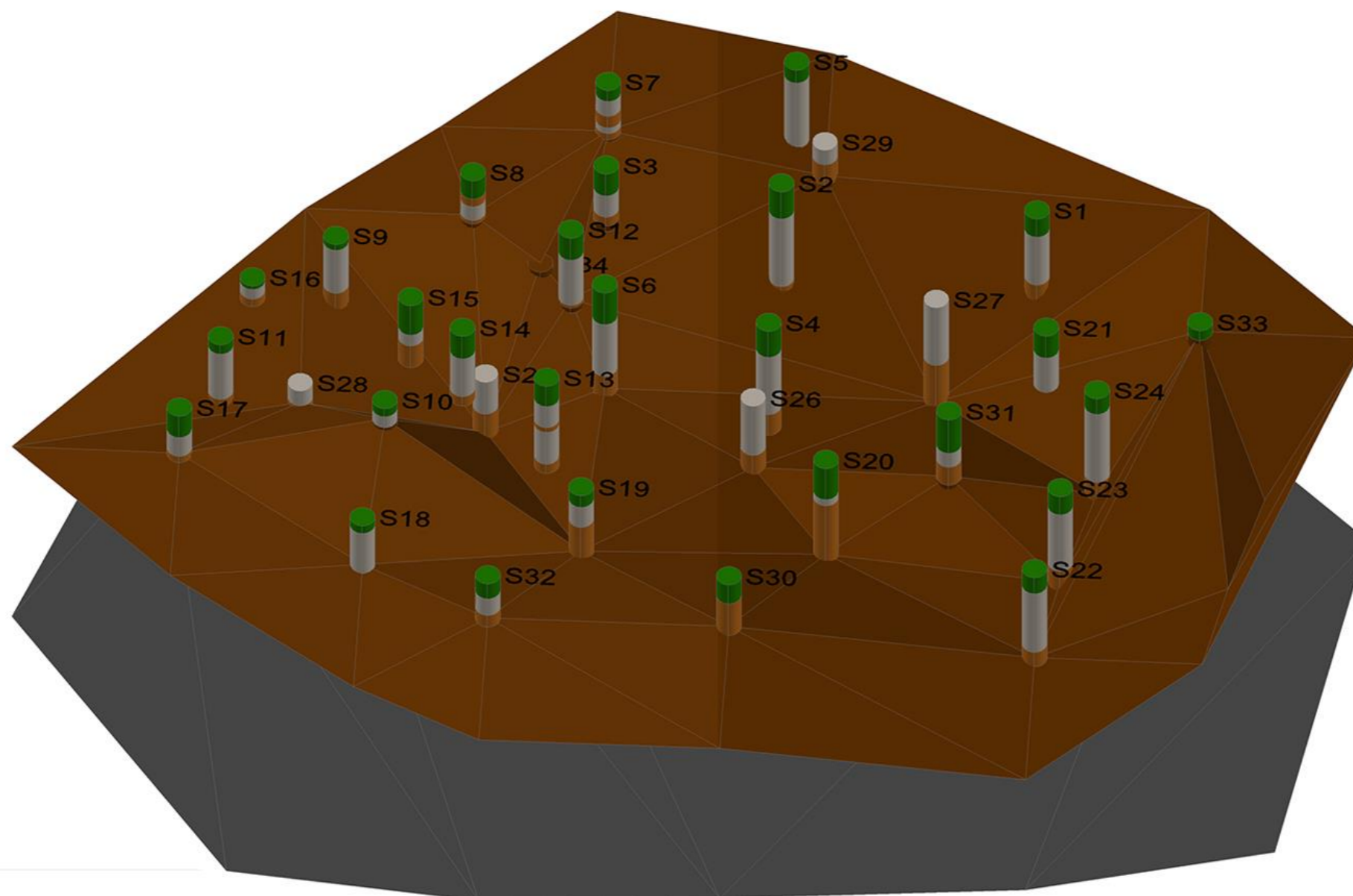
Modelo 3D – ZG3



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

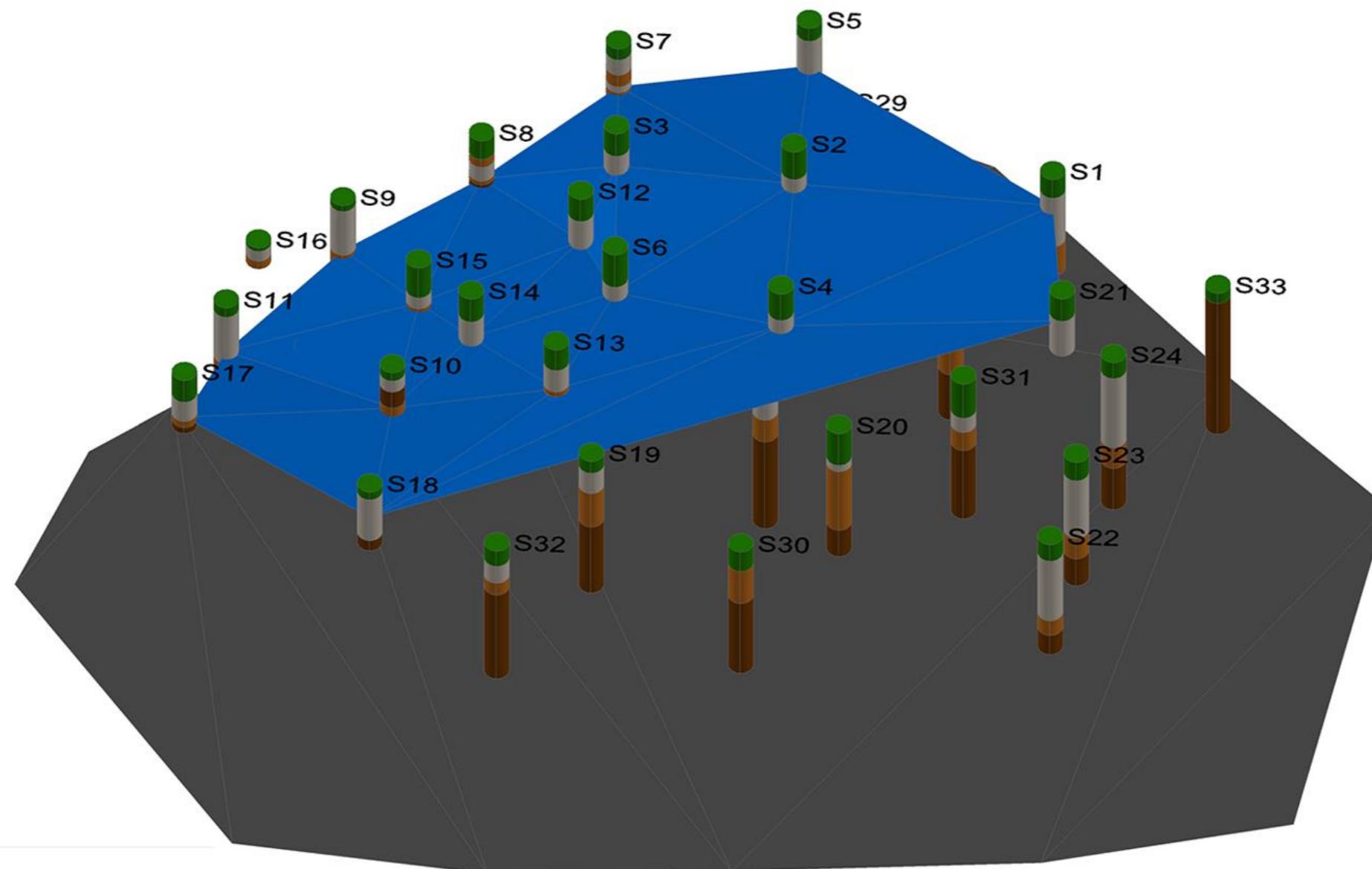
Modelo 3D – ZG2



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

**Modelo 3D – ZG1**



Zonas geotécnicas

- ZG4 - Aterros, solos de cobertura e/ou aluvião.
- ZG3 - Granito com resultados do ensaio SPT inferiores a 50 pancadas.
- ZG2 - Granito com resultados do ensaio SPT superiores a 51 pancadas.
- ZG1 - Rocha granítica.

Modelo 3D – Nível Freático