



REPRESENTAÇÕES TRIDIMENSIONAIS DE DADOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

DOMINGOS XAVIER MENDANHA FERREIRA

setembro de 2025



REPRESENTAÇÕES TRIDIMENSIONAIS DE DADOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

DOMINGOS XAVIER MENDANHA FERREIRA

Setembro de 2025

**REPRESENTAÇÕES TRIDIMENSIONAIS DE DADOS GEOLÓGICO-
GEOTÉCNICOS**

**THREE-DIMENSIONAL REPRESENTATIONS OF GEOLOGICAL AND
GEOTECHNICAL DATA**

Domingos Xavier Mendanha Ferreira

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**

Orientador: Doutor Agostinho Martins Mendonça

Júri

Presidente

Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé, Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais

João Paulo Meixedo dos Santos Silva, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Maria Isabel Gonçalves Fernandes, Professora Auxiliar com Agregação, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

António Agostinho Martins Mendonça, Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, setembro de 2025

[página propositadamente em branco]

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho permitiu-me perceber que, com dedicação e persistência, tudo é possível. Sem o apoio e orientação daqueles que me rodeia, a conclusão deste trabalho seria uma obra hercúlea. Assim, quero agradecer o apoio, que direta ou indiretamente, prestaram o seu contributo e às quais, não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e gratidão.

Primeiramente gostaria de agradecer ao Doutor António Agostinho Martins Mendonça (DEG|ISEP), pelo apoio e orientação durante o trabalho realizado. Tal como a disponibilidade e incentivo, sem este não seria possível a realização deste trabalho.

Os docentes do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do ISEP, pelos ensinamentos transmitidos ao longo de cada unidade curricular.

Muito obrigado a todos!

[página propositadamente em branco]

Resumo

O presente trabalho tem como tema a modelação geológico-geotécnica tridimensional, tendo como principal objetivo avaliar a capacidade destes modelos para representar, de forma clara e robusta, as propriedades do subsolo. Após uma análise dos softwares de modelação 3D disponíveis no mercado, foi selecionado um programa da Bentley Systems. Este permite a construção e atualização dinâmica dos modelos ao longo do fluxo de trabalho, possibilitando a inserção contínua de novos dados geotécnicos e geológicos. Com este software, foi possível elaborar diferentes projeções tridimensionais de parâmetros como o grau de alteração dos materiais, o grau de fracturação e os valores das unidades de Lugeon, aplicados ao caso de estudo. A Barragem do Açafal foi selecionada como objeto de estudo, contando com uma campanha de prospeção que incluiu quatro sondagens com ensaios Lugeon, seis perfis sísmicos e 21 poços de reconhecimento geológico. Estes dados serviram de base para a construção dos modelos apresentados, tendo ainda sido consideradas sondagens adicionais com o objetivo de demonstrar a robustez, adaptabilidade e fiabilidade do software selecionado. Os resultados evidenciam o potencial da modelação 3D na interpretação integrada do subsolo, contribuindo para uma tomada de decisão mais informada em projetos de engenharia.

Palavras-chave: Modelação 3D, Leapfrog Geo, Modelação Geológico-Geotécnica, Geovisualização

[página propositadamente em branco]

Abstract

This work focuses on three-dimensional geological-geotechnical modeling, with the primary objective of evaluating the ability of these models to accurately and robustly represent underground properties. After analyzing the 3D modeling software available on the market, a program from Bentley Systems was selected, which enables the construction and dynamic updating of models throughout the workflow, allowing for the continuous insertion of new geotechnical and geological data. With this software, it was possible to develop various three-dimensional projections of parameters, such as the degree of material alteration, the state of fracturing, and Lugeon unit values, for the case study. The Açaçal Dam was selected as the object of study, with an in situ investigation campaign that included four Lugeon tests, six seismic profiles, and 21 geological reconnaissance wells. This data served as the basis for constructing the models presented, and additional surveys were also considered to demonstrate the robustness, adaptability, and reliability of the selected software. The results highlight the potential of 3D modeling in the integrated interpretation of the subsoil, contributing to more informed decision-making in engineering projects.

Keywords: 3D Modeling, Leapfrog Geo, Geological-Geotechnical Modeling, Geovisualization

[página propositadamente em branco]

Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento do tema.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
2. Zonamento Geológico-Geotécnico: Breves Tópicos.....	9
2.1. Caracterização Geotécnica.....	9
2.1.1. Prospeção Geotécnica.....	11
2.1.2. Prospeção Geofísica.....	12
2.1.3. Prospeção Mecânica.....	13
2.1.4. Ensaio Lugeon.....	14
2.2. Representações da Prospeção Geotécnica.....	17
2.2.1. Zonamento Geotécnico.....	17
2.2.2. Modelação Geotécnica 3D.....	19
3. Ferramentas Comerciais de Modelação Geotécnica: uma síntese.....	25
3.1. Autodesk Civil 3D.....	25
3.2. RockWorks.....	27
3.3. GEO5 Stratigraphy.....	27
3.4. Bentley OpenGround.....	29
3.5. Leapfrog Geo.....	30
3.6. Aplicações de Estudo.....	31
3.6.1. Escavação Urbana.....	31
3.6.2. Barragem Lower Baker, Estado de Washington, EUA (Bartsch & Gilman 2019).....	32
4. Apresentação do Caso de Estudo.....	37
4.1. Introdução.....	37
4.2. Enquadramento das Estruturas.....	38
4.2.1. Barragens de Betão.....	38
a) Barragens de Gravidade.....	38
b) Barragens em Arco.....	39
c) Barragens de Contraforte.....	40
4.2.2. Barragens de Aterro.....	40
a) Barragem de Aterro de Solo.....	41
b) Barragens de Aterro de Enrocamento.....	42
4.3. Caso de Estudo.....	43
4.3.1. Características da Barragem e da Albufeira.....	43
4.3.2. Trabalhos de Prospeção.....	45
4.3.3. Caracterização Geológica da Região.....	45
4.3.4. Ensaio Lugeon.....	47
4.3.5. Representações dos Elementos Geológico-Geotécnicos do Caso de Estudo.....	47
5. Representações Geológico-Geotécnicas do Caso de Estudo.....	51
5.1. Introdução.....	51
5.2. Zonamento Geotécnico do Projeto.....	51
5.3. Abordagem Clássica.....	54
5.4. Modelação 3D.....	59
5.4.1. Seleção do Software.....	59
5.4.2. Preparação dos Dados.....	59
5.4.3. Formatação dos dados.....	60
5.4.4. Ficheiro <i>Collar</i>	60
5.4.5. Ficheiro <i>Survey</i>	61
5.4.6. Ficheiros <i>Assay</i>	62
5.5. Modelo Conceptual.....	63
5.5.1. Construção do Modelo.....	64
5.5.2. Modelo Geológico.....	66
5.5.3. Modelo Grau de Alteração.....	67

5.5.4.	Modelo Grau de Fracturação	68
5.6.	Modelos Numéricos	69
5.6.1.	Modelo de Lugeon	69
5.6.2.	Modelo de Refração Sísmica	70
5.7.	Modelos Combinados	72
5.8.	Representação das Famílias de Fraturas	73
5.9.	Análise Crítica	76
6.	Interpretações e Correções dos Modelos	80
6.1.	Correção do Modelo	80
6.2.	Comparação Bidimensional dos Resultados (Perfis)	84
7.	Conclusões	92
8.	Referências	100

[página propositadamente em branco]

Lista de figuras

Figura 1 - Conjunto típico de equipamentos para realizar um teste Lugeon com obturador duplo (adaptado de Vaskou et al. 2019).....	15
Figura 2 - Conjunto típico de equipamentos para realizar um teste Lugeon com obturador simples (adaptado de Vaskou et al. 2019).....	16
Figura 3 - Etapas para obtenção do zonamento geotécnico (adaptado de Silva 2023).....	19
Figura 4 - Etapas no tratamento e processamento de dados na construção de um Modelo 3D (adaptado de Silva 2023).....	20
Figura 5 - Modelo 3D criado pela extensão Geotechnical Modeler (Fonte: https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview).....	26
Figura 6 – ‘Layout’ demonstração do RockWorks 2020 (Fonte: https://rockware.com/product/rockworks/).....	27
Figura 7 - Modelo tridimensional gerado pelo GEO5 (Fonte: https://www.finesoftware.eu/geotechnical-software/stratigraphy/).....	28
Figura 8 - Modelo tridimensional retirado da ficha de apresentação do <i>software</i> OpenGround (Fonte: https://geoengineer.org/software/openground-cloud).....	29
Figura 9 - Modelo geológico 3D em Cape Lambert (Whiteman 2021).....	30
Figura 10 - Modelo Geológico-Geotécnico 3D final (Silva 2023).....	32
Figura 11 - Representação 3D da combinação do modelo geológico e estrutural para a Lower Baker Dam, (adaptado de Bartsch & Gilman 2019).....	33
Figura 12 - Representação de uma barragem de gravidade (adaptado de Atallah 2002).....	38
Figura 13 - Representação de uma barragem em arco (adaptado de Atallah 2002).....	39
Figura 14 - Representação de uma barragem de contraforte (adaptado de Atallah 2002).....	40
Figura 15 - Perfil tipo de uma barragem de aterro de solo (adaptado de Quintas 2002).....	42
Figura 16 - Barragem do Açafal, vista do talude jusante (Fonte: https://cnpqg.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal).....	43
Figura 17 - Planta da barragem (Fonte: https://cnpqg.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal).....	44
Figura 18 - Perfil longitudinal da barragem (Fonte: https://cnpqg.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal).....	44
Figura 19 - Perfil transversal da barragem (Fonte: https://cnpqg.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal).....	45
Figura 20 - Enquadramento geológico do local em estudo. Extrato da Folha 24-D Castelo Branco da Carta Geológica de Portugal (Ribeiro et al. 1967).....	46
Figura 21 - Perfil Geológico-Geotécnico segundo o eixo da Barragem, retirado do projeto da Barragem do Açafal (Hidroprojecto 1997).....	52
Figura 22 - Representação da diáclases no Dips, a) diagrama de rosetas, b) projeção estereográfica.....	53
Figura 23 - Planta de localização dos trabalhos de prospeção.....	54
Figura 24 - Perfil A-A' para o grau de alteração (W) dos terrenos de fundação da barragem.....	57
Figura 25 - Perfil A-A' para o grau de fracturação (F) dos terrenos de fundação da barragem.....	57
Figura 26 - Perfil A-A' para o ensaio de Lugeon dos terrenos de fundação da barragem.....	58
Figura 27 - Altimetria da área em estudo.....	63
Figura 28 - Importação dos dados de sondagem no software.....	64
Figura 29 - Importação dos ficheiros, collar, assay e survey no software.....	65
Figura 30 - Modelo geológico 3D inicial.....	66
Figura 31 - Modelo do grau de alteração (W).....	67
Figura 32 - Modelo de espaçamento de fracturação.....	68
Figura 33 - Modelo das Unidades de Lugeon.....	70
Figura 34 - Modelo tridimensional velocidade das ondas de propagação sísmicas.....	71
Figura 35 - Modelo combinado Litologia vs. Lugeon.....	72
Figura 36 - Estereograma do sistema de fraturas Açafal.....	74
Figura 37 - Projeção do estereograma sobre a área de estudo.....	75
Figura 38 - Projeção estereográfica sobre modelo numérico Lugeon.....	75
Figura 39 - Modelo grau de alteração original (acima) e modelo corrigido (em baixo).....	81
Figura 40 - Modelo grau de fracturação original (acima) e modelo corrigido (em baixo).....	82
Figura 41 - Modelo das Unidades de Lugeon original (acima) e modelo corrigido (em baixo).....	83
Figura 42 - Modelo Unidades de Lugeon e Geologia.....	84

Figura 43 - Planta de localização dos perfis traçados.....	85
Figura 44 - Perfil inicial de alteração (Perfil A-A').....	86
Figura 45 - Perfil corrigido de alteração (Perfil A-A').....	86
Figura 46 - Perfil inicial para grau de fracturação (Perfil A-A').....	87
Figura 47 - Perfil corrigido para grau de fracturação (Perfil A-A').....	87
Figura 48 - Perfil inicial para Unidades de Lugeon (Perfil A-A').....	88
Figura 49 - Perfil Corrigido para Unidades de Lugeon (Perfil A-A').....	88
Figura 50 - Perfil A-A' das Unidades de Lugeon, Abordagem Clássica.....	95
Figura 51 - Perfil A-A' das Unidades de Lugeon, Leapfrog Geo.	95

[página propositadamente em branco]

Lista de tabelas

Tabela 1 - Atitude das diáclases para a área de estudo.	52
Tabela 2 - Posição vertical e profundidade atingida pelas sondagens S1, S2, S3 e S4.	55
Tabela 3 – Classificação do grau de alteração de maciços rochosos (ISRM, 1980, 1981).	55
Tabela 4 - Classificação do grau de fracturação de maciços rochosos (ISRM 1981)	56
Tabela 5 - Intervalos Unidades de Lugeon utilizados para o zonamento dos perfis.	56
Tabela 6 - Correlação da velocidade de propagação das ondas sísmica para parâmetros do grau de alteração e fracturação.	60
Tabela 7 - Exemplo preenchimento do ficheiro Collar.	61
Tabela 8 - Exemplo preenchimento do ficheiro Survey.....	62
Tabela 9 - Exemplo preenchimento do ficheiro Assay.	63
Tabela 10 - Intervalos Unidades de Lugeon considerados no modelo numérico.....	69
Tabela 11 - Ficheiro Survey para a velocidade de propagação das ondas sísmicas.	71

[página propositadamente em branco]

Lista de anexos

- Anexo I – Planta e Perfis A-A' (Abordagem Clássica)
- Anexo II - Ficheiro Collar
- Anexo III - Ficheiro Survay
- Anexo IV - Ficheiro Assay (Geologia)
- Anexo V – Ficheiro Assay (Estado de Alteração)
- Anexo VI – Ficheiro Assay (Estado de Fracturação)
- Anexo VII – Ficheiro Assay (Unidades de Lugeon)
- Anexo VIII – Ficheiro Assay (Velocidade Ondas Sísmicas)
- Anexo IX – Ficheiro Assay (Famílias de Fraturas)
- Anexo X - Pontos Topográficos
- Anexo XI - Topografia e Família de Fraturas
- Anexo XII - Modelos Tridimensionais
- Anexo XIII - Ensaio Lugeon e Modelos Combinados
- Anexo XIV - Planta e Perfis A-A' (Leapfrog Geo)
- Anexo XV - Planta e Perfis 1-1' (Leapfrog Geo)
- Anexo XVI - Perfis A-A'

[página propositadamente em branco]

Acrónimos

Lista de Acrónimos

AGS	<i>Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists</i>
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DEG	Departamento de Engenharia Geotécnica
DEM	Modelo Digital de Elevação
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i>
NMC	Nível Máximo de Cheia
NPA	Nível de Pleno Armazenamento
PSE	<i>Puget Sound Energy</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
UL	Unidades de Lugeon

[página propositadamente em branco]

Capítulo I

Introdução

[página propositadamente em branco]

1. Introdução

A presente dissertação de mestrado 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). Serve a mesma dar conclusão ao ciclo de estudos do ano letivo 2024/2025 e obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

1.1. Enquadramento do tema

O reconhecimento das condições geológicas-geotécnicas, considerando o rápido crescimento das zonas urbanas e a ocorrência de situações singulares, assumem um papel fundamental no planeamento e utilização do solo (e.g., Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Chaminé et al. 2016, 2021, Mo et al. 2025, Hasan et al. 2025). Atualmente, existe um crescimento exponencial na elaboração de projetos de engenharia, cada vez mais complexos, associados ao crescimento urbano desordenado e à exposição a riscos naturais. Considerando estes fatores, existe uma crescente necessidade na procura de ferramentas avançadas que permitam a melhor caracterização das características do subsolo.

As técnicas tradicionais de caracterização geológica-geotécnica, projetos e planeamento da ocupação do solo ajustados a projetos de engenharia, como edifícios, fundações, estradas e túneis utilizam métodos manuais, que apesar de atribuído um papel crucial, exigem tempo e mão de obra (Tanoli et al. 2025). Desta forma, surge a necessidade de utilizar métodos que permitem avaliar de forma rápida e clara os terrenos alvo de estudo.

Desta forma, a criação de modelos tridimensionais, assentes em dados de sondagens, mapas geológicos, registos de investigações geotécnicas, secções transversais, entre outros, são

fundamentais para a minimização de riscos e otimização de custos aquando da execução de projetos (e.g., Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Baynes et al. 2021, Petrone et al. 2023, Tanoli et al. 2025).

1.2. Objetivos

A necessidade de modelos geológicos e geotécnicos cada vez mais robustos e precisos, de forma a obter uma observação detalhada e que abranja cada caso de estudo, é transversal ao crescente grau de complexidade das obras de engenharia. Neste contexto, a representação tridimensional assume um papel cada vez mais relevante, permitindo uma visão detalhada e abrangente de cada caso de estudo.

O objetivo deste trabalho, consiste na seleção de um software disponível no mercado, que seja capaz de produzir resultados robustos, fidedignos e que se adapte a diferentes tipos de estudos geológico-geotécnicos. Este deve ainda ser intuitivo na sua utilização e apresentar versatilidade na importação e tratamento de dados.

Após a seleção do software, este irá ser aplicado a um caso de estudo real, de forma a tratar e analisar os dados disponíveis, para que permita observar o comportamento e a evolução dos modelos com a metodologia empregue. Com o presente estudo pretende-se avaliar a eficácia da representação tridimensional da geologia e parâmetros geotécnicos.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em sete Capítulos. De seguida, serão apresentados de forma sucinta os capítulos apresentados neste documento, referindo-se os aspetos mais relevantes por eles abrangidos:

Capítulo I – Introdução

Este Capítulo enquadra o tema do presente trabalho e os objetivos que se pretendem alcançar.

Capítulo II – Zonamento Geológico-Geotécnico

Neste Capítulo, abordam-se os conceitos de zonamento geotécnico, de caracterização geotécnica, a prospeção geotécnica e respetivos tipos. Neste capítulo são também abordados os diferentes

tipos de representação geotécnica, apresentando-se uma breve introdução à modelação geológica-geotécnica 3D.

Capítulo III – Ferramentas Comerciais de Modelação Geotécnica

No terceiro Capítulo, são mencionadas diferentes ferramentas comerciais disponíveis no mercado para a representação tridimensional de dados geológico-geotécnicos. Ainda neste, são apresentados dois casos práticos da aplicação de dois softwares distintos constantes na bibliografia.

Capítulo IV – Apresentação do Caso de Estudo

Neste Capítulo, são abordados diferentes tipos de barragens. Pretende-se com este, dar a conhecer de uma forma breve o panorama geral do tipo de barragens e as suas implicações.

Apresenta-se ainda a barragem de aterro objeto da aplicação prática do presente trabalho.

Capítulo V – Representações Geológico-Geotécnicas do Caso de Estudo

No quinto Capítulo é apresentação da caracterização geológico-geotécnica pelo método convencional (bidimensional) e tridimensional.

Para este último caso de modelação é abordada a metodologia da inserção de dados no software comercial selecionado bem como a criação de modelos, o seu ajuste e a comparação entre eles.

Capítulo VI – Aplicação e resultados

Neste Capítulo fazendo-se as respetivas interpretações e comparações de forma a obter as respostas aos objetivos da dissertação.

Na sequência das análises desenvolvidas descrevem-se as correções implementadas aos modelos iniciais para melhoria da sua fiabilidade.

Capítulo VII – Conclusões

No último Capítulo traçam-se as conclusões finais, as respostas obtidas no decurso da pesquisa e aplicação prática do software usado para a representação de dados geológico-geotécnicas e perspetivas futuras para a melhoria dos resultados por ele potenciados.

[página propositadamente em branco]

Capítulo II

Zonamento Geológico-Geotécnico: Breves Tópicos

[página propositadamente em branco]

2. Zonamento Geológico-Geotécnico: Breves

Tópicos

A segurança e durabilidade das construções estão intrinsecamente ligadas às propriedades geotécnicas do terreno, desta forma investigações geotécnicas são um pré-requisito fundamental (Ijaz et al. 2025). Na ausência de um estudo geotécnico, a estabilidade e capacidade de cargas das camadas do subsolo são indeterminadas, apresentando riscos consideráveis para a integridade estrutural, utilização e desempenho geral das construções, podendo resultar em limitações funcionais ou em falhas estruturais (Baynes et al. 2021, Ijaz et al. 2025).

O zonamento geológico-geotécnico corresponde a uma representação de dados geológico-geotécnicos (qualitativos, semi-quantitativos e quantitativos) que possibilita a representação espacial e gráfica dos dados geológico-geotécnicos obtidos para a área representativa de um determinado projeto de engenharia. Por isso, definem-se as denominadas unidades de zonamento geológico-geotécnico (ou, simplesmente, unidades de zonamento geotécnico) na cartografia de geologia de engenharia ou cartografia geotécnica (e.g., Dearman 1991, Zuquette & Gandolfi 2004, Culshaw 2005, Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Culshaw et al. 2021, Chaminé & Chaminé 2023, Hencher 2024).

2.1. Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica baseia-se nas propriedades geomecânicas, características físicas dos solos e das rochas e um conjunto de ensaios in situ e laboratoriais (Fernandes & Chaminé 2023, Liu et al. 2024). Estes trabalhos, executados durante as campanhas de prospeção são indispensáveis para projetos de engenharia, dado que os terrenos apresentam inúmeras e diversas variabilidades.

Posteriormente, os resultados destas campanhas são compilados em relatórios geotécnicos que registam estas variabilidades.

O contexto geotécnico de um projeto, é definido tendo em consideração fatores essenciais como a estabilidade do terreno, o tipo e dimensão da estrutura, as condições geotécnicas do subsolo, o nível das águas subterrâneas e a sismicidade local e/ou regional (Eurocódigo 7 2010, OE 2020). A avaliação dos estados limite é feita através de cálculos, modelos experimentais e/ou pelo método observacional (Silva 2023).

Segundo autores (e.g., Sabatini et al. 2002, Eurocódigo 7 2007, 2010, OE 2020, Norbury 2020, Turner et al. 2021, Culshaw et al. 2021, Fernandes & Chaminé 2023, Silva 2023), 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;
- topografia do local;
- singularidades do terreno;
- datas-limite e orçamento;
- definição das propriedades específicas ao projeto.

A caracterização geotécnica de um local é essencial para avaliar a capacidade do terreno em suportar a estrutura projetada, considerando aspetos como a estabilidade global, deformações e movimentos do solo (Silva 2023). Assim, a necessidade de identificar detalhadamente o solo e as rochas, torna-se essencial para os integrar nos modelos para o dimensionamento de obras. Para além disto, a inclinação dos estratos geológicos (e descontinuidades em geral), a presença de cavidades, as condições hidrogeológicas e ambientais locais (meteorização, variações no nível freático, entre outros), e o impacto destas em infraestruturas existentes devem ser especificados (Eurocódigo 7 2010, Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, OE 2020).

No desenvolvimento dos modelos, estes devem ser capazes de representar o comportamento do terreno para os estados limite definidos, assegurando que os critérios de segurança e desempenho estrutural sejam cumpridos (Silva 2023). Quando se afere que um modelo não é fiável, deve ser

adotado um modelo alternativo, acompanhado por coeficientes de segurança que garantam a baixa probabilidade de excedência desses limites (Silva 2023).

Importa salientar que o conhecimento profundo das condições do terreno depende essencialmente da qualidade das campanhas de prospeção geotécnica. A precisão e a utilidade dos modelos são condicionadas pela fiabilidade, rigor na recolha e análise dos dados de prospeção, que devem abranger ensaios laboratoriais e in situ, bem como estudos geofísicos e históricos (Silva 2023, Hu et al. 2024).

2.1.1. Prospeção Geotécnica

A prospeção geotécnica constitui a base para a caracterização dos terrenos onde serão implantadas as obras de engenharia, assumindo um papel fundamental no processo de conceção e execução destas. De acordo com o Eurocódigo 7 (2007, 2010), a investigação do solo e das rochas deve fornecer informações suficientes para determinar as propriedades geotécnicas e identificar condições adversas que afetem o comportamento, a estabilidade das fundações e outras estruturas.

A forma mais comum de conduzir uma campanha de prospeção, é proceder à caracterização dos terrenos através da medição, observação e recolha de amostras, elaborar mapas geológicos, análise de sondagens, poços, trincheiras, utilização indireta de ensaios geofísicos e realização de ensaios ao solo e à rocha. Os resultados obtidos por estes métodos, apenas são representativos do local de aquisição, estando limitados ao ponto testado dificultando a generalização dos resultados para a totalidade da área estudada (Adewoyin et al. 2021).

Assim, revela-se pertinente a realização de um reconhecimento superficial preliminar. Habitualmente, este reconhecimento baseia-se na compilação de informação existente, nomeadamente documentos escritos, cartas topográficas, cartas geológicas e cartas geotécnicas (Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Chaminé & Fernandes 2023, He et al. 2024). A consulta de trabalhos realizados nas proximidades dos locais de estudo constitui uma fonte importante de conhecimento para o planeamento da campanha de prospeção.

Segundo o Eurocódigo 7 (2007, 2010) e OE (2020), o estudo de caracterização de um terreno para um projeto geotécnico, deve assegurar que este abrange todas as formações geológicas intersetadas, dando ênfase nos seguintes aspetos:

- perfil do terreno;
- cavidades naturais ou resultantes da ação humana;

- degradação de rochas, solos ou materiais de aterro;
- efeitos hidrogeológicos;
- falhas, diáclases e outras descontinuidades;
- maciços de solo ou rocha sujeitos a fenómenos de fluência;
- solos e rochas expansíveis ou colapsáveis;
- presença de resíduos ou de materiais manufacturados.

Geralmente considera-se que a prospeção geotécnica se divide em duas componentes distintas e complementares (e.g., Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Matos Fernandes 2015, Fernandes & Chaminé 2023): a prospeção geofísica e a prospeção mecânica.

2.1.2. Prospeção Geofísica

A prospeção geofísica é uma ferramenta eficaz na fase preliminar da caracterização geotécnica, demonstrando ser uma mais-valia para estudar grandes áreas, como barragens, vias rodoviárias e linhas ferroviárias. Este tipo de prospeção é normalmente utilizado antes de se executarem sondagens mecânicas permitindo otimizar custos obtendo-se uma caracterização abrangente da área de estudo (Telford et al. 1990, Reynolds 2011, Zhang et al. 2025).

A principal vantagem dos métodos geofísicos é o facto de ser possível a obtenção de dados em grande escala, sem levar a perturbações do subsolo dado que se trata de um método não destrutivo. Este tipo de ensaio dá uma visão preliminar dos materiais do subsolo identificando heterogeneidades e zonas com diferentes comportamentos geotécnicos. As confirmações dos resultados obtidos podem posteriormente ser confirmados através da utilização de técnicas invasivas, como sondagens e ensaios in situ, oferecendo maior detalhe e definição do subsolo.

Os métodos geofísicos mais utilizados correntemente, são os métodos de refração sísmica, os métodos de resistividade eléctrica e os eletromagnéticos. Os métodos de refração sísmica utilizam a velocidade de propagação de ondas sísmicas para caraterizar o subsolo, enquanto os métodos eléctricos e eletromagnéticos utilizam corrente eléctrica ou eletromagnéticas, respetivamente (Loke 1999).

Estes métodos apresentam inúmeras aplicações, desde a identificação de camadas geológicas e definição da sua espessura, delimitar zonas alteradas de maciços rochosos, estimar a profundidade do substrato mais resistente, localizar cavidades, identificar zonas de fracturação e falhas, entre outros (Reynolds 2011, Matos Fernandes 2015).

Os dados obtidos durante a campanha de prospeção devem ser interpretados e se possível complementar com outras informações do local alvo de estudo, produzindo um modelo geotécnico representativo desse local (e.g., Zuquette & Gandolfi 2004, Culshaw 2005, Culshaw et al. 2021).

2.1.3. Prospeção Mecânica

A prospeção mecânica é utilizada frequentemente para a caracterização do subsolo em obras localizadas, como barragens, edifícios e pontes. Este tipo de prospeção pode ser um complemento à prospeção geofísica, de forma a validar os resultados obtidos (Matos Fernandes 2015). De entre os métodos de prospeção mecânica, refere-se poços e valas para terrenos terrosos, podendo também serem executados diferentes tipos de ensaios.

Os poços e valas permitem uma observação direta dos terrenos atravessados e facilita a recolha de amostras para análise laboratorial remexidas ou indeformadas. Estes métodos permitem analisar a estabilidade do substrato e assumem um papel relevante na identificação do substrato firme subjacente às camadas superficiais (Folque 1987). Estes tipos de métodos são condicionados pela presença de água, pelas limitações dos equipamentos utilizados e acima de tudo pela resistência dos materiais intersetados.

No que respeita às sondagens, podemos dividi-las em três tipos principais: percussão, rotação e rotopercussão. A seleção do tipo de sondagem a executar esta correlacionada com a natureza dos materiais a atravessar. A perfuração por percussão adequa-se a solos e rochas mais brandas e consiste na fragmentação dos materiais através de impactos sucessivos. Se os materiais a atravessar corresponderem a solos muito duros ou rochas muito competentes, a utilização de perfuração à rotação é mais adequada. Dado que utiliza ferramentas abrasivas para atravessar estes materiais. A rotopercussão combina os dois métodos referidos anteriormente, de referir que este tipo de técnica permite aumentar a eficiência do processo.

Como complemento às sondagens e de forma a caracterizar o solo, é possível interromper os trabalhos e proceder à execução de ensaios in-situ como, o Standard Penetration Test (SPT). Este ensaio permite, através de correlações obter informações das sobre a capacidade de carga dos materiais, ângulo de atrito, peso volúmico, entre outros (Al-Jabban 2013, Yusof & Zabidi 2018). Assim como o SPT, o Cone Penetration Test (CPT) é também utilizado recorrentemente para a caracterização do solo (Shahgholian et al. 2022). Este, assim como o ensaio com Dynamic Cone Penetrometer (DCP) não necessitam de furos de sondagens para a sua execução, sendo um ensaio rápido de se executar permitindo a caracterização do solo em profundidade de forma precisa (Garcia et al. 2024).

Além das técnicas referidas, existem outros ensaios de prospeção que complementam a caracterização do terreno, entre estes referem-se: ensaio pressiométrico, ensaio de dilatômetro, ensaio de cisalhamento em furos de sondagem, ensaio de carga em placa, entre outros (Lutenegger 2021, Robertson & Cabal 2022). A seleção dos métodos é feita de acordo com as particularidades de cada local e com o objetivo do estudo.

2.1.4. Ensaio Lugeon

No caso de projetos de barragens, como o objeto desta dissertação, frequentemente recorre-se ao ensaio de Lugeon que foi desenvolvido para avaliar a permeabilidade de maciços rochosos e a necessidade de injeção de caldas em fundações de barragens. De acordo com Maurice Lugeon, o seu objetivo é identificar as zonas mais e menos permeáveis no maciço rochoso, além de fornecer dados para determinar a quantidade de calda de cimento necessária à execução das cortinas de consolidação e/ou de impermeabilização (Quiñones-Rozo 2010).

Embora simples de executar, o ensaio passou a ser amplamente utilizado em estudos de caracterização geológica e geotécnica após a sua divulgação. Contudo, a regulamentação da sua aplicação por normas específicas ocorreu mais recentemente. A International Organization for Standardization (ISO) – ISO 22282-3 (2012) e a American Society for Testing and Materials (ASTM) – ASTM D4630-96 (2008) definem os termos, símbolos, unidades e procedimentos aplicáveis ao ensaio. A adoção dessas normas permite uma avaliação precisa das condições do local e facilita comparações entre diferentes locais (Vaskou et al. 2019).

O ensaio é realizado em furos de sondagem, com injeção de água sob pressão a uma taxa constante, num trecho isolado, utilizando obturadores duplos ou simples. A condição do ensaio é controlada por patamares de pressão de dez minutos, estabelecendo um escoamento em regime permanente. São registados os volumes de água absorvidos e as pressões aplicadas. Os resultados são expressos em Unidades de Lugeon (UL), sendo 1 UL a absorção de 1 litro de água por minuto, por metro de furo, a 1 MPa (10 bar), medida no ponto médio do trecho de ensaio.

Este ensaio é utilizado para definir a profundidade dos tratamentos, uma vez que maciços com coeficiente de absorção inferior a 1 UL são considerados impermeáveis e inviáveis para injeção de calda de cimento. Simples, rápido e com equipamentos comuns, o ensaio tornou-se padrão para o zonamento hidrogeológico, a determinação das características hidráulicas e a escolha dos tratamentos necessários. Além disso, fornece informações detalhadas sobre a fracturação e permeabilidade do maciço, essenciais para a caracterização do local.

O ensaio de Lugeon pode ser realizado de forma ascendente ou descendente, sendo esta escolha determinada por critérios económicos, pelas especificações técnicas do projeto e pelos objetivos pretendidos.

A principal diferença entre os dois métodos está na localização do troço a ensaiar. No método ascendente, utilizam-se dois obturadores (Figura 1), isolando-se um troço específico do furo previamente perfurado. Já no método descendente, recorre-se a um único obturador (Figura 2), sendo o ensaio efetuado no fundo do furo, à medida que a perfuração progride em profundidade.

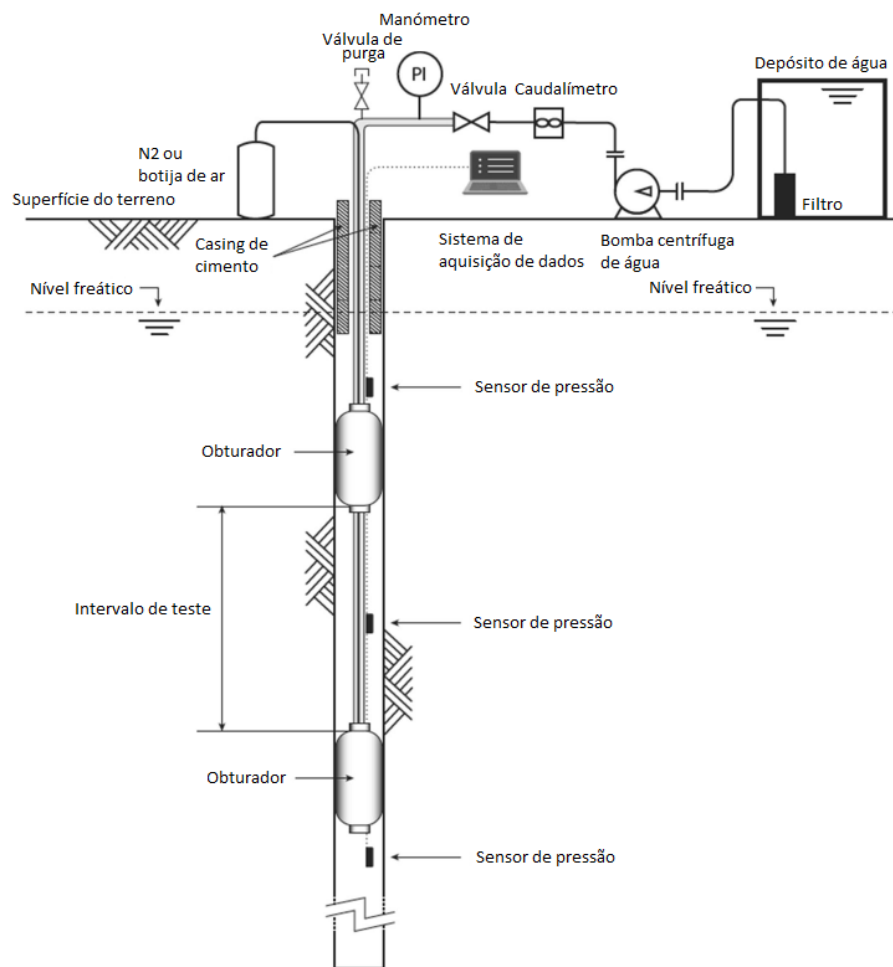


Figura 1 - Conjunto típico de equipamentos para realizar um teste Lugeon com obturador duplo (adaptado de Vaskou et al. 2019).

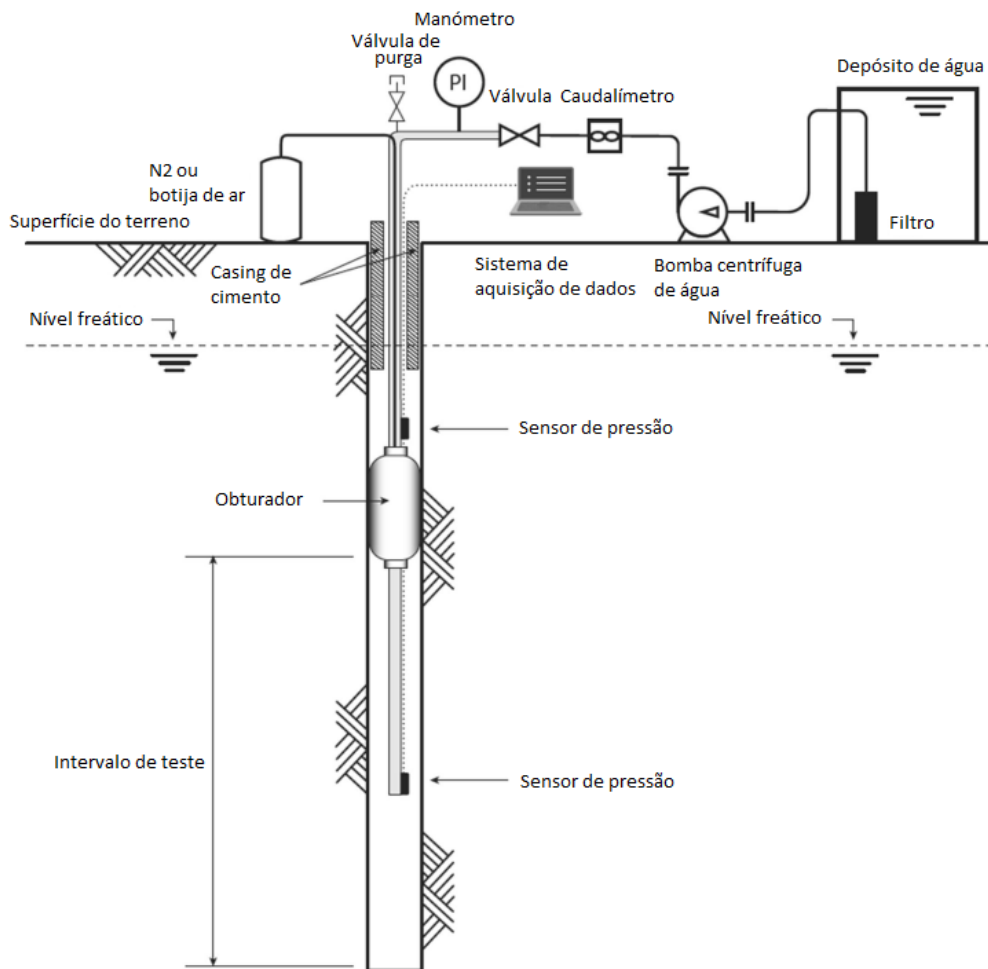


Figura 2 - Conjunto típico de equipamentos para realizar um teste Lugeon com obturador simples (adaptado de Vaskou et al. 2019)

A execução do ensaio inicia-se com a introdução dos obturadores no furo até à profundidade desejada, estando estes ligados a uma mangueira que permite o seu enchimento e conseqüente insuflação. O conjunto inclui também um tubo de menor diâmetro, conectado a um manômetro, que permite efetuar as leituras de pressão, em patamares, no interior da câmara de ensaio. Adicionalmente, é utilizado um medidor de nível de água, com o objetivo de detetar eventuais fugas durante o ensaio (Vaskou et al 2019).

Cada patamar de pressão é mantido durante 10 minutos após a estabilização da pressão. Recomenda-se que o registo do caudal total seja efetuado, pelo menos, a cada minuto durante os 10 minutos de duração de cada patamar. A utilização de instrumentação automatizada simplifica o processo e permite uma frequência mais elevada na recolha de dados. Normalmente, realizam-se entre cinco e dez patamares com pressões crescentes, seguidos de patamares com pressões decrescentes (Vaskou et al 2019).

2.2. Representações da Prospeção Geotécnica

As investigações geotécnicas realizam-se maioritariamente com recurso a sondagens. A partir destas, é realizado um log de sondagem no qual inclui informações sobre o subsolo, incluindo a descrição litológica local, resultados de ensaios in-situ, entre outros. Este tipo de procedimento, é considerado mais preciso quando comparado com outros métodos de prospeção.

Os testemunhos (logs) de sondagem retratam uma visualização unidimensional (1D) do local em estudo, dado que a informação obtida é pontual, caracterizando de forma direta o local onde foi executada a sondagem. Apesar deste método permitir a observação direta do subsolo, uma das suas limitações é a dispersão espacial da execução de sondagens. Usualmente, executam-se sondagens nos locais onde a obra é mais exigente, não havendo uma cobertura total do local de estudo.

De forma a caracterizar a distribuição da geologia e propriedades geotécnicas entre sondagens, pode ser executado um mapa bidimensional (2D) a partir das observações 1D. Este tipo de representação, retrata a continuidade espacial das camadas geológicas e propriedades geotécnicas. Contudo, este tipo de representação está suscetível a erros em locais mais complexos inerentes ao carácter discreto dos pontos de sondagem.

A representação tridimensional (3D) de investigações geotécnicas tem vindo a ser uma necessidade crescente no campo da engenharia geotécnica. Isto deve-se ao incremento da capacidade dos equipamentos de perfuração e à complexidade e desafios do subsolo, à proliferação de projetos de infraestruturas de grande escala ou ainda à necessidade de redução de riscos devido às limitações de representações 1D e 2D. A representação 3D oferece uma melhor visualização das investigações geotécnicas, estando mais próxima da realidade do que as representações 1D e 2D (e.g., Culshaw et al. 2021; Turner et al., 2021).

Diversos trabalhos na representação 3D têm sido desenvolvidos recentemente com esse propósito. No decurso deste trabalho serão apresentados alguns casos de aplicação desta metodologia. Esses trabalhos levados a cabo por autores como Petrone et al. (2023), Liu et al. (2025), Tanoli et al. (2025) pretende representar de forma factual a distribuição de unidades geotécnicas no subsolo.

2.2.1. Zonamento Geotécnico

A definição do zonamento geotécnico é uma etapa fundamental dos estudos geológico-geotécnicos, sendo o seu objetivo agrupar as unidades presentes no terreno em volumes que apresentem características idênticas e que respondam a solicitações impostas de forma

semelhante a curto e longo prazo. A elaboração de zonamentos deve atender à seleção de parâmetros que serão utilizados e a determinação de valores característicos para cada zona definida (e.g., Pistone 1989, Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Chaminé & Fernandes 2023).

Os zonamentos permitem realizar uma análise quantitativa da interação entre o solo e a estrutura a construir, levando à tomada de decisões adequadas para os métodos de construção sendo adequadas às condições locais. Através da definição de zonamentos, não se obtém apenas o referido anteriormente, mas também uma visão da distribuição espacial das unidades no subsolo (Pavlovic 2006, Silva 2023).

Dependendo dos objetivos do projeto, a definição do zonamento geotécnico é influenciada pelos parâmetros que se pretendem caracterizar. Se o objetivo do projeto for a execução de escavações, interessa, caracterizar o local de estudo de acordo com o carácter escavável ou ripável dos materiais. Já para o caso de fundações, é necessário a definição de um zonamento assente em parâmetros que permitam definir zonas com capacidade de carga adequada ao projeto. Desta forma, nas boas práticas de definição de zonamentos geotécnicos é importante, utilizar parâmetros que expressem de forma adequada as características dos materiais. Destaca-se, a heterogeneidade da litologia, ensaios SPT, o Índice RQD, o grau de alteração (W), o grau de fraturação (F), as condições hidrogeológicas e geohidráulicas (por exemplo, ensaios Lugeon), entre outros parâmetros que sejam relevantes para o caso de estudo (ISRM, 1980, 2007, 2015).

Importa salientar, que para além dos parâmetros obtidos na fase de prospeção, a utilização de ensaios laboratoriais podem complementar a definição do zonamento, oferecendo um modelo que caracteriza de forma fiel os terrenos (Silva 2023). Uma forma de garantir a homogeneidade de cada zona modelada é através da utilização de ferramentas estatísticas e geoespaciais, estas ajudam a delimitar zonas com comportamento geotécnico semelhante. Contudo, existem algumas limitações que devem ser referidas, a definição de zonas assenta em dados recolhidos localmente e permitem a definição dos limites dessas zonas verticalmente, sendo posteriormente feita uma interpretação da possível distribuição horizontal destas (Qi & Liu 2018). Este tipo de interpretações pode levar a erros na distribuição espacial das zonas, especialmente quando estamos perante terrenos heterogéneos.

Silva (2023), entende o zonamento geotécnico como um processo interativo e evolutivo, podendo ser constantemente atualizado com novas campanhas de prospeção atualizando o modelo ao longo do tempo. Este processo inicia-se com um modelo simples com base em informações prévias de observação direta do terreno, evoluindo posteriormente com a disponibilidade de novas informações para um modelo detalhado e pormenorizado da área de interesse.

A elaboração de um zonamento geotécnico deve seguir um conjunto de normas e recomendações para a caracterização do subsolo, a seleção de parâmetros e critérios de forma a definir zonas homogêneas, estando estas recomendações disponíveis no Eurocódigo 7 (2007, 2010) e na OE (2020).

Na Figura 3, podemos observar as etapas para a obtenção de um zonamento geotécnico. Assim, todas as etapas apresentam um papel fundamental na definição de um zonamento geotécnico, contudo a validação e verificação, assumem uma importância particular, dado que permitem adaptar o zonamento às condições reais encontradas no decorrer do projeto (Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011).

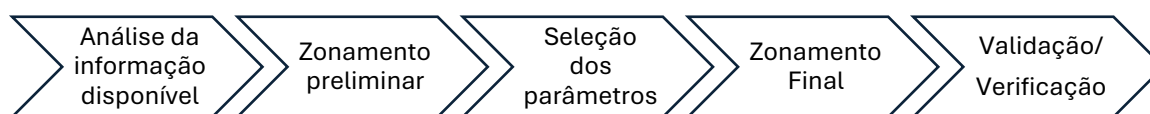


Figura 3 - Etapas para obtenção do zonamento geotécnico (adaptado de Silva 2023).

2.2.2. Modelação Geotécnica 3D

A modelação geológica e geotécnica, que consiste no reconhecimento das litologias, na caracterização das suas propriedades físicas e mecânicas e na definição de geometrias tridimensionais, representa uma etapa fundamental nos projetos de engenharia (Petrone 2023). Estes modelos, são uma ferramenta útil nas fases iniciais de um projeto permitindo a otimização das soluções construtivas e contribuem para a mitigação de riscos e a redução de custos associados (Khan et al. 2021).

Nas últimas décadas, os projetos de engenharia têm vindo a apresentar novos desafios notando-se um aumento da complexidade das obras e pelas características geológico-geotécnicas nos locais onde estas virão a ser implantadas. Desta forma a utilização de ferramentas computacionais cada vez mais sofisticadas tem vindo a ser desenvolvidas, permitindo a construção de modelos tridimensionais que possibilitam a caracterização rigorosa do subsolo (Aghamolaie et al. 2019).

Os modelos tridimensionais oferecem diversas vantagens, entre elas destaca-se o facto de este tipo de modelos permitir visualizar a distribuição espacial e as variações geotécnicas do subsolo, direccionar uma investigação geotécnica para locais que apresentem maiores fragilidades, seleccionar o tipo de fundação mais adequado e facilitar a retroanálise de modelos e parâmetros estimados (Dong et al. 2015).

Silva (2023) refere com base em trabalhos desenvolvidos por Azaronak (2015) um conjunto de etapas a executar, para o processamento de uma modelação 3D de um local. De forma genérica, a metodologia adotada por estes autores pode ser resumida em 5 etapas: recolha de dados; tratamento de dados; modelação; utilização do modelo e arquivo (Figura 4).



Figura 4 - Etapas no tratamento e processamento de dados na construção de um Modelo 3D (adaptado de Silva 2023).

A construção de um modelo 3D inicia-se na recolha de dados geotécnicas, provenientes de mapas geológicos, sondagens mecânicas, ensaios laboratoriais, campanhas geofísicas, medições in-situ, devendo a informação recolhida estar devidamente georreferenciada para garantir a sua correlação espacial (Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Menon & Masters 2025, Tanoli et al. 2025). Os dados recolhidos devem ser sujeitos a um tratamento e análise. Desta forma é possível converter a informação recolhida em parâmetros geotécnicos, como a densidade, a resistência ao corte, módulos elásticos, caracterizando as propriedades físicas e mecânicas dos materiais (Gonzalez de Vallejo & Ferrer 2011, Aldungarova et al. 2025, Hasan et al. 2025)

Os parâmetros determinados são integrados em modelos tridimensionais, que através de técnicas de interpolação espacial, como a krigagem, é possível a representação das superfícies das camadas que se pretendem representar (Kim et al. 2020). Assim, é possível observar a distribuição vertical e horizontal dos parâmetros em análise obtendo-se informações relevantes acerca dos terrenos em estudo, que interfiram diretamente com o objetivo do estudo.

Na modelação 3D, um aspeto crucial é a padronização de dados, que facilita a interoperabilidade entre diferentes sistemas e garante a reutilização eficiente da informação ao longo do ciclo de vida de um projeto (Silva 2023). Formatos como o AGS (Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists), permitem que os modelos sejam facilmente exportados, importados e atualizados sem perda de informação, tornando-se cada vez mais utilizados pelas comunidades internacionais (e.g., Lee et al. 2021, Cruz et al. 2023, Costa Pinto et al. 2023).

A longevidade dos modelos é garantida se estes forem armazenados de forma que sejam acessíveis e reutilizados em projetos futuros, permitindo a continua atualização sempre que novos dados forem obtidos no decorrer dos projetos ou até mesmo em fases posteriores a este. Desta forma, a seleção de um software adequado é fundamental.

Softwares como o Leapfrog Geo¹ ou o GEO5², apresentam interfaces com a capacidade de armazenar e integrar novos dados, permitindo a atualização dos modelos à medida que novos dados são incorporados. Salienta-se que nos últimos anos tem havido uma crescente integração dos modelos tridimensionais com sistemas BIM (Building Information Modeling), permitindo a equipas multidisciplinares partilharem e atualizarem informações em tempo real, revolucionando a forma como os dados geotécnicos são utilizados em projetos de engenharia (e.g., Seequent 2021, Vaníček et al. 2021, Turner et al. 2021, Chaminé & Fernandes 2023).

Em suma, a modelação geotécnica 3D não corresponde a apenas visualizações tridimensionais de dados, mas um elemento essencial para o reconhecimento do subsolo, permitindo uma maior capacidade de visualização de dados, melhorar na eficiência dos projetos e melhorar a comunicação de informação entre diferentes setores (e.g., Culshaw et al. 2021, Turner et al. 2021, Webber & Kijek 2022).

¹ <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/>

² <https://www.finesoftware.com.br/>

[página propositadamente em branco]

Capítulo III

Ferramentas Comerciais de Modelação Geotécnica: uma síntese

[página propositadamente em branco]

3. Ferramentas Comerciais de Modelação

Geotécnica: uma síntese

O desenvolvimento tecnológico de softwares, nos últimos anos, tem permitido a investigadores e especialistas da área o desenvolvimento comercial de metodologias de modelação geotécnica 3D cada vez mais precisos e complexos. Estes softwares, como se já tem vindo a constatar, permitem uma visualização fidedigna do subsolo, permitindo a caracterização deste e por consequente auxiliar nos trabalhos de apoio ao dimensionamento geotécnico.

De momento, o mercado é dominado pela Autodesk Inc.³ e pela Bentley Systems, Inc.⁴. Estas companhias oferecem uma variada gama de produtos, cuja aplicação e seleção deve ser adequada a cada caso de estudo. De seguida, apresentam-se alguns dos principais softwares disponíveis no mercado, referindo algumas das suas características principais e casos de estudo da sua aplicação na modelação tridimensional de projetos geotécnicos.

3.1. Autodesk Civil 3D

O Autodesk Civil 3D é um software direcionado para o desenvolvimento de projetos de engenharia civil, desenvolvido pela Autodesk Inc., sendo a sua aplicação transversal a diferentes áreas como, projeto de estradas, edifícios, pontes, redes de drenagem, entre outros.

³ <https://www.autodesk.com/>

⁴ <https://www.bentley.com/>

O Civil 3D permite criar modelos consistentes e interligados, promovendo a coerência entre diferentes fases de projeto, levando a uma redução de erro e automatizar processos de atualização. Este software foi criado com o objetivo de facilitar a colaboração entre diferentes áreas, assegurando que as equipas trabalhem com uma base de dados comum e sincronizada.

No contexto da representação tridimensional, o Civil 3D caracteriza-se por uma plataforma extensível e possui compatibilidade com ferramentas específicas que permitem a expansão das suas potencialidades. Desta forma, a extensão Geotechnical Modeler recebe destaque pois permite a incorporação e análise de dados geotécnicos diretamente nas representações tridimensionais (Figura 5). Esta extensão demonstra boas capacidades na criação de perfis do subsolo e visualizações 3D com base em ensaios e sondagens.

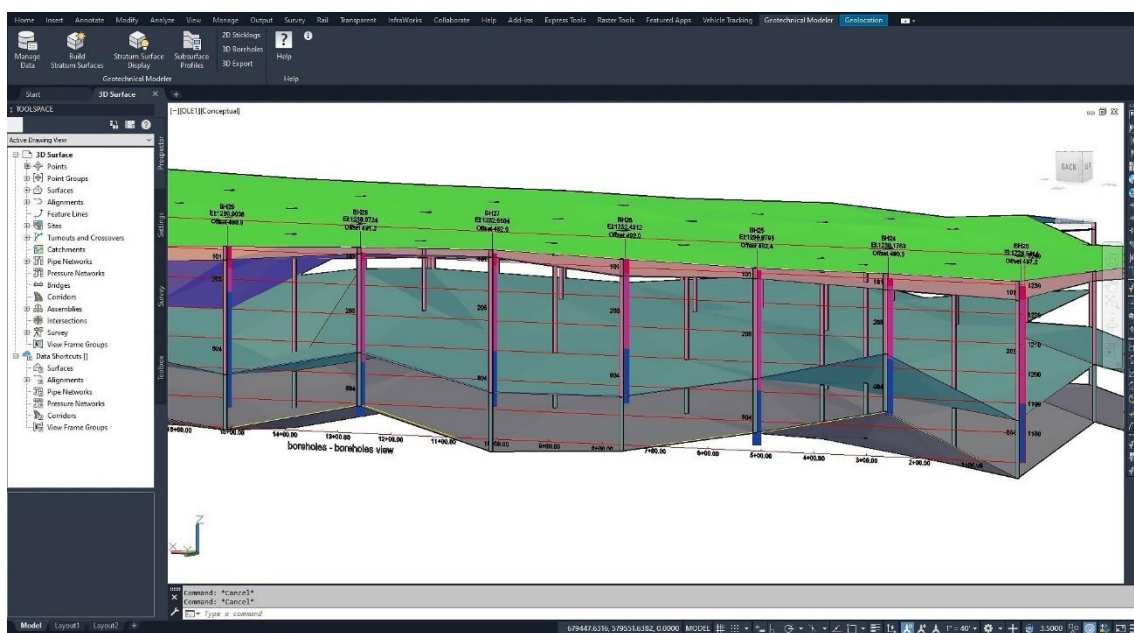


Figura 5 - Modelo 3D criado pela extensão Geotechnical Modeler (Fonte: <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview>).

Um software apresenta vantagens se for possível a compatibilidade dos seus dados com outras plataformas. O Civil 3D possui grande compatibilidade com formatos padronizados, como o AGS, o que permite a integração de dados recolhidos em campanhas geotécnicas de forma eficiente.

A combinação do Civil 3D e a extensão mencionada, são uma ferramenta capaz de produzir modelos robustos de representações tridimensionais e permitem melhorar a compreensão do comportamento dos terrenos.

3.2. RockWorks

O RockWorks é um programa desenvolvido pela RockWare que permite a interpretação, organização e visualização espacial de dados geológicos e geotécnicos. Este software permite a criação de mapas 2D e 3D do subsolo com base em dados de sondagens, descrições litológicas, ensaios SPT e CPT e resultados laboratoriais.

A capacidade deste software em criar modelos tridimensionais e zonamentos geotécnicos, aliado à criação automática de perfis geológicos/geotécnicos e secções transversais, torna-o adequado na fase de caracterização do subsolo (Figura 6). Os modelos criados, são fundamentais para apoiar decisões de projeto e prever o comportamento dos terrenos, permitindo a identificação de zonas críticas.

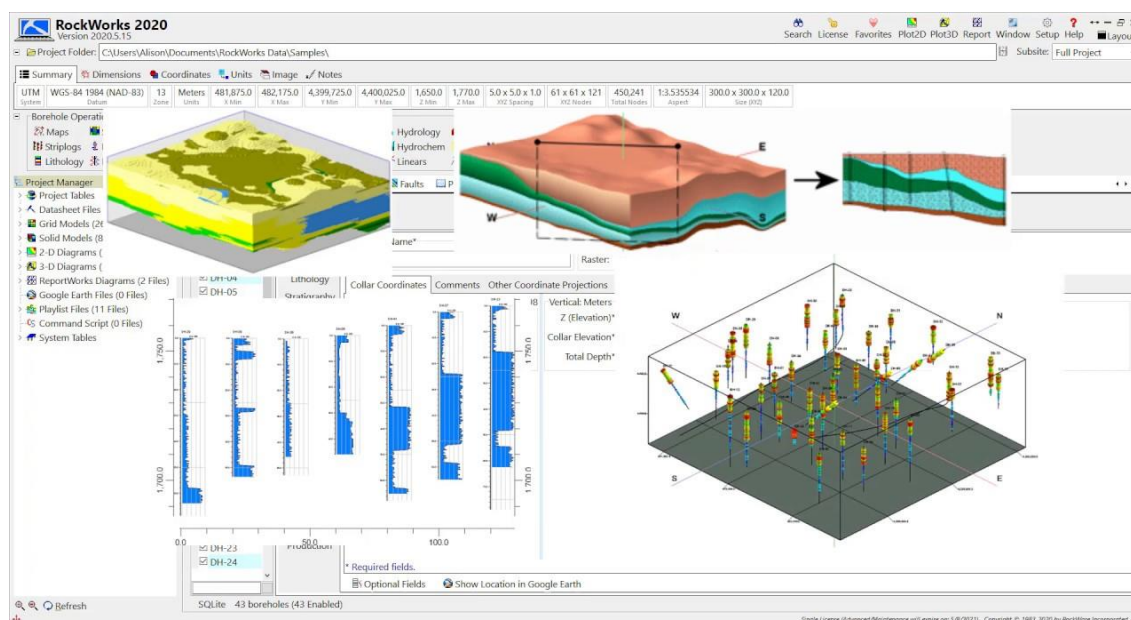


Figura 6 – ‘Layout’ demonstração do RockWorks 2020 (Fonte: <https://rockware.com/product/rockworks/>).

Em suma, o RockWorks permite a modelação tridimensional, oferecendo uma base conceptual e geométrica coerente, transmitindo uma visão clara das condições do subsolo. Este software permite exportar dados em formatos compatíveis softwares CAD e SIG.

3.3. GEO5 Stratigraphy

O Stratigraphy é um software desenvolvido pela software GEO5 que permite gerar modelos geológicos e geotécnicos a partir de dados de campo como sondagens e ensaios de penetração (SPT, CPT) e observações geológicas (Figura 7). Este módulo permite ao operador interpretar e

representar de forma clara as condições do subsolo, assumindo um papel preponderante no planejamento e dimensionamento de obras geotécnicas.

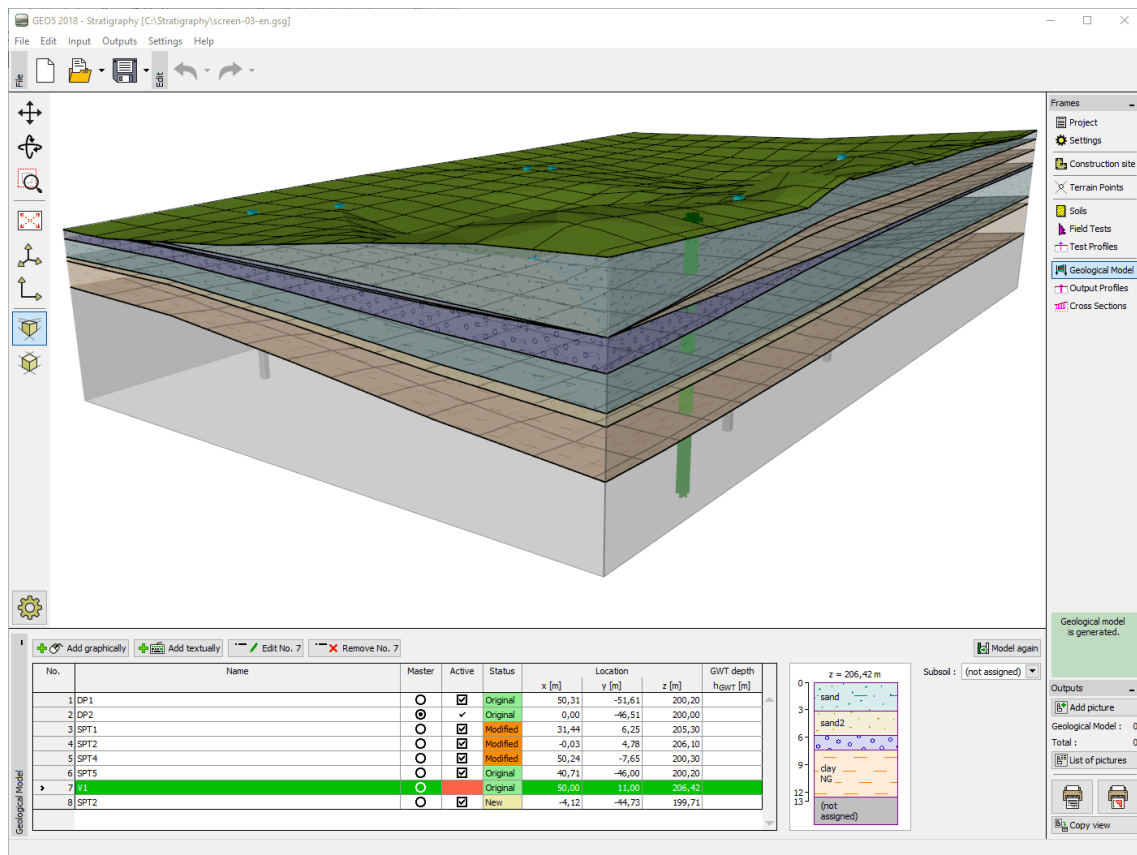


Figura 7 - Modelo tridimensional gerado pelo GEO5 (Fonte: <https://www.finesoftware.eu/geotechnical-software/stratigraphy/>)

Este software, permite a introdução e gestão de dados de sondagens, possibilitando a importação da informação a partir de ficheiros Excel ou formatos estandardizados como o formato CSV. As sondagens podem incorporar descrições detalhadas das características do solo e rochas intersetadas, incluindo a classificação geotécnica, descrição geológica, nível freático, entre outros parâmetros. A partir destes dados, o software realiza a interpolação entre pontos e gera perfis geológicos contínuos, permitindo a edição manual dos limites das camadas ou ajustar de forma adequada o modelo.

O GEO5 Stratigraphy tem como vantagens a integração direta com os restantes softwares da GEO5, como por exemplo o Slope Stability, Settlement ou Shallow Foundations. Esta vantagem permite que representações geradas possam ser utilizadas de forma direta como base para estudos geotécnicos, garantindo coerência dos dados ao longo de todas as fases de um projeto.

Importa salientar, que o GEO5 Stratigraphy permite exportar os modelos e perfis em formatos compatíveis com softwares CAD (formato DXF) e ferramentas SIG (Sistemas de Informação Geográfica).

3.4. Bentley OpenGround

O OpenGround é um software desenvolvido pela Bentley Systems direcionado para a gestão, visualização e modelação de dados geotécnicos. Este visa a substituição de métodos tradicionais de tratamento de dados de sondagens e investigações de campo, disponibilizando os dados de forma consistente e atualizada em tempo real.

A função principal do OpenGround é a centralização dos dados de campanhas de prospeção geotécnica, tais como, sondagens, ensaios SPT, CPT, análises laboratoriais, descrições litológicas e classificações geotécnicas. O software, após tratamento dos dados referidos, permite a visualização de perfis geológicos e geotécnicos, zonamentos, índices geotécnicos e classificações geomecânicas e modelos tridimensionais, promovendo uma compreensão simplificada e precisa das condições do subsolo (Figura 8).

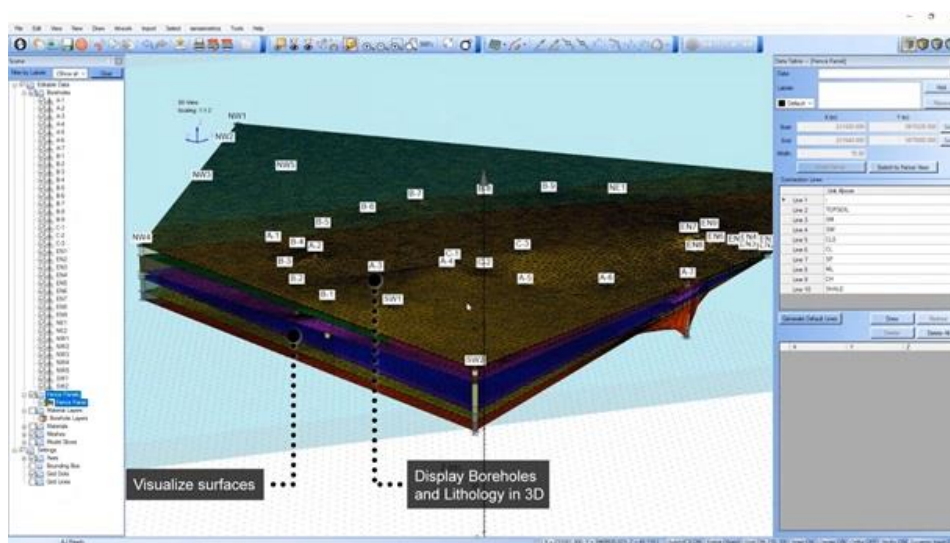


Figura 8 - Modelo tridimensional retirado da ficha de apresentação do *software* OpenGround (Fonte: <https://geoengineer.org/software/openground-cloud>).

Uma das vantagens do OpenGround, é a possibilidade de integração dos dados e informação com outras soluções do ecossistema Bentley, tais como o PLAXIS, OpenRoads, OpenRail, AutoCAD Civil 3D e plataformas BIM. Desta forma, existe uma passagem direta de informação, integrando diretamente os dados em análises numéricas, modelação de projetos e elaboração de relatórios sem perda de informação.

3.5. Leapfrog Geo

O Leapfrog Geo é um software desenvolvido pela ARANZ Geo, é atualmente mantido pela Seequent, The Bentley Subsurface Company. Este software, permite a modelação geológica tridimensional, sendo, por vezes necessário adaptar o modelo à escala a que se está a trabalhar, dado que é um software focado na exploração mineral. Contudo, é um software versátil e pode ser utilizado para as áreas da geotecnia, hidrogeologia e engenharia civil.

A vantagem deste software é a sua rápida capacidade de criação de modelos geológicos 3D com base em dados de campo, como furos de sondagem, ensaios in situ, utilização de mapas geológicos e dados geofísicos (Figura 9). Acrescenta, o facto de este atualizar automaticamente os modelos criados sempre que são adicionadas novas informações, o que leva a uma melhoria significativa da eficiência do fluxo de trabalho.

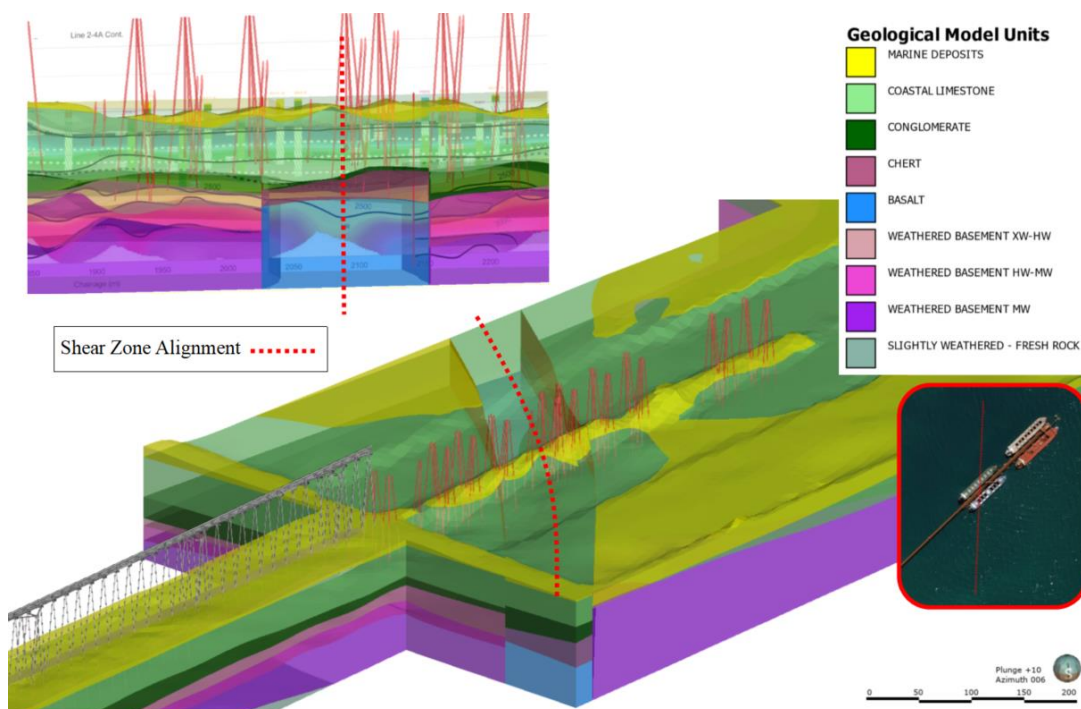


Figura 9 - Modelo geológico 3D em Cape Lambert (Whiteman 2021)

Apesar de o Leapfrog Geo seja direcionado para o tratamento e interpretação de dados geológicos, a forma como interpreta e trata os dados introduzidos permite a modelação e compreensão do comportamento geotécnico. O facto de este identificar e caracterizar camadas litológicas, zonas de alteração, descontinuidades, nível freático torna-o uma ferramenta versátil para o dimensionamento de projetos de engenharia.

Como se tem vindo a constatar, o aspeto mais valorizado no mercado é a capacidade de um software conseguir disponibilizar os seus resultados com outros. O Leapfrog Geo, apresenta essa capacidade, dado que consegue disponibilizar os resultados obtidos compatíveis com softwares como o PLAXIS 3D, RS3 (da Rocscience), entre outros. Os modelos criados podem também ser exportados em formatos como DXF ou 3D grids, possibilitando a partilha de informação com softwares de modelação numérica permitindo a análise de tensões e estabilidade de taludes.

3.6. Aplicações de Estudo

3.6.1. Escavação Urbana

Silva (2023) elaborou um modelo geológico-geotécnico 3D para uma escavação urbana na cidade do Porto, com base nos dados recolhidos durante a campanha de prospeção realizada para suporte ao projeto de execução.

O modelo foi desenvolvido com base em trinta e quatro (34) furos de sondagem, complementados por ensaios SPT, realizados num terreno localizado na Praça do Bom Sucesso, na cidade do Porto. A partir dos logs de sondagem e dos resultados obtidos, o autor definiu o zonamento geotécnico dos terrenos, com base em correlações utilizadas para estimar as propriedades dos solos e das rochas.

Nos seus trabalhos, o autor destaca que a padronização dos dados é um fator determinante na elaboração de modelos tridimensionais. Para tal, recorreu ao formato AGS, preparando um ficheiro no formato “.ags”, que foi posteriormente utilizado na criação do modelo.

O software selecionado para o desenvolvimento do modelo foi o Autodesk Civil 3D, pela sua versatilidade e pela possibilidade de inclusão de extensões dedicadas, como o Geotechnical Modeler, que permite a importação eficiente de dados geológico-geotécnicos e a consequente criação de modelos tridimensionais do terreno.

A aplicação do software permitiu ao autor a elaboração de dois modelos geológico-geotécnicos. O primeiro modelo, que corresponde ao modelo provisório, apresentando um modelo complexo, com falta de informação e erros de interpretação algorítmica. Este modelo apresenta alguns hiatos, resultado da dificuldade que o software possui em detetar pontos de transição entre zonas geológico-geotécnicas.

Para contornar o problema referido, foram criados pontos entre zonas geotécnicas, o que permite eliminar erros e incoerências do terreno. O que resultou no modelo final evidenciado na Figura 10.

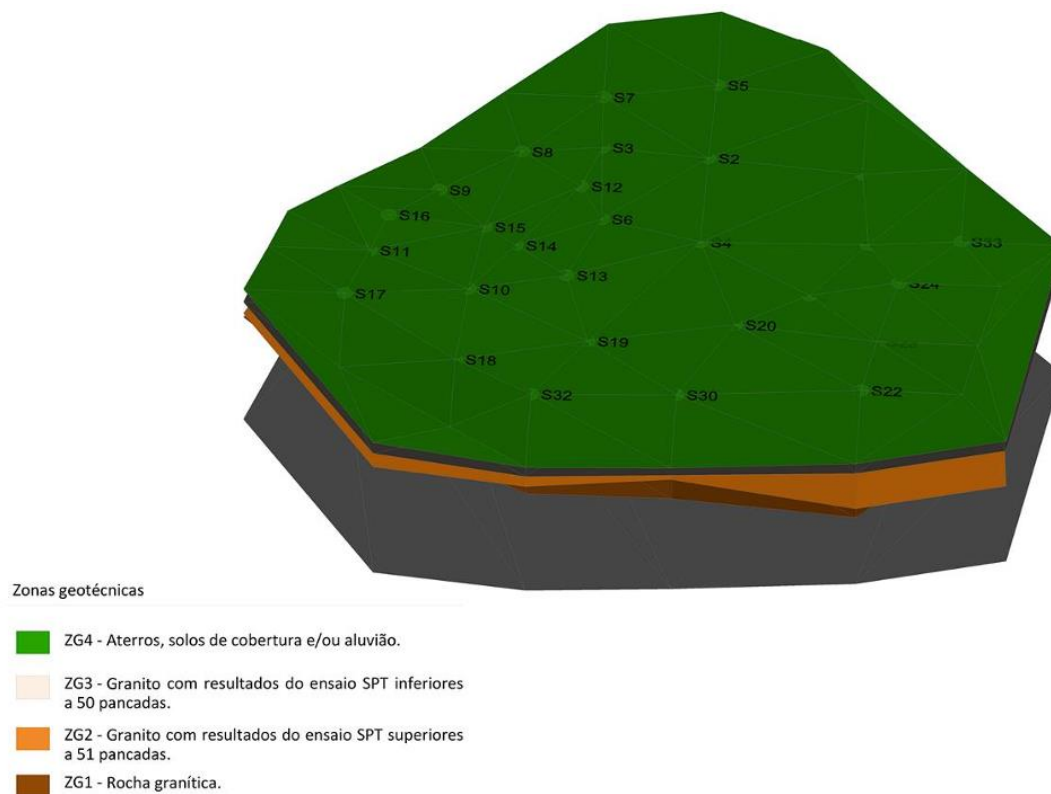


Figura 10 - Modelo Geológico-Geotécnico 3D final (Silva 2023).

3.6.2. Barragem Lower Baker, Estado de Washington, EUA (Bartsch & Gilman 2019)

Bartsch & Gilman (2019) apresentam o caso da barragem de betão de Lower Baker localizada nos EUA. A Barragem Lower Baker localiza-se na confluência dos rios Baker e Skagit, no nordeste do estado de Washington, EUA. Esta estrutura em arco apresenta uma altura de 87 metros e foi construída em 1925. Pouco depois de o reservatório começar a encher, a barragem começou a apresentar fugas nas paredes de apoio. Inicialmente, estas fugas foram tratadas com injeção de calda de cimento, na década de 1940, mas as infiltrações voltaram a surgir com o tempo.

Com a persistência das fugas foi procurada uma metodologia que permitisse mitigar o problema. Neste âmbito, a Puget Sound Energy (PSE), empresa responsável pela operação da barragem, iniciou em 2012 um estudo aprofundado. O objetivo do estudo era a identificação das causas das fugas a partir da modelação de dados geológicos e estruturais de forma a desenvolver uma solução de intervenção a longo prazo.

A construção do modelo geológico, consistiu na combinação de dados históricos e informações recentes. O modelo geológico incorporou dados de varrimento LiDAR, assim como dados de diferentes campanhas de prospeção.

A definição da superfície do modelo foi obtida a partir de levantamentos LiDAR realizados nos encontros da barragem e na zona de dissipação. Deste levantamento resultou um modelo digital de elevação (DEM), que serviu como limite superior para o modelo geológico 3D.

A partir dos dados LiDAR, e da sua combinação com os dados das sondagens realizadas entre 2015 e 2018, foi possível a definição de estruturas geológicas, como falhas, delimitação de litologias, entre outros parâmetros.

De forma a obter um modelo mais robusto, foi recorrido a dados históricos, como relatórios de campanhas de prospeção anteriores e das campanhas de injeção. Nas zonas onde a informação era escassa, recorreu-se a fotografias históricas obtidas aquando da construção da Barragem o que possibilitou uma estimativa da localização e orientação das diáclases observadas.

Como referido, o software utilizado para auxiliar a modelação 3D foi o Leapfrog Geo, dado que este permite integrar todos os dados disponíveis num único modelo, possibilitando a visualização tridimensional deste. O modelo final permitiu a identificação das falhas principais e a modelação da litologia da área de estudo, fornecendo uma visão detalhada subjacente à barragem (Figura 11).

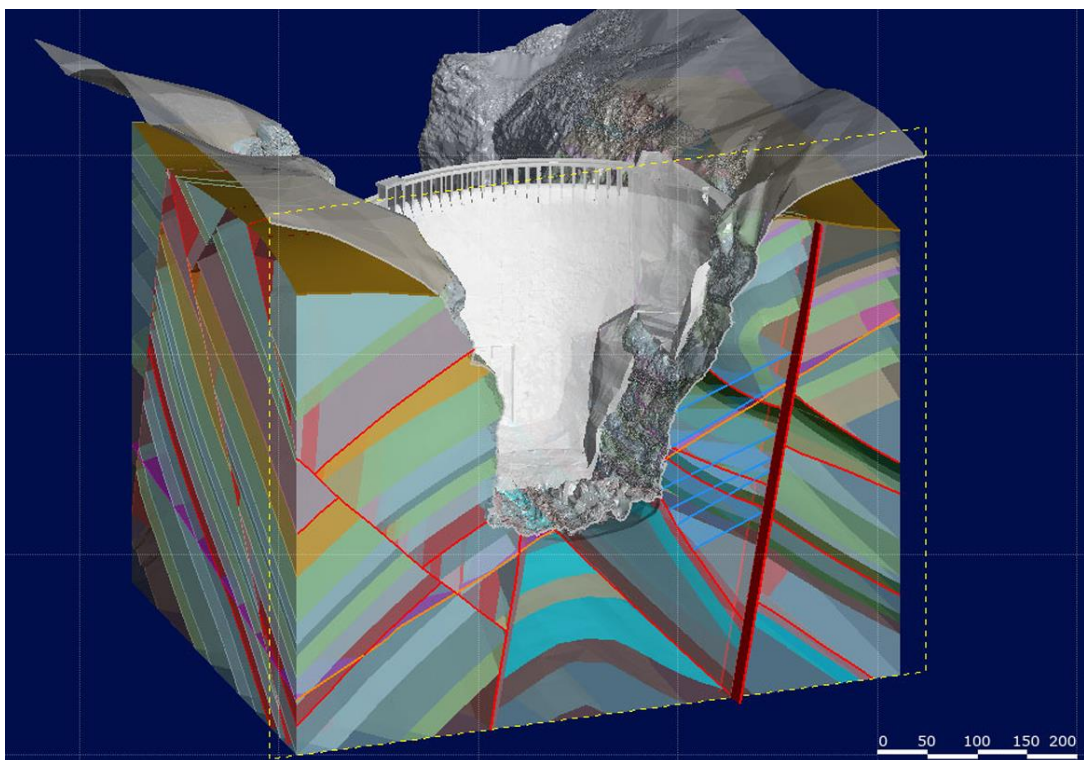


Figura 11 - Representação 3D da combinação do modelo geológico e estrutural para a Lower Baker Dam, (adaptado de Bartsch & Gilman 2019).

[página propositadamente em branco]

Capítulo IV

Apresentação do caso de estudo

[página propositadamente em branco]

4. Apresentação do Caso de Estudo

4.1. Introdução

No presente trabalho propõe-se o desenvolvimento de representações de dados geológico-geotécnicos aplicados ao caso específico de um projeto de uma barragem de aterro. Estas representações visam a caracterização de parâmetros adquiridos aquando da campanha de prospeção.

As barragens desempenham um papel crucial na gestão de recursos hídricos. Podem ser construídas para diferentes fins, desde o controlo de cheias, abastecimento de água para consumo doméstico, fins agrícolas, indústria, produção de energia elétrica e turismo (Athari et al. 2025, Belete et al. 2025).

A International Commission on Large Dams (ICOLD) adota uma classificação básica para as barragens, distinguindo dois tipos principais: barragens de aterro e barragens de betão. Estas estruturas são classificadas com base nos materiais utilizados na sua construção (Bhattari et al. 2016).

As barragens de aterro podem ser subdivididas em barragens de solo e em barragens de enrocamento, enquanto as barragens de betão dividem-se em três tipos: barragens de gravidade, barragens em arco e barragens de contraforte (Bhattari et al. 2016). De seguida, apresenta-se genericamente cada um destes tipos de barragens.

4.2. Enquadramento das Estruturas

4.2.1. Barragens de Betão

a) Barragens de Gravidade

As barragens de gravidade, tal como as barragens de aterro, são amplamente utilizadas a nível mundial, oferecendo uma fiabilidade elevada, relativa facilidade de construção e adaptabilidade a diferentes condições geológicas (Sharma et al. 2025).

Este tipo de barragem, baseia-se na sua forma geométrica e no peso da estrutura para garantir a estabilidade da estrutura e resistir às pressões hidrostáticas da água a montante (Atallah 2002) (Figura 12).

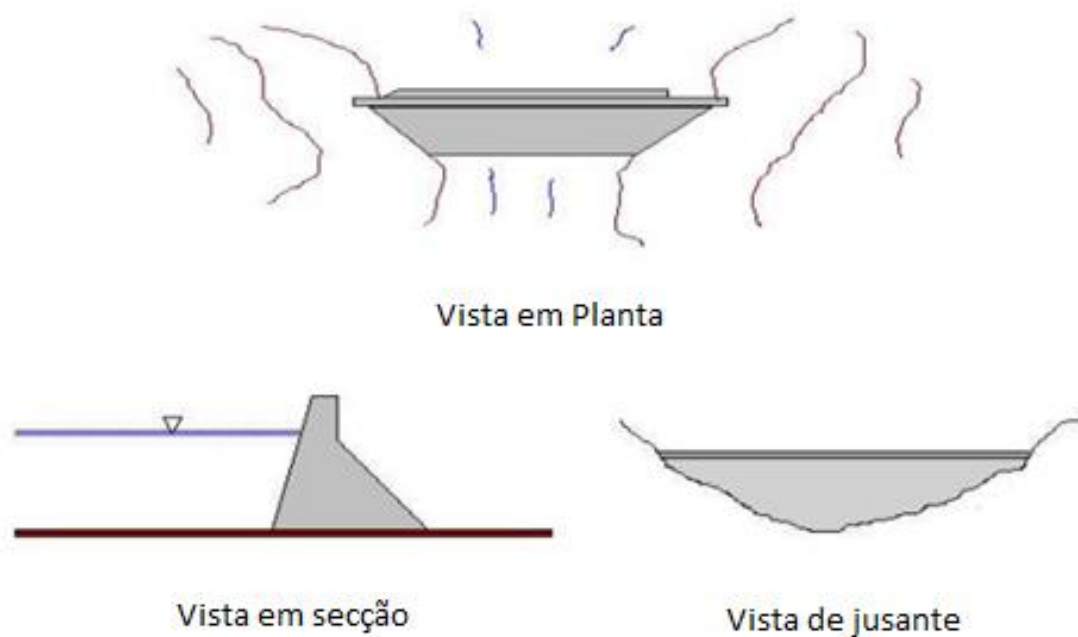


Figura 12 - Representação de uma barragem de gravidade (adaptado de Atallah 2002).

Este tipo de barragem, apesar de apresentar um elevado número de vantagens, apresenta um elevado custo inicial e processos de construção mais morosos devido à quantidade de betão necessária e à utilização de equipamentos de apoio muito especializados.

A principal vantagem deste tipo de estrutura é o facto de se poderem construir em qualquer local, desde que os terrenos de fundação possuam resistência adequada para suportar as cargas impostas, sendo esta característica um fator limitante na altura da barragem (Sharma et al. 2025).

b) Barragens em Arco

As barragens em arco, são adequadas para vales profundos e estreitos, nos quais as encostas são constituídas por formações geológicas estáveis e resistentes, capazes de suportar pressões elevadas (Panicker et al. 2024). Este tipo de barragem está dependente da resistência da ligação entre a barragem e a rocha das encostas e a resistência da própria rocha para suportar a pressão da água. Isto contrasta com as barragens de gravidade, que se caracterizam por ser o seu próprio peso a suportar a pressão da água (Figura 13).

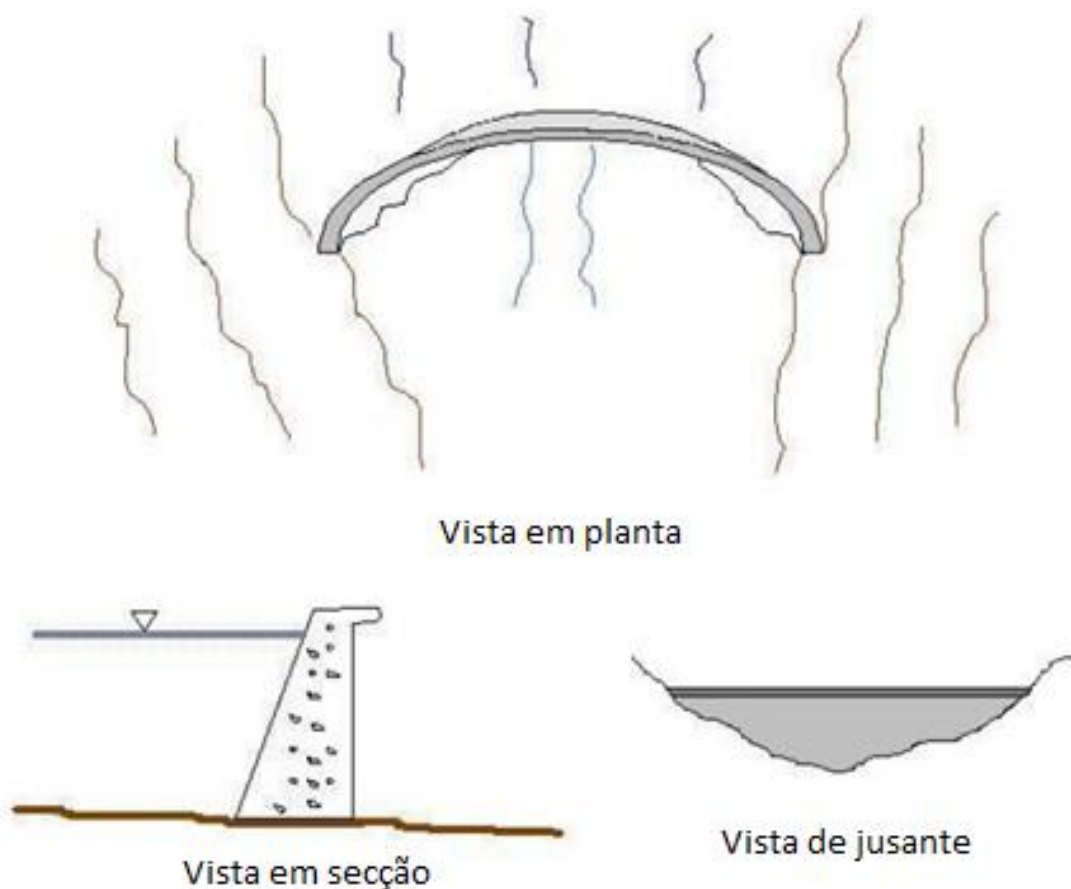


Figura 13 - Representação de uma barragem em arco (adaptado de Atallah 2002).

Devido às características deste tipo de estrutura, as barragens em arco apresentam uma altura superior ao seu comprimento. Quando comparadas com as barragens de gravidade em betão, utilizam quantidades menores de material na sua construção. No entanto, a sua execução exige conhecimentos técnicos elevados dada a complexidade da obra (Atallah 2002).

c) Barragens de Contraforte

As barragens de contraforte são uma combinação das duas últimas barragens de betão referidas, barragens de gravidade e barragens em arco, resultando numa estrutura híbrida (Figura 14). Este tipo de estrutura utiliza contrafortes posicionados na face jusante para suportar e distribuir de forma eficaz a pressão da água (Al-Bayati & Arslan 2023).

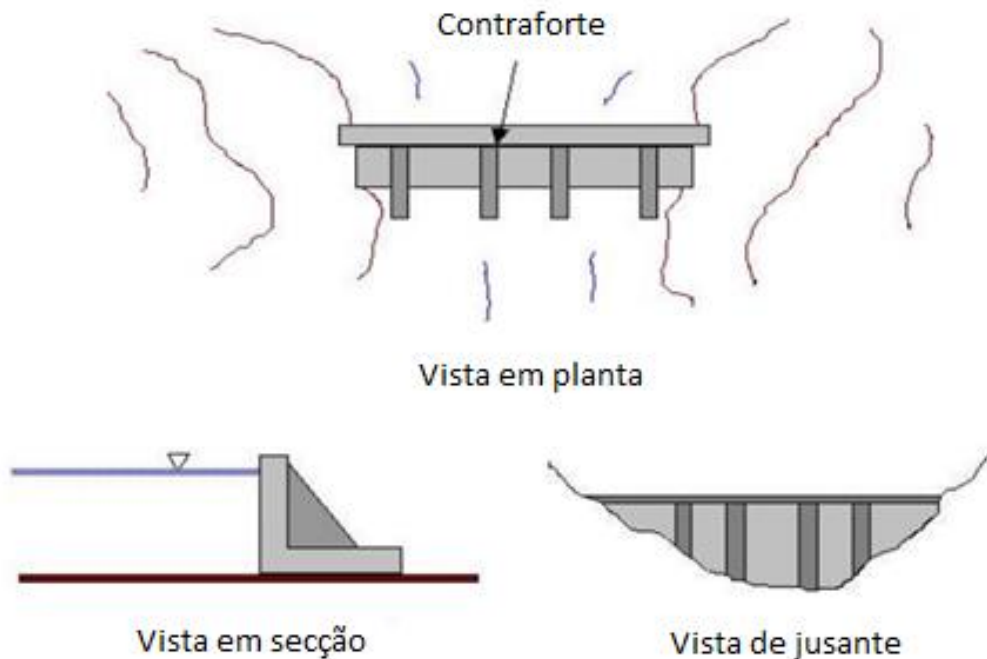


Figura 14 - Representação de uma barragem de contraforte (adaptado de Atallah 2002).

Este tipo de barragem requer quantidade de betão menores do que as barragens de gravidade, influenciando diretamente os custos de construção, o peso da estrutura e a pressão que esta exerce sobre os terrenos de fundação. Dado que este tipo de barragem utiliza contrafortes para distribuir as cargas impostas, há uma redução nas forças transmitidas aos pontos de apoio da barragem nas encostas, contrastando assim com as barragens em arco (Atallah 2002). Este tipo de barragem surge para enfrentar desafios de custo, geológicos e topográficos distintos.

4.2.2. Barragens de Aterro

As barragens de aterro caracterizam-se por uma estrutura relativamente simples, constituída essencialmente por solo compactado e enrocamento, apresentando excelente adaptabilidade a diversos tipos de fundação (Galindo et al. 2020). Esta característica contribui para a sua utilização em qualquer tipo de terreno.

As barragens de aterro utilizam na sua construção materiais naturais disponíveis na proximidade da obra, o que reduz significativamente os custos de transporte e aquisição destes (EL-Molla & Kilit 2025). O baixo custo de construção e a necessidade de equipamentos menos complexos, acrescem ao número de fatores que levam a que este tipo de barragem seja a opção mais escolhida em comparação a outro tipo de barragem.

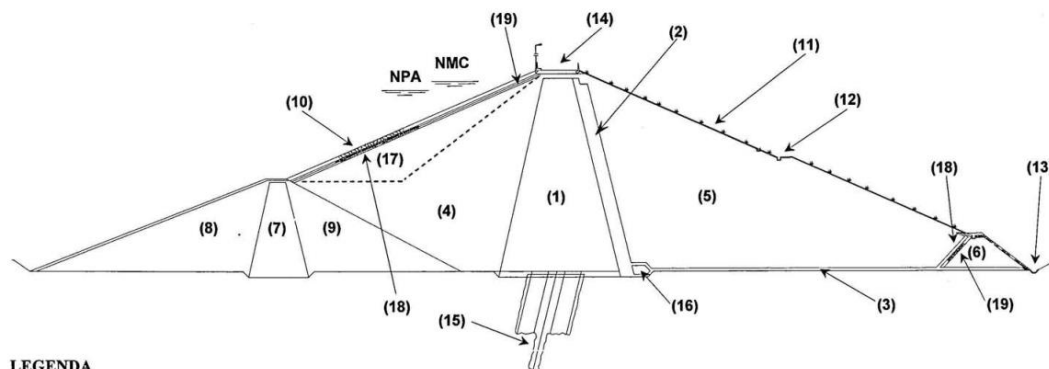
Acresce o facto de este tipo de barragem apresentar uma maior flexibilidade face às condições dos terrenos de fundação, quando as comparamos com barragens de betão, pois adaptam-se melhor a terrenos heterogéneos ou menos competentes (Li et al. 2024).

a) Barragem de Aterro de Solo

As barragens de aterro de solo são geralmente construídas em vales largos com encostas suaves. Os requisitos para as condições de fundação são menos restritos quando as comparamos com as barragens de gravidade. A altura da barragem, é limitada pela resistência do material de fundação e dos materiais que as constituem (Atallah 2002).

Usualmente as barragens de aterro de solo são constituídas por diferentes secções zonadas, como zonas menos impermeáveis (que corresponde ao núcleo, normalmente localizado no centro da secção transversal da barragem) e zonas relativamente permeáveis (que constituem os maciços estabilizadores, que suportam o núcleo e protegem a barragem de ações erosivas). As zonas permeáveis podem ser constituídas por diferentes tipos de materiais, estando dependente das necessidades do projeto (Khassaf 2020).

Na Figura 15, podemos observar um perfil tipo de uma barragem de aterro de solo, no qual o corpo da barragem é formado por um núcleo, normalmente construído em material argiloso, que dificulta a percolação da água. As zonas na envolvente do núcleo, correspondem aos maciços estabilizadores a montante e a jusante, que ajudam na estabilização da estrutura.



LEGENDA

- | | |
|---|---|
| <p>1 – NÚCLEO
 2 – FILTRO DE CHAMINÉ
 3 – TAPETE FILTRANTE
 4 – MACIÇO ESTABILIZADOR DE MONTANTE
 5 – MACIÇO ESTABILIZADOR DE JUSANTE
 6 – PÉ DE JUSANTE
 7 – NÚCLEO DA ENSECADEIRA
 8 – MACIÇO ESTABILIZADOR DE MONTANTE DA ENSECADEIRA
 9 – MACIÇO ESTABILIZADOR DE JUSANTE DA ENSECADEIRA
 10 – PROTECÇÃO DO PARAMENTO DE MONTANTE
 11 – PROTECÇÃO DO PARAMENTO DE JUSANTE</p> | <p>12 – CALEIRA DE DRENAGEM NA BANQUETA
 13 – VALETA DE DRENAGEM NO PÉ DE JUSANTE
 14 – COROAMENTO DA BARRAGEM
 15 – CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO
 16 – VALA DE DRENAGEM LONGITUDINAL
 17 – PROTECÇÃO DO MACIÇO ESTABILIZADOR DE MONTANTE
 18 – FILTROS DIVERSOS
 19 – DRENOS DIVERSOS
 NPA – NÍVEL DE PLENO ARMAZENAMENTO
 NMC – NÍVEL DE MÁXIMA CHEIA</p> |
|---|---|

Figura 15 - Perfil tipo de uma barragem de aterro de solo (adaptado de Quintas 2002).

A barragem é normalmente equipada com um sistema de drenagem e filtros, para permitir o escoamento de águas de infiltração, de forma a reduzir o risco de fendilhação. Este tipo de barragem é também dotado de uma camada de enrocamento que permite a proteção dos taludes da ação da água e do vento.

Quando este tipo de barragem é contruído sobre materiais com permeabilidade elevada é procedimento comum a execução de uma cortina de estanqueidade, de forma a impermeabilizar os terrenos de fundação.

b) Barragens de Aterro de Enrocamento

As barragens de aterro de enrocamento são construídas com fragmentos rochosos de diferentes dimensões, contrariamente às barragens de aterro de solo que utilizam na sua construção solo compactado. A impermeabilização deste tipo de barragens pode ser feita com a incorporação de um núcleo de argila ou pela utilização de uma membrana impermeável na face localizada a montante, que pode ser composta por betão ou betuminoso, dependendo dos requisitos projeto (Khassaf 2020).

Os terrenos de fundação deste tipo de estrutura devem ser mais competentes do que os terrenos do tipo de barragem referido anteriormente, contudo, não requerem a mesma exigência para as barragens de gravidade de betão, tornando esta opção viável para zonas menos favoráveis e onde existam materiais rochosos na proximidade para a sua construção (Atallah 2002).

Assim, se no local onde se pretende construir este tipo de barragem existirem materiais rochosos disponíveis, esta solução pode ser economicamente viável, derivada da redução significativa dos custos de transporte e do custo da própria matéria-prima. A construção deste tipo de barragens é, por norma, rápida e dadas as características dos materiais de construção torna-a adequada para regiões com climas extremos (Khassaf 2020). Contudo, a construção deste tipo de barragem requer o uso de equipamentos pesados para o transporte e compactação dos materiais, implicando, por vezes, custos adicionais.

4.3. Caso de Estudo

A aplicação a seguir apresentada consiste no caso da Barragem de aterro, já construída, localizada na localidade do Açafal, no concelho de Vila Velha de Ródão, distrito de Castelo Branco. A barragem está implantada sobre a Ribeira do Açafal, um afluente do rio Tejo. Esta infraestrutura integra a bacia hidrográfica do Tejo e tem como principal finalidade o abastecimento do sistema de regadio agrícola da região.

A sua construção foi concluída em 2004, tendo o projeto sido elaborado em 1997 (Figura 16).



Figura 16 - Barragem do Açafal, vista do talude jusante (Fonte: <https://cnpqb.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal>)

4.3.1. Características da Barragem e da Albufeira

De acordo com a informação constante no portal da APA (<https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/barragens-de-portugal>) a Barragem do Açafal é uma estrutura do tipo aterro zonado, com uma altura de 29 metros acima da fundação (26 metros acima do terreno natural). O

desenvolvimento do coroamento é de 121 metros, com uma largura de 7,5 metros e o volume total de aterro é de aproximadamente 138 000 m³.

Na Figura 17, podemos observar a planta da barragem e alguns dos elementos que a constituem, taludes, descarregador de cheias e descarga de fundo. O descarregador de cheias localiza-se no lado esquerdo, não apresenta qualquer tipo de controlo e a dissipação de energia é salto de esqui. O descarregador de fundo localiza-se na margem direita, é do tipo conduta sob aterro, sendo o controlo a montante efetuado com recurso a comportas planas e a jusante por válvulas de jato oco.

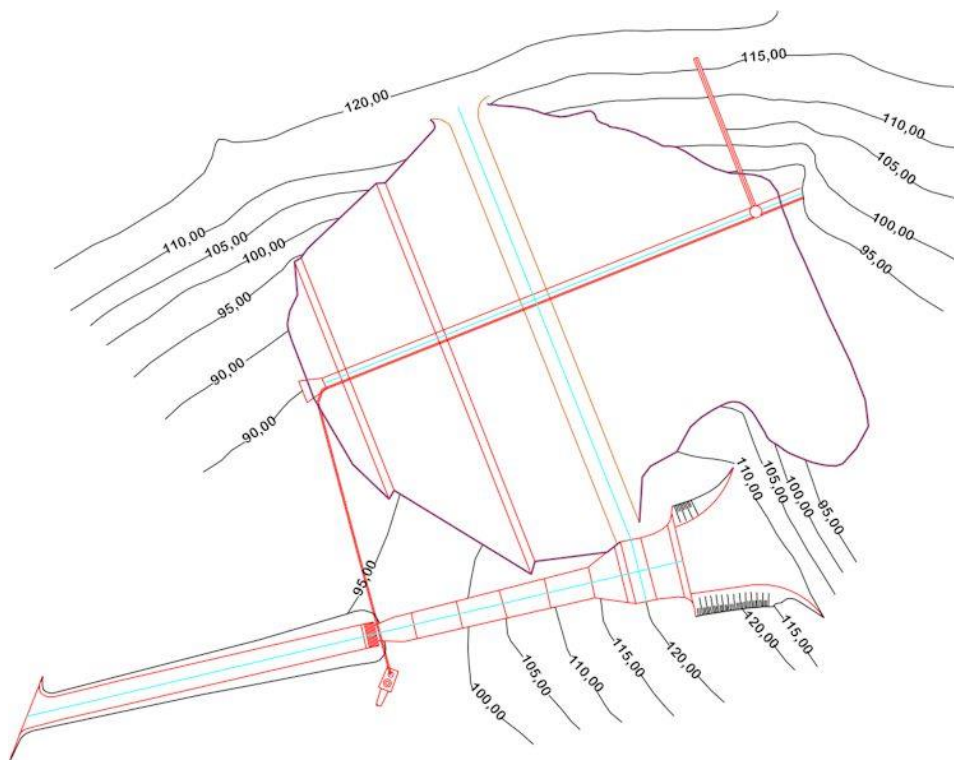


Figura 17 - Planta da barragem (Fonte: <https://cnpqb.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal>).

O nível de pleno armazenamento (NPA) situa-se à cota 112,6 metros, enquanto o nível máximo de cheia (NMC) atinge a cota 114,75 metros (Figura 18).

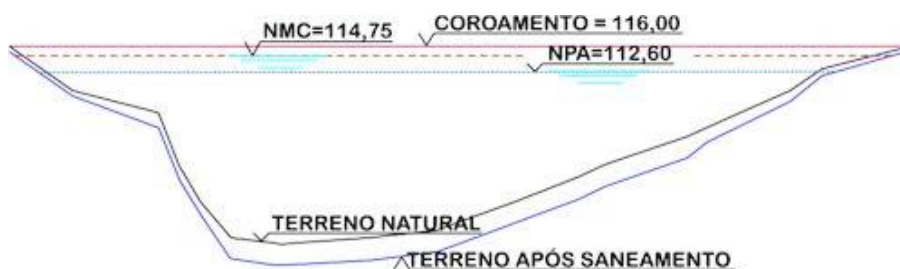


Figura 18 - Perfil longitudinal da barragem (Fonte: <https://cnpqb.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal>).

No que refere à geometria dos taludes, a estrutura apresenta a montante uma inclinação de 2,7:1 (H/V) e a jusante uma inclinação de 2,2:1. O núcleo de impermeabilização da barragem possui uma inclinação no contacto com os materiais estabilizadores da barragem de 2:1 (H/V) (Figura 19).

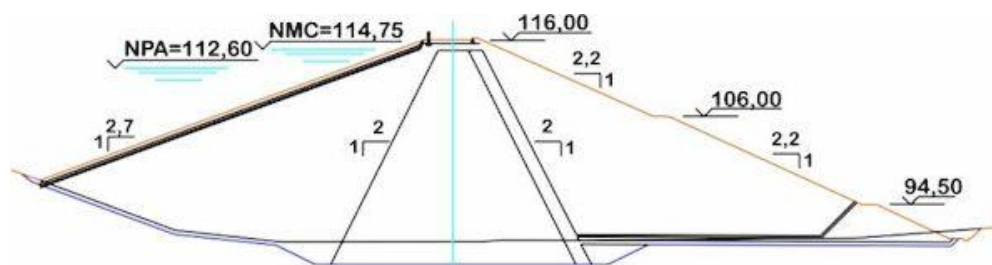


Figura 19 - Perfil transversal da barragem (Fonte: <https://cnpqb.apambiente.pt/content/a%C3%A7afal>).

4.3.2. Trabalhos de Prospecção

A campanha de prospecção para a caracterização dos terrenos de fundação e das manchas de empréstimo de suporte ao projeto de execução da barragem, consistiu na realização de 4 furos de sondagem ao longo do eixo da barragem, 21 poços de reconhecimento geológico e na execução de 6 perfis de refração sísmica. As sondagens, foram executadas com recurso a equipamento de perfuração por rotação, sendo complementados por ensaios de absorção de água (ensaios Lugeon) para a caracterização hidrogeológica dos terrenos.

4.3.3. Caracterização Geológica da Região

Do ponto de vista geológico, os terrenos da área de estudo são constituídos por Xistos e Grauvaques como representado na Folha 24-D Castelo Branco da Carta Geológica de Portugal de (Ribeiro et al. 1967) (Figura 20). Do ponto de vista geológico, esta formação é constituída por xistos argilosos finos, alternados com grauvaques, apresentando de forma geral uma coloração negra ou cinzento-escura quando se apresentam sãos e castanho-escura quando se encontram alterados.

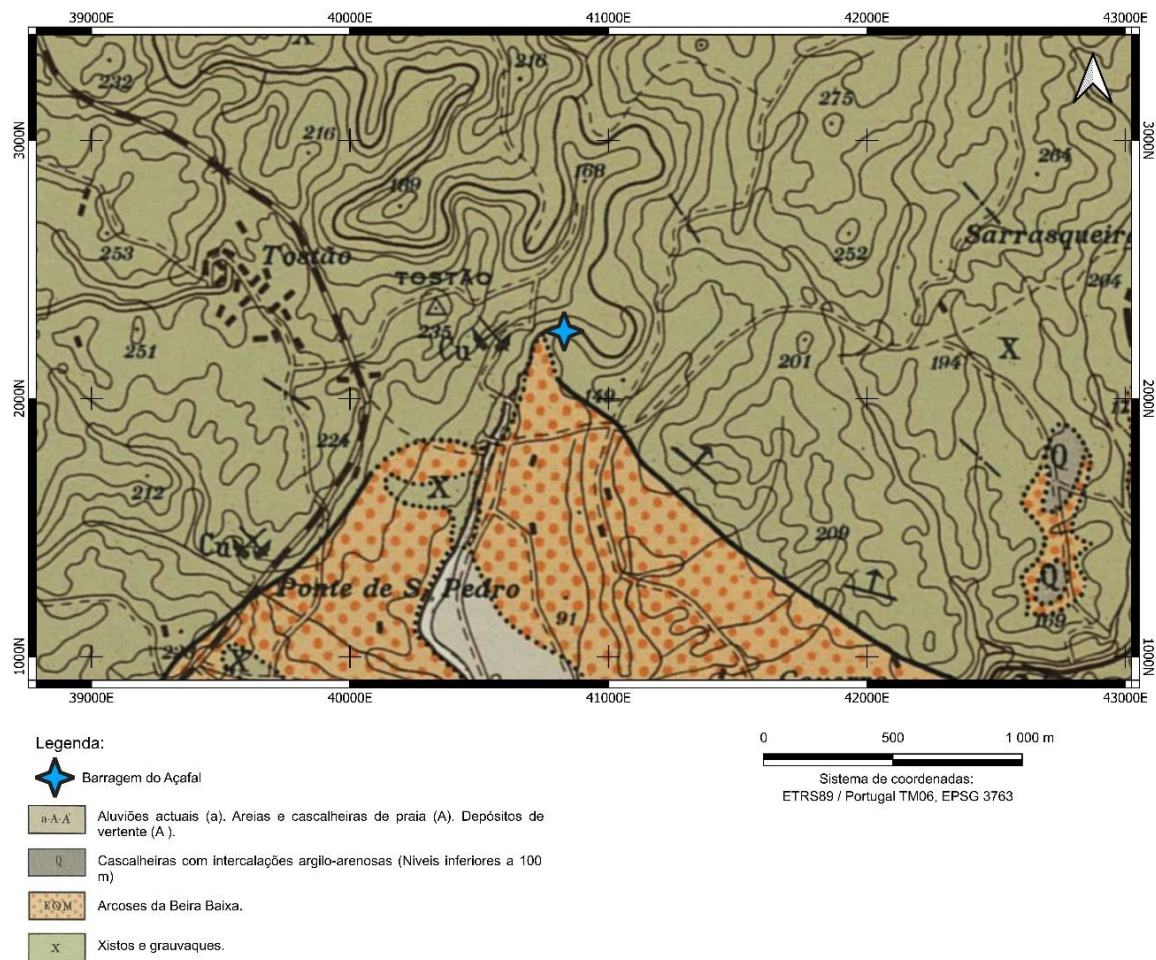


Figura 20 - Enquadramento geológico do local em estudo. Extrato da Folha 24-D Castelo Branco da Carta Geológica de Portugal (Ribeiro et al. 1967).

Subjacente à formação referida, ocorrem aluviões resultantes da decorrência da linha de água e solos de cobertura que são visíveis nos logs de sondagem e fichas de caracterização dos poços de reconhecimento. Na Notícia Explicativa da Carta 24-D é referido a existência de filões quartzosos que cortam a formação. Estes filões foram também identificados nos logs de sondagem a profundidades superiores a 10m.

A jusante da Barragem, ocorrem formações de Arcoses da Beira Baixa, que assentam sobre os xistos da região. Os afloramentos desta formação são extensos, observando-se por vezes retalhos isolados devido a ações erosivas.

Durante a campanha de prospeção, verificou-se ainda que a xistosidade dos materiais apresenta uma inclinação que varia entre 50º e 60º, sendo esta inclinação concordante com a das famílias de diáclases.

4.3.4. Ensaio Lugeon

Foram realizados 23 ensaios Lugeon ao longo das quatro sondagens executadas no eixo da barragem. Nas sondagens S1, S2 e S3, os primeiros ensaios iniciaram-se aos 5 m de profundidade, enquanto na sondagem S4 o primeiro ensaio foi realizado à profundidade de 1,30 m. Os ensaios foram efetuados em troços de 5 m de comprimento, de forma a obter uma caracterização detalhada da permeabilidade do maciço rochoso.

A área de estudo caracteriza-se por valores de absorção baixos, sendo notória uma tendência de diminuição da permeabilidade com a profundidade. Os valores à superfície são mais elevados, resultado do grau de fracturação dos materiais, que afeta diretamente o ensaio executado.

4.3.5. Representações dos Elementos Geológico-Geotécnicos do Caso de Estudo

No capítulo seguinte são desenvolvidas várias representações interpretativas dos diferentes dados geológico-geotécnicos do caso de estudo. Neste pretende-se demonstrar e comparar os parâmetros do projeto através da sua representação pelo método clássico e modelos tridimensionais.

[página propositadamente em branco]

Capítulo V

Representações Geológico-Geotécnicas do Caso de Estudo

[página propositadamente em branco]

5. Representações Geológico-Geotécnicas do Caso de Estudo

5.1. Introdução

Neste Capítulo apresenta-se um conjunto de representações Geológico-Geotécnicas interpretativas dos dados disponíveis no âmbito do projeto e construção da Barragem do Açafal.

Para tal apresentam-se elementos constantes no Projeto de Execução representações 2D desenvolvidas pelo autor bem como modelações 3D por recurso ao software comercial Leapfrog Geo detido pela Seequent, The Bentley Subsurface Company.

5.2. Zonamento Geotécnico do Projeto

O zonamento geotécnico dos terrenos da Barragem do Açafal consistiu na definição de zonamentos com base no grau de alteração, grau de fracturação, velocidade das ondas sísmicas e nos valores de Unidades de Lugeon. As zonas definidas são as seguintes:

- ZG1 – Zona Geotécnica 1: Engloba xistos e grauvaques pouco alterados (W_2), a interseção de fraturas é afastada (F_2). Os materiais apresentam velocidade de propagação das ondas sísmicas superiores a 3000m/s e os valores de absorção de água variam de 0 a 5 Unidades de Lugeon.
- ZG2 – Zona Geotécnica 2: Compreende os xistos e grauvaques muito alterados (W_4) a mediamente alterados (W_3), a interseção de fraturas varia de próxima (F_4) a mediamente afastada (F_3). A velocidade de propagação das ondas sísmicas nestes materiais varia entre

1500m/s e 1750m/s e os valores de absorção de água são superiores a 5 Unidades de Lugeon.

- ZG3 – Zona Geotécnica 3: Engloba Solos de cobertura, aluviões e xistos e grauvaques decompostos (W₅), a interseção de fraturas é maioritariamente muito próxima (F₅). A velocidade de propagação das ondas sísmicas é inferior a 500m/s.

A definição do zonamento geológico-geotécnico suporta a elaboração de um Perfil Geológico-Geotécnico segundo o alinhamento do eixo da barragem. Na Figura 21 apresenta-se o perfil retirado do Projeto da Barragem do Açafal.

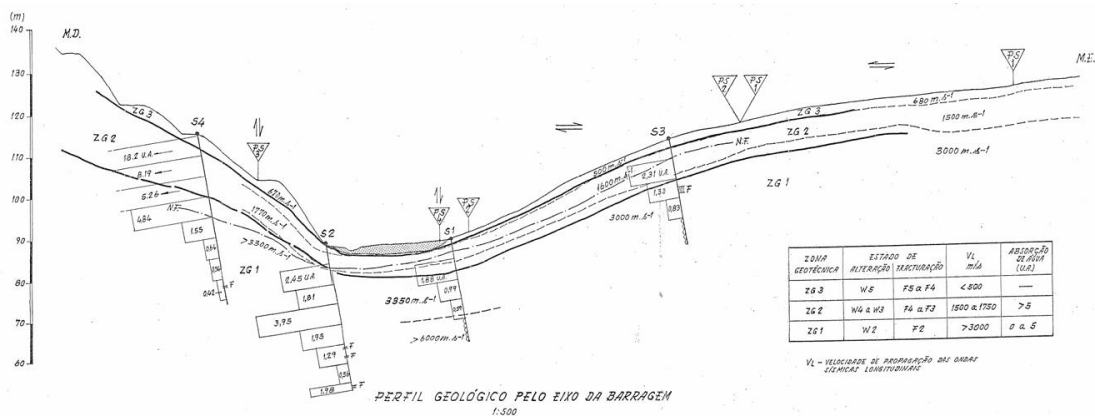


Figura 21 - Perfil Geológico-Geotécnico segundo o eixo da Barragem, retirado do projeto da Barragem do Açafal (Hidroprojecto 1997).

A partir das diáclases identificadas nos elementos de projeto foi possível elaborar uma projeção estereográfica. Na Tabela 1, podemos observar a orientação e inclinação (atitude geológica) para cada uma das diáclases consideradas para a projeção estereográfica, assim como a determinação do Dip e Dip Direction.

Tabela 1 - Atitude das diáclases para a área de estudo.

Diáclases	Orientação	Inclinação	Dip	Dip Direction
1	N137E	55NE	55	47
2	N155E	60NE	60	65
3	N135E	50NE	50	45
4	N155E	50NE	50	65
5	N154E	50NE	50	64

Tabela 1 (Continuação)- Atitude das diáclases para a área de estudo.

Diáclases	Orientação	Inclinação	Dip	Dip Direction
6	N148E	45NE	45	58
7	N164E	60NE	60	74
8	N161E	40NE	40	71
9	N146E	60NE	60	56
10	N139E	40NE	10	49
11	N133E	90NE	90	43
12	N137E	70NE	70	47
13	N140E	60NE	60	50
14	N117E	60NE	60	27
15	N155E	50NE	50	65
16	N112E	60NE	60	22

O software utilizado para o tratamento dos dados foi o Dips da RocScience (licença LABCARGA|ISEP). De forma geral, podemos aferir que as famílias de diáclases seguem uma orientação N20°-50°W, como evidenciado no diagrama de rosetas (Figura 22a). A partir da projeção estereográfica (Figura 22b) foi possível determinar o plano que melhor define a orientação das famílias de fraturas, N38°W e apresenta uma inclinação de 35°.

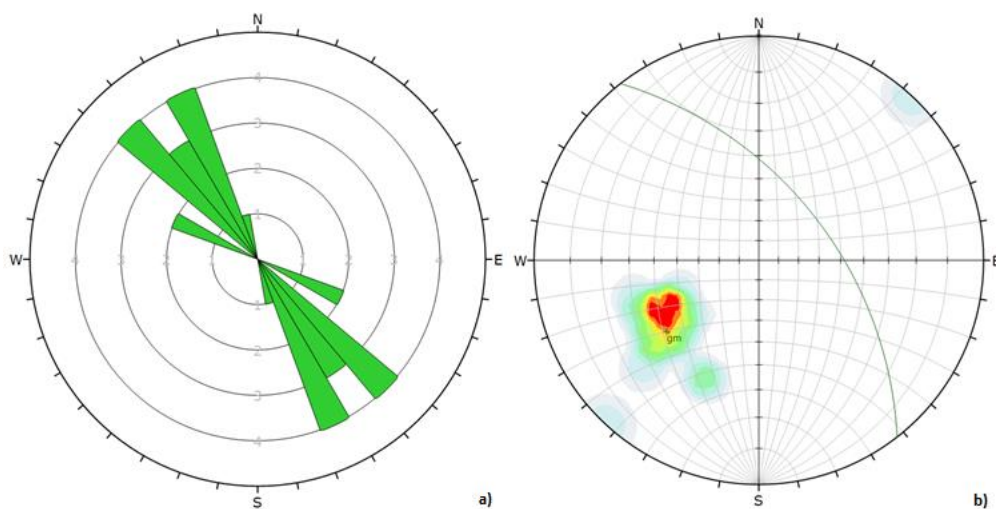


Figura 22 - Representação da diáclases no Dips, a) diagrama de rosetas, b) projeção estereográfica.

5.3. Abordagem Clássica

De forma a uniformizar a metodologia empregue neste trabalho, pretende-se demonstrar uma abordagem clássica de representações do caso de estudo. Esta abordagem utilizou como base a informação disponível nos logs da campanha de prospeção para elaborar perfis geológico-geotécnicos, segundo o alinhamento de implantação da barragem.

A representação deste tipo de perfis, revelará a sua importância mais à frente neste trabalho, permitindo uma comparação entre os resultados obtidos nestes perfis com os resultados obtidos na aplicação de um software de modelação geológica.

A elaboração dos perfis apresentados resulta na interpretação dos logs de sondagens executados segundo o alinhamento de implantação da barragem, a partir dos quais se procedeu à representação do grau de alteração, grau de fracturação e valores das Unidades de Lugeon. Foram utilizadas 4 sondagens para elaborar os perfis, estando estas representadas na seguinte planta (Figura 23) e constante no Anexo I.

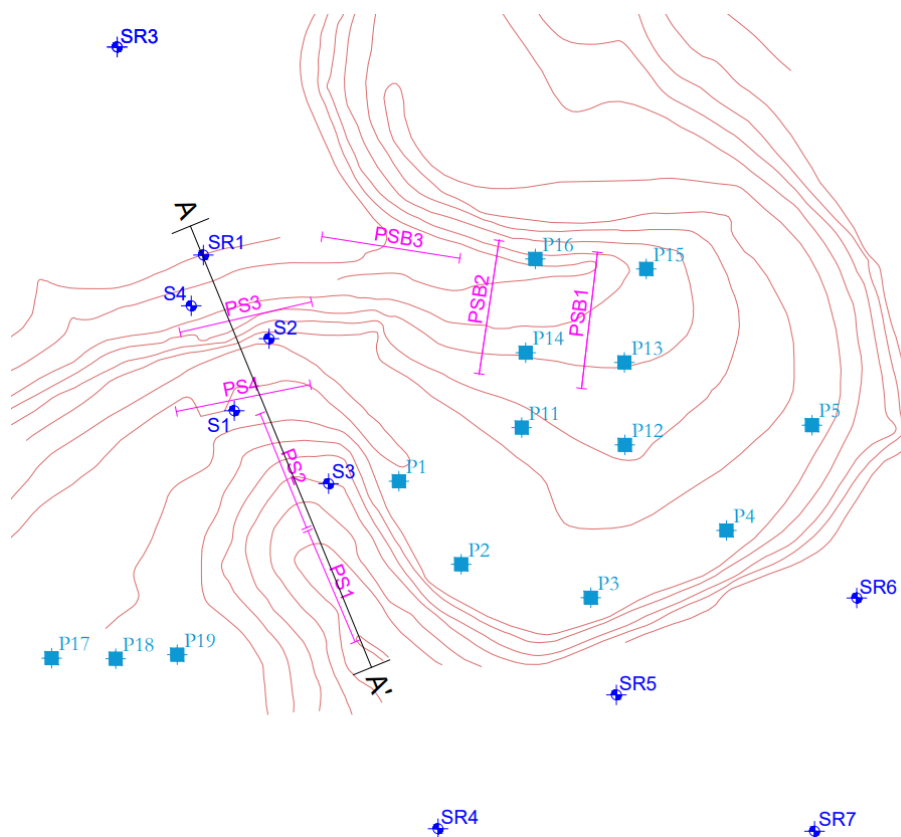


Figura 23 - Planta de localização dos trabalhos de prospeção.

Na Tabela 2 encontra-se informações relativas à cota e profundidade atingida pelas sondagens.

Tabela 2 - Posição vertical e profundidade atingida pelas sondagens S1, S2, S3 e S4.

Furo sondagem	Cota (m)	Profundidade atingida (m)
S1	91,1	25,0
S2	90,3	37,0
S3	114,3	25,0
S4	114,6	40,1

Como referido, para a avaliação dos parâmetros geotécnicos, foram definidos três perfis distintos, permitindo representar graficamente os parâmetros analisados no decorrer deste trabalho e a leitura da sua variação em profundidade.

De seguida serão, de forma sucinta, apresentados os parâmetros tidos em consideração para a elaboração dos perfis. O grau de alteração é um dos parâmetros essenciais na caracterização do maciço rochoso. Este permite avaliar as condições de integridade do maciço de acordo com os critérios estabelecidos pela classificação ISRM (1981). A descrição dos diferentes estados de alteração encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação do grau de alteração de maciços rochosos (ISRM, 1980, 1981).

Simbologia	Termo	Descrição
W1	São	Não há sinais visíveis de material rochoso alterado, talvez alguma descoloração nas superfícies de descontinuidades principais.
W2	Pouco alterado	A descoloração indica alteração nos materiais e superfícies de descontinuidades. Todo o material pode apresentar descoloração e ser mais fraco do que a rocha sã.
W3	Mediamente alterado	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado num solo. Rocha sã ou com descoloração está presente, seja como uma estrutura descontínua ou fragmentos.
W4	Muito alterado	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado num solo. Rocha sã ou descolorida está presente, seja como uma estrutura descontínua ou fragmentos.
W5	Decomposto	Todo o material está decomposto e/ou desintegrado num solo. A estrutura original do maciço ainda permanece intacta.

O grau de fracturação ou espaçamento das descontinuidades reflete as descontinuidades presentes no maciço. Este parâmetro é um dos aspetos fundamentais na descrição adequada do maciço rochoso. Na Tabela 4, apresenta-se a classificação do espaçamento entre descontinuidades, de acordo com os critérios estabelecidos pela classificação da ISRM (1981).

Tabela 4 - Classificação do grau de fracturação de maciços rochosos (ISRM 1981)

Simbologia	Espaçamento (cm)	Designação
F1	> 200	Muito afastadas
F2	60 – 200	Afastadas
F3	20 – 60	Mediamente afastadas
F4	6 – 20	Próximas
F5	< 6	Muito próximas

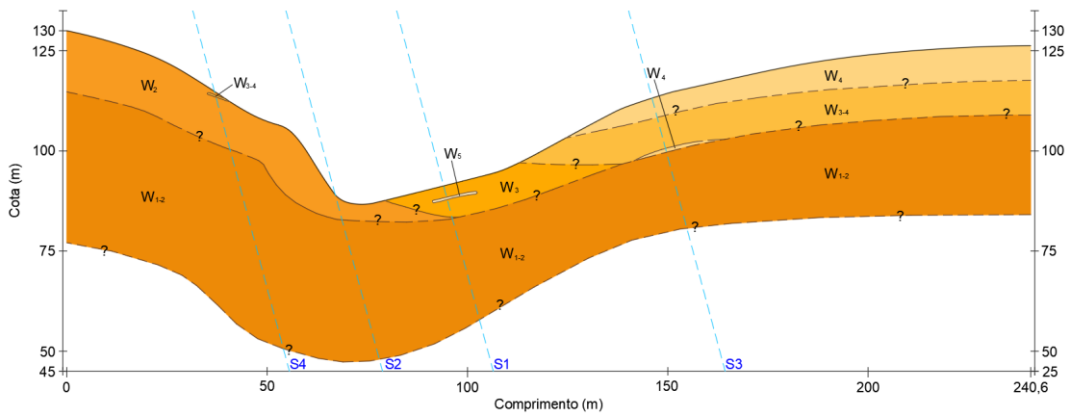
A definição do perfil correspondente às Unidades de Lugeon, considerou os intervalos indicados na Tabela 5. A definição destes intervalos, sustém-se no facto de nas boas práticas de construção de barragens de aterro a cortina de impermeabilização dever ultrapassar as unidades litológicas com um valor de absorção inferior a 3 Unidades de Lugeon e, ainda, de mais à frente neste trabalho se aplicar o mesmo intervalo de valores em análises complementares.

Tabela 5 - Intervalos Unidades de Lugeon utilizados para o zonamento dos perfis.

Designação	Unidades de Lugeon (UL)
UA1	< 1
UA2	1 - 3
UA3	3 – 6
UA4	> 6

Com base nas classificações e intervalo definidos acima foi possível traçar os perfis constantes no Anexo I. Na Figura 24, apresenta-se a evolução do grau de alteração dos terrenos de fundação segundo o eixo da barragem (perfil A-A'). No lado esquerdo do perfil observa-se que os terrenos são menos alterados do que os que constituem o lado direito, ocorrendo à superfície materiais pouco alterados, evoluindo em profundidade para materiais pouco alterados a são. O lado direito caracteriza-se por uma ligeira variabilidade no grau de alteração dos materiais, havendo alternâncias e repetições para o mesmo grau de alteração a diferentes profundidades.

Nesta zona, o maciço, superficialmente, encontra-se muito alterado, evoluindo em profundidade para materiais mediamente alterados a muito alterados. Na base destas camadas o material mantém-se consistente por todo o perfil, estando este pouco alterado a são. De referir, que nas sondagens S4 e S1, foram observados estados de alteração que apresentavam pouca possança, definindo-se uma pequena lenticula para os representar.



terreno, sendo isso sustentado pelas sondagens, permitindo a definição dos limites prováveis até à extremidade do perfil.

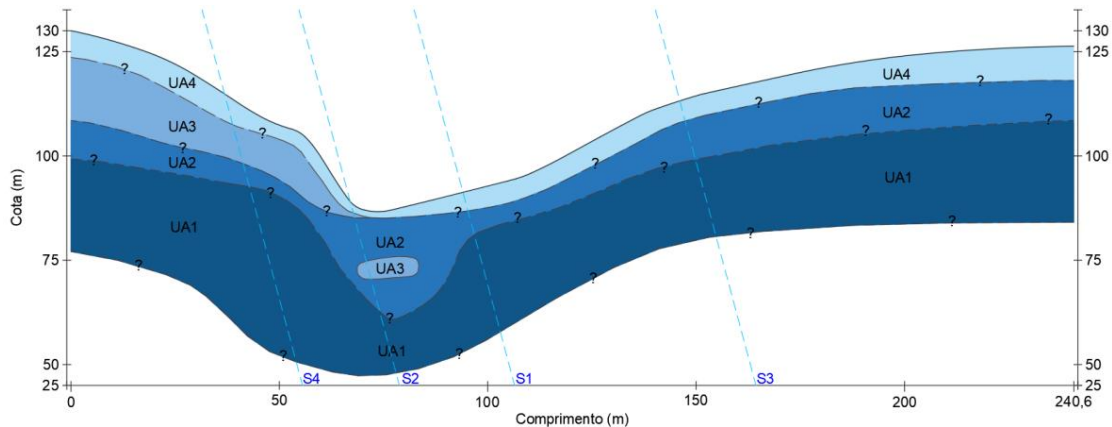


Figura 26 - Perfil A-A' para o ensaio de Lugeon dos terrenos de fundação da barragem.

Destes perfis, observa-se que o lado esquerdo do perfil apresenta um maciço menos alterado e um afastamento de fraturas mais elevado. O lado direito é caracterizado por materiais mais alterados e por fraturas mais próximas. Se analisarmos a evolução destes estados em profundidade, há de facto uma correlação entre as camadas mais fraturadas e as camadas mais alteradas.

Quando comparamos o perfil dos ensaios Lugeon com o grau de alteração e o grau de fracturação torna-se evidente a relação destes. As camadas superiores, mais fraturadas e alteradas resultam em valores Lugeon superiores, já as camadas profundas menos alteradas e com uma rede de fraturas mais afastada resulta em valores Lugeon superiores. Note-se que na zona onde foi realizada a sondagem S2, não existem indícios que permitam aferir um aumento das Unidades de Lugeon em profundidade (a partir do grau de alteração e fracturação).

O ensaio Lugeon é influenciado diretamente pela rede de fraturas, a sua abertura e continuidade espacial destas no maciço. Um outro aspeto a considerar que influencia o ensaio de Lugeon é a abertura de novas fraturas em resultado da injeção de água no decorrer do ensaio. Este comportamento do maciço pode ter levado ao surgimento em profundidade de valores superiores.

De forma geral, é possível afirmar que existe uma relação entre o grau de alteração e o grau de fracturação com os resultados Lugeon.

5.4. Modelação 3D

5.4.1. Seleção do Software

O software selecionado para a modelação 3D da presente dissertação foi o Leapfrog Geo fornecido pela Bentley Systems. Esta ferramenta, conforme já mencionado, apresenta capacidade de integrar, processar e visualizar dados geológicos, geotécnicos e estruturais de forma dinâmica e intuitiva. Justifica-se a escolha deste software pela sua versatilidade e eficiência na modelação de superfícies e volumes, o que permite a construção de modelos geológicos e a análise de parâmetros referentes ao grau de alteração (W), caracterização do espaçamento de fraturas (F) e valores de Unidades de Lugeon.

A interface gráfica do software escolhido é intuitiva e acessível ao utilizador, o que facilita a interpretação dos dados e a comunicação de resultados de forma clara. Embora a aplicação deste software seja frequentemente associada à indústria mineira e de exploração de georrecursos, a sua utilização noutros contextos revela-se igualmente eficaz, desde que seja adaptado à escala e natureza dos dados disponíveis.

No presente trabalho, a utilização deste software permitiu uma abordagem sistemática à modelação da área de estudo, assegurando a coerência entre os diferentes conjuntos de dados e a criação de modelos tridimensionais fiáveis e informativos.

5.4.2. Preparação dos Dados

A construção do modelo 3D baseou-se nos dados de sondagens obtidos durante a fase de prospeção e reconhecimento geológico-geotécnico da Barragem do Açafal. A informação disponível, pela sua antiguidade, encontrava-se em formato físico pelo que foi necessário proceder à sua digitalização.

Nesta fase foi essencial homogeneizar a informação disponível nos logs de sondagem e fichas de reconhecimento geológicos dos poços, procedendo-se a uma interpretação prévia e preparação dos dados para a sua integração no modelo.

O modelo inicial consistiu na utilização de dados provenientes de 4 sondagens, 11 poços de reconhecimento geológico e informação proveniente de 6 perfis de refração sísmica. De forma a obter uma base de dados um pouco mais robusta, optou-se por se elaborar uma linearização das velocidades de ondas sísmicas e “transformar” os perfis em pontos de sondagem. Desta forma, adotou-se a correlação expressa na Tabela 6.

Tabela 6 - Correlação da velocidade de propagação das ondas sísmica para parâmetros do grau de alteração e fracturação.

Velocidade Ondas Sísmicas (m/s)	Grau de alteração, W	Grau de fracturação, F
< 700	W ₅	F ₅
1500 - 1750	W ₃₋₄	F ₃₋₄
> 3000	W ₂	F ₂

5.4.3. Formatação dos dados

O software utiliza os dados carregados para extrapolar e modelar a geologia e parâmetros da área de estudo. De forma a garantir a validade do modelo, os dados inseridos devem cumprir critérios como a correta sequenciação das unidades a analisar.

Regra geral, o software requer sondagens com uma certa uniformidade, profundidades consideráveis e dados consistentes. No entanto, com o objetivo de avaliar as potencialidades e limitações do software, foram também introduzidos dados com profundidades heterogêneas, uma vez que a região em estudo apresenta uma complexidade litológica bastante reduzida.

A localização das sondagens é igualmente um fator determinante na construção do modelo. A sua disposição espacial influencia diretamente a fidelidade da modelação tridimensional. Quando os dados são introduzidos dentro de um alinhamento, o modelo gerado tende a ser irrealista nas áreas envolventes. Por outro lado, uma disposição em grelha permite obter um modelo mais preciso e representativo da realidade.

Por fim, para que o software consiga processar os logs e gerar o modelo 3D, é necessário desdobrar a informação em três ficheiros distintos, no formato “.csv”: Collars, Survey e Assay. Os dados correspondentes a cada um dos ficheiros utilizados no Leapfrog Geo encontram-se nos Anexos II a IX.

5.4.4. Ficheiro *Collar*

O ficheiro Collar contém a informação relativa ao posicionamento espacial das sondagens, bem como a sua profundidade e a posição vertical. Neste ficheiro, é necessário inserir o ID (identificação das sondagens), a posição espacial (X, Y), a cota (Z) e a profundidade máxima atingida por cada sondagem (Tabela 7).

Tabela 7 - Exemplo preenchimento do ficheiro Collar.

ID	X	Y	Z	Depth
S1	40824,0	2255,7	0	25
S2	40841,5	2292,0	0	37
S3	40871,5	2218,9	0	25
S4	40802,3	2308,6	0	40

O campo ID, assume um papel preponderante na introdução dos dados, dado que esta coluna irá permitir a ligação da informação referente às sondagens de todos os ficheiros.

O valor correspondente à posição vertical (Z) pode ser igual a 0 m apenas se for incorporada no modelo uma superfície topográfica e se houver garantia de que esta está correta. No modelo, é possível deslocar automaticamente as sondagens para a superfície. Contudo, esta funcionalidade deve ser utilizada com cautela, devendo ser assegurada a posição altimétrica correta da superfície do terreno.

Importa salientar que, após a deslocação vertical das sondagens pelo software, não se verificam variações significativas nas cotas originais das sondagens.

As coordenadas utilizadas no ficheiro Collar foram extraídas da planta da obra, tendo como sistema de referência o PT-TM06/ETRS89, que é o sistema de coordenadas selecionado no software para a projeção do modelo.

5.4.5. Ficheiro Survey

O ficheiro Survey contém o ID da sondagem, a profundidade (coluna Depth), a inclinação (Dip) e o azimute (Azimuth). Como referido anteriormente, o ID, presente em todos os ficheiros a importar no software, estabelece a ligação entre os dados e cada sondagem.

Para o preenchimento da coluna Depth, é necessário a informação se esta foi executada na vertical. Se for verificado que esta foi realizada na vertical em relação à superfície do terreno é suficiente introduzir apenas uma linha no ficheiro .csv, atribuindo o valor do comprimento da sondagem executada. O Dip deverá ser 90 (indicando a verticalidade) e o Azimuth 0.

Na eventualidade de a sondagem ter sido executada com inclinação em relação à superfície, torna-se necessário introduzir duas linhas no ficheiro .csv. A primeira linha contém a informação da posição inicial da sondagem. Temos por exemplo, a sondagem S1, a primeira linha para esta

sondagem será, Depth 0 m, o Dip 90 e o Azimuth 0. A segunda linha reflete o desvio da sondagem em relação à posição inicial, o Depth 25 m, com o Dip indica a inclinação da sondagem 75 e o Azimuth a direção da inclinação 218.

Estas informações permitem ao software representar corretamente a geometria da sondagem, de acordo com a inclinação e direção reais observadas durante a campanha de prospeção. Na Tabela 8 está representado uma parcela dos dados introduzidos no ficheiro Survey.

Tabela 8 - Exemplo preenchimento do ficheiro Survey.

ID	Depth	Dip	Azimuth
S1	0	90	0
S1	25	75	218
S2	0	90	0
S2	37	75	215
S3	0	90	0
S3	25	75	233
S4	0	90	2
S4	40	75	230

5.4.6. Ficheiros Assay

O ficheiro Assay fornece ao software as informações relativas às formações geológicas e aos parâmetros que se pretendem analisar. Este ficheiro é composto por quatro colunas: uma para o ID da sondagem, duas que definem as profundidades inicial e final de cada unidade ou parâmetro presente no furo e uma última coluna que indica o nome da formação ou do parâmetro, sendo esta a mais relevante para a modelação no software.

Como cada parâmetro a modelar apresenta diferentes profundidades de início e fim, é necessário criar ficheiros distintos para cada um. No presente trabalho, foram analisados os seguintes parâmetros: litologia, grau de alteração, fracturação, resultados do ensaio Lugeon e velocidade de propagação de ondas sísmicas. Assim, foi necessário preparar um ficheiro individual para cada um destes parâmetros.

Na Tabela 9, observamos a título de exemplo, como deve ser realizado o preenchimento das linhas referentes às sondagens S1 e S2. Nesta, está representada a importação da classificação geológica para, correspondendo “Sc” a solos de cobertura, “X” os xistos e grauvaques e “Al” a aluviões.

Tabela 9 - Exemplo preenchimento do ficheiro Assay.

ID	From	To	Geology
S1	0	0,5	Sc
S1	0,5	25	X
S2	0	0,5	Sc
S2	0,5	37	X

O software procederá à interpolação de cada camada com base na espessura e profundidade dos dados registados em cada um dos furos de sondagem.

5.5. Modelo Concetual

Os modelos criados numa fase inicial basearam-se nos dados recolhidos durante a campanha de prospeção da área de estudo. Durante a aplicação do software, verificou-se a necessidade de realizar correções aos modelos, tendo-se considerado pertinente o acréscimo de sondagens na envolvente da área modelada, de forma a ajustar e refinar as superfícies geradas. Este ponto será abordado mais à frente neste trabalho.

Para a elaboração dos modelos, criou-se inicialmente um modelo de superfície com base em pontos cotados, apresentando-se no Anexo X uma porção destes, o que permitiu definir o limite superior do modelo geológico (Figura 27) e constante no Anexo XI. Em seguida, os ficheiros *Survey*, *Collar* e *Assay* foram introduzidos no programa, servindo de base para a interpolação das formações geológicas e para a definição dos parâmetros a analisar.

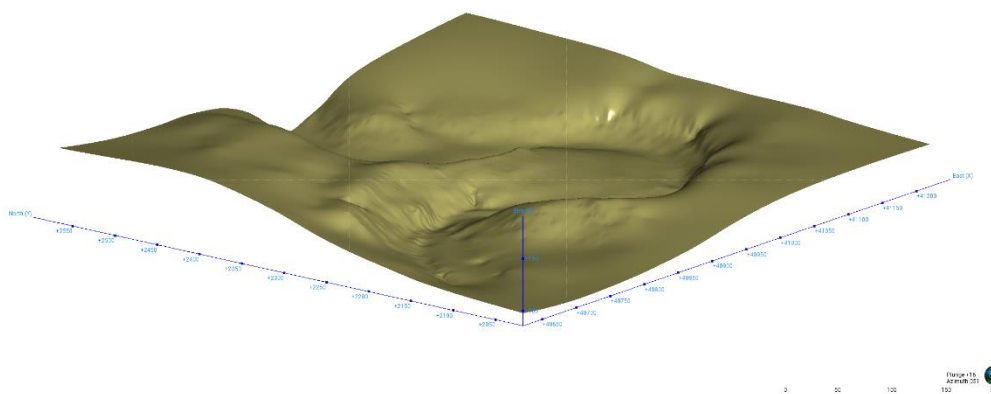


Figura 27 - Altimetria da área em estudo

Com base nesses dados e parâmetros foram gerados vários modelos tridimensionais. O software utilizado permite ainda a criação de modelos combinados, funcionalidade que foi explorada neste estudo. Foram considerados dois cenários principais: no primeiro, utilizaram-se apenas os dados das sondagens disponíveis; no segundo, foram adicionadas sondagens de controlo, com o objetivo de corrigir eventuais anisotropias no modelo. Posteriormente, elaborou-se um modelo no qual foram introduzidas as principais famílias de fraturas, com o objetivo de determinar o plano médio de orientação.

5.5.1. Construção do Modelo

A construção do modelo está dependente do tipo de informação que se pretende incorporar neste e do tipo de representação que se pretende criar. Para tal, é necessário seleccionar corretamente o tipo de dados a importar. Por exemplo, dados referentes a litologias devem ser importados como lithology, o grau de alteração e fracturação podem ser classificados como category. Se o objetivo for a criação de um modelo numérico, os dados devem ser introduzidos em formato numérico. Na Figura 28 e Figura 29 constam os passos para carregar os nossos ficheiros .csv no Leapfrog Geo.

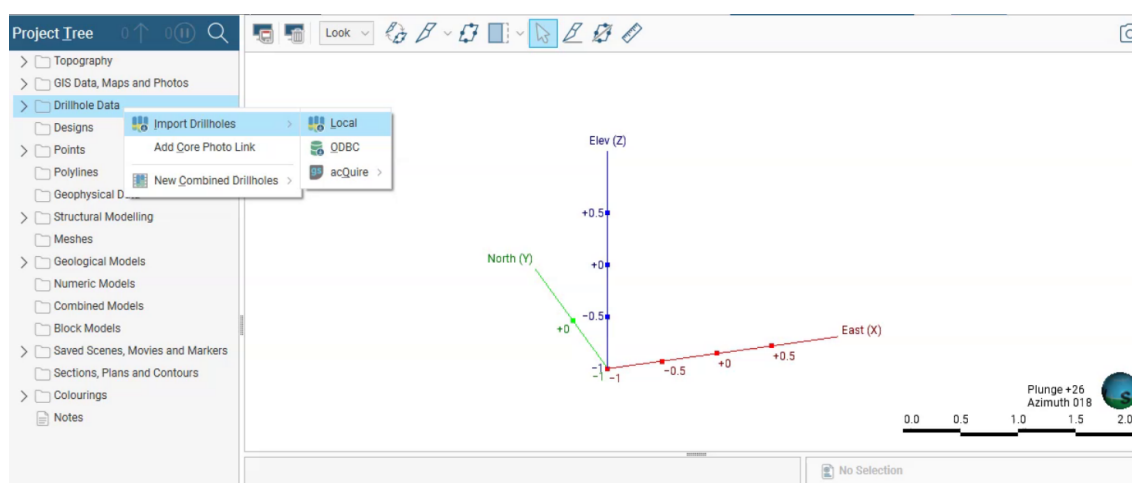


Figura 28 - Importação dos dados de sondagem no software.

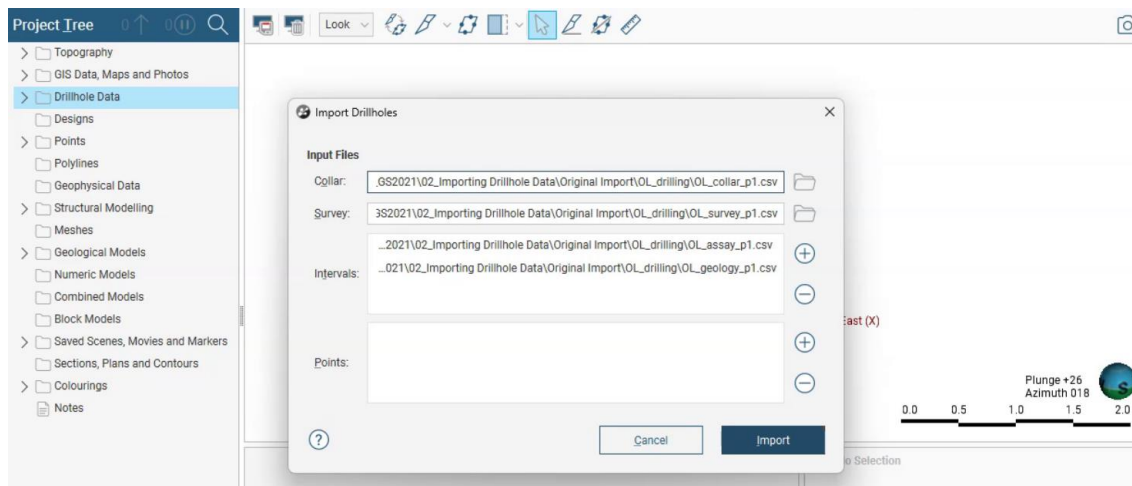


Figura 29 - Importação dos ficheiros, collar, assay e survey no software.

Após o carregamento dos dados no software, o segundo passo consiste na escolha do tipo de modelo a criar. No presente trabalho, o modelo inicial desenvolvido é um modelo geológico, sendo necessário definir a origem da informação a processar assim como os limites do modelo.

O terceiro passo na construção do modelo consiste na criação das superfícies litológicas, que servirão de base para a gerar os volumes correspondentes. Nesta fase, é essencial conhecer a ordem estratigráfica das camadas inseridas. A modelação das superfícies deve iniciar-se com a camada mais recente, classificada no modelo como camada de erosão. As restantes superfícies serão classificadas como depósitos e deverão ser modeladas por ordem cronológica, da mais recente para a mais antiga.

Os modelos numéricos, ao contrário dos modelos geológicos, apenas requerem a identificação da origem dos dados (ID), os dados a analisar e as respetivas profundidades. Este tipo de modelo permite interpolar os dados disponíveis nas sondagens, para criar um modelo da área de estudo.

Os modelos combinados permitem gerar representações tridimensionais a partir da integração de diferentes fontes de informação disponíveis no software. Estes, resultam da combinação de qualquer tipo de modelo previamente construído no software, permitindo combinar diferentes parâmetros, como grau de alteração, as Unidades de Lugeon, a fracturação ou as litologias.

Esta funcionalidade constitui uma ferramenta poderosa, uma vez que a combinação de diversos modelos permite a criação de zonamentos mais robustos possibilitando representar múltiplos parâmetros, aumentando a utilidade e a precisão da modelação.

No entanto, este tipo de modelação deve ser utilizado com alguma cautela. Quando os modelos a combinar contêm um número elevado de elementos, o resultado pode ser um modelo

excessivamente complexo, demasiado fragmentado e com múltiplos volumes pequenos e sobrepostos. Esta fragmentação dificulta tanto a interpretação visual como a análise prática dos resultados, podendo comprometer a eficácia do modelo final.

5.5.2. Modelo Geológico

O modelo geológico da área de estudo apresenta uma baixa variabilidade litológica, identificando-se apenas três unidades distintas. A região é coberta por uma camada de solos de cobertura com espessura variável entre 0,2m e 1,0m. Na zona da ribeira ocorrem depósitos aluvionares para os quais a espessura não ultrapassa os 2,0m. A base destas formações é composta por xistos e grauvaques.

Tendo em conta as litologias presentes, o modelo geológico é caracterizado por uma complexidade relativamente baixa. No entanto, apesar da sua simplicidade, este modelo constitui uma base crucial para o desenvolvimento de modelos combinados.

Na Figura 30, observa-se a representação tridimensional do modelo geológico da área de estudo. A superfície modelada para os solos de cobertura apresenta um hiato no centro do modelo, resultado do facto de não ter sido identificado nos poços de reconhecimento geológico este material. Neste local, a informação disponível leva a considerar a presença do afloramento rochosos à superfície. A partir da interpolação com os dados de sondagens e poços circundantes é possível identificar a continuação do afloramento rochoso, mesmo em áreas onde a informação direta é escassa.

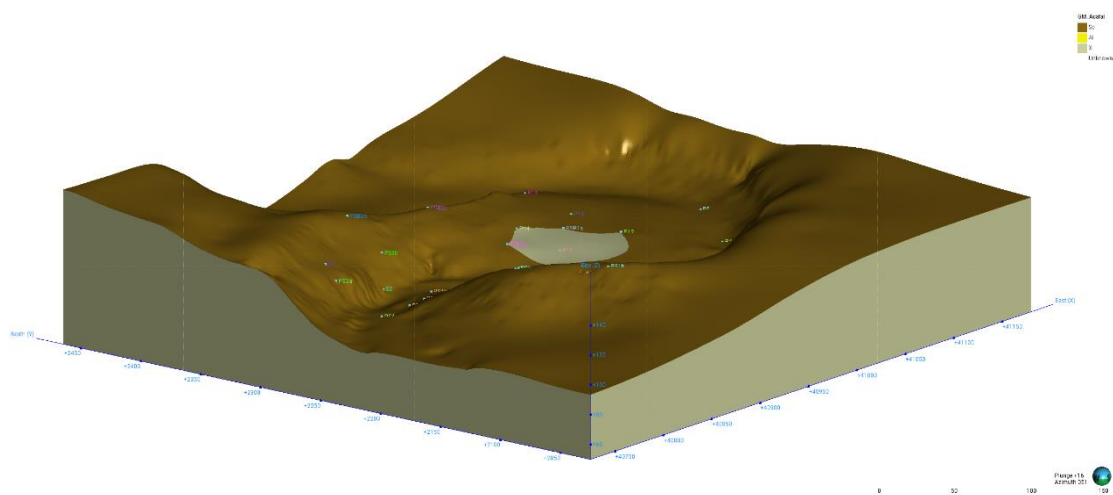


Figura 30 - Modelo geológico 3D inicial.

Os depósitos aluvionares não são claramente representados nas superfícies geradas uma vez que se encontram-se geralmente cobertos pelos solos de cobertura. Note-se que a superfície aluvionar apresenta limitações, atribuídas à topografia acidentada da área e à escassez de dados disponíveis. Como resultado, a superfície modelada estende-se indevidamente pelas encostas e pelos topos do vale, o que não corresponde à realidade, dado que estas unidades ocorrem exclusivamente no fundo do vale.

5.5.3. Modelo Grau de Alteração

O modelo do grau de alteração das formações geológicas representado na Figura 31, mostra a evolução em profundidade do grau de alteração (W) do maciço rochoso. No modelo representado, observa-se que os estados de alteração W_5 , W_3 , W_2 e W_{2-1} estendem-se até aos limites do modelo, não sendo observadas variações na espessura das camadas de alteração.

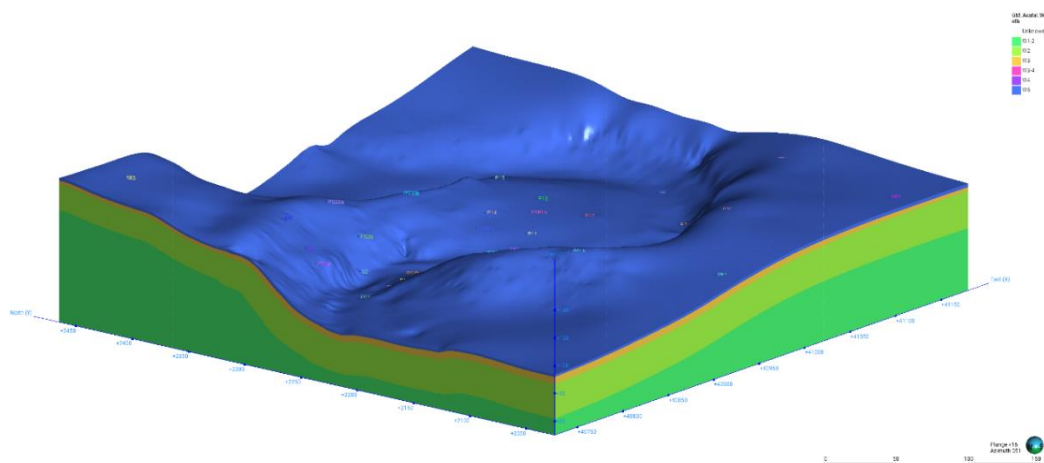


Figura 31 - Modelo do grau de alteração (W).

A organização hierárquica das superfícies dos estados de alteração, para a obtenção da representação do modelo, exige procedimentos adicionais quando comparada à construção do modelo geológico. A modelação baseia-se no pressuposto de que as unidades superiores são mais recentes do que as inferiores, não sendo esperado a repetição alternada da mesma litologia na mesma sondagem.

No entanto, no caso dos estados de alteração, verifica-se a ocorrência de repetições do mesmo estado em profundidade para um mesmo registo (log). Esta situação dificulta a construção

automática das superfícies, sendo necessária a intervenção no software aquando da definição destas.

Para tal, foi necessário definir a ordem das superfícies dos estados de alteração, indicando ao software quais os pontos que este deveria assumir. Este processo é importante, pois a disposição incorreta leva a erros na modelação, à omissão de volumes ou representações inadequadas.

5.5.4. Modelo Grau de Fracturação

Um dos parâmetros de maior relevância para a caracterização do comportamento dos terrenos na área de estudo é a avaliação da fracturação em profundidade. Tal como ocorre no modelo de alteração, a construção do modelo de fraturas enfrenta desafios relacionados com a repetição dos mesmos estados em profundidade para um mesmo furo de sondagem, o que dificulta a definição de superfícies.

Assim como no modelo anterior, foi necessária a intervenção manual da definição das superfícies do modelo, visto que o grau de fracturação se repete de forma alternada em algumas das sondagens introduzidas no modelo.

O modelo apresentado na Figura 32 ilustra os diferentes volumes gerados, evidenciando a distribuição espacial das fraturas conforme a classificação do espaçamento de fracturação. De forma geral, observa-se que a densidade de fraturas tende a diminuir com a profundidade, refletindo um maciço progressivamente menos fraturado. Note-se que no lado esquerdo do vale, o maciço apresenta um grau de fracturação menos intenso (F_4) com a aproximação à superfície ao contrário do lado direito do vale que apresenta um grau de fracturação mais intenso (F_{4-5}).

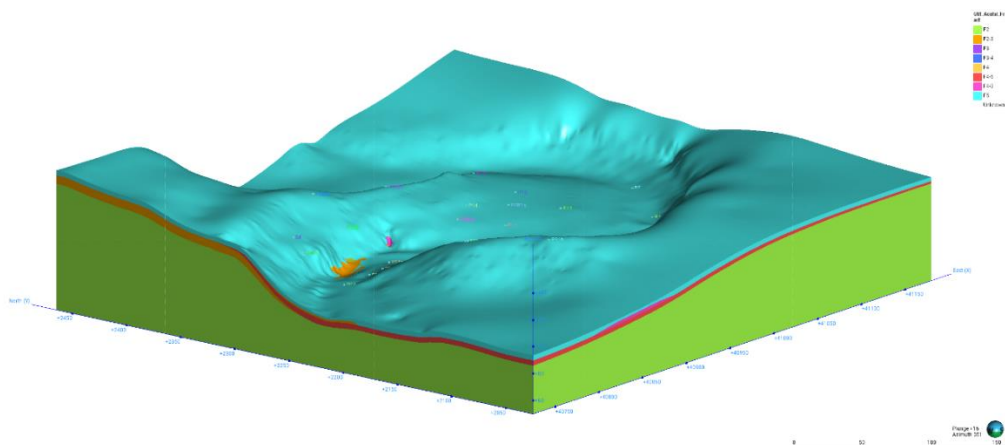


Figura 32 - Modelo de espaçamento de fracturação.

5.6. Modelos Numéricos

5.6.1. Modelo de Lugeon

No caso concreto de uma barragem a representação espacial dos resultados dos ensaios Lugeon na área de trabalho assume um papel preponderante na classificação das condições hidrogeológicas em profundidade do maciço onde se implanta. Este parâmetro é essencial pois permite definir a profundidade até à qual a cortina de impermeabilização (cortina de estanqueidade) deverá ser executada.

De acordo com as normas de construção de barragens, a cortina de estanqueidade deve estender-se até à profundidade onde o maciço apresente valores de Lugeon inferiores a 3UL. Com o objetivo de analisar a evolução da permeabilidade em profundidade, foram definidos intervalos de valores Lugeon para a construção do modelo numérico conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Intervalos Unidades de Lugeon considerados no modelo numérico.

Intervalo
< 1
1 – 3
3 – 6
> 6

O modelo gerado apresenta algumas incongruências, nomeadamente a ocorrência de valores anormalmente elevados em profundidade, sobretudo em zonas afastadas dos pontos de ensaio. Estes valores não correspondem a medições reais, mas resultam de extrapolações feitas pelo software em áreas onde a informação disponível é escassa ou inexistente. Este comportamento evidencia as limitações do modelo na representação fidedigna das condições hidrogeológicas em profundidade, especialmente quando a densidade de dados é reduzida.

Outro fator relevante é a distribuição espacial dos furos de sondagem. Quando os furos se encontram muito afastados entre si, sobretudo para topografias acidentadas como a do presente caso, a interpolação dos dados tende a assumir comportamentos artificiais. Estas anomalias levam a que se formem superfícies com geometria cónica, resultantes da escassez de informação nos espaços entre furos (Figura 33). Este efeito é particularmente evidente na interpolação padrão utilizada pelo software, que é isotrópica, ou seja, assume influência igual nas direções X, Y e Z.

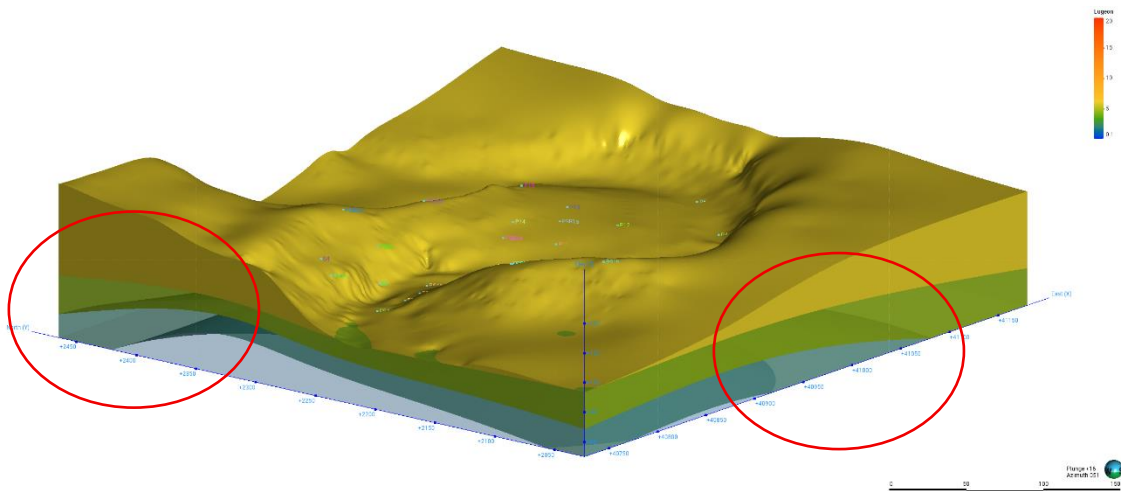


Figura 33 - Modelo das Unidades de Lugeon

Para mitigar este comportamento, foi necessário ajustar os parâmetros de interpolação, forçando a geração de uma interpolação anisotrópica. Esta abordagem atribui uma maior continuidade lateral (X e Y) e menor influência vertical (Z), originando superfícies mais estendidas horizontalmente e corrigindo os efeitos cónicos observados. No entanto, esta correção deve ser devidamente tida em consideração na interpretação dos resultados.

Os resultados nas zonas onde a informação é escassa devem ser interpretados com cautela, pois o modelo deixa de refletir fielmente as condições dos trabalhos realizados correspondendo a uma aproximação de uma interpretação conceptual.

5.6.2. Modelo de Refração Sísmica

A elaboração do modelo baseou-se em perfis sísmicos realizados nas áreas circundantes à zona de estudo. Para que estes dados pudessem ser utilizados no software, foi necessário adaptá-los para um formato adequado, no qual foram consideradas as velocidades de propagação e os respetivos intervalos de profundidade.

Assim, foi elaborado um ficheiro .csv (Tabela 11) com os dados disponíveis, considerando-se dois pontos de inserção para cada perfil sísmico (em cada extremidade deste) de forma a conferir mais robustez ao modelo.

Tabela 11 - Ficheiro Survey para a velocidade de propagação das ondas sísmicas.

HoleID	From	To	Geofísica
PS1a	0	1,8	680
PS1a	1,8	6	1500
PS1a	6	30	3000
PS1b	0	1,8	680
PS1b	1,8	9,3	1500
PS1b	9,3	30	3000

O modelo apresentado na Figura 34, representa a distribuição da velocidade de propagação das ondas sísmicas na área de estudo. Como esperado, observa-se o aumento da velocidade de propagação em profundidade o que indica a presença de um maciço menos alterado e mais competente.

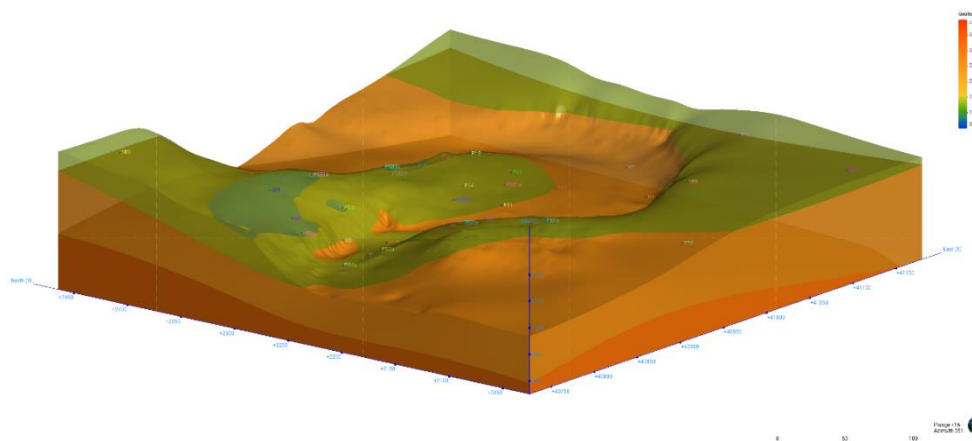


Figura 34 - Modelo tridimensional velocidade das ondas de propagação sísmicas.

Contudo, a interpretação deste modelo deve ser feita, assim como os anteriores, de forma cautelosa. Os perfis sísmicos executados encontram-se concentrados na região central do modelo, levando a que o software extrapole valores para as áreas onde não existe informação. O software usa métodos de interpolação isotrópica para preencher as áreas onde a informação é escassa, refletindo-se assim, tal como em modelos anteriores, em superfícies com formas de “cone” as quais afundam abruptamente não correspondendo à realidade.

Desta forma, tal como no modelo elaborado para as Unidades de Lugeon, foi feita uma correção na forma como o software faz a interpolação dos dados, obrigando-o a estender horizontalmente as superfícies para que o modelo se ajuste melhor à realidade, sendo o resultado o que se observa na

figura acima. Contudo, este tipo de intervenção por parte do operador deve ser sido em consideração aquando se tecem considerações sobre estes modelos.

5.7. Modelos Combinados

A criação de modelos combinados, como referido anteriormente, constitui uma ferramenta poderosa disponível no software utilizado. Neste sentido, com o objetivo de ilustrar esta funcionalidade, foram criados vários modelos combinando a litologia da área de estudo com diferentes parâmetros.

A combinação do modelo geológico com os resultados do ensaio Lugeon encontra-se representada na Figura 35. Como já foi referido, a área de estudo apresenta apenas uma unidade litológica, sendo que não é evidente a potencialidade desta ferramenta neste caso específico. No entanto, o modelo permite obter uma visão geral das possibilidades desta funcionalidade no contexto da modelação tridimensional.

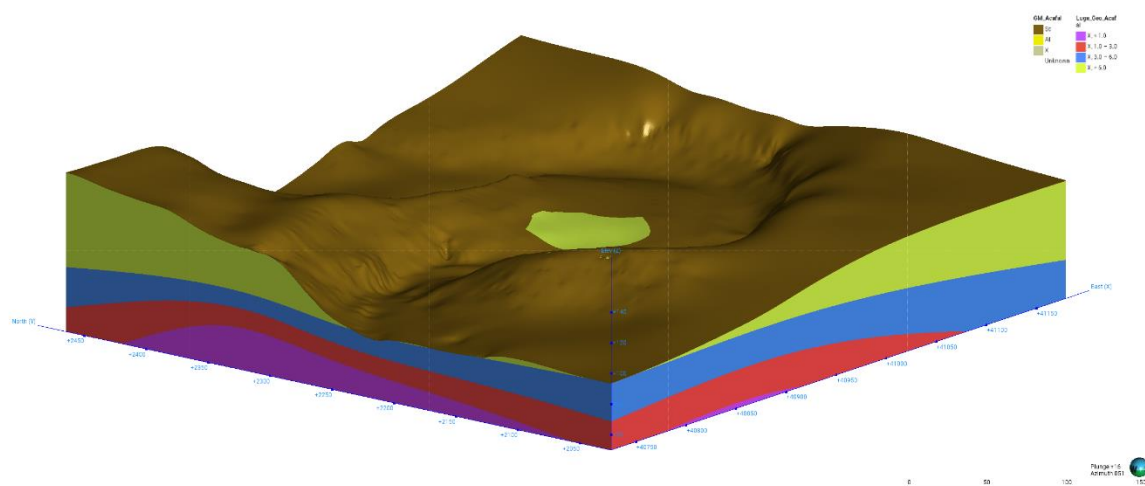


Figura 35 - Modelo combinado Litologia vs. Lugeon.

A aplicação desta funcionalidade do modelo geológico com cada um dos modelos anteriormente descritos seria redundante, pois como só existe uma litologia com possança significativa para serem observados os efeitos da mesma.

Com o objetivo de demonstrar as potencialidades deste tipo de modelação, foram combinados os parâmetros de alteração, fracturação e as Unidades de Lugeon com as litologias. Esta combinação resultou na criação de um modelo com um número extremamente elevado de volumes, tornando-se visualmente complexo e de difícil interpretação.

Faz-se notar que a criação de modelos combinados baseia-se na informação disponível nos modelos base, sendo que, se estes apresentarem um número elevado de classificações, o modelo combinado herdará essa complexidade, gerando vastas quantidades de volumes com dimensões variadas. Este excesso de subdivisões pode comprometer a validade do modelo e dificultar a análise espacial dos dados.

Uma solução para evitar a formação excessiva de volumes, seria redefinir os intervalos e simplificar os dados de entrada dos modelos base, agrupando dados com comportamento semelhante. Em alternativa, também poder-se-ia descartar os elementos com pouca relevância ou espessura reduzida, de forma a simplificar a estrutura do modelo final e facilitar a sua interpretação.

5.8. Representação das Famílias de Fraturas

Uma das funcionalidades do software utilizado é a possibilidade de introdução de parâmetros estruturais, o que se revela particularmente útil no presente trabalho, dado que a definição da cortina de estanqueidade está dependente da orientação do sistema de fraturas (ou descontinuidades), com o objetivo de maximizar a impermeabilização dos terrenos de fundação da barragem.

O software permite a criação de um estereograma, com base nas famílias de fraturas identificadas no terreno sendo possível a inserção destas no local onde foram levantadas. Para tal, é necessário introduzir os parâmetros correspondentes à localização geográfica (X, Y, Z), bem como a direção e inclinação (azimute e mergulho) de cada família de fraturas.

A partir dos dados estruturais introduzidos, o software gera um estereograma (Figura 36), que representa graficamente a distribuição espacial das fraturas. Com base nesta distribuição é possível calcular a orientação média do conjunto de fraturas e recorrendo à distribuição estatística de Bingham permitindo determinar o plano médio e a inclinação da família de fraturas.

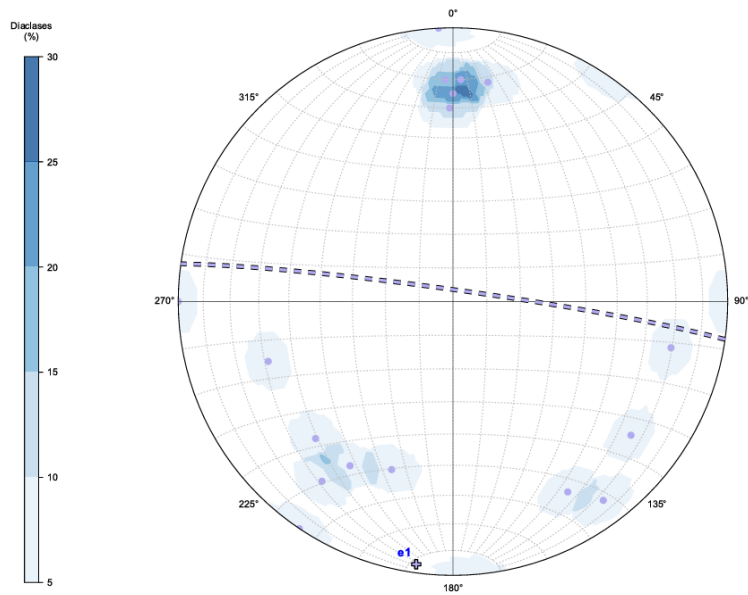


Figura 36 - Estereograma do sistema de fraturas Açafal.

A amostragem das famílias de fraturas é reduzida e dispersa, havendo uma variação considerável na orientação destas. Com esta ferramenta, é possível obter uma orientação média mais robusta e representativa da realidade, dado que considera as variações angulares.

A informação obtida pode ser integrada diretamente nos modelos geológicos desenvolvidos tornando a sua visualização mais interativa e informativa. Estes modelos facilitam uma compreensão mais clara e objetiva da orientação média das famílias de fraturas.

Na Figura 37 encontram-se representadas as fraturas introduzidas no software, bem como o estereograma correspondente à área de estudo. Está igualmente indicado o plano médio do sistema de fraturas, calculado com base na distribuição dos dados inseridos. No Anexo XI constam as representações da projeção das famílias de fraturas.

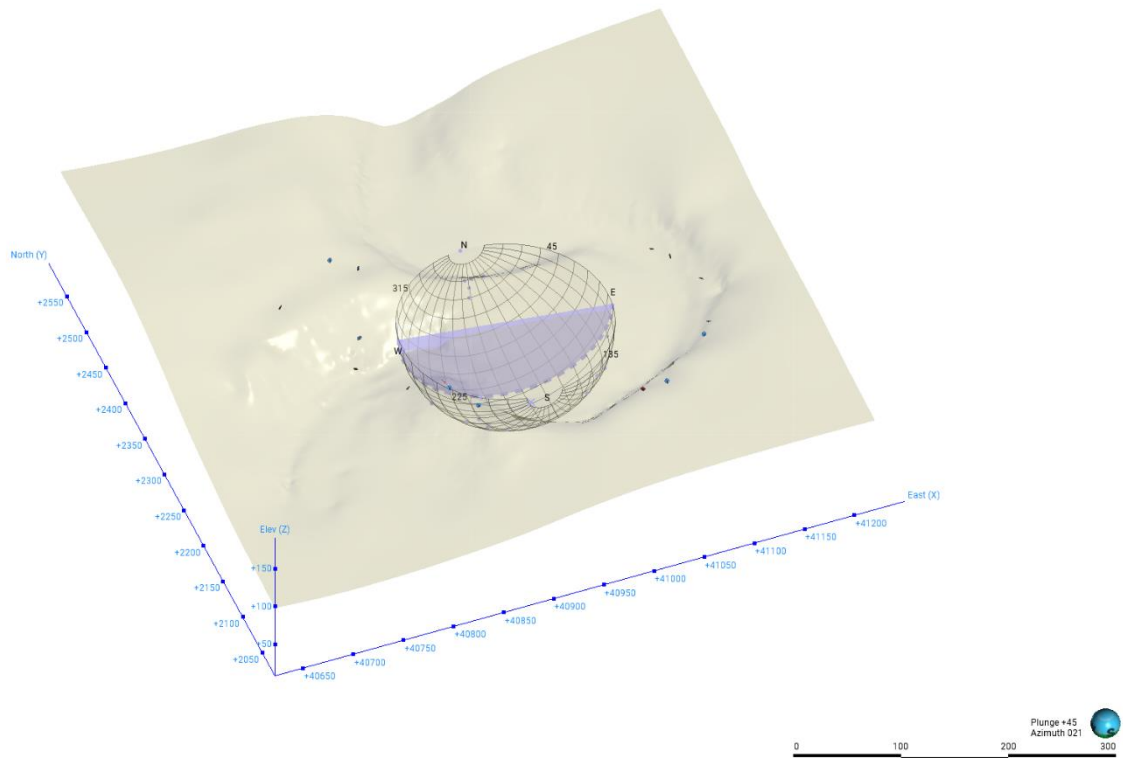


Figura 37 - Projeção do estereograma sobre a área de estudo.

A projeção do estereograma pode ser realizada sobre qualquer modelo criado. Na Figura 38, apresenta-se a projeção do estereograma sobre o modelo numérico relativo aos ensaios Lugeon, permitindo a visualização integrada da orientação média das famílias de fraturas em conjunto com os resultados dos ensaios hidrogeológicos.

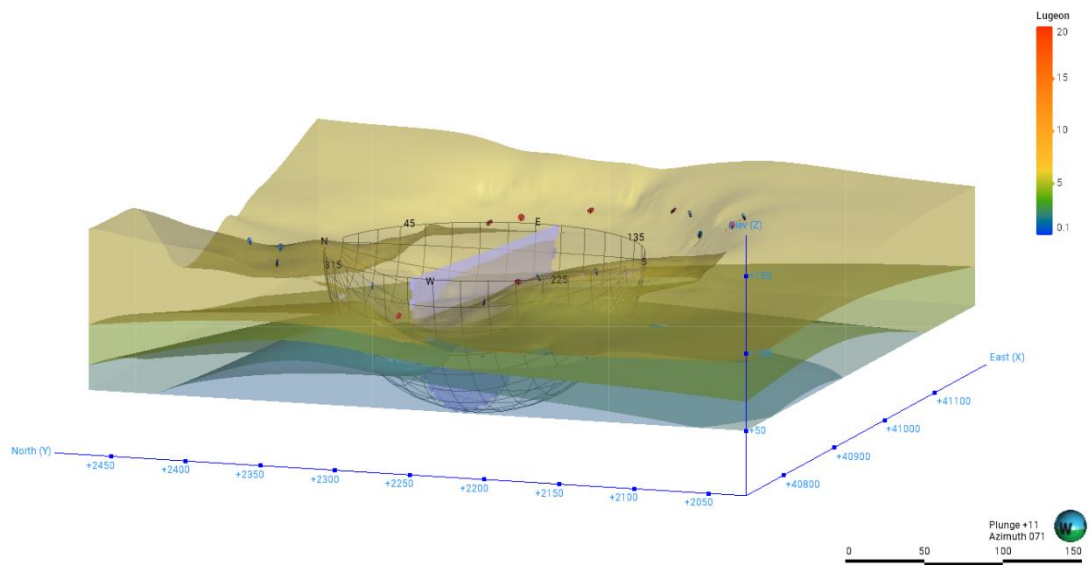


Figura 38 - Projeção estereográfica sobre modelo numérico Lugeon.

5.9. Análise Crítica

No decorrer da aplicação do software selecionado para os trabalhos, verificou-se a necessidade de adicionar novos pontos com dados de base para o modelo. Esta necessidade resulta da interpretação dos modelos gerados anteriormente e dos resultados correspondentes obtidos. Verificou-se, que a ausência de dados, ou a concentração destes apenas num local, resulta em interpolações erróneas sendo criadas superfícies ou omitidas informações para as zonas mais distantes do modelo.

Nos modelos gerados, verificaram-se erros no que respeita à continuidade lateral das superfícies em resultado da repetição do mesmo parâmetro no mesmo furo de sondagem em profundidade. Assim este aspeto teve de ser alvo de análise e correção, pois os resultados produzidos não refletiam a natureza dos dados.

Outro aspeto a considerar aquando da geração dos modelos, é a “idade” das superfícies, ou a ordem que estas devem ser interpretadas ou formadas. Quando trabalhamos com informação sobre o grau de alteração do maciço, ou o grau de fracturação, não é possível atribuir uma ordem cronológica a estas camadas. Por norma, existe alguma heterogeneidade na evolução destes estados em profundidade, resultando em zonas mais alteradas intercaladas por zonas menos alteradas, ou vice-versa. A repetição do mesmo estado é frequente repetir-se em profundidade, tendo este assunto vindo a ser abordado neste trabalho. Por fim, o facto de não existir continuidade para o mesmo parâmetro nas sondagens próximas também conduz a anomalias no modelo.

Para além das sondagens adicionadas, outro tipo de ajuste poderá ser levado a cabo para que sejam produzidos modelos mais robustos e precisos. A definição de novos pontos de controlo nas sondagens, mesmo que seja atribuída uma possança de zero. O facto de o parâmetro existir nas sondagens próximas, mesmo que não tenha representação, leva ao modelo a realizar interpolações mais precisas. A ausência de valores não é equivalente a zero.

Desta forma, e considerando os aspetos atrás referidos, procedeu-se à introdução de correções nos modelos para avaliar o comportamento do software, antes e a após a intervenção do operador.

Estas correções são apresentadas e analisadas no Capítulo VI.

[página propositadamente em branco]

Capítulo VI

Interpretações e Correções dos Modelos

[página propositadamente em branco]

6. Interpretações e Correções dos Modelos

6.1. Correção do Modelo

Conforme atrás descrito a análise dos resultados obtidos numa primeira fase, e com vista à produção de modelos mais robustos e realistas implicou à implementação de correções resultantes da sua interpretação. Este Capítulo apresenta esses modelos corrigidos resultantes da adição criteriosa pelo utilizador de novos pontos de dados.

Os modelos de fracturação e alteração apresentam diferenças significativas em comparação com modelos originais. Efetivamente na área de estudo observam-se alterações na distribuição e na espessura das camadas do grau de alteração e de fracturação.

Na Figura 39, encontram-se representados os modelos de alteração inicial (em cima) e o modelo corrigido (em baixo). Nesta figura, é possível observar que as superfícies de alteração sofreram ajustes, principalmente na face sul do modelo, na qual a camada com grau de alteração W_2 deixa de ter continuidade por todo o modelo. Por outro lado, na face oeste do modelo, são observadas alterações na espessura das camadas com grau de alteração W_3 . De forma geral são ainda observados ajustes nas superfícies e volumes criados para este modelo.

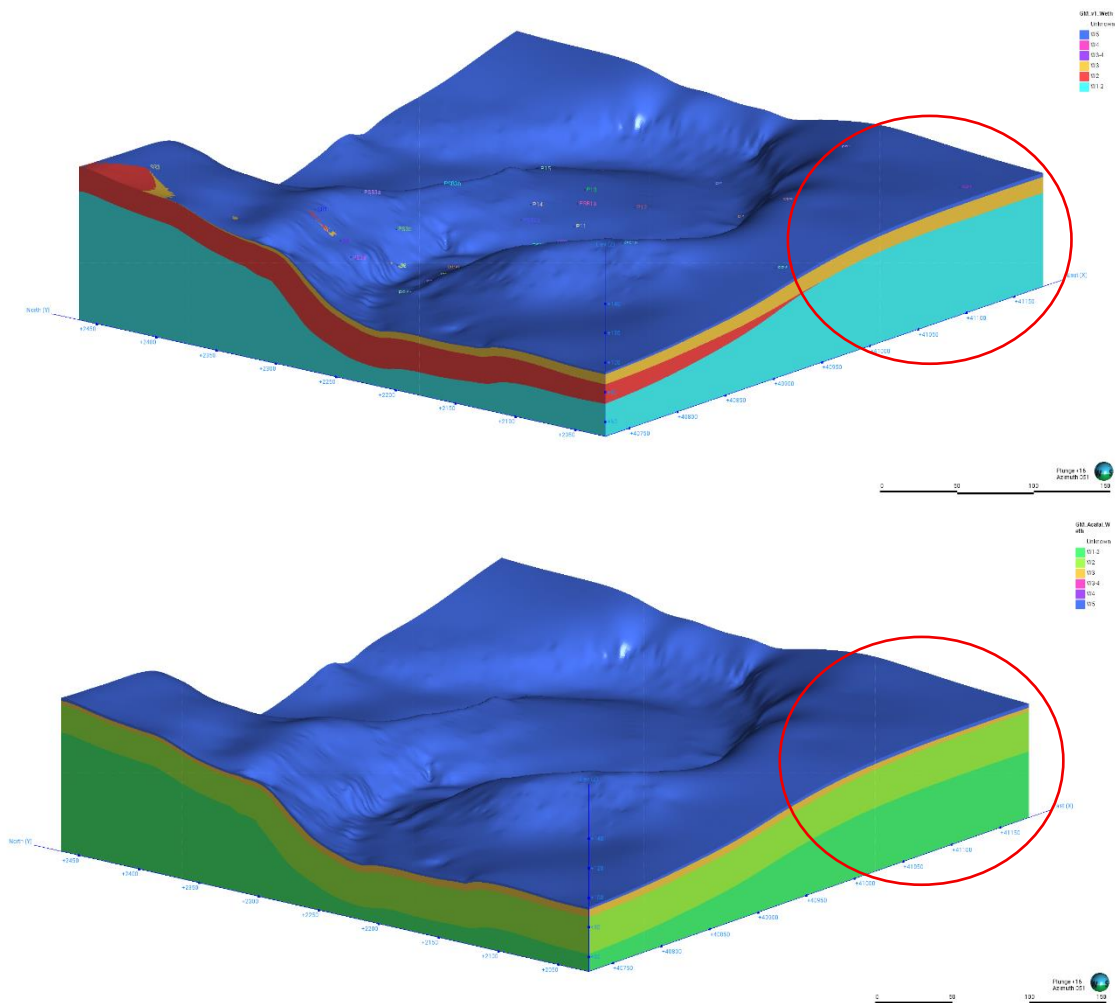


Figura 39 - Modelo grau de alteração original (acima) e modelo corrigido (em baixo).

O modelo do grau de fracturação apresenta, assim como o anterior, diferenças especialmente na continuidade das camadas mais superficiais do modelo. Na face oeste do modelo, observam-se agora uma melhor definição das superfícies para o grau de alteração, sendo expressa a continuidade das camadas ao longo do modelo. Ao contrário do modelo inicial, que apresentava interrupções abruptas na continuidade dos volumes gerados. O modelo corrigido, na face sul, apresenta menor número de sobreposições de volumes, em resultado da introdução dos novos furos de sondagem o que levou a aferir novos limites para o contacto das superfícies.

Na Figura 40 apresenta-se o modelo original, em cima, e o modelo corrigido, em baixo, para que se melhor observem as diferenças mencionadas.

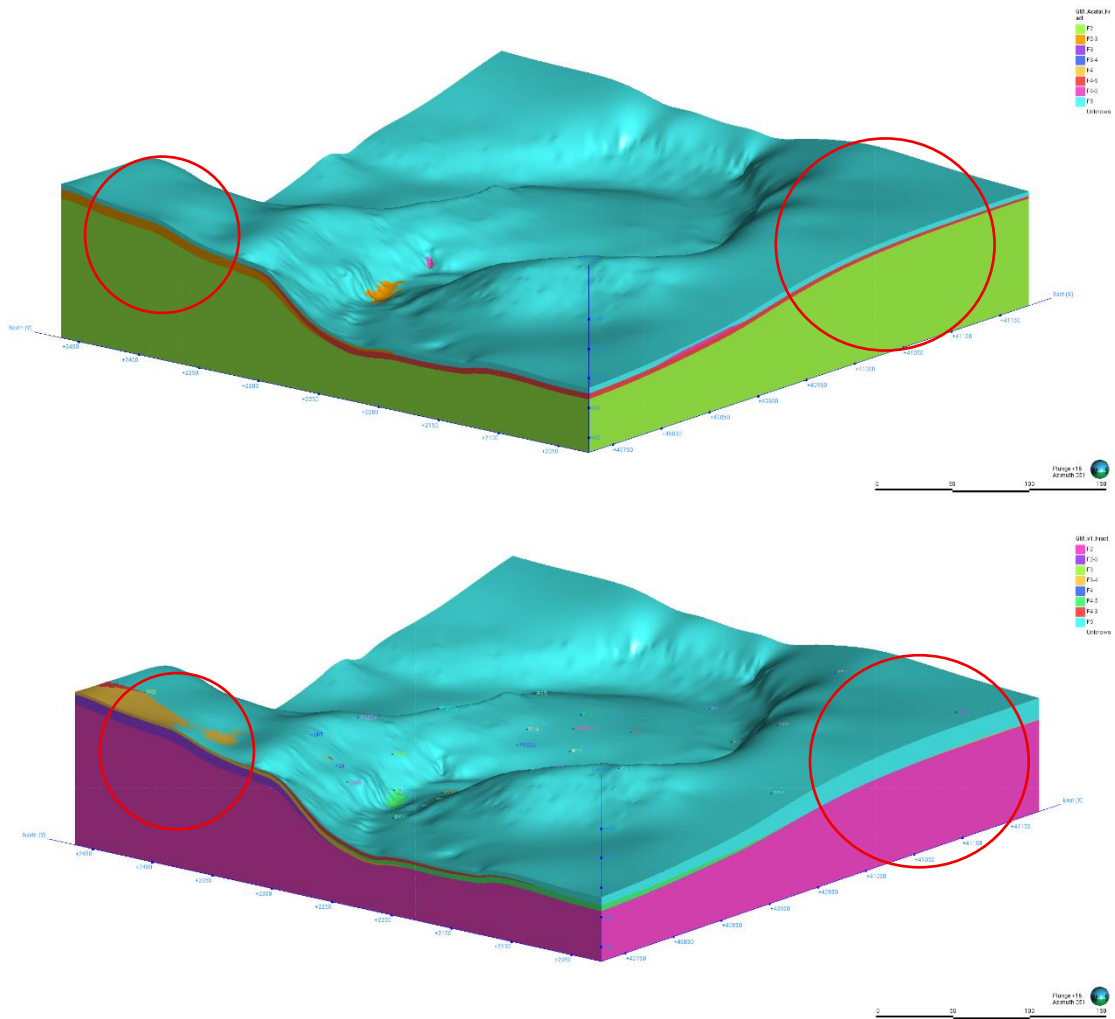


Figura 40 - Modelo grau de fracturação original (acima) e modelo corrigido (em baixo).

Na Figura 41, apresenta-se o modelo das Unidades de Lugeon original sobreposto ao modelo corrigido. Neste modelo é nitidamente visível o impacto da inclusão de mais dados no modelo, permitindo uma melhor interpolação para gerar os volumes. Observa-se, no modelo corrigido, uma melhor representação das camadas para cada intervalo de valores ao longo do modelo sendo corrigida o efeito “cone” na representação destes. Um ponto negativo a destacar é a influência do ajuste na representação das camadas, que levou à interpretação por parte do software de zonas no fundo do vale com valores de Unidades de Lugeon inferiores à realidade.

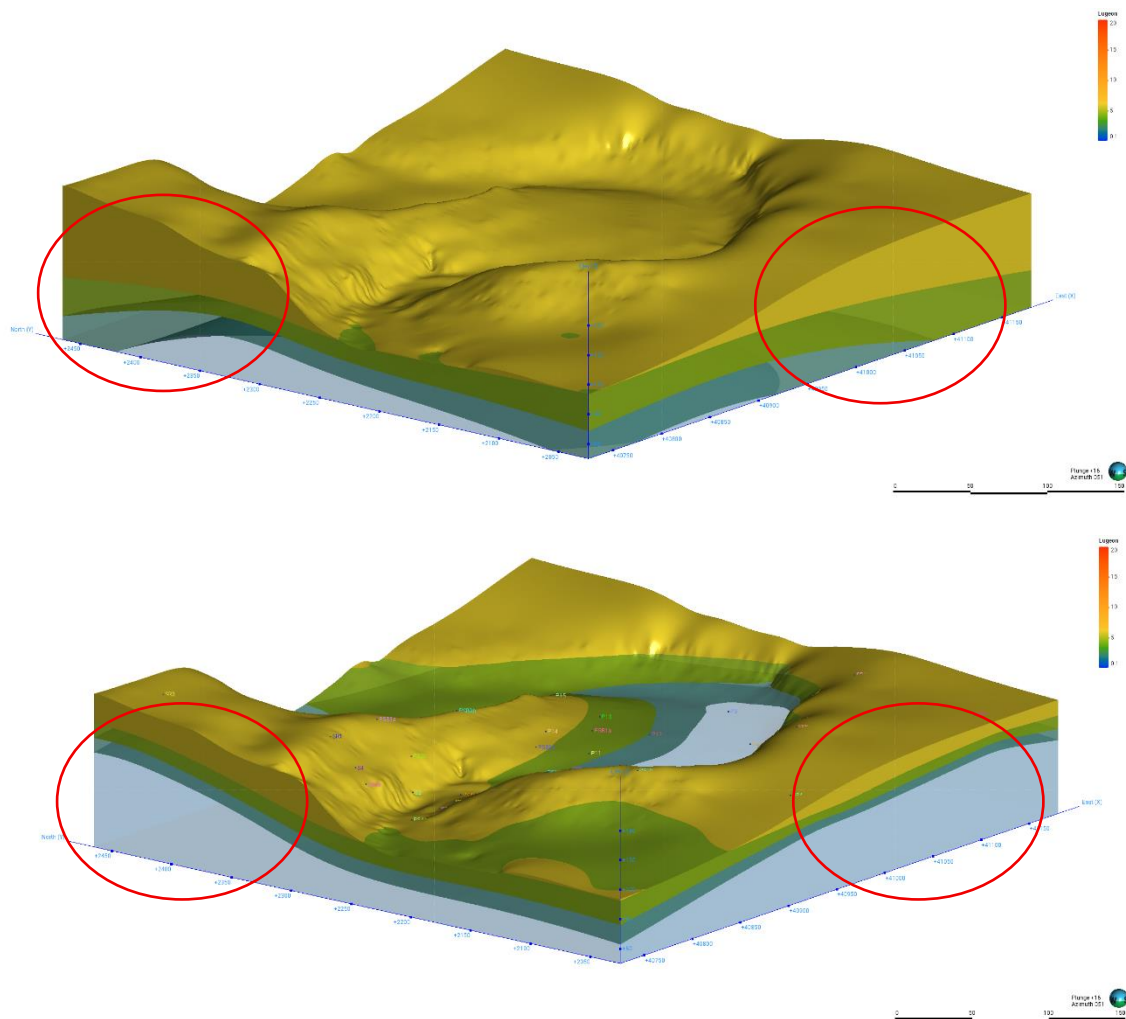


Figura 41 - Modelo das Unidades de Lugeon original (acima) e modelo corrigido (em baixo).

O modelo que combina as Unidades de Lugeon com a geologia apresenta as mesmas alterações nos volumes e superfícies do modelo acima descrito. Desta forma, na Figura 42 podemos observar o modelo com as novas correções.

Nos Anexos XII e XII encontram-se as representações correspondentes aos modelos tridimensionais, assim como as representações dos ensaios de Lugeon e modelos combinados.

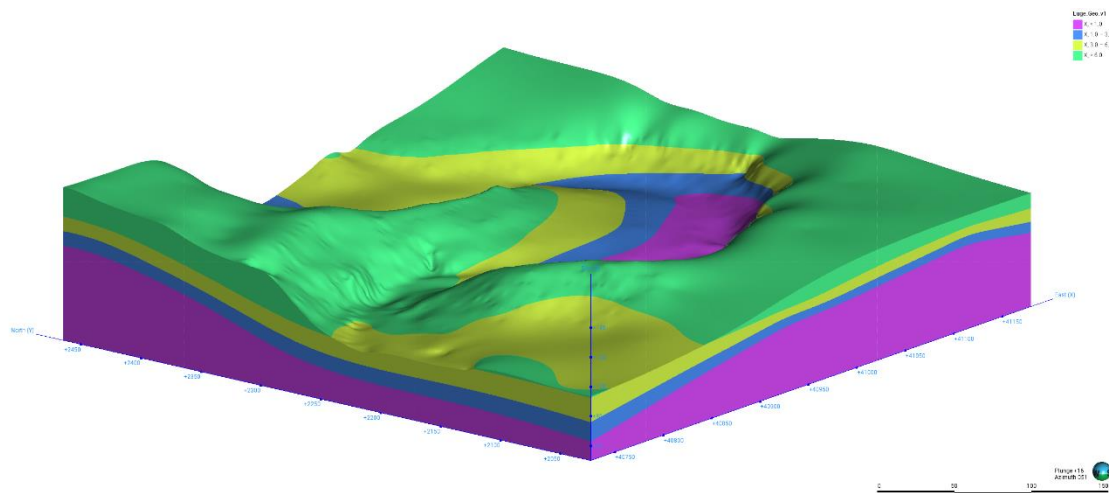


Figura 42 - Modelo Unidades de Lugeon e Geologia.

6.2. Comparação Bidimensional dos Resultados (Perfis).

A partir dos modelos mencionadas, é possível seccionar o nosso modelo em perfis 2D, permitindo uma análise mais simples e específica dos terrenos para qualquer orientação pretendida. Assim, foram traçados dois perfis de forma a analisar a evolução dos modelos em profundidade. O primeiro (Perfil A-A'), foi traçado no local de implantação da barragem, segundo o seu eixo, e o segundo (1-1'), foi traçado perpendicular a este. Na Figura 43 podemos observar a planta de localização dos perfis traçados e constante no Anexo XIV.

De forma a quantificar as diferenças entre os modelos iniciais e os corrigidos, segue-se de seguida uma breve comparação das ilustrações pertencentes ao Perfil A-A'. As ilustrações obtidas para este e para o Perfil 1-1' encontram-se no Anexo XV.

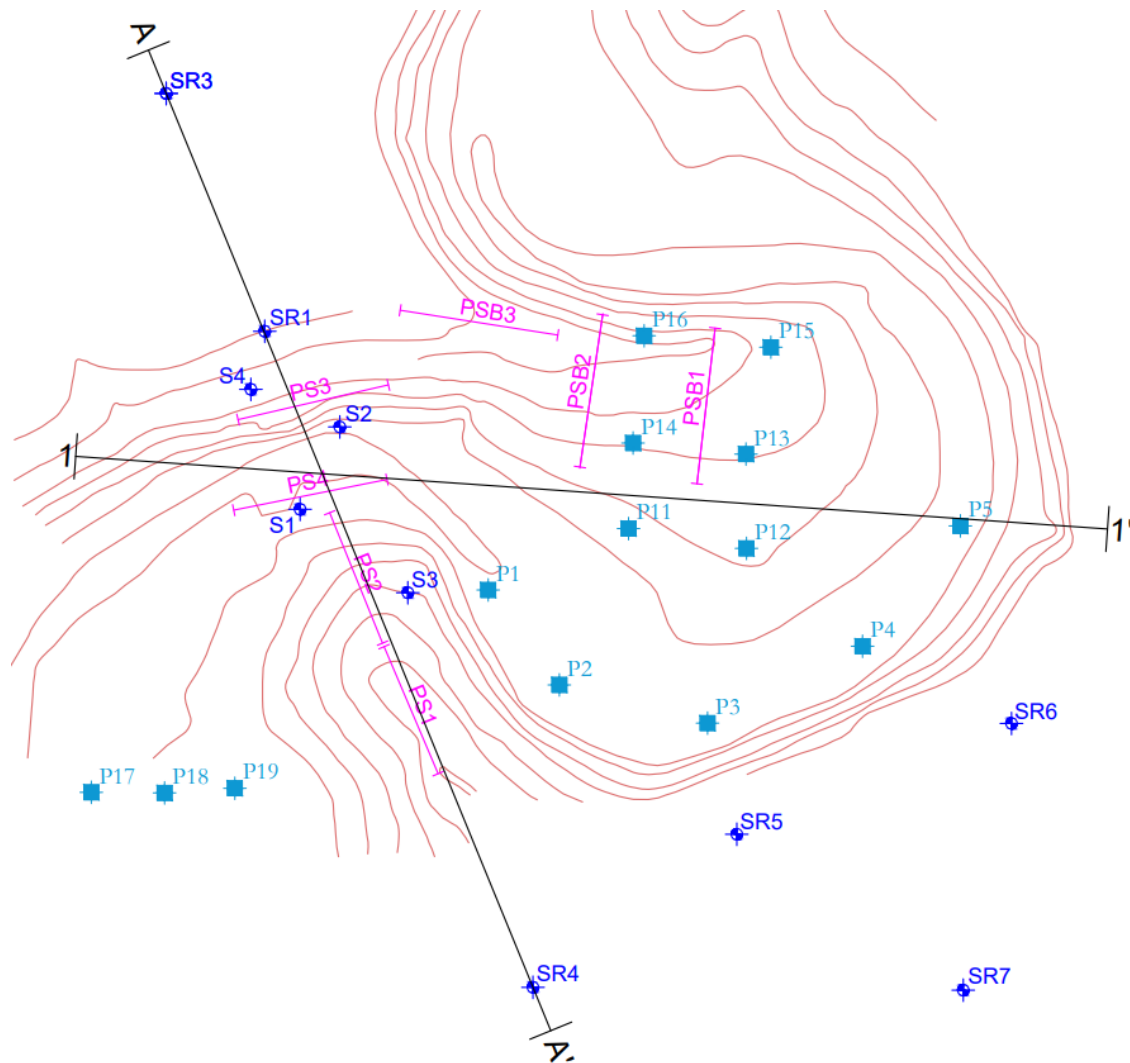


Figura 43 - Planta de localização dos perfis traçados

Os perfis do modelo de alteração mostram uma diferença significativa da influência da adição de novos dados ao modelo. Na Figura 44, a camada W_2 mantém a sua continuidade em todo o perfil, aumentando a sua espessura no lado direito do perfil. A camada de alteração W_3 apresenta maior representação no lado direito do perfil, tornando-se cada vez mais estreita no lado esquerdo. No perfil também foi identificada uma camada com grau de alteração W_4 , contudo, esta camada apenas se restringe ao fundo do vale e está localizada na transição de camadas moderadamente alteradas a decompostas.

Quando comparamos o perfil do modelo inicial com o corrigido é evidente a influência da adição de informação ao modelo. Na Figura 45, a camada W_2 , perde a sua continuidade em todo o perfil, diminuindo de espessura com a aproximação do final deste. Já a camada W_3 apresenta uma maior espessura no modelo corrigido no lado direito do perfil, perdendo a sua representatividade no lado esquerdo.

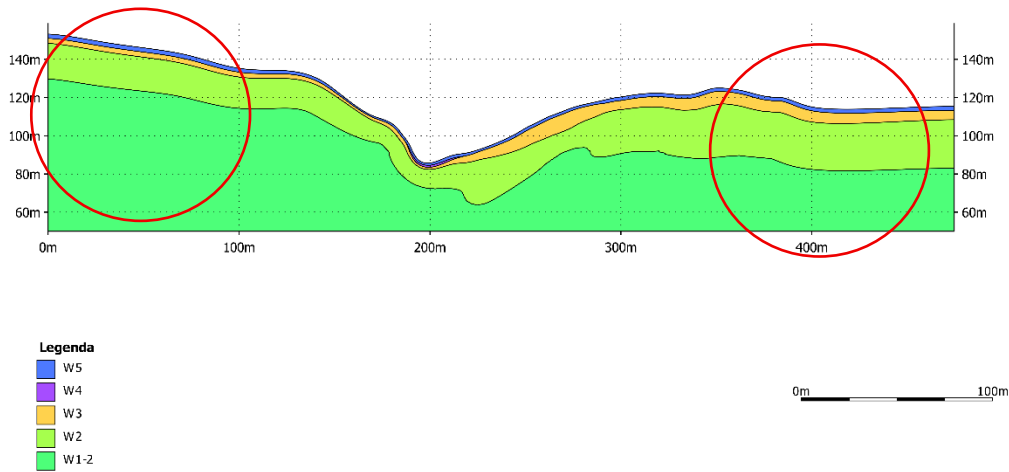


Figura 44 - Perfil inicial de alteração (Perfil A-A')

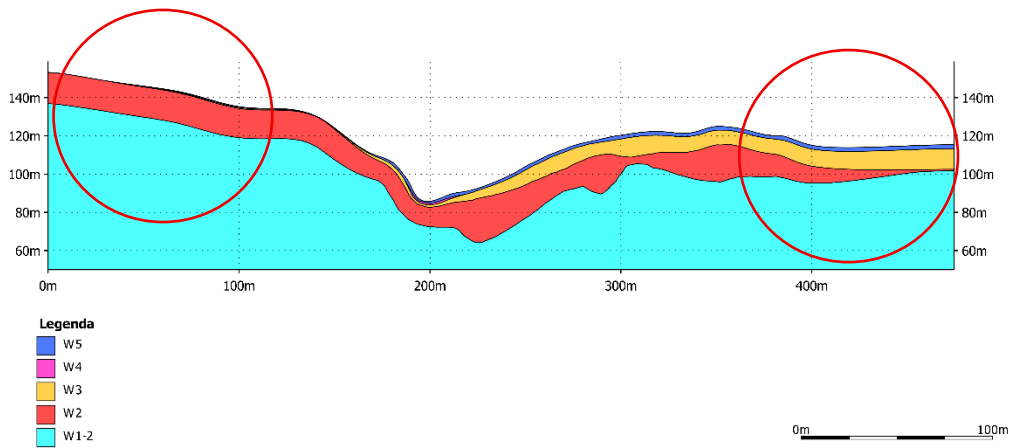


Figura 45 - Perfil corrigido de alteração (Perfil A-A')

Os perfis bidimensionais representativos do grau de fracturação mostram diferenças na forma como o software processa os dados introduzidos. Na Figura 46, a aproximadamente 250 metros, observa-se uma interrupção abrupta da camada F2-3, este tipo de “erro” está associado à introdução dos dados no software. Neste local, os pontos de referência para a interpolação das superfícies, apresentam duplicação do mesmo grau de fracturação em profundidade, levando a uma representação incorreta das superfícies e consequentemente da criação dos volumes.

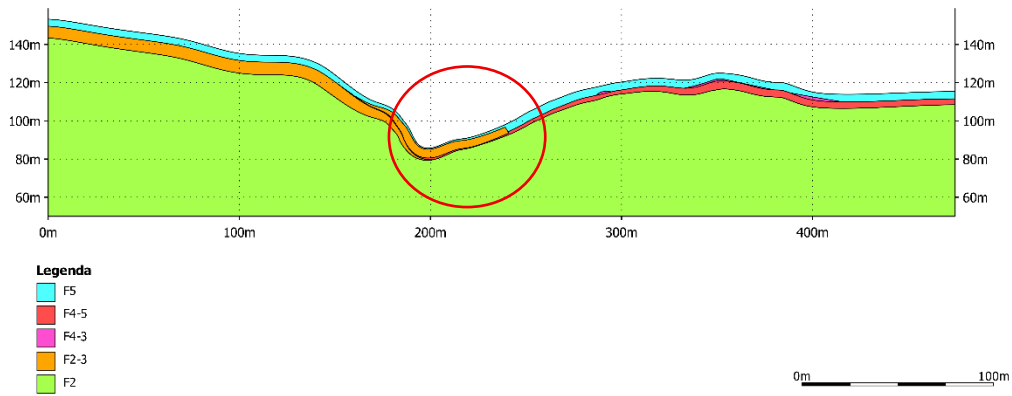


Figura 46 - Perfil inicial para grau de fracturação (Perfil A-A').

A Figura 47, demonstra claramente diferenças entre os dois modelos. Neste perfil observa-se uma redefinição das camadas superficiais do modelo. No lado esquerdo, o modelo inicial apresentava, da superfície para a base, as camadas F₅, F₂₋₃ e F₂. Já o modelo corrigido dispõe a seguinte sequência F₃₋₄, F₂₋₃ e F₂. No fundo do vale, onde inicialmente estava representada uma camada F₂₋₃, deixando esta agora de existir passando a serem geradas camadas F₃. No lado direito do perfil as diferenças também são claras, as camadas perderam a sua continuidade e paralelismo com a superfície, passando a serem representadas alterações do grau de fracturação. A camada correspondente a materiais decompostos, também apresenta uma maior possança no lado direito do modelo.

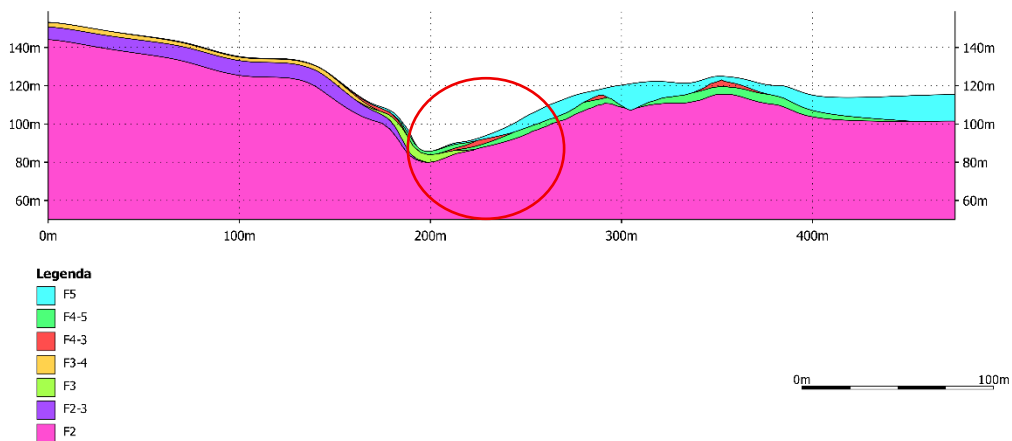


Figura 47 - Perfil corrigido para grau de fracturação (Perfil A-A').

Na Figura 48 apresenta-se o perfil correspondente ao modelo de Unidades de Lugeon, como mencionado anteriormente. As interpolações dos dados inseridos demonstram a limitação do software na representação das superfícies para áreas onde a existência de dados é escassa ou inexistente. Quando comparamos o modelo inicial com o modelo corrigido (Figura 49), verifica-se que a adição de informação ao modelo permite uma melhor interpolação dos valores originando

modelos mais precisos. No perfil inicial, próximo dos 200 metros, observa-se um artefacto no interior da camada correspondente a <1UL, deixando este de existir no modelo corrigido. A diferença mais significativa entre os dois perfis é o comportamento das camadas. No perfil inicial observam-se os “cones” mencionados anteriormente, pelo que estes deixam de estar presentes no modelo corrigido.

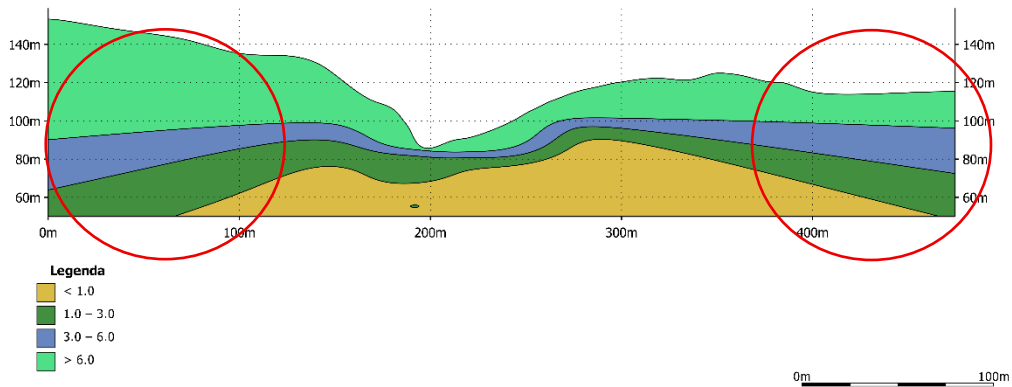


Figura 48 - Perfil inicial para Unidades de Lugeon (Perfil A-A').

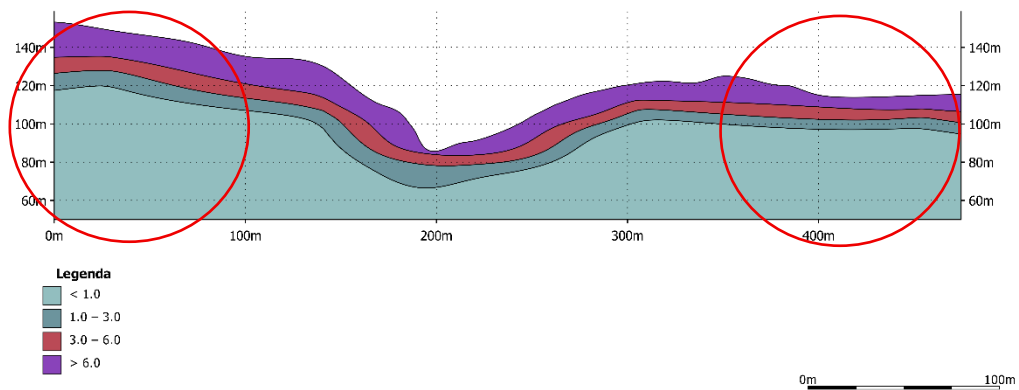


Figura 49 - Perfil Corrigido para Unidades de Lugeon (Perfil A-A').

O Anexo XVI contém os perfis A-A' da abordagem clássica, assim como os obtidos no Leapfrog Geo. Algumas considerações sobre os resultados obtidos são tecidas no Capítulo das Conclusões.

[página propositadamente em branco]

Capítulo VII

Conclusões

[página propositadamente em branco]

7. Conclusões

A criação de modelos para o grau de alteração, o grau de fracturação, as Unidades de Lugeon e a refração sísmica permite obter vastas informações acerca dos terrenos de fundação e do próprio maciço na envolvente de um determinado projeto. A utilização destes modelos, permite obter informações acerca da envolvente do local onde se realizou a campanha de prospeção, como a geologia de engenharia e os parâmetros geotécnicos.

Apesar de atualmente ser possível o recurso a software potente para auxílio das modelações geológico-geotécnica e na previsão das características das áreas envolventes, as interpretações dos resultados obtidos devem ser olhadas com espírito crítico. Como se veio a constatar nos exemplos apresentados, a escassez de dados pode afetar diretamente a forma como são representadas as superfícies e volumes nos modelos.

De forma a contornar a escassez de dados, foram adotadas algumas metodologias para aumentar a informação disponível a introduzir nos modelos. A partir dos perfis sísmicos, foi possível através de uma correlação empírica “converter” a informação disponível da velocidade de propagação das ondas sísmicas em estados de alteração. Através da análise dos dados próximos aos perfis sísmicos, e com o grau de alteração determinado, propôs-se um grau de fracturação para esses materiais.

A adição de novas sondagens também demonstrou ser uma mais-valia para a redefinição das superfícies e volumes dos modelos. Com mais dados, os resultados obtidos são mais robustos e permitem a extração de informação mais fidedigna.

A correção das superfícies geradas dos modelos é um aspeto a salientar no ajuste destes. Por vezes é essencial inserir parâmetros adicionais nos dados de entrada. Estes parâmetros, permitem a interpolação das superfícies de forma mais eficaz, reduzindo erros nos modelos. A inserção de informação nos dados de entrada, consiste, por exemplo, na atribuição a uma sondagem, à

profundidade que seria espectável, o parâmetro que se pretende corrigir, atribuindo-lhe um valor de 0 para a sua espessura. Desta forma, é possível orientar o software na definição das superfícies, e por consequente melhorar as representações finais.

As necessidades e objetivos do presente trabalho exigiram a seleção de um software capaz de cumprir com o intuito pretendido. Desta forma, foi selecionado um software comercializado pela Bentley Systems. A escolha desta ferramenta assentou no facto de a mesma ser intuitiva, facilitando a sua utilização, e pela robustez dos modelos geológicos e geotécnicos gerados. Acrescenta, o facto de esta ferramenta ser capaz de processar grandes volumes de informação para gerar modelos precisos e dinâmicos. Uma outra característica que levou à seleção deste software foi a capacidade de adicionar novos dados em qualquer fase dos trabalhos, o que permite uma atualização continua dos modelos de forma automática.

O software utilizado demonstrou ser capaz de criar diferentes tipos de modelos, como geológicos, numéricos e a possibilidade de combinar estes modelos. A integração de novos dados, demonstrou ser uma opção viável durante a elaboração dos modelos pretendidos, permitindo a atualização destes no decorrer do trabalho de forma a gerar modelos mais complexos e que melhor caracterizam o local de estudo.

Embora este software seja capaz de criar diferentes modelos, a intervenção por parte do operador, demonstra ser necessária e essencial, na correção destes modelos, corrigindo e ajustando a forma como é feita a interpolação e representação dos dados. Estas intervenções levam a que interpretações erradas por parte do software sejam evitadas.

Os modelos geológicos criados apresentam uma grande fiabilidade para a interpretação da área de estudo, apesar de o local apresentar baixa diversidade geológica, foi possível obter um modelo capaz de representar os materiais do local.

Os modelos de alteração e fracturação demonstram a capacidade que o software possui na representação de modelos com mais variáveis. Apesar de ser necessária a intervenção da parte do utilizador na redefinição das superfícies, este foi capaz de produzir modelos que permitem a interpretação dos estados de alteração e fracturação nos terrenos de fundação.

Os modelos numéricos, apresentam ser uma funcionalidade interessante, ao permitirem a interpolação de dados pela área de trabalho até pontos distantes do modelo. Contudo, foi verificada a necessidade de alteração do método de interpolação, de isotrópica para anisotrópica para que os resultados fossem mais próximos da realidade e, consequentemente, mais fiáveis.

A ferramenta que demonstrou maior potencialidade de modelação foi a opção de gerar modelos combinados. A partir de diferentes modelos, sejam eles modelos geológicos ou numéricos, é

possível combiná-los obtendo um novo conjunto de dados que reúne os diferentes parâmetros introduzidos na base de dados. Contudo, um ponto negativo desta funcionalidade é o número de volumes gerados pela combinação de diferentes modelos. Se forem combinados modelos que apresentam um elevado número de parâmetros, o produto final gerado apresenta uma elevada quantidade de volumes, com dimensões variadas, dificultando a interpretação do modelo.

De forma a melhorar os modelos combinados, diminuindo a quantidade de volumes gerados, é necessário ajustar os dados de entrada. Para tal, é recomendado reduzir o número de parâmetros introduzidos, simplificando os modelos. Desta forma asseguram-se melhores resultados para este tipo de modelos.

A adição de novos pontos de sondagem, levou a uma melhoria significativa dos modelos gerados. No decorrer da modelação tridimensional, optou-se por adicionar ao modelo 6 novas sondagens, resultando numa melhoria significativa das superfícies e volumes gerados nos modelos anteriormente mencionados.

A partir da informação disponível das plantas da obra, foi possível extrair a orientação de fraturas para a área de estudo, permitindo elaborar um estereograma a partir do software. Esta característica confere ao software uma vasta transversalidade, permitindo a partir de apenas um programa analisar uma vasta quantidade de dados.

O software, permite também seccionar o perfil, ou seja, extrair perfis bidimensionais a partir do modelo. Estes perfis possibilitam a análise dos terrenos em qualquer local, segundo a direção e inclinação que se pretenda. Esta ferramenta foi útil para analisar a representação dos parâmetros introduzidos segundo o eixo da barragem, comparando assim os resultados obtidos nos diferentes modelos.

No Anexo XVI, podemos observar os resultados obtidos para os perfis A-A' da Abordagem Clássica e do Leapfrog Geo. Nestas ilustrações, são observadas diferenças nas representações dos parâmetros. A utilização do software permite a obtenção dos resultados de forma rápida, interpolando os dados inseridos para a definição das superfícies. Contudo, identifica-se a perda de informação para camadas com menor possança, as superfícies geradas são prolongadas lateralmente levando à representação de parâmetros em locais onde não existiriam, ou sobrepondo-os com informação existente. Este tipo de interpretação poderá ser corrigido com a inclusão de novos dados aumentando a base de dados existente, ou através da sua correção manual.

No perfil A-A' da abordagem clássica, foi possível identificar na zona assinalada na Figura 50, uma zona hidrogeológica com valores de Unidades de Lugeon superiores à envolvente, não constando

para o mesmo perfil obtido no Leapfrog Geo (Figura 51). Nos locais assinalados nestas figuras nota-se claramente diferenças na forma como a interpretação dos parâmetros e projeção das superfícies é realizada.

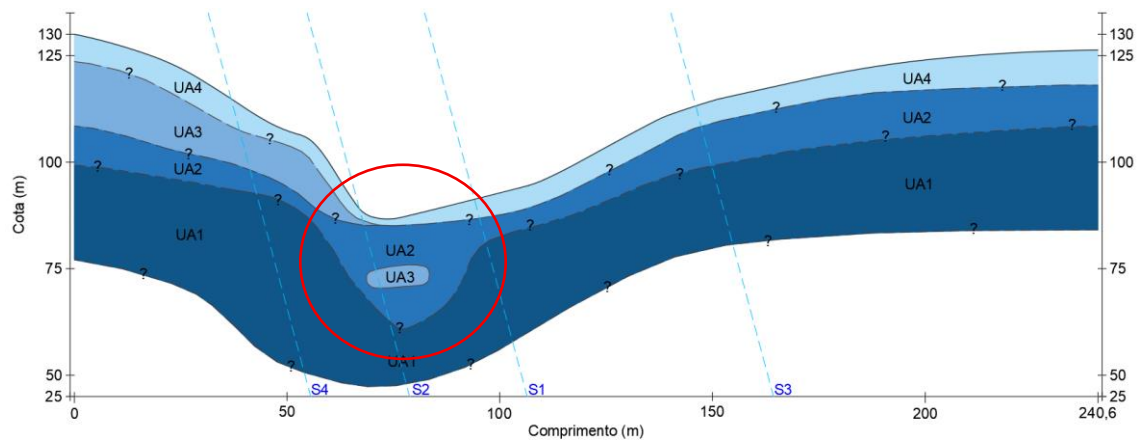


Figura 50 - Perfil A-A' das Unidades de Lugeon, Abordagem Clássica.

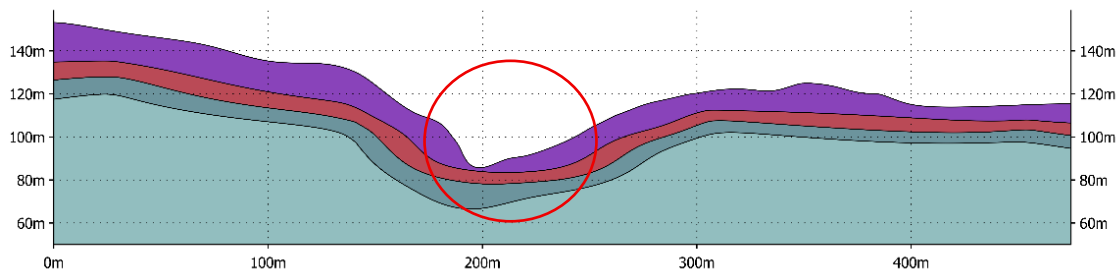


Figura 51 - Perfil A-A' das Unidades de Lugeon, Leapfrog Geo.

Enumeradas as potencialidades e fragilidades da ferramenta a que se recorreu no âmbito dos estudos desenvolvidos apresenta-se de seguida trabalhos e procedimentos futuros que permitam uma maior e melhor utilização de software comercial para a apoio à produção de representações geológico-geotécnicas de projetos de engenharia em geral e de barragens em particular. Dentro destes destaca-se:

A integração de ferramentas de parametrização pode contribuir para a análise de dados e identificar padrões que possam auxiliar o operador na modelação tridimensional e na interpretação dos resultados obtidos. Estas ferramentas podem também contribuir para a homogeneização dos dados e identificação nas fases precoces de erros nos parâmetros a modelar.

A integração dos modelos gerados pelo Leapfrog Geo em softwares de cálculo numérico, como o PLAXIS 3D e RS3 permitirá, de forma rápida e eficiente, a disponibilização de informações geológico-geotécnicas a técnicos de diferentes áreas. Esta sinergia permitirá aumentar o fluxo de

informações, levando a um aumento significativo da aplicação destes modelos e otimizando processos de tomada de decisão. Esta conectividade facilita o trabalho entre equipas multidisciplinares, promovendo a construção de modelos dinâmicos em constante evolução.

[página propositadamente em branco]

Capítulo VIII

Referências

[página propositadamente em branco]

8. Referências

A.S.T.M. (1988). Rock classification systems for engineering purposes. American Society for Testing and Materials.

Adewoyin O.O., Joshua E.O., Akinyemi M.L., Omeje M., Adagunodo T.A. (2021). Evaluation of geotechnical parameters of reclaimed land from near-surface seismic refraction method. *Heliyon*, 7(4), e06765. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06765>

Aghamolaide I., Lashkaripour G. R., Ghafoori M., Moghaddas N. H. (2019). 3D geotechnical modeling of subsurface soils in Kerman city, southeast Iran. *Bulletin of Engineering and the Environment*, 78:1385-1400. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1240-7>

Al-Bayati N. Z., Arslan C. A. (2023). Optimum design of buttress dam using genetic algorithm. *Anbar Journal of Engineering Science*, 14(2):40-52. <http://doi.org/10.37649/aengs.2023.142965.1061>

Aldungarova A., Utepov Y., Mukhamejanova A., Tulebekova A., Nazarova A., Tleubayeva A., Makasheva I., Zhakapbayeva G., Makhiyev B., Mkilima T. (2025). Advancing intermediate soil properties (ISP) interpolation for enhanced geotechnical survey accuracy. A review. *Engineering Reports*, 7:e70328. <https://doi.org/10.1002/eng2.70328>

Al-Jabban W J.M. (2013). Estimation of Standard Penetration Test (SPT) of Hilla City, Iraq by using GPS coordination. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7(2): 133-145.

Atallah, T.A. (2002). A review on dams and breach. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University.

Athari E., Sattari M.T., Aalami M.T. (2025). Comparison of N-Beats with standalone and hybrid deep learning models in monthly inflow forecasting to the Aras dam reservoir: a feature selection analysis. *Journal of Agricultural Sciences*, 31(3):747-766. DOI: 10.15832/ankutbd.1603391

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.

Bartsch C., Gilman T. (2019). 3D geological modelling as a tool for evaluating foundations – a case study for Lower Baker Dam, Washington State, USA. *Terrane Geoscience*.

Baynes F.J., Parry S., Novotný J. (2021). Engineering geological models, projects, and geotechnical risk. *Quart. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 54(2). <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-080>

- Belete D., Chala E.T., Jilo N. Z., Garo T. (2025). Engineering geological investigation of the Katar dam foundation and abutment slope stability analysis, Southeast Ethiopia. *Indian Geotechnical Journal* 5(3):1563-1593. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-01033-1>
- Bhattarai S., Zhou Y., Zhao C., Yadav R. (2016). An overview on types, construction method, failure and key technical issues during construction of high dams. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(26), 10415-10432.
- Chaminé H.I., Afonso M.J., Trigo JF, Freitas L., Ramos L., Carvalho J.M. (2021). Site appraisal in fractured rock media: coupling engineering geological mapping and geotechnical modelling. *European Geologist Journal*, 51:31-38 <http://doi.org/10.5281/zenodo.4948771>
- Chaminé H.I., Fernandes I. (2023). The role of engineering geology mapping and GIS-based tools in geotechnical practice. In: Chastre C., Neves J., Ribeiro D., Neves M.G., Faria P. (eds) *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, p. 3–27. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_1
- Chaminé H.I., Teixeira J., Freitas L., Pires A., Silva R.S., Pinho T., Monteiro R., Costa A.L., Abreu T., Trigo J.F., Afonso M.J., Carvalho J.M. (2016). From engineering geosciences mapping towards sustainable urban planning. *European Geologist Journal*, 41:16-25.
- Costa Pinto L., Moreira S., Cruz J., Branco J., Cruz B., Chaminé H.I. (2023). ME-AGS GENERATOR: aplicativo para a geração automatizada de ficheiros AGS4 em geotecnia. In: Mota D., Silva E., Santos J.F., Marinho J., Cardoso M., Morgado N., Carvalho P., Moreira S. (eds), *Simpósio de Engenharia Informática 2023: Proceedings Book*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, P.Porto, Porto, pp. 76-85.
- Cruz B., Cruz J., Branco J., Chaminé H.I. (2023). Digitalização, uniformização e transferência de dados geotécnicos: uma realidade incontornável. In: Duarte I., Marcelino J., Pinho A., Faria P., Lopes L., Pereira P. (eds.), *Proceedings 18º Congresso Nacional de Geotecnia (18CNG)*, Universidade de Évora & Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Évora.
- Culshaw M., Jackson I., Peach D., van der Meulen M.J., Berg R., Thorleifson H. (2021). Geological survey data and the move from 2-D to 4-D. In: Turner, A.K., Kessler, H., van der Meulen, M.J. (eds.) *Applied Multidimensional Geological Modeling: Informing Sustainable Human Interactions with the Shallow Subsurface*, pp. 13–34. Wiley-Blackwell, Chichester.
- Culshaw M.G. (2005). From concept towards reality: Developing the attributed 3D model of the shallow subsurface. *Quart. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 38, 231–284 (2005). <http://dx.doi.org/10.1144/1470-9236/04-072>
- Dearman W.R. (1991). *Engineering geological mapping*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Dong M., Neukum C., Hu H. (2015). Real 3D geotechnical modeling in engineering geology: a case study from the inner city of Aachen, Germany. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74:281-300. DOI 10.1007/s10064-014-0640-6
- El-Molla D.A., Kilit M. (2025). Seepage control, detection, and treatment in embankment dams: a state-of-the-art Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10185-y>
- Eurocode 7 (2007). *Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing*. Caparica: European Committee for Standardization.
- Eurocódigo 7 (2010). *Eurocódigo 7 - Projeto geotécnico, Parte 1: Regras gerais*. Caparica: Instituto Português da Qualidade,
- Fernandes I., Chaminé H.I. (2023). In situ geotechnical investigations. In: Chastre C, Neves J, Ribeiro D, Neves MG, Faria P (eds) *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, p. 29–54. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_2
- Folque, J. (1987). *Introdução à mecânica dos solos*. LNEC, Lisboa.
- Galindo R., Sánchez-Martín J., Marañón C.O. (2020). Sustainable construction of earth dams: use of heterogeneous material from the dam site. *Sustainability*, 12, 9940. doi:10.3390/su12239940

Garcia K.E., Muhi M., Tabaroei A. (2024). The role of dynamic cone penetrometer testing in assessing pavement subgrade strength: a literature review. *International Journal of Geomaterials*, 26(117), 132-142. DOI: 10.21660/2024.117.g13440

Gonzalez de Vallejo L.I., Ferrer M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis Group, Boca Raton.

Hasan M., Su L., Cui P., Shang Y. (2025). Development of deep-underground engineering structures via 2D and 3D RQD prediction using non-invasive CSAMT. *Scientific Reports*, 15:1403. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85626-7>

He L., Jiao Y., Zhang Y., Zheng F., Peng H., Ranjith P.G. (2024). Innovative geological-geotechnical zoning framework for urban planning: Wuhan's experience. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources* 10:176. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00830-5>

Hencher S. (2024). *Practical Engineering Geology*. 2nd Edition. CRC Press, Taylor & Francis.

Hidroprojeto (1997). *Peças escritas e desenhadas do Projecto de execuãod a Barragem do Açafal*.

Hu Y., Wang Z. Z., Guo X., Kek H. Y., Ku T., Goh S. H., Leung C. F., Tan E., Zhang Y. (2024). Three-dimensional reconstruction of subsurface stratigraphy using machine learning with neighborhood aggregation. *Engineering Geology* 337, 107588. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107588>

Ijaz N., Ijaz Z., Zhou N., Rehman Z., Ijaz H., Ijaz A., Hamza M. (2025). Optimizing subsurface geotechnical data integration for sustainable building infrastructure. *Buildings*, 15, 140. <https://doi.org/10.3390/buildings15010140>

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1980). *Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods*. In: Brown E.T. (ed.), *suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods*, ISRM. Pergamon Press, Oxford.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1981). *Basic geotechnical description of rock masses*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18:85-110.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (2007). *The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), *suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods*, ISRM, Ankara.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (2015). *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*. In: Ulusay, R. (ed.), *suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods*, ISRM. Springer, Berlin.

Khan M., Park J., Seo J. (2021). Geotechnical property modeling and construction safety zoning based on GIS and BIM integration. *Applied Sciences*, 11, 4004. <https://doi.org/10.3390/app11094004>

Khassaf S.I. (2020). *Dams and Reservoirs*. University of Basrah. (Tese de Doutorado).

Kim M., Kim A., Chung C. (2020). A three-dimensional geotechnical spatial modeling method for borehole dataset using optimization of geostatistical approaches. *Journal of Civil Engineering*, 24(3): 778-793. DOI 10.1007/s12205-020-1379-1

Lee M.L., Lee Y.L., Goh S. L., Koo C.H., Lau S.H., Chong S.Y. (2021). Case studies and challenges of implementing geotechnical building information modelling in Malaysia. *Infrastructures*, 6, 145. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6100145>

Li Y., Liu H., Wen L., Xu Z., Zhang Y. (2024). Reliability analysis of high core rockfill dam against seepage failure considering spatial variability of hydraulic parameters. *Acta Geotechnica*, 19:4091-4106. DOI:10.1007/s11440-023-02159-x

Liu H., Su H., Sun L., Dias-da-Costa D. (2024). State-of-the-art review on the use of AI-enhanced computational mechanics in geotechnical engineering. *Artificial Intelligence Review*, 57:196. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10836-w>

Liu P., Li Z., Yu G., Li Z. (2025). Three-dimensional geological modeling method based on potential vector fields. *Applied Sciences*, 15, 3594. <https://doi.org/10.3390/app15073594>

- Loke M. H. (1999). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys*. Penang: Geotomo Software.
- Lutenegger A.J. (2021). *In situ testing methods in geotechnical engineering*. CRC Press.
- Matos Fernandes M. (2015). *Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica*. FEUP Edições. Vol. 2, 2ª Edição. Porto.
- Menon J., Masters Y. (2025). Unlocking offshore geotechnical risk mitigation: the role of building information modeling (BIM). In: 5th International Symposium on Offshore Geotechnics (2025).
- Mo J., Zhu L., Wen P., Xie Z., Li R., Ji C., Cheng W., Zhang Y., Chen C., Yang Q., Wang J. (2025). 3D-CWC: A Method to Evaluate the Geological Suitability for Layered Development and Utilization of Urban Underground Space. *Land*, 14, 551. <https://doi.org/10.3390/land14030551>
- Norbury D. (2020). *Soil and rock description in engineering practice*. 3rd Edition, Whittles Publishing, CRC Press.
- OE – Ordem dos Engenheiros (2020). *Recomendações na área da geotecnia*. Especialização em Geotecnia. Ordem dos Engenheiros, Lisboa.
- Panicker J., Nagarajan P., Thampi S. G. (2024). Safety considerations, failure scenarios and various factors affecting the behaviour and performance of concrete arch dams. *E3S Web of Conferences*, 559, 04053. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455904053>
- Pavlovic N. (2006). Geotechnical zonation: principles, criteria, and procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 228.
- Petrone P., Allocca V., Incontri P., De Vita P. (2023). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 82:12. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-03017-y>
- Pistone R.S. (1989). *Estabilización integral de grandes excavaciones en roca*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Qi X., Liu H. (2018). An improved global zonation method for geotechnical parameters. *Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.11.013>
- Quiñones-Rozo, C. (2010). Lugeon test interpretation, revisited. *Collaborative Management of Integrated Watersheds, US Society of Dams, 30th Annual Conference, S.*, (pp. 405-414).
- Quintas F.E.G. (2002). *Planeamento da construção de barragens de terra*. Universidade do Porto (Dissertação de Mestrado).
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Ribeiro O., Teixeira C., Ferreira C. R. (1967). *Notícia explicativa da Folha 24-D Castelo Branco da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Robertson P.K., Cabal K. (2022). *Guide to in situ testing*. P.K. Robertson Consulting, 2nd Edition.
- Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P. W., Schneider J. A., Zettler T. E. (2002). *Geotechnical Engineering Circular N.º 5 – Evaluation of Soil and Rock Properties*. U.S. Department of Transportation, Office of Bridge Technology, Washington.
- Shahgholian R., Ferreira C., Fonseca A.V. (2022). Correlation between SPT and CPT test in liquefiable deposits. *CONSTRUCT-GEO*, Faculty of Engineering of the University of Porto. DOI: 10.1201/9781003308829-100
- Sharma A, Thakur S, Nallasivam K, (2025). Seismic Response Assessment of Concrete Gravity Dam with Dam-Foundation-Reservoir Interaction by Adopting Finite Element Technique. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 13:332. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-01905-7>
- Silva J.P.C. (2023). *Modelações geológico-geotécnico tridimensionais*. Instituto Superior de Engenharia do Porto (Dissertação de Mestrado). URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/23980>
- Tanoli U.F., Azhar M.U., Ahmad T., Khawaja M.S., Ahmed M. (2025). The Role of 3D Subsurface Modelling for Geotechnical Engineering Data Visualization. *Journal of Himalayan Earth Sciences* (58)1, 21-36.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. (1990). *Applied Geophysics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Turner A.K., Kessler H., van der Meulen M.J. (2021). *Applied multidimensional geological modeling: informing sustainable human Interactions with the shallow subsurface*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.

Vaniček I., Jirásko D., Vaniček M. (2021). Role of geotechnical engineering in BIM process modelling. In: 14th Baltic Sea Region Geotechnical Conference. doi:10.1088/1755-1315/727/1/012007

Vaskou P., Quadros E. F., Kanji M. A., Johnson T., Ekmekci M. (2019). ISRM suggested method for the Lugeon test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52:4155–4174. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01954-x>

Webber S. M., Kijek K. (2022). Applying 3D geological modelling techniques to geotechnical engineering problems - advantages, pitfalls, and "Getting the Geology Right". In: 14th Young Geotechnical Professionals Conference.

Whiteman B.D. (2021). 3D ground modelling: geotechnical investigation for dolphin replacement and jetty strengthening at Cape Lambert A (CLA). In: *New Zealand Geotechnical Society Symposium*.

Yusof N.Q.A.M., Zabidi H. (2018). Reliability of using the standard penetration test (SPT) in predicting properties of soil. *Journal of Physics: Conference Series*, 1082. doi:10.1088/1742-6596/1082/1/012094

Zhang G., Xu L., Qiu F., Shen Z., Zhang Y. (2025). A review on the progress of integrated geophysical exploration techniques for leakage hazard detection in earth and rock dams. *Applied Sciences*, 15(4):1767. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15041767>

Zuquette L., Gandolfi N. (2004). *Cartografia geotécnica*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

Sites da internet (consultado de abril a maio de 2025)

Seequent (2021). The role of the 3D geological Model in Geotechnical BIM. In: <https://www.seequent.com/the-role-of-the-3d-geological-model-in-geotechnical-bim/>

[página propositadamente em branco]

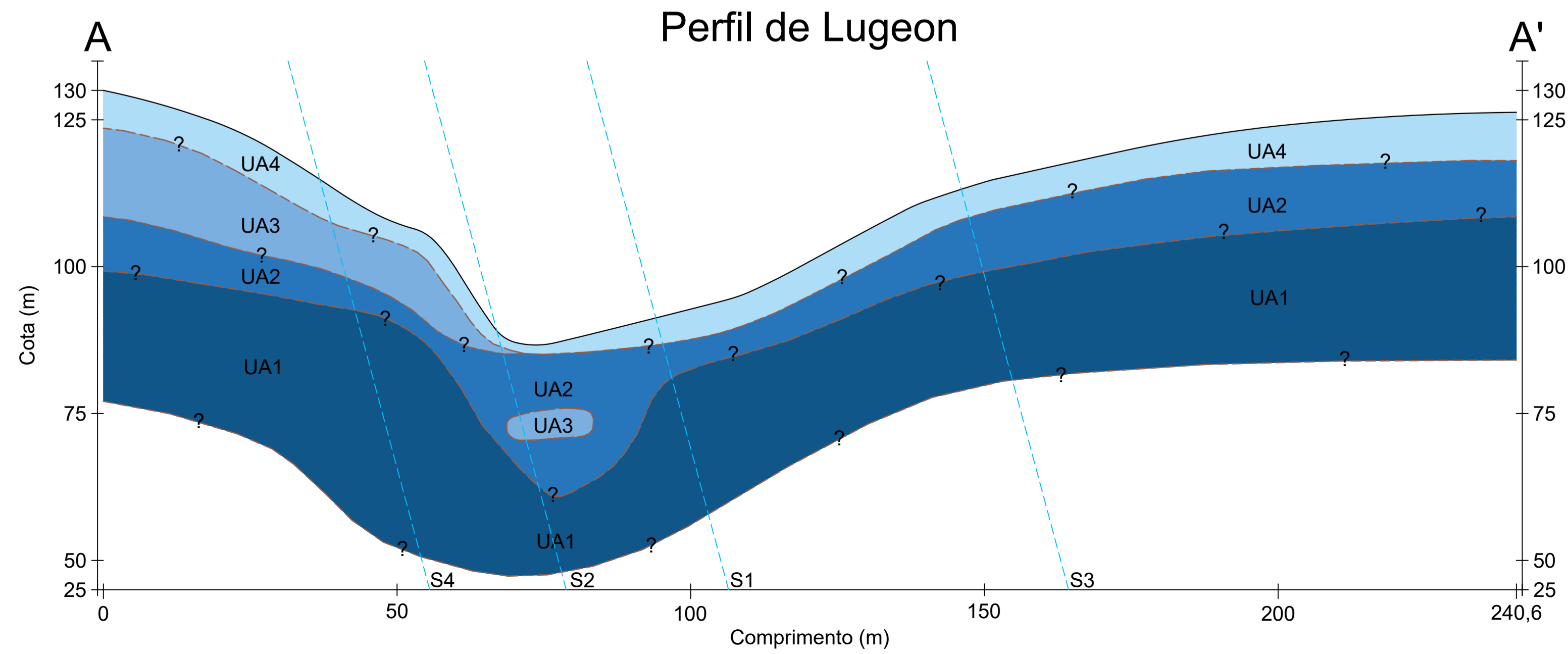
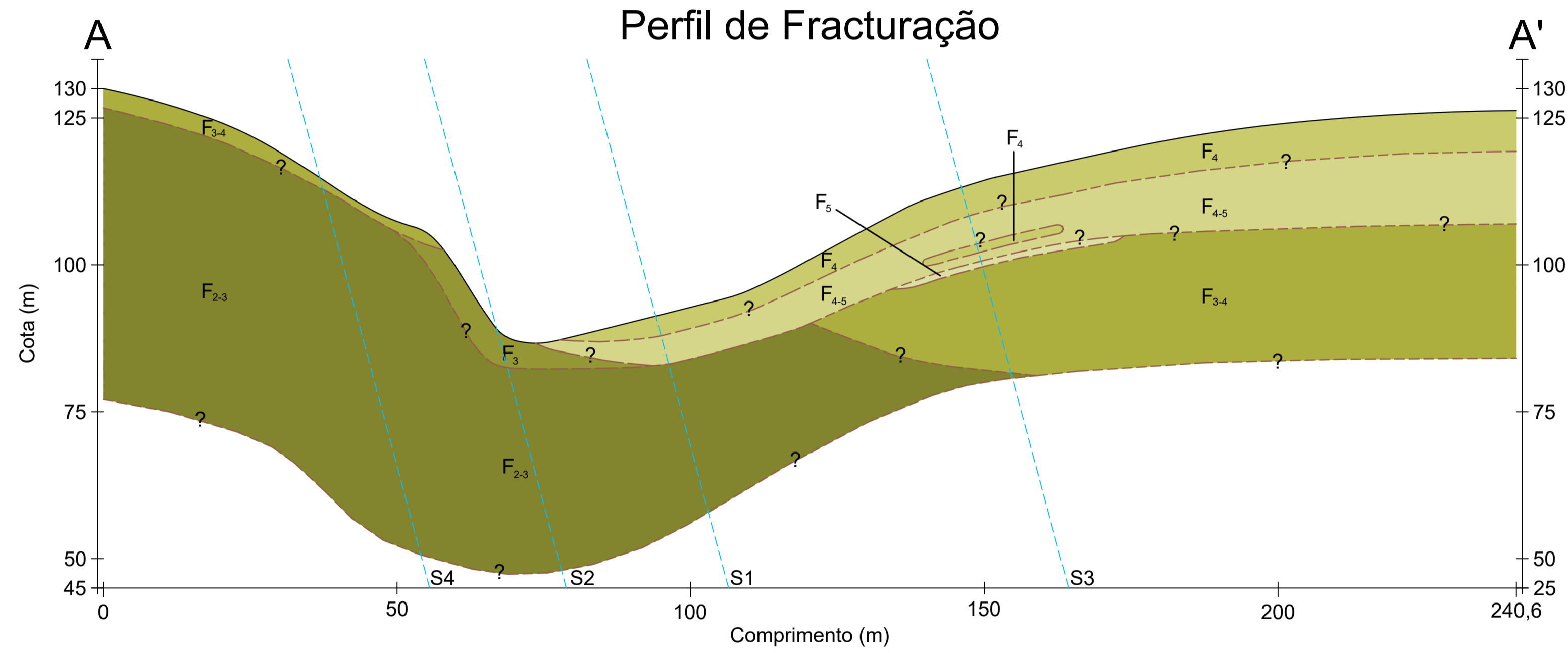
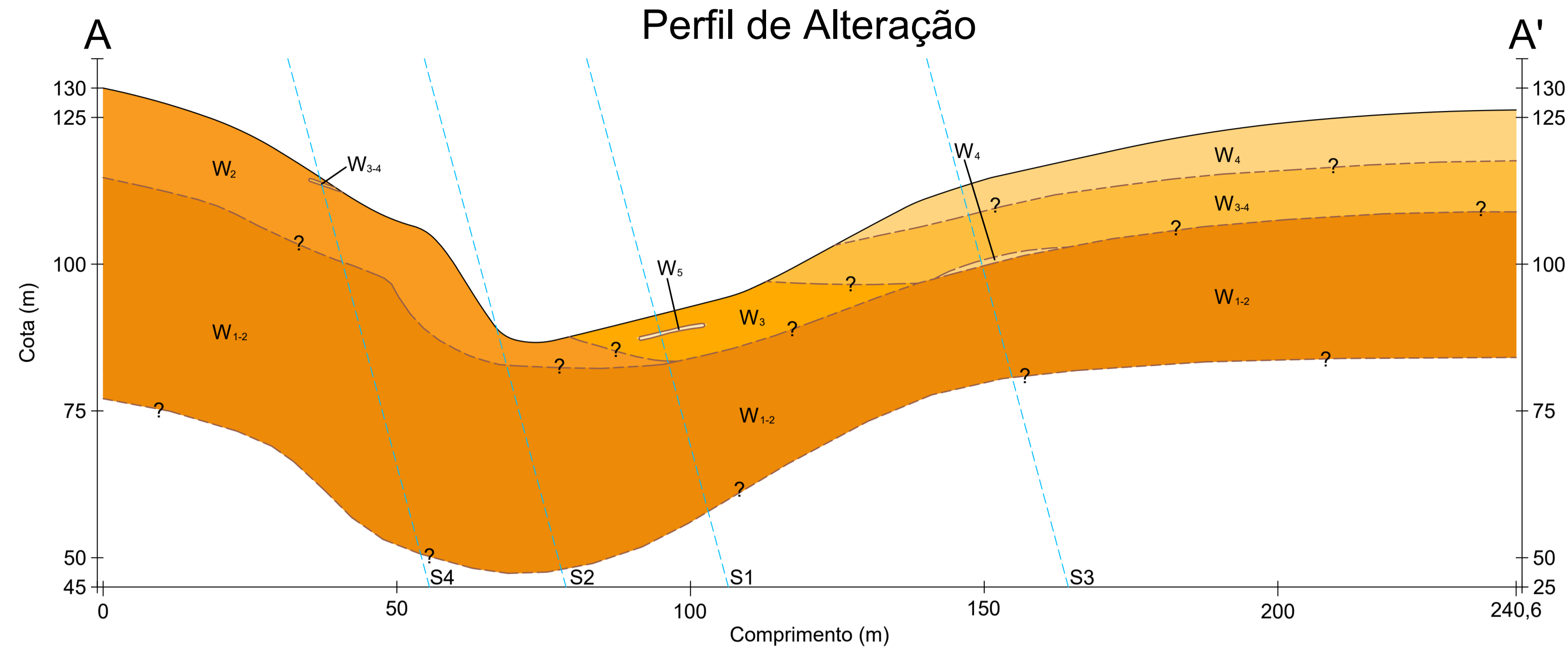
Anexos

[página propositadamente em branco]

Anexo I – Planta e Perfis A-A' (Abordagem Clássica)

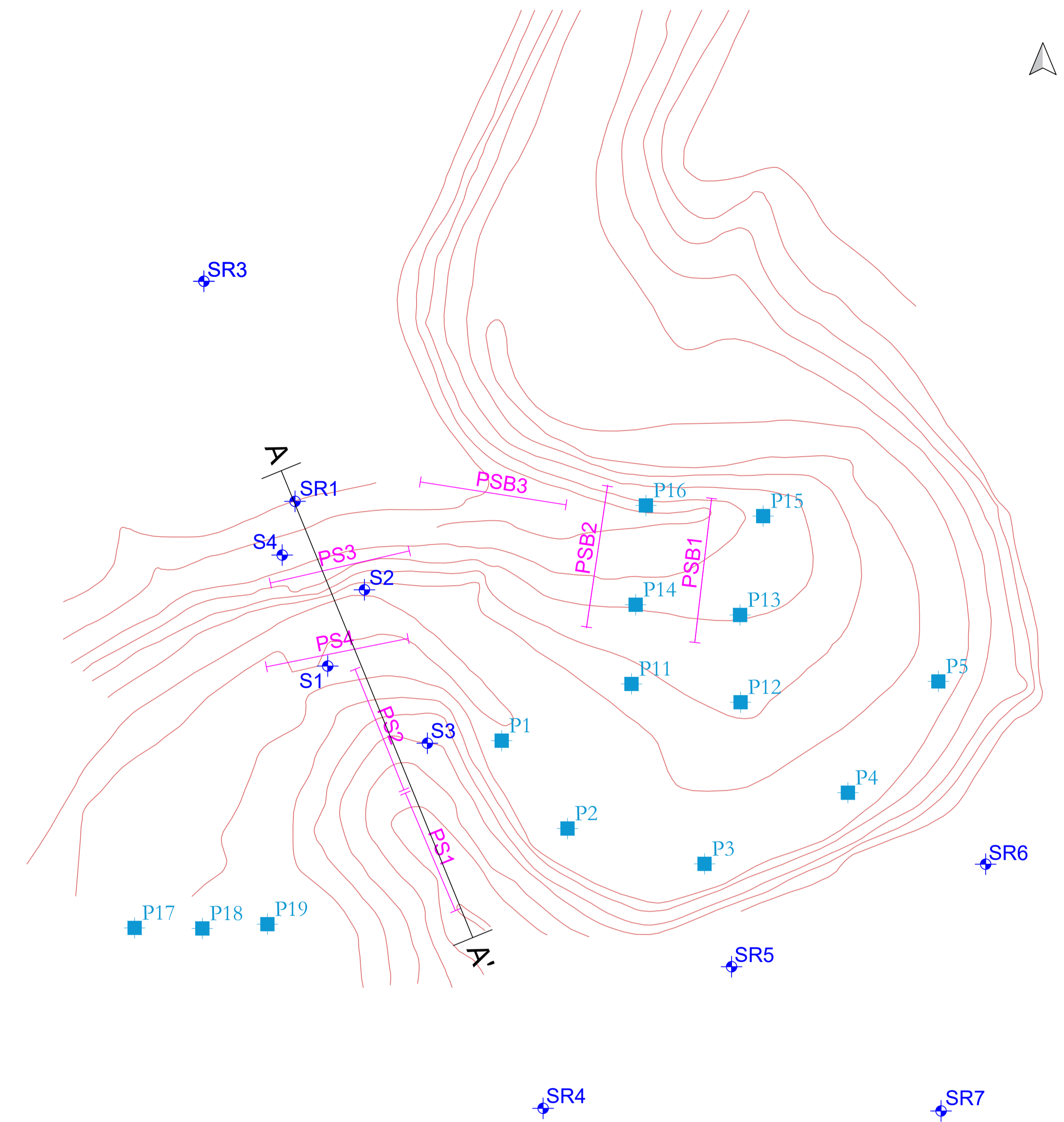
Perfis A-A'

Escala 1/100



Planta de Localização

Escala 1/1500



Legenda

- | | | | |
|---------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Sondagem | W ₅ | F ₅ | UA ₄ |
| Poço | W ₄ | F ₄₋₅ | UA ₃ |
| Perfil sísmico | W ₃₋₄ | F ₄ | UA ₂ |
| Perfil A-A' | W ₃ | F ₃₋₄ | UA ₁ |
| Superfície do terreno | W ₂ | F ₃ | |
| Limite parâmetro provável | W ₁₋₂ | F ₂₋₃ | |

Anexo II – Ficheiro *Collar*

HoleID	X	Y	Z	Depth
S1	40824,0	2255,7	50	25
S2	40841,5	2292,0	50	37
S3	40871,5	2218,9	50	25
S4	40802,3	2308,6	50	40
SR1	40808,4	2334,2	50	40
SR2	40869,9	2183,3	50	25
SR3	40764,9	2439,1	50	40
SR4	40926,7	2044,8	50	25
SR5	41016,5	2112,4	50	25
SR6	41137,7	2161,2	50	25
PS1a	40861,0	2195,1	50	30
PS1b	40884,8	2139,1	50	30
PS2a	40837,0	2254,2	50	30
PS2b	40860,3	2196,6	50	30
PS3a	40796,6	2295,2	50	30
PS3b	40862,9	2310,5	50	30
PS4a	40794,7	2255,3	50	30
PS4b	40862,3	2268,8	50	30
PSB1a	40997,1	2267,3	50	30
PSB1b	41007,0	2335,6	50	30
PSB2a	40947,4	2274,3	50	30
PSB2b	40957,4	2341,5	50	30
PSB3a	40868,1	2343,5	50	30
PSB3b	40937,6	2332,5	50	30
P1	40906,9	2220,1	50	2,6
P2	40938,3	2178,2	50	2,0
P3	41003,6	2161,4	50	2,3

Continuação...

HoleID	X	Y	Z	Depth
P4	41072	2195,3	50	2,3
P5	41115,1	2248,4	50	2,2
P11	40968,8	2247,2	50	1,3
P12	41020,8	2238,4	50	1,4
P13	41020,6	2280	50	1,3
P14	40970,8	2285,1	50	1,6
P15	41031,6	2327,2	50	2
P16	40975,7	2332,2	50	1,2
P17	40778,9	2174,7	50	2
P18	40787,8	2178,8	50	3
P19	40804,9	2188,2	50	3,5

Anexo III – Ficheiro *Survey*

Anexo III

HoleID	Depth	Dip	Azimuth
S1	0	-90	0
S1	25	-75	218
S2	0	-90	0
S2	37	-75	215
S3	0	-90	0
S3	25	-75	233
S4	0	-90	0
S4	40	-75	230
SR1	0	-90	0
SR1	40	-75	230
SR2	0	-90	0
SR2	25	-75	233
SR3	0	-90	0
SR3	40	-75	230
SR4	0	-90	0
SR4	25	-75	233
SR5	0	-90	0
SR5	25	-75	233
SR6	0	-90	0
SR6	25	-75	233
PS1a	30	-90	0
PS1b	30	-90	0
PS2a	30	-90	0
PS2b	30	-90	0

HoleID	Depth	Dip	Azimuth
PS3a	30	-90	0
PS3b	30	-90	0
PS4a	30	-90	0
PS4b	30	-90	0
PSB1a	30	-90	0
PSB1b	30	-90	0
PSB2a	30	-90	0
PSB2b	30	-90	0
PSB3a	30	-90	0
PSB3b	30	-90	0
P1	2.6	-90	0
P2	2	-90	0
P3	2.3	-90	0
P4	2.3	-90	0
P5	2.2	-90	0
P11	1.3	-90	0
P12	1.4	-90	0
P13	1.3	-90	0
P14	1.6	-90	0
P15	2	-90	0
P16	1.2	-90	0
P17	2	-90	0
P18	3	-90	0
P19	3.5	-90	0

Anexo IV – Ficheiro *Assay* (Geologia)

Anexo IV

HoleID	From	To	Geology
S1	0	0,5	Sc
S1	0,5	25	X
S2	0	0,5	Sc
S2	0,5	37	X
S3	0	0,2	Sc
S3	0,2	25	X
S4	0	0,2	Sc
S4	0,2	40	X
SR1	0	0,2	Sc
SR1	0,2	40	X
SR2	0	0,2	Sc
SR2	0,2	25	X
SR3	0	0,2	Sc
SR3	0,2	40	X
SR4	0	0,2	Sc
SR4	0,2	25	X
SR5	0	0,2	Sc
SR5	0,2	25	X
SR6	0	0,2	Sc
SR6	0,2	25	X
PS1a	0	30	X
PS1b	0	30	X
PS2a	0	0,5	Sc
PS2a	0,5	30	X
PS2b	0	30	X
PS3a	0	30	X
PS3b	0	30	X

HoleID	From	To	Geology
PS4a	0	0,5	Sc
PS4a	0,5	30	X
PS4b	0	0,5	Sc
PS4b	0,5	30	X
PSB1a	0	30	X
PSB1b	0	30	X
PSB2a	0	30	X
PSB2b	0	30	X
PSB3a	0	0,5	Sc
PSB3a	0,5	30	X
PSB3b	0	0,5	Sc
PSB3b	0,5	30	X
P1	0	2,4	Al
P1	2,4	2,6	X
P2	0	0,2	Sc
P2	0,2	2	Al
P3	0	0,6	Al
P3	0,6	2,3	X
P4	0	0,3	Sc
P4	0,3	2	Al
P4	2	2,3	X
P5	0	0,6	Sc
P5	0,6	2	Al
P5	2	2,2	X
P11	0	1,3	X
P12	0	1,4	X
P13	0	0,2	Sc

Continuação...

HoleID	From	To	Geology
P13	0,2	1,3	X
P14	0	1,6	X
P15	0	0,2	Sc
P15	0,2	2	X
P16	0	1,2	X
P17	0	0,3	Sc
P17	0,3	2	Al
P18	0	0,3	Sc
P18	0,3	3	Al
P19	0	0,4	Sc
P19	0,4	3,5	Al

Anexo V – Ficheiro *Assay* (Estado de Alteração)

Anexo V

HoleID	From	To	Alteração
S1	0	3	W3
S1	3	3,5	W5
S1	3,5	8,5	W3
S1	8,5	25	W1-2
S2	0	7	W2
S2	7	37	W1-2
S3	0	5	W4
S3	5	13	W3-4
S3	13	14	W4
S3	14	25	W1-2
S4	0	16	W2
S4	16	40	W1-2
SR1	0	16	W2
SR1	16	40	W1-2
SR2	0	5	W4
SR2	5	13	W3-4
SR2	13	14	W4
SR2	14	25	W1-2
SR3	0	16	W2
SR3	16	40	W1-2
SR4	0	5	W4
SR4	5	13	W3-4
SR4	13	14	W4
SR4	14	25	W1-2
SR5	0	5	W4
SR5	5	13	W3-4
SR5	13	14	W4

HoleID	From	To	Alteração
SR5	14	25	W1-2
SR6	0	5	W4
SR6	5	13	W3-4
SR6	13	14	W4
SR6	14	25	W1-2
PS1a	0	1,8	W5
PS1a	1,8	6	W3-4
PS1a	6	30	W2
PS1b	0	1,8	W5
PS1b	1,8	9,3	W3-4
PS1b	9,3	30	W2
PS2a	0	1,1	W5
PS2a	1,1	5,4	W3-4
PS2a	5,4	30	W2
PS2b	0	1,1	W5
PS2b	1,1	7	W3-4
PS2b	7	30	W2
PS3a	0	3	W5
PS3a	3	9,8	W3-4
PS3a	9,8	30	W2
PS3b	0	3	W5
PS3b	3	9,8	W3-4
PS3b	9,8	30	W2
PS4a	0	1,8	W5
PS4a	1,8	6,7	W3-4
PS4a	6,7	30	W2
PS4b	0	1,2	W5

Continuação...

HoleID	From	To	Alteração
PS4b	1,2	6	W3-4
PS4b	6	30	W2
PSB1a	0	2,6	W3-4
PSB1a	2,6	30	W2
PSB1b	0	5,4	W3-4
PSB1b	5,4	30	W2
PSB2a	0	7,2	W3-4
PSB2a	7,2	30	W2
PSB2b	0	2,5	W3-4
PSB2b	2,5	30	W2
PSB3a	0	5	W5
PSB3a	5	13	W3-4
PSB3a	13	30	W2
PSB3b	0	5	W5
PSB3b	5	30	W2
P1	0	2,4	AI
P1	2,4	2,6	W5
P2	0	0,2	Sc
P2	0,2	2	AI
P3	0	0,6	AI
P3	0,6	2,3	W5
P4	0	0,3	Sc
P4	0,3	2	AI

HoleID	From	To	Alteração
P4	2	2,3	W5
P5	0	0,6	Sc
P5	0,6	2	AI
P5	2	2,2	W5
P11	0	1	W5
P11	1	1,3	W3
P12	0	1,2	W5
P12	1,2	1,4	W3
P13	0	0,2	Sc
P13	0,2	1,3	W5
P14	0	1,6	W5
P15	0	0,2	Sc
P15	0,2	1,5	W5
P15	1,5	2	W3
P16	0	1	W3
P16	1	1,2	W2
P17	0	0,3	Sc
P17	0,3	2	AI
P18	0	0,3	Sc
P18	0,3	3	AI
P19	0	0,4	Sc
P19	0,4	3,5	AI

Anexo VI – Ficheiro *Assay* (Estado de Fracturação)

Anexo VI

HoleID	From	To	Fracturação
S1	0	3,5	F4
S1	3,5	8,5	F4-5
S1	8,5	25	F2-3
S2	0	7	F3
S2	7	37	F2-3
S3	0	5	F4
S3	5	11,5	F4-5
S3	11,5	14	F5
S3	14	25	F3-4
S4	0	2,5	F3-4
S4	2,5	40	F2-3
SR1	0	2,5	F3-4
SR1	2,5	40	F2-3
SR2	0	5	F4
SR2	5	11,5	F4-5
SR2	11,5	14	F5
SR2	14	25	F3-4
SR3	0	2,5	F3-4
SR3	2,5	40	F2-3
SR4	0	5	F4
SR4	5	11,5	F4-5
SR4	11,5	14	F5
SR4	14	25	F3-4
SR5	0	5	F4
SR5	5	11,5	F4-5
SR5	11,5	14	F5
SR5	14	25	F3-4

HoleID	From	To	Fracturação
SR6	0	5	F4
SR6	5	11,5	F4-5
SR6	11,5	14	F5
SR6	14	25	F3-4
PS1a	0	1,8	F5
PS1a	1,8	6	F4-3
PS1a	6	30	F2
PS1b	0	1,8	F5
PS1b	1,8	9,3	F4-3
PS1b	9,3	30	F2
PS2a	0	1,1	F5
PS2a	1,1	5,4	F4-3
PS2a	5,4	30	F2
PS2b	0	1,1	F5
PS2b	1,1	7	F4-3
PS2b	7	30	F2
PS3a	0	3	F5
PS3a	3	9,8	F4-3
PS3a	9,8	30	F2
PS3b	0	3	F5
PS3b	3	9,8	F4-3
PS3b	9,8	30	F2
PS4a	0	1,8	F5
PS4a	1,8	6,7	F4-3
PS4a	6,7	30	F2
PS4b	0	1,2	F5
PS4b	1,2	6	F4-3

Continuação...

HoleID	From	To	Fracturação
PS4b	6	30	F2
PSB1a	0	2,6	F4-3
PSB1a	2,6	30	F2
PSB1b	0	5,4	F4-3
PSB1b	5,4	30	F2
PSB2a	0	7,2	F4-3
PSB2a	7,2	30	F2
PSB2b	0	2,5	F4-3
PSB2b	2,5	30	F2
PSB3a	0	5	F5
PSB3a	5	13	F4-3
PSB3a	13	30	F2
PSB3b	0	5	F5
PSB3b	5	30	F2
P1	0	2,4	F5
P1	2,4	2,6	F5
P2	0	0,2	F5
P2	0,2	2	F5
P3	0	0,6	F5
P3	0,6	2,3	F5
P4	0	0,3	F5
P4	0,3	2	F5

HoleID	From	To	Fracturação
P4	2	2,3	F5
P5	0	0,6	F5
P5	0,6	2	F5
P5	2	2,2	F5
P11	0	1	F5
P11	1	1,3	F3
P12	0	1,2	F5
P12	1,2	1,4	F3
P13	0	0,2	F5
P13	0,2	1,3	F5
P14	0	1,6	F5
P15	0	0,2	F5
P15	0,2	1,5	F5
P15	1,5	2	F3
P16	0	1	F3
P16	1	1,2	F2
P17	0	0,3	F5
P17	0,3	2	F5
P18	0	0,3	F5
P18	0,3	3	F5
P19	0	0,4	F5
P19	0,4	3,5	F5

Anexo VII – Ficheiro *Assay* (Unidades de Lugeon)

Anexo VII

HoleID	From	To	Unidades de Lugeon
S1	0	5	18
S1	5	10	1,88
S1	10	15	0,99
S1	15	20	0,59
S1	20	25	0
S2	0	5	18
S2	5	10	2,45
S2	10	15	1,81
S2	15	20	3,95
S2	20	25	1,95
S2	25	30	1,29
S2	30	35	0,56
S2	35	37	1,98
S3	0	5	18
S3	5	10	2,31
S3	10	15	1,33
S3	15	20	0,83
S3	20	25	0,14
S4	0	5	18
S4	5	10	8,19
S4	10	15	5,26
S4	15	20	4,84
S4	20	25	1,55
S4	25	30	0,64
S4	30	35	0,55
S4	35	40	0,42

HoleID	From	To	Unidades de Lugeon
SR2	0	5	18
SR2	5	10	2,31
SR2	10	15	1,33
SR2	15	20	0,83
SR2	20	25	0,14
SR1	0	5	18
SR1	5	10	8,19
SR1	10	15	5,26
SR1	15	20	4,84
SR1	20	25	1,55
SR1	25	30	0,64
SR1	30	35	0,55
SR1	35	40	0,42
SR4	0	5	18
SR4	5	10	2,31
SR4	10	15	1,33
SR4	15	20	0,83
SR4	20	25	0,14
SR3	0	5	18
SR3	5	10	8,19
SR3	10	15	5,26
SR3	15	20	4,84
SR3	20	25	1,55
SR3	25	30	0,64
SR3	30	35	0,55
SR3	35	40	0,42

Continuação...

HoleID	From	To	Unidades de Lugeon
SR5	0	5	18
SR5	5	10	2,31
SR5	10	15	1,33
SR5	15	20	0,83
SR5	20	25	0,14
SR6	0	5	18
SR6	5	10	2,31
SR6	10	15	1,33
SR6	15	20	0,83
SR6	20	25	0,14
SR7	0	5	18
SR7	5	10	2,31
SR7	10	15	1,33
SR7	15	20	0,83
SR7	20	25	0,14

Anexo VIII – Ficheiro *Assay* (Velocidade Ondas Sísmicas)

Anexo VIII

HoleID	From	To	Geofisica
PS1a	0	1,8	680
PS1a	1,8	6	1500
PS1a	6	30	3000
PS1b	0	1,8	680
PS1b	1,8	9,3	1500
PS1b	9,3	30	3000
PS2a	0	1,1	500
PS2a	1,1	5,4	1610
PS2a	5,4	30	3400
PS2b	0	1,1	500
PS2b	1,1	7	1610
PS2b	7	30	3400
PS3a	0	3	670
PS3a	3	9,8	1770
PS3a	9,8	30	3300
PS3b	0	3	670
PS3b	3	9,8	1770
PS3b	9,8	30	3300
PS4a	0	1,8	650

HoleID	From	To	Geofisica
PS4a	1,8	6,7	1825
PS4a	6,7	30	3350
PS4b	0	1,2	650
PS4b	1,2	6	1825
PS4b	6	30	3350
PSB1a	0	2,6	1290
PSB1a	2,6	30	2900
PSB1b	0	5,4	1290
PSB1b	5,4	30	2900
PSB2a	0	7,2	1400
PSB2a	7,2	30	3100
PSB2b	0	2,5	1400
PSB2b	2,5	30	3100
PSB3a	0	5	815
PSB3a	5	13	2000
PSB3a	13	30	3500
PSB3b	0	5	815
PSB3b	5	30	3500

Anexo IX – Ficheiro *Assay* (Famílias de Fraturas)

ID	X	Y	Z	Dip	Dip_Azimuth
1	41119,3	2329,6	50	60	122
2	41131,1	2312,3	50	0	90
3	41146	2270,8	50	60	135
4	41129,3	2209,9	50	55	110
5	41119,2	2195,4	50	70	88
6	41081,4	2175,9	50	70	37
7	41060,6	2139,7	50	65	90
8	41036,5	2139,4	50	0	34
9	40888,5	2180,4	50	70	92
10	40840,9	2239,0	50	70	59
11	40871,9	2227,0	50	60	18
12	40872,7	2213,9	50	60	89
13	40806,6	2284,9	50	70	36
14	40818,6	2306,6	50	0	87
15	40756,3	2349,1	50	80	53
16	40821,5	2389,7	50	70	89
17	40845,2	2376,9	50	70	12

Anexo X – Pontos Topográficos

Ponto	X	Y	Z
1	40759	2146	95
2	40765	2152	95
3	40772	2156	95
4	40773	2157	95
5	40775	2159	95
6	40776	2161	95
7	40776	2162	95
8	40776	2164	95
9	40775	2167	95
10	40774	2170	95
11	40773	2172	95
12	40773	2174	95
13	40774	2177	95
14	40776	2179	95
15	40778	2183	95
16	40781	2189	95
17	40783	2192	95
18	40784	2196	95
19	40787	2203	95
20	40789	2209	95
21	40790	2212	95
22	40792	2215	95
23	40793	2217	95
24	40796	2219	95
25	40800	2221	95
26	40807	2225	95
27	40810	2227	95

Ponto	X	Y	Z
28	40811	2228	95
29	40812	2230	95
30	40813	2233	95
31	40814	2235	95
32	40814	2237	95
33	40813	2239	95
34	40814	2240	95
35	40815	2242	95
36	40817	2243	95
37	40823	2246	95
38	40827	2247	95
39	40841	2250	95
40	40850	2251	95
41	40854	2251	95
42	40861	2250	95
43	40866	2249	95
44	40871	2247	95
45	40876	2246	95
46	40879	2245	95
47	40882	2243	95
48	40886	2238	95
49	40890	2233	95
50	40892	2230	95
51	40893	2226	95
52	40897	2217	95
53	40901	2207	95
54	40903	2202	95

Continuação (Folha Final)...

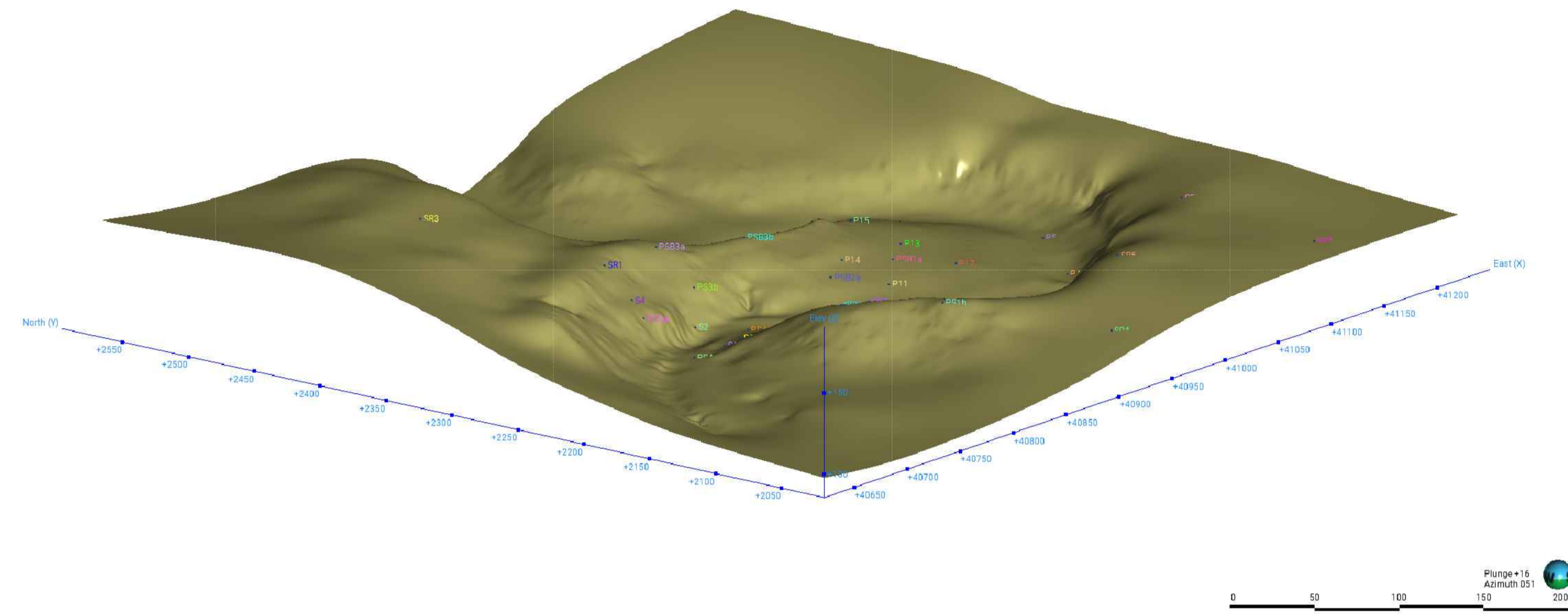
Ponto	X	Y	Z
2778	40681	2239	108
2779	40685	2276	119
2780	40647	2216	113
2781	40590	2228	127
2782	40601	2192	117
2783	40656	2182	106
2784	40631	2120	102
2785	40700	2081	95
2786	40728	2123	95
2787	40686	2040	94
2788	40734	2053	94
2789	40738	2013	94
2790	40802	1990	96
2791	40828	2064	101
2792	40870	2014	104
2793	40860	1968	100
2794	40898	2095	114
2795	40920	2019	113
2796	40951	2077	122
2797	40952	1947	110
2798	41027	1970	120
2799	41014	2029	125
2800	41022	2083	128
2801	41082	2097	129
2802	41076	2061	129
2803	41095	2008	126

Ponto	X	Y	Z
2805	41131	1957	124
2806	41146	2044	128
2807	41121	2127	129
2808	41172	2109	132
2809	41261	2048	127
2810	41237	2102	130
2811	41215	2124	132
2812	41163	2159	134
2813	41164	2200	128
2814	41209	2207	135
2815	41221	2177	135
2816	41261	2164	135
2817	41238	2199	135
2818	41264	2207	135
2819	41287	2191	137
2820	41309	2229	138
2821	41264	2244	139
2822	41235	2256	138
2823	41193	2244	131
2824	41203	2290	135
2825	41233	2299	140
2826	41274	2290	142
2827	41319	2275	141
2828	41321	2327	144
2829	41273	2335	146
2830	41229	2351	144

Anexo XI - Topografia e Família de Fratura

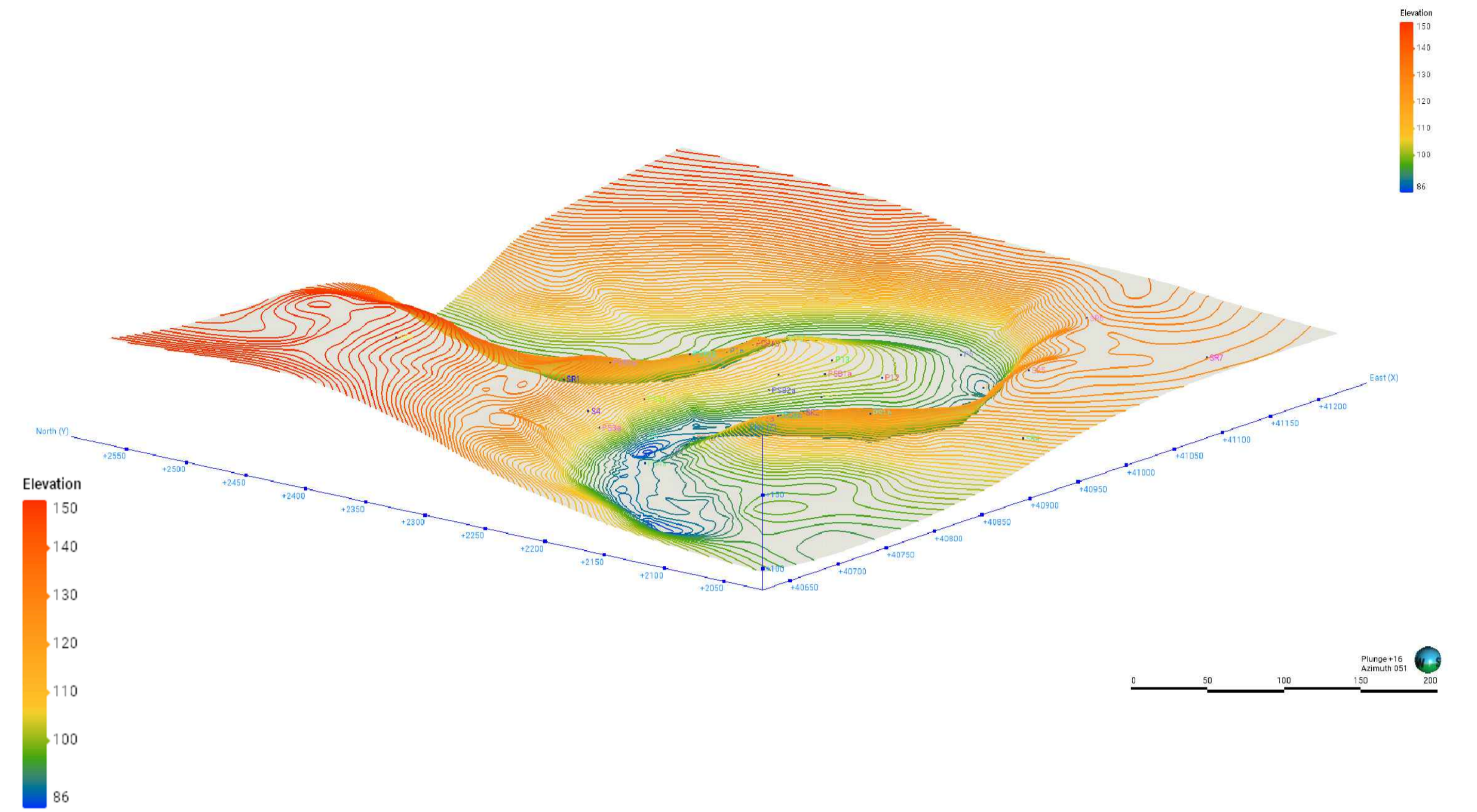
Superfície do Terreno

Escala 1/2 500



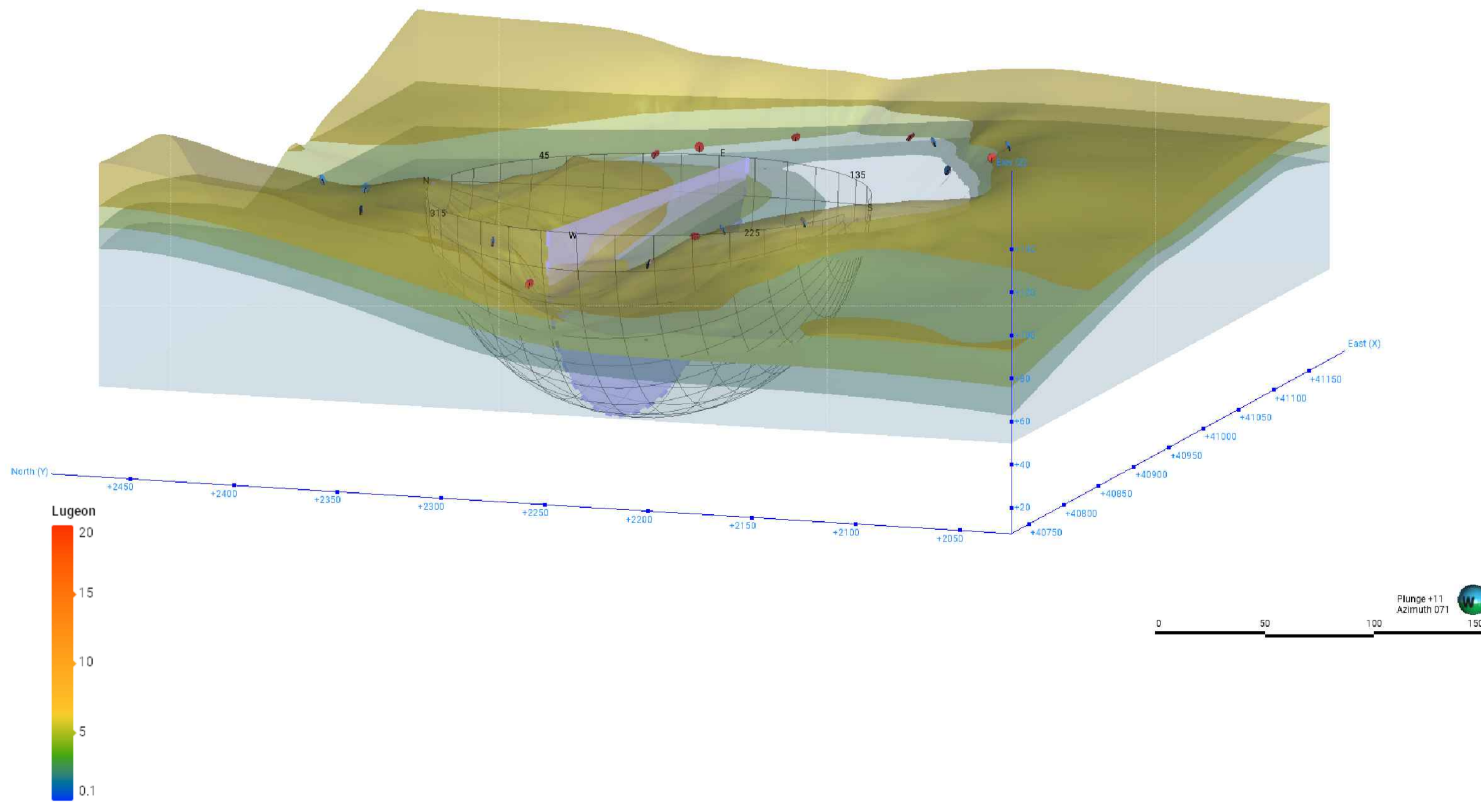
Curvas de Nível

Escala 1/2 500



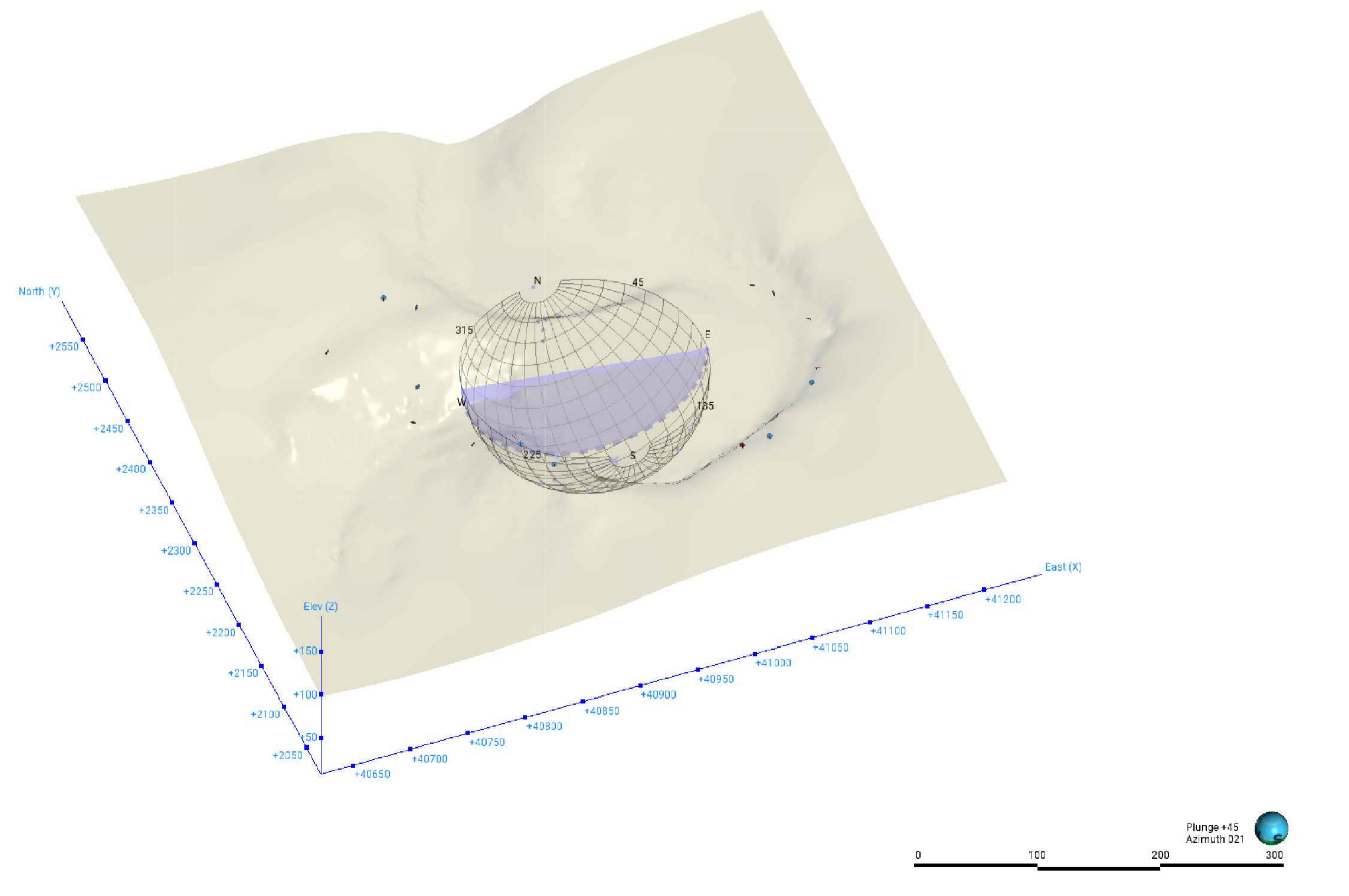
Projeção do Estereograma Sobre o Modelo de Lugeon

Escala 1/1 700



Plano Médio da Família de Fracturas

Escala 1/3 100

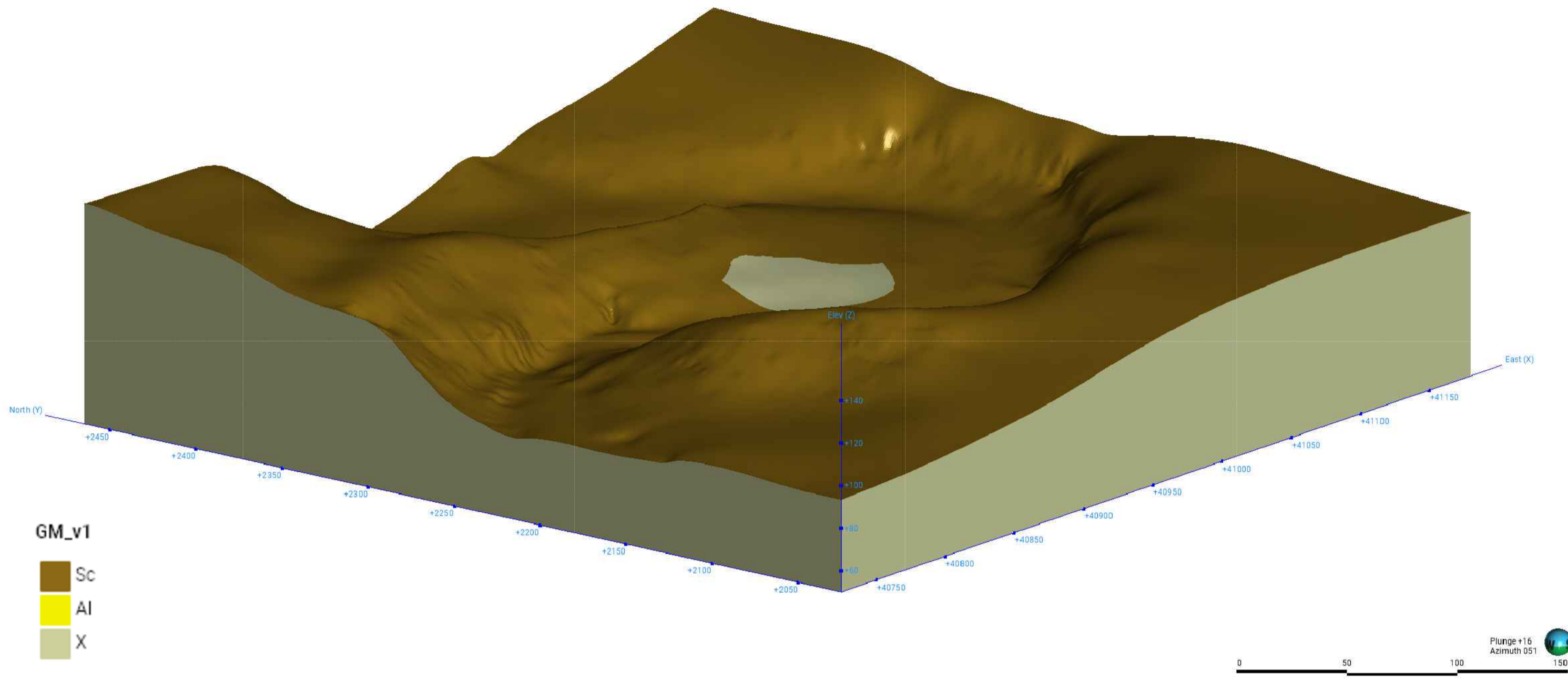


Representações Tridimensionais de Dados Geológicos-Geotécnicos Domingos Xavier Mendanha Ferreira	Designação Anexo XI - Topografia e Família de Fraturas	Escalas 1/2 500 1/1 700	Nº Ordem 02
	Projecção da Superfície de Terreno, Curvas de Nível, Plano Médio das Famílias de Fraturas e Projecção do Estereograma sobre Modelo de Unidades de Lugeon	Data Setembro 2025	

Anexo XII - Modelos Tridimensionais

Geológico

Escala 1/1 800

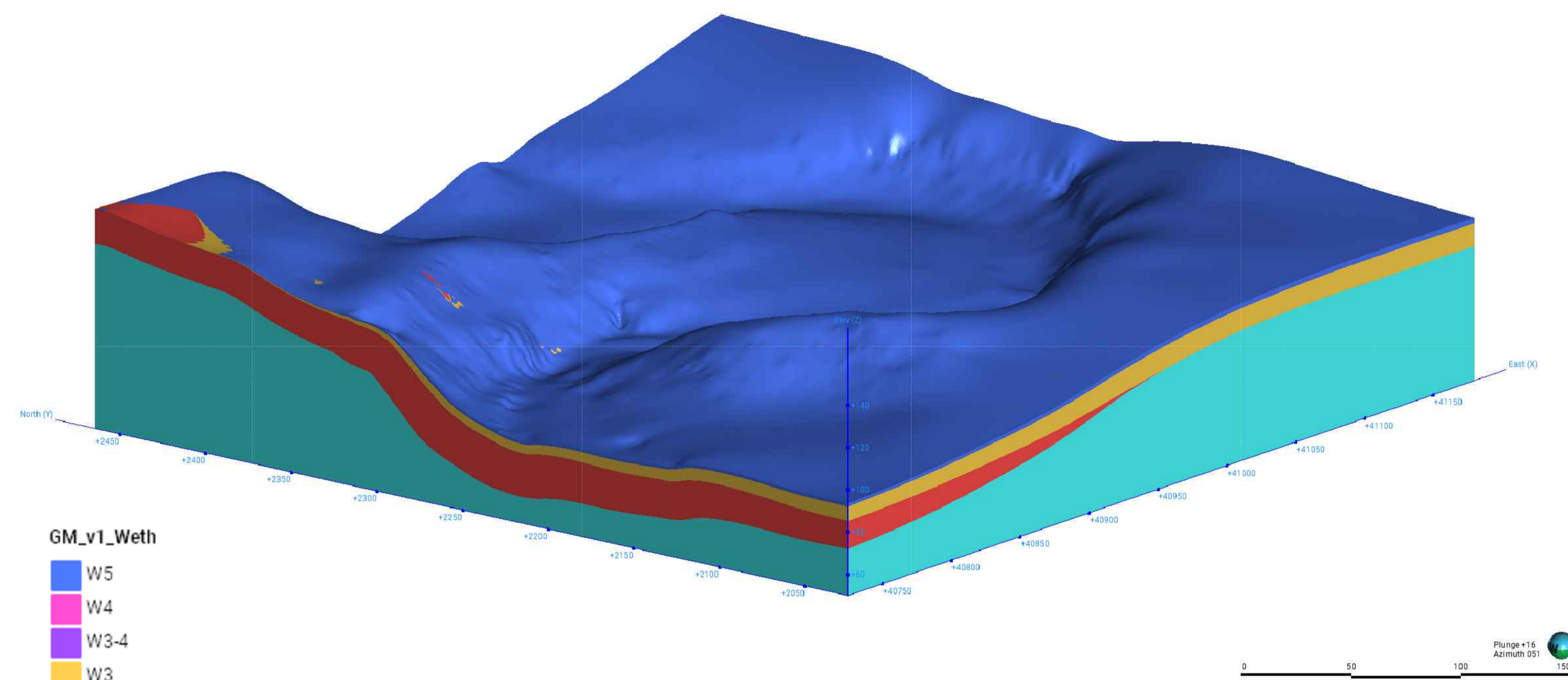


GM_v1

- Sc
- AI
- X

Estado de Alteração

Escala 1/1 800

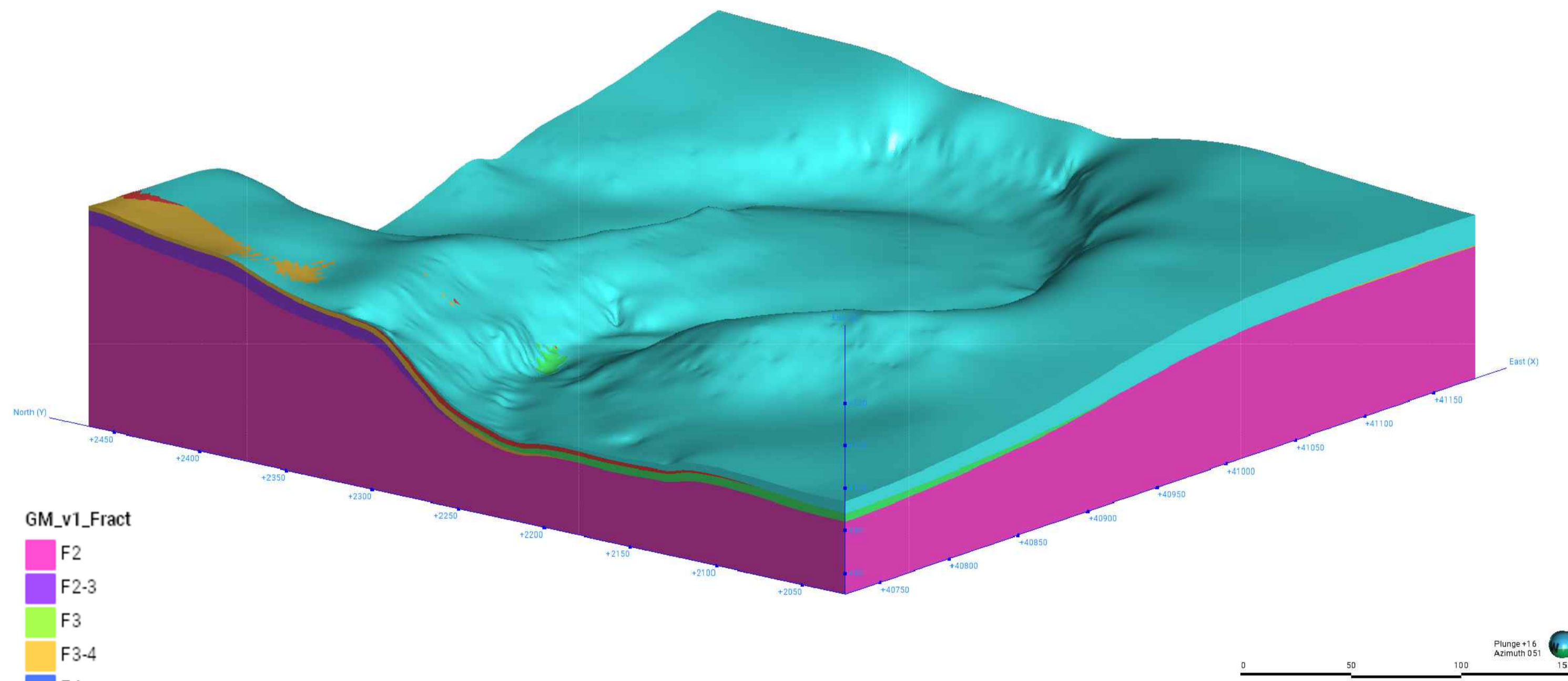


GM_v1_Weth

- W5
- W4
- W3-4
- W3
- W2
- W1-2

Estado de Fracturação

Escala 1/1 800

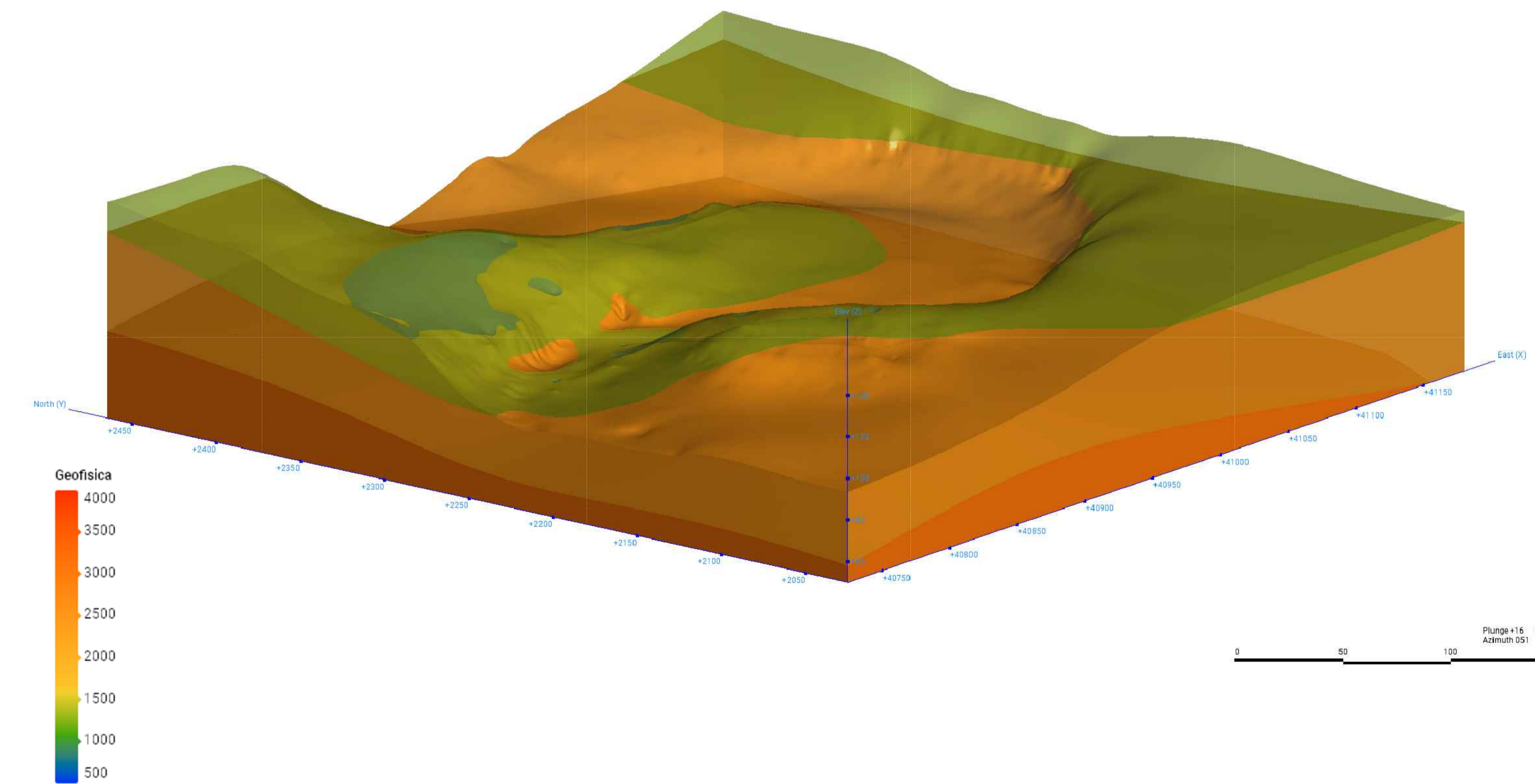


GM_v1_Fract

- F2
- F2-3
- F3
- F3-4
- F4
- F4-5
- F4-3
- F5

Velocidade das Ondas de Propagação Sísmicas

Escala 1/1 800



Geofísica

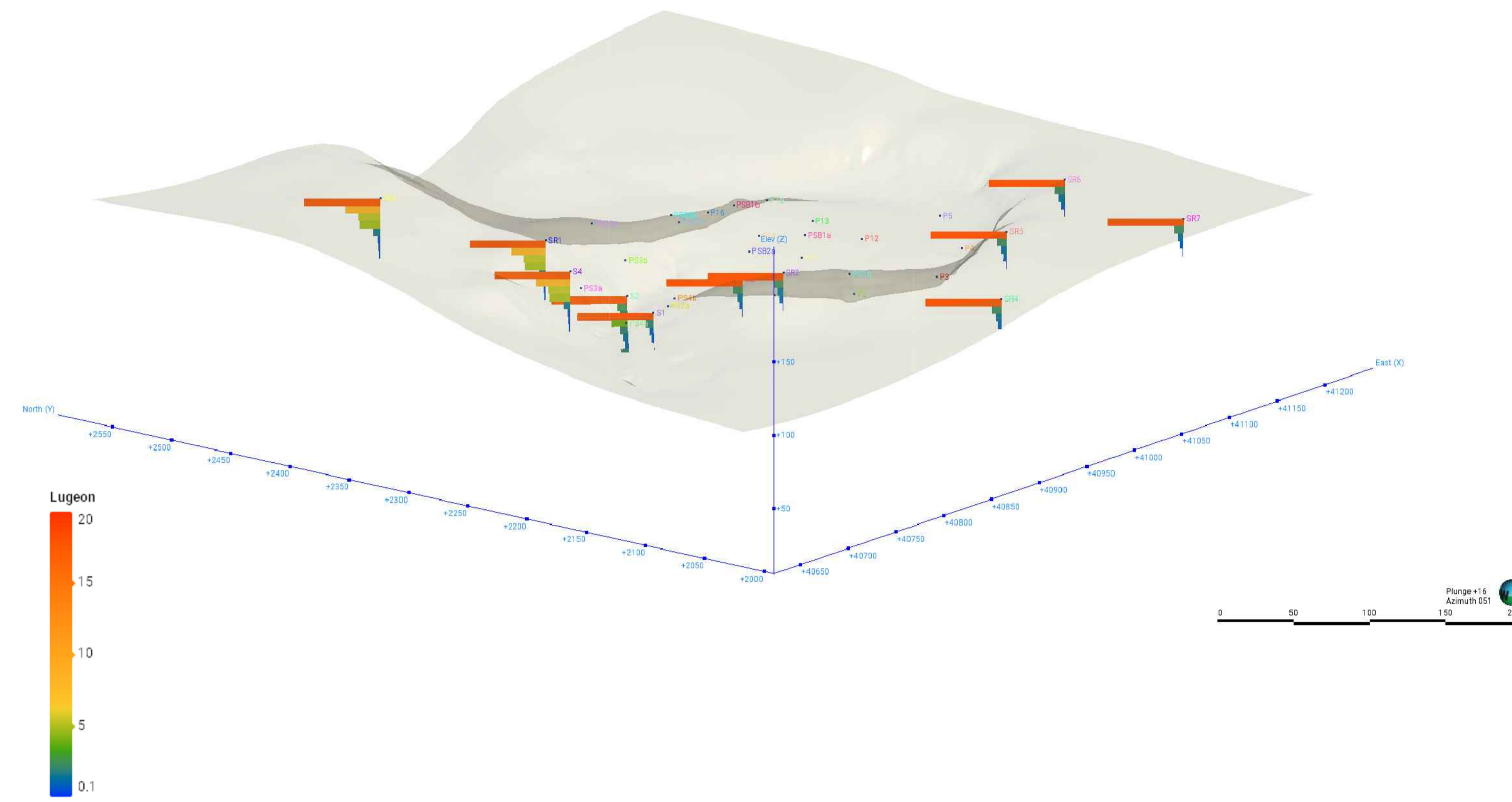
- 4000
- 3500
- 3000
- 2500
- 2000
- 1500
- 1000
- 500

Representações Tridimensionais de Dados Geológicos-Geotécnicos Domingos Xavier Mendanha Ferreira	Designação	Anexo XII - Modelos Tridimensionais Geológico, do Estado de Alteração, de Fracturação e da Velocidade de Propagação das Ondas Sísmicas	
	Escalas	1/1 800	Nº Ordem
	Data	Setembro 2025	03

Anexo XIII - Ensaio Lugeon e Modelos Combinados

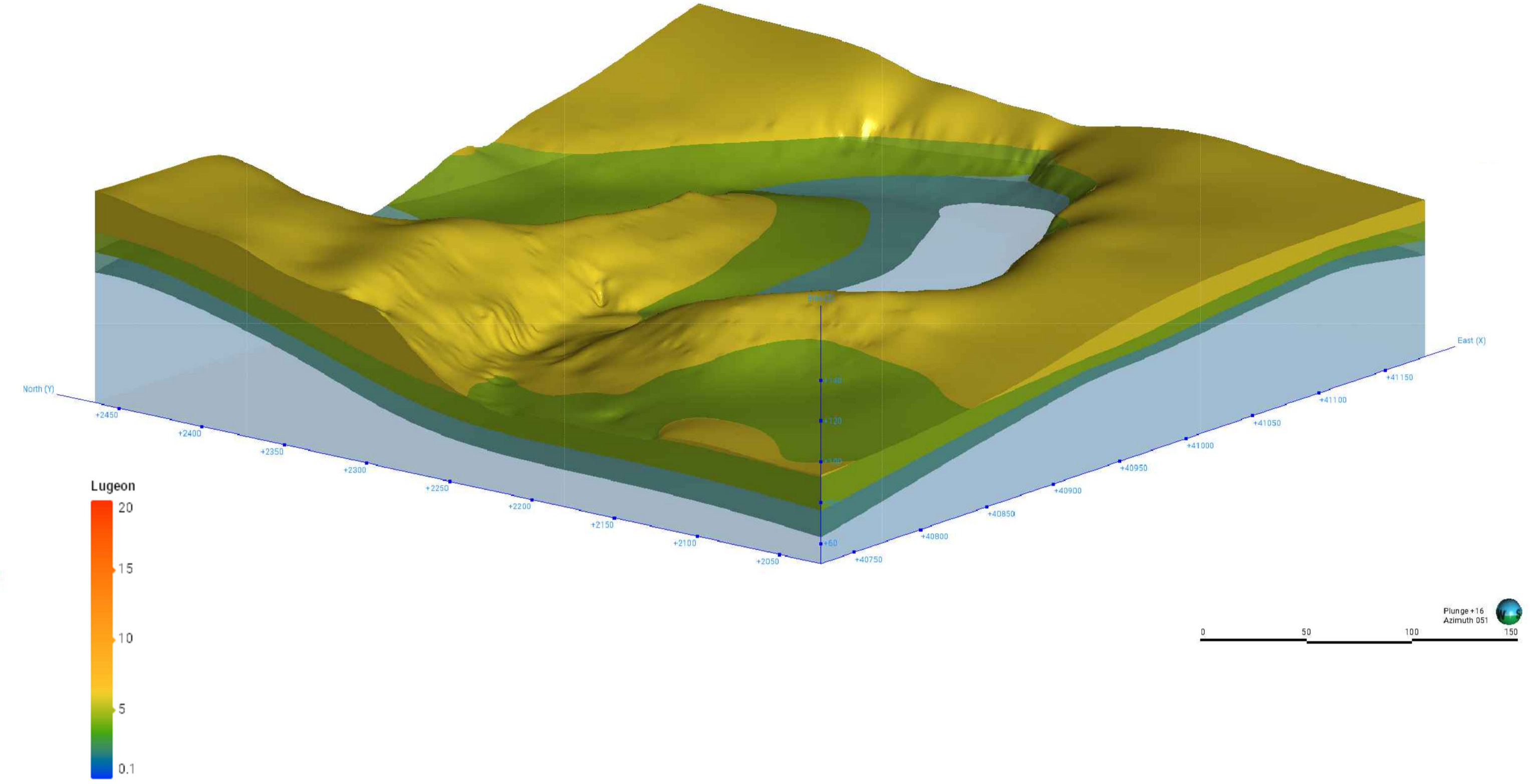
Projeção dos Ensaios de Unidades de Lugeon

Escala 1/2 500



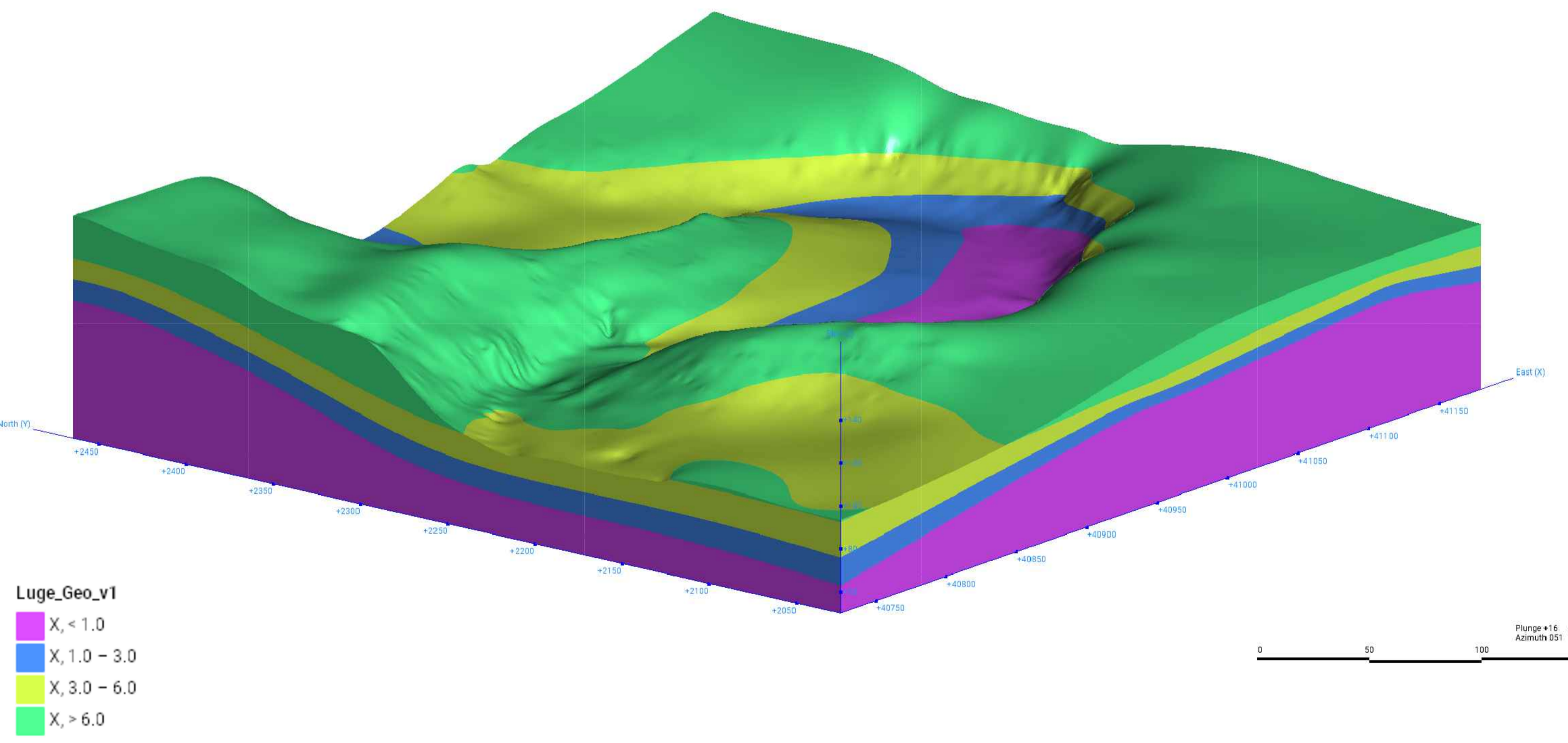
Unidades de Lugeon

Escala 1/1 800



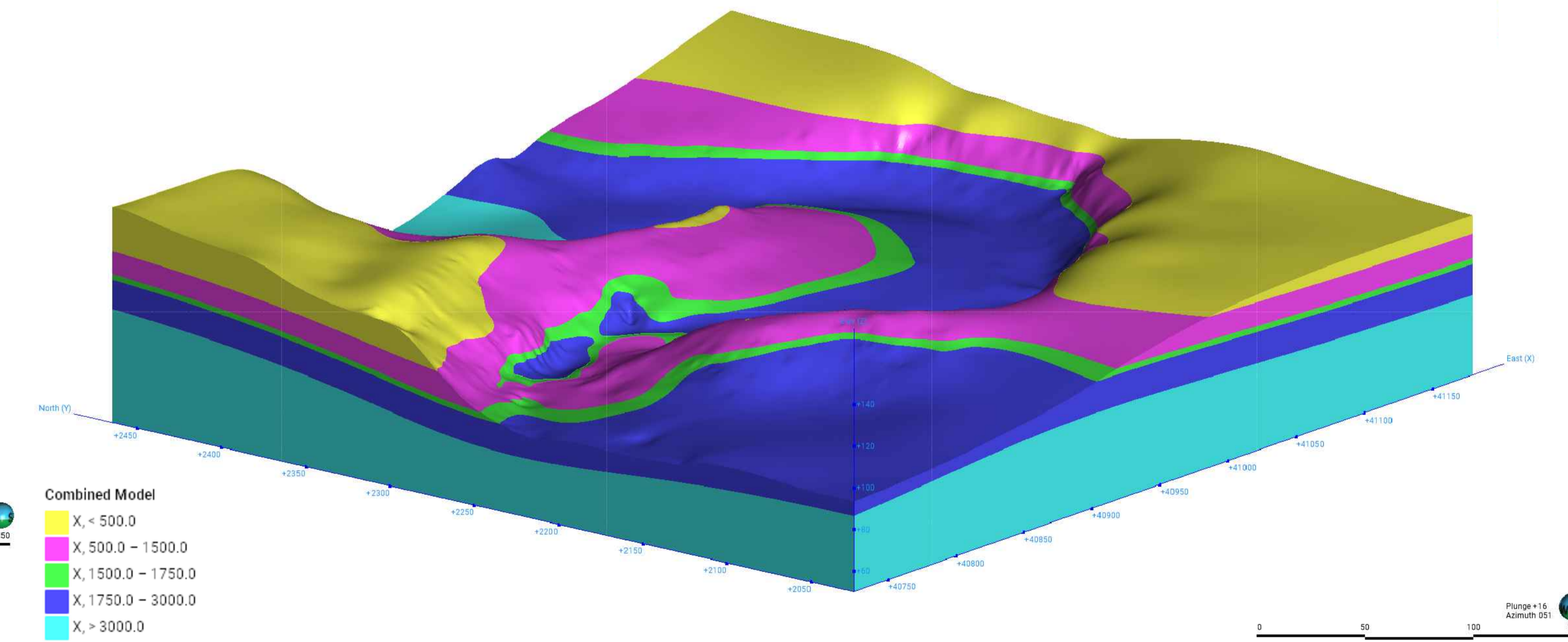
Unidades Lugeon vs Geologia

Escala 1/1 800



Velocidade das Ondas de Propagação Sísmicas vs Geologia

Escala 1/1 800

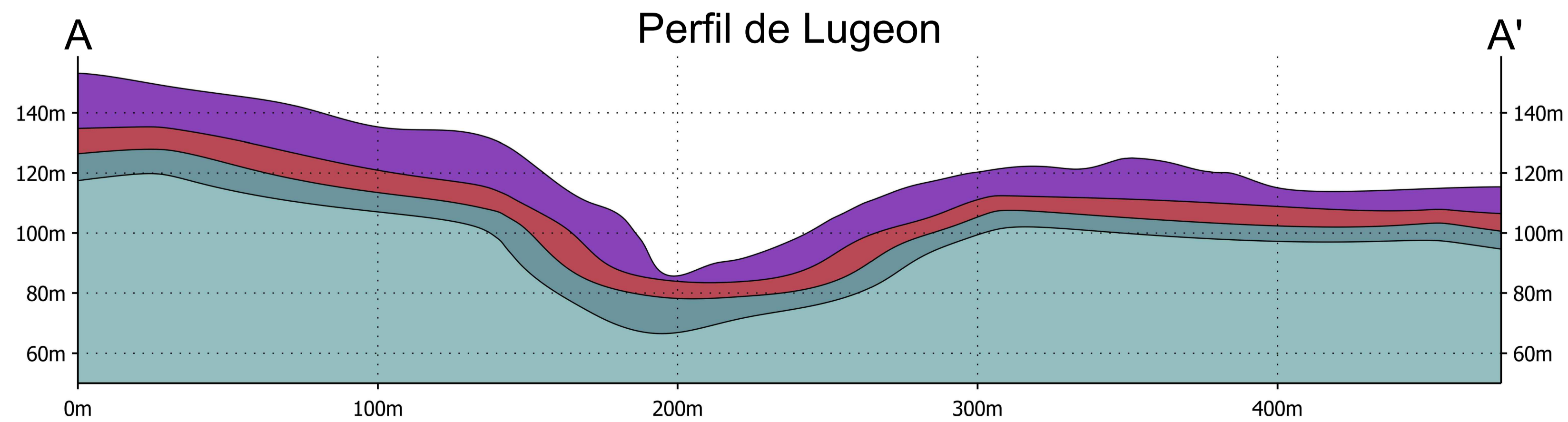
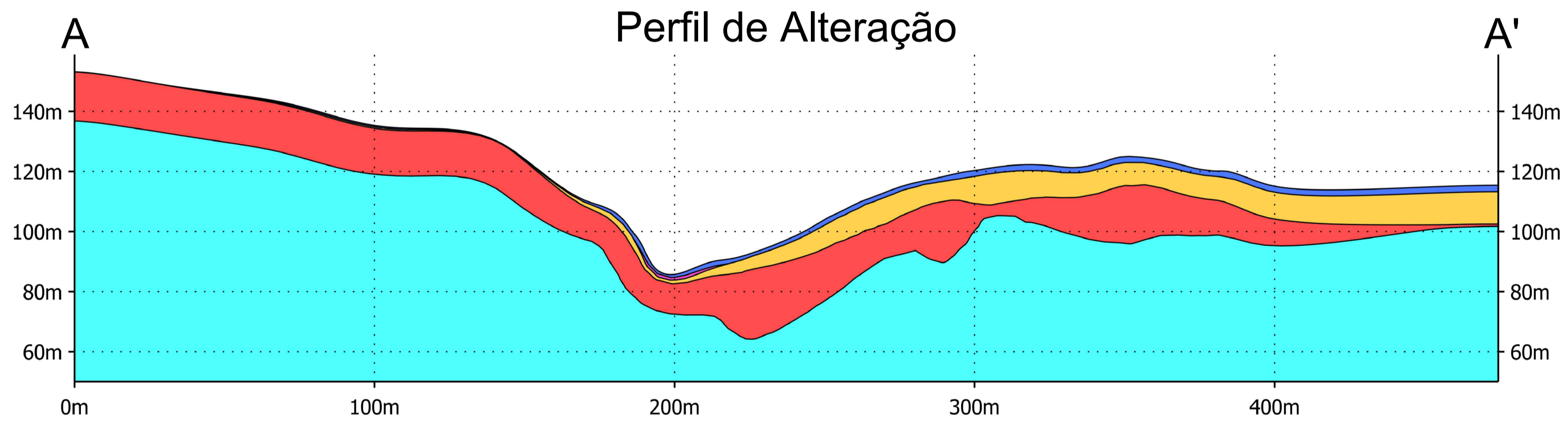
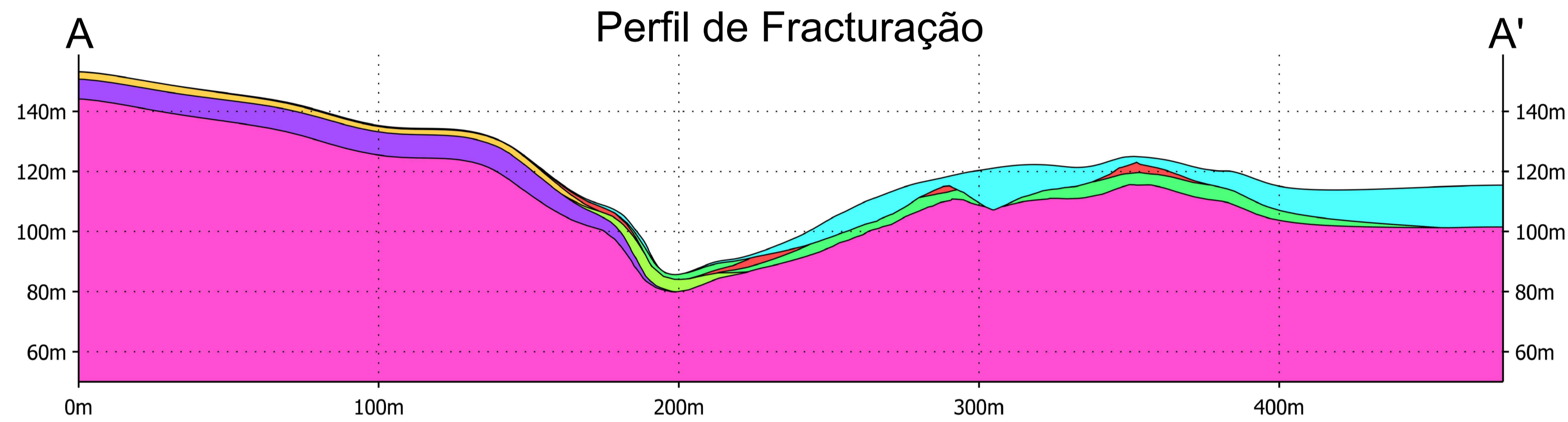
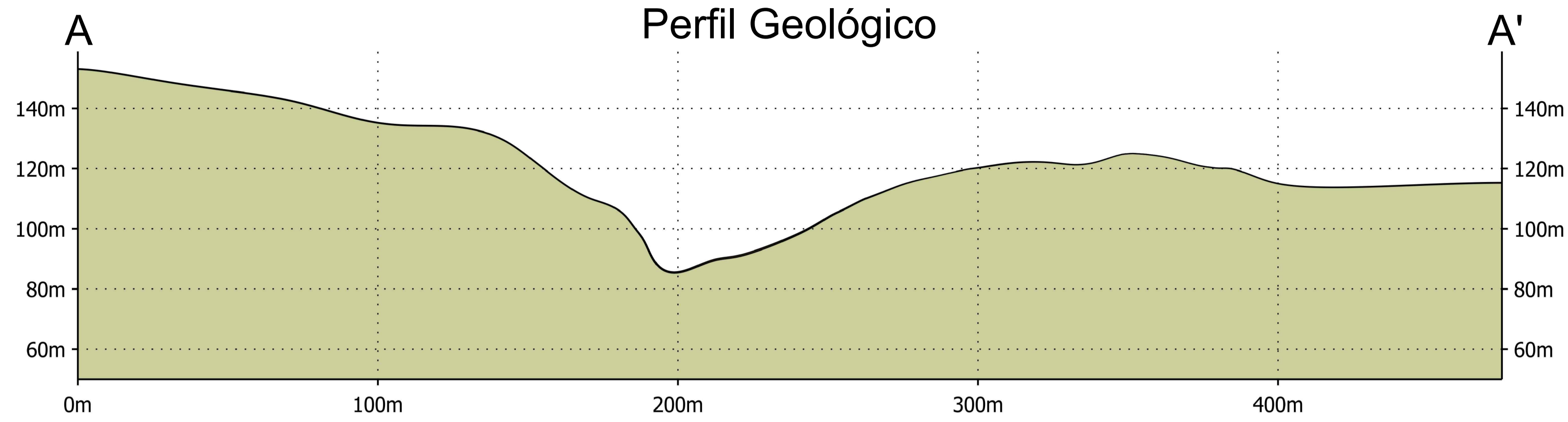


Representações Tridimensionais de Dados Geológicos-Geotécnicos Domingos Xavier Mendanha Ferreira	Designação	Anexo XIII - Ensaio Lugeon e Modelos Combinados	
	Escalas	1/1 800	Nº Ordem
	Representação dos Ensaios Lugeon e Modelos de Lugeon e Geofísica Combinados com Geologia	Data	Setembro 2025
			04

Anexo XIV - Planta e Perfis A-A' (Leapfrog Geo)

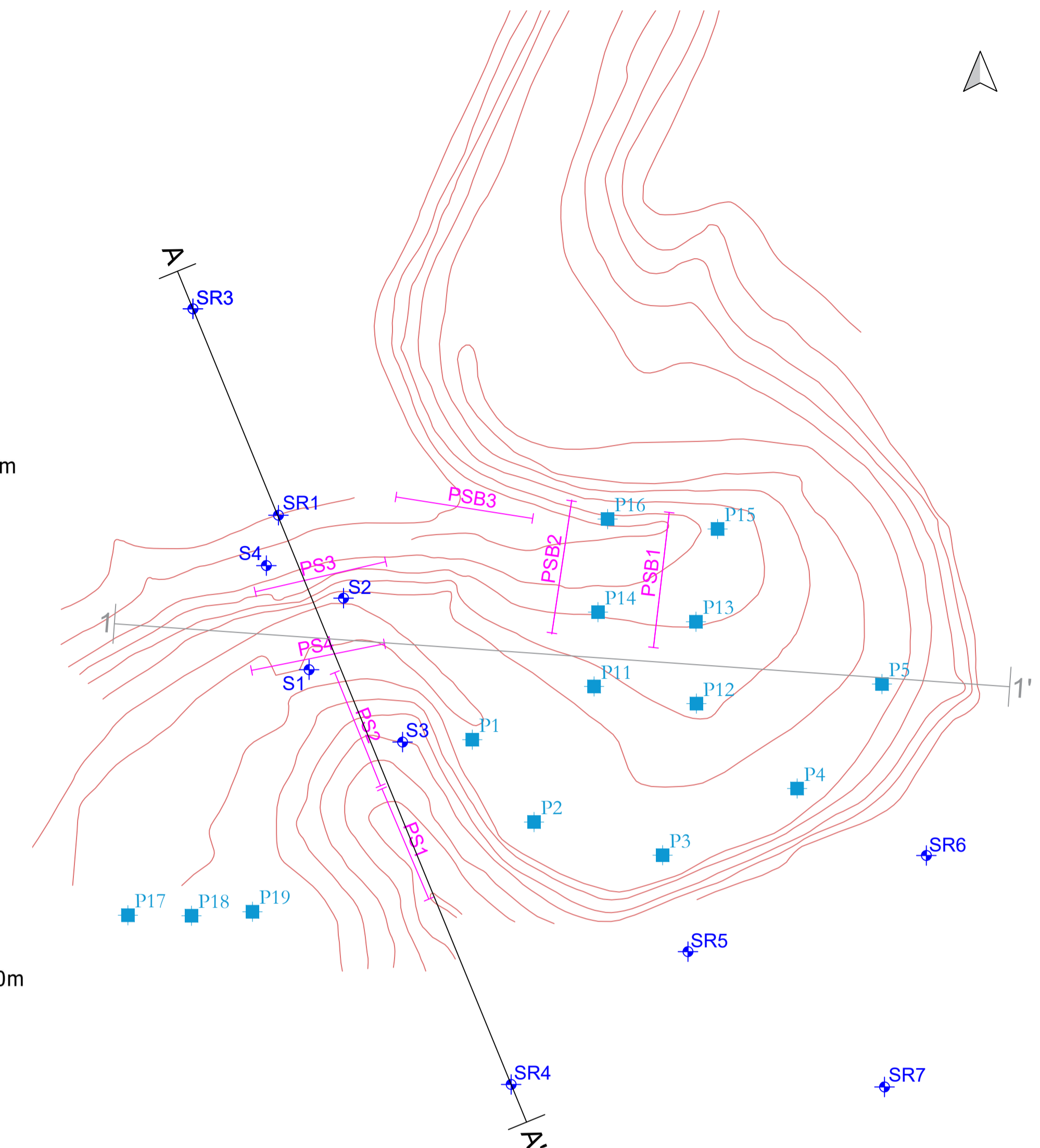
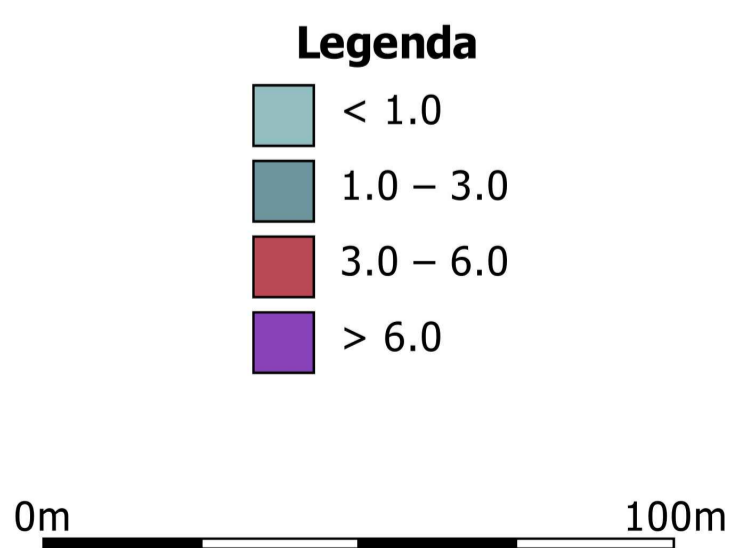
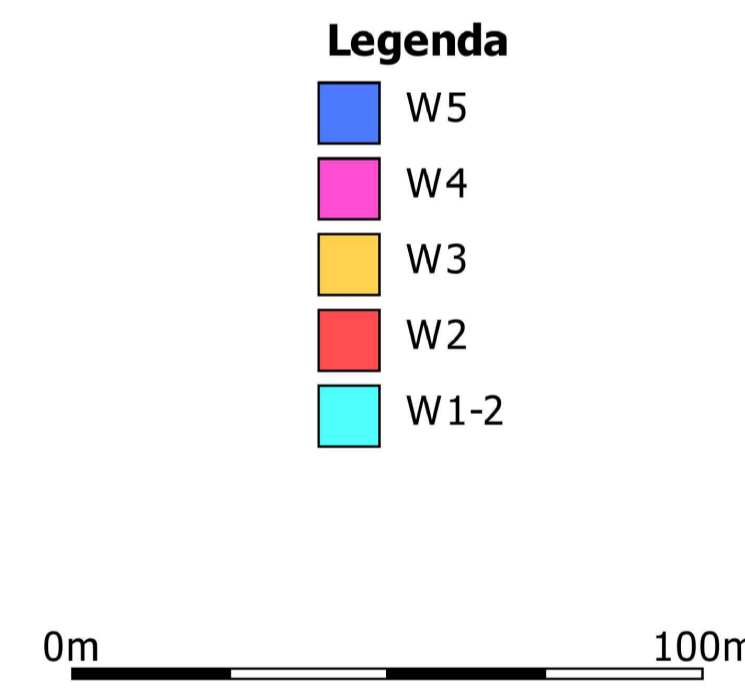
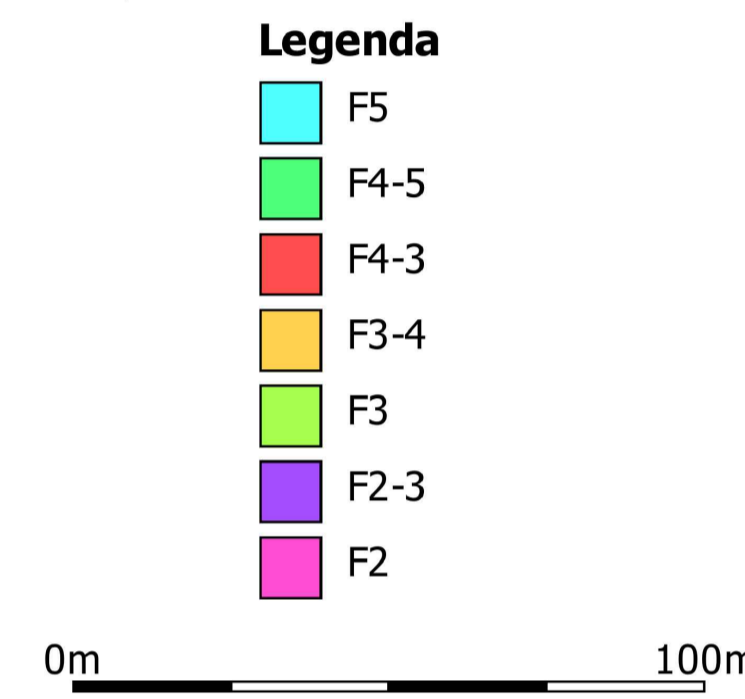
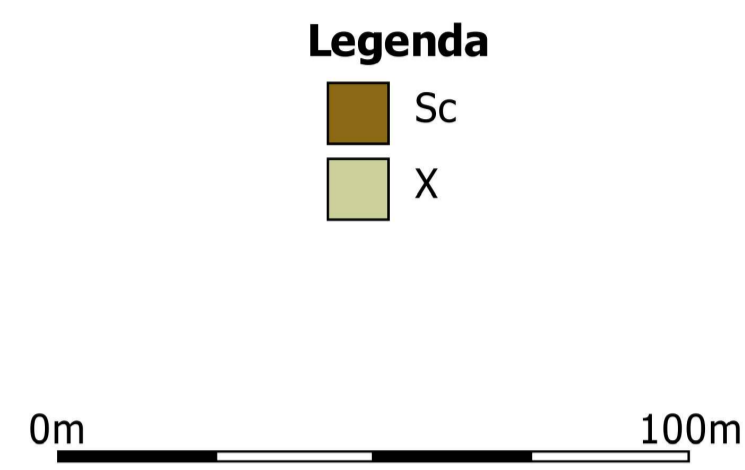
Perfis A-A'

Escala 1/120



Planta de Localização

Escala 1/2 000



Legenda

- Sondagem
- Poço
- Perfil sísmico
- Perfil A-A'
- Superfície do terreno
- Limite parâmetro provável

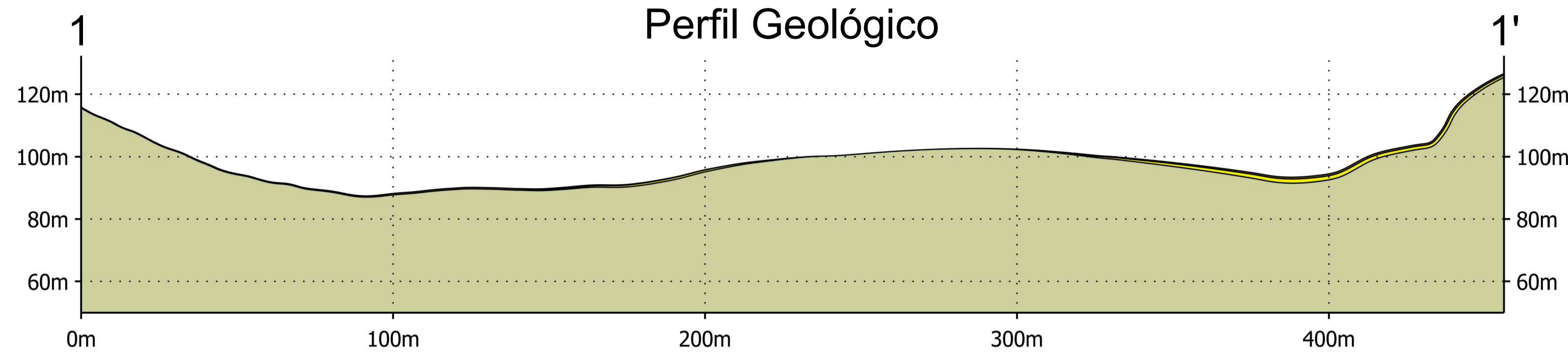
Anexo XV - Planta e Perfis 1-1' (Leapfrog Geo)

Perfis 1-1'

Escala 1/120

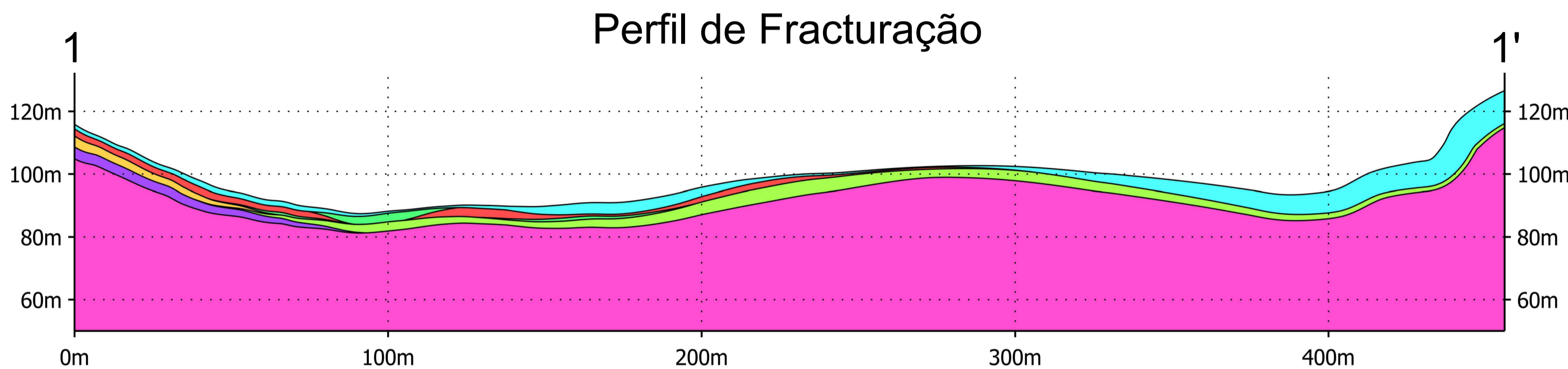
Planta de Localização

Escala 1/2 000



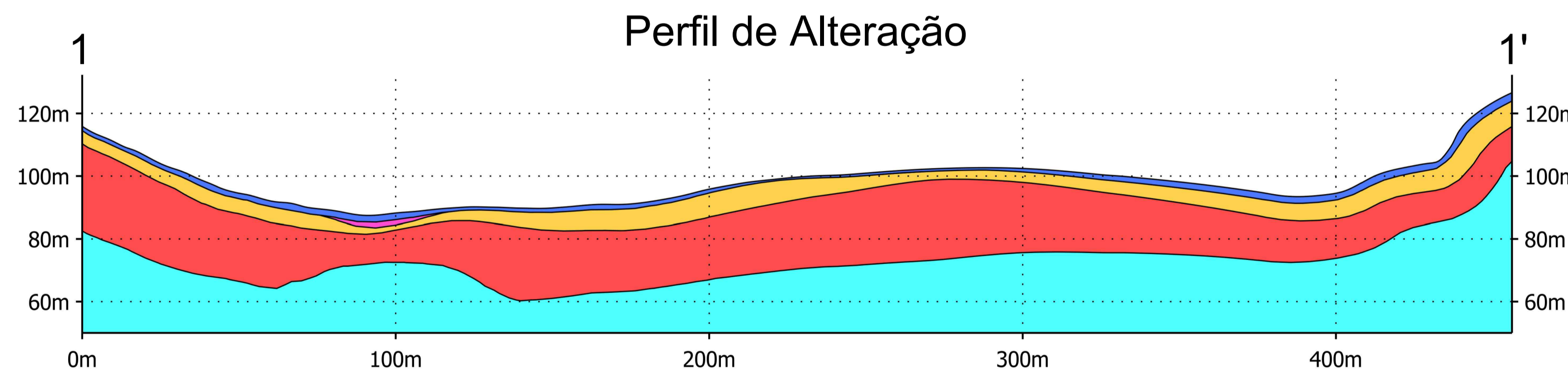
Legenda

- Sc
- Al
- X



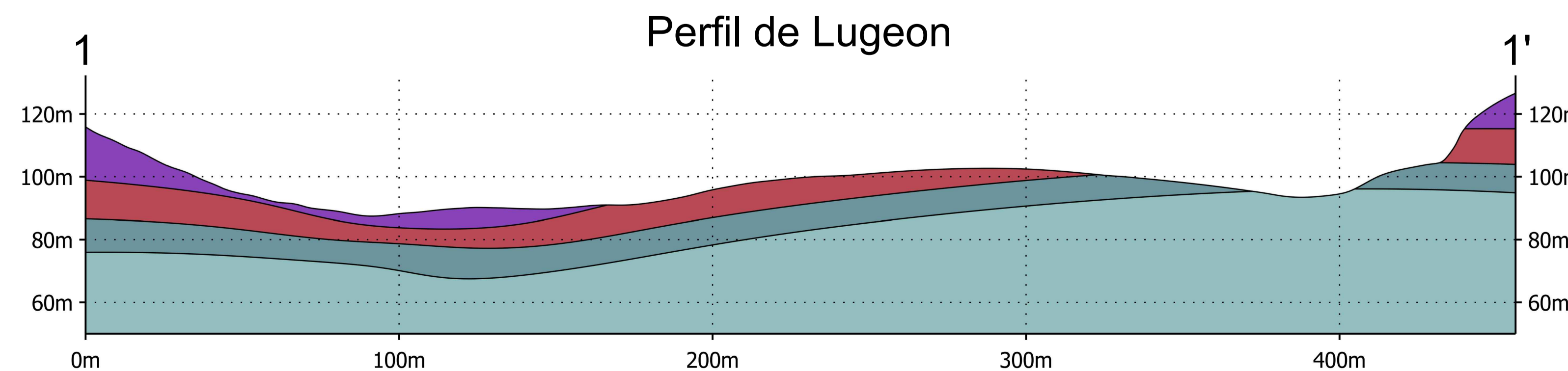
Legenda

- F5
- F4-5
- F4-3
- F3-4
- F3
- F2-3
- F2



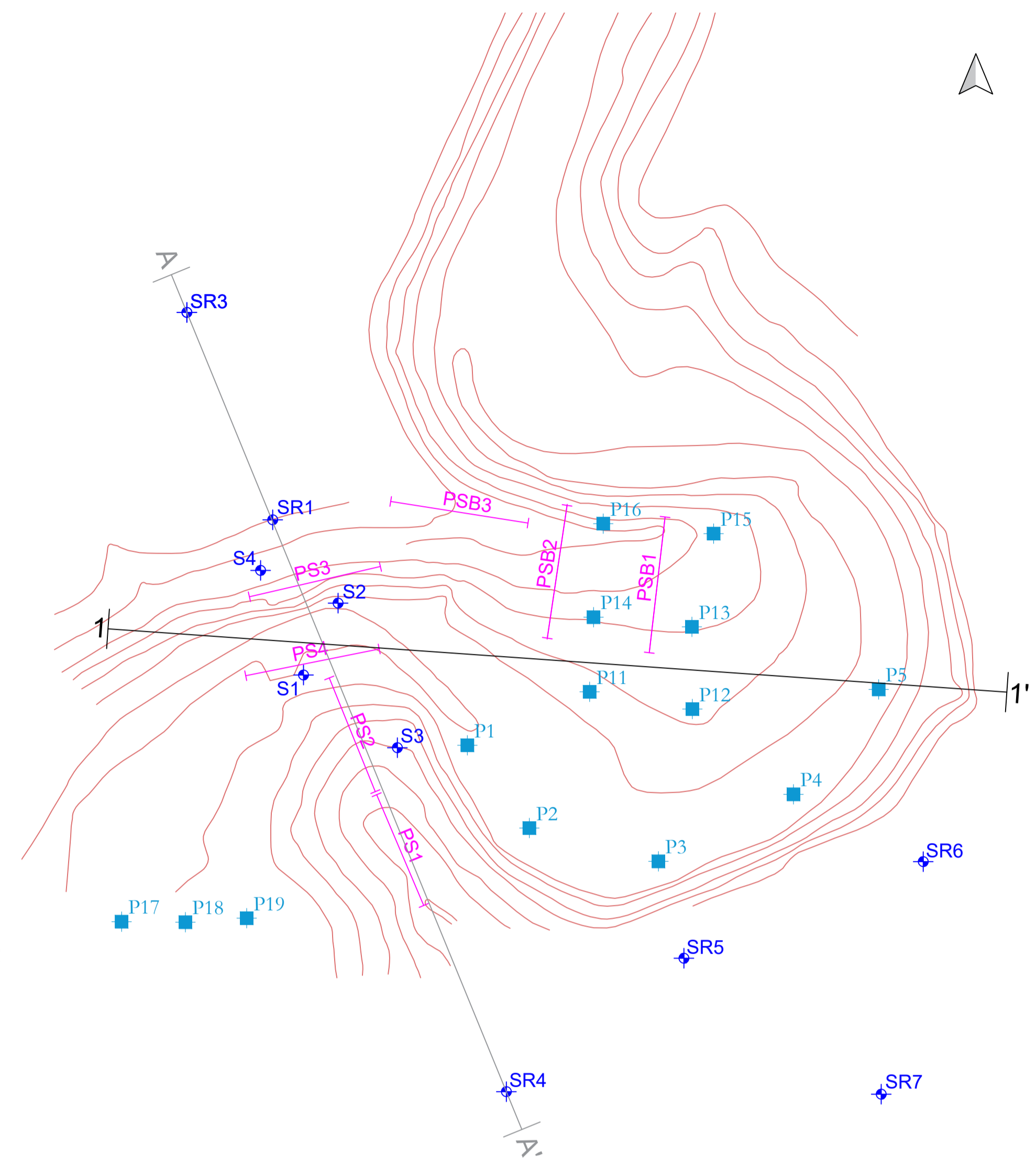
Legenda

- W5
- W4
- W3
- W2
- W1-2



Legenda

- < 1.0
- 1.0 – 3.0
- 3.0 – 6.0
- > 6.0



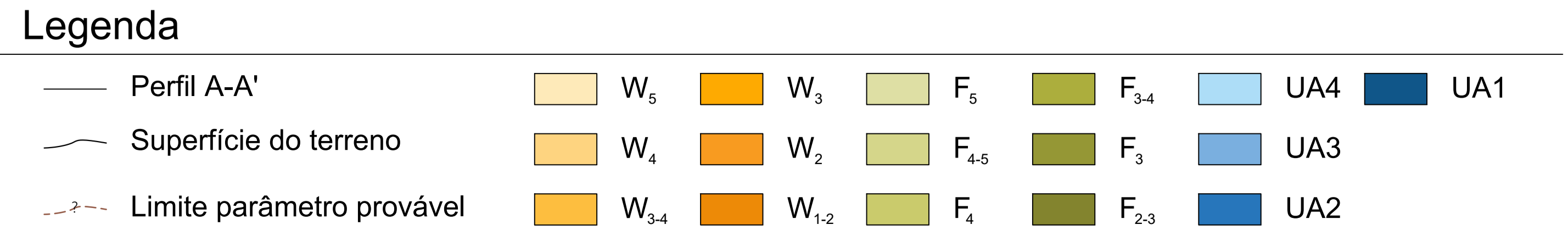
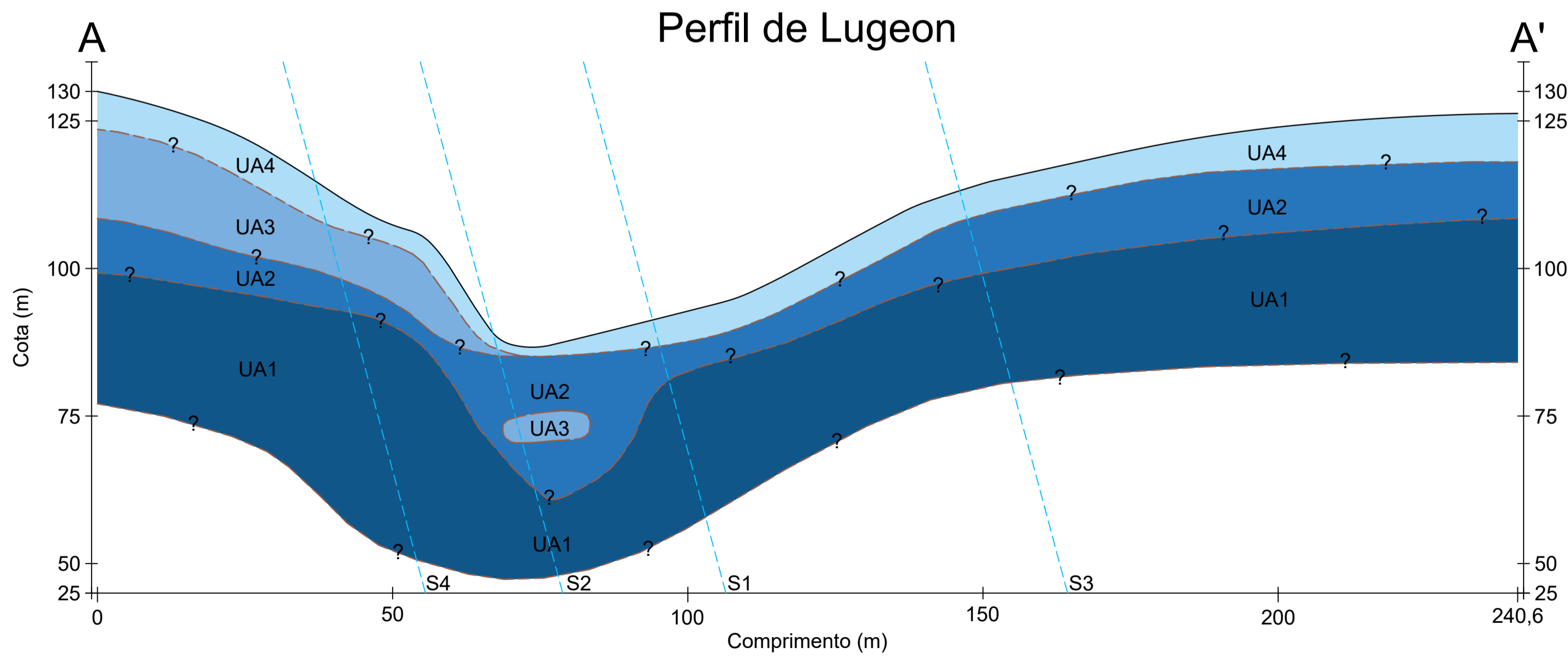
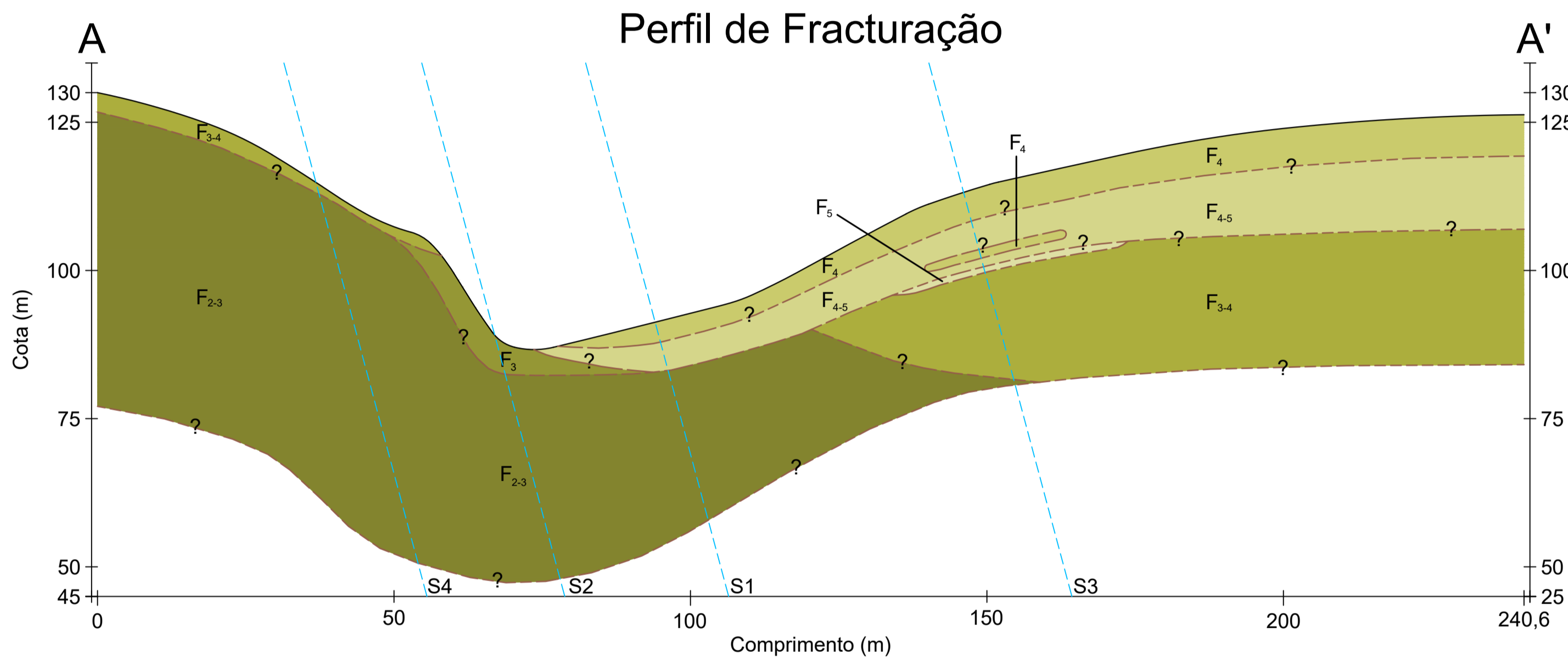
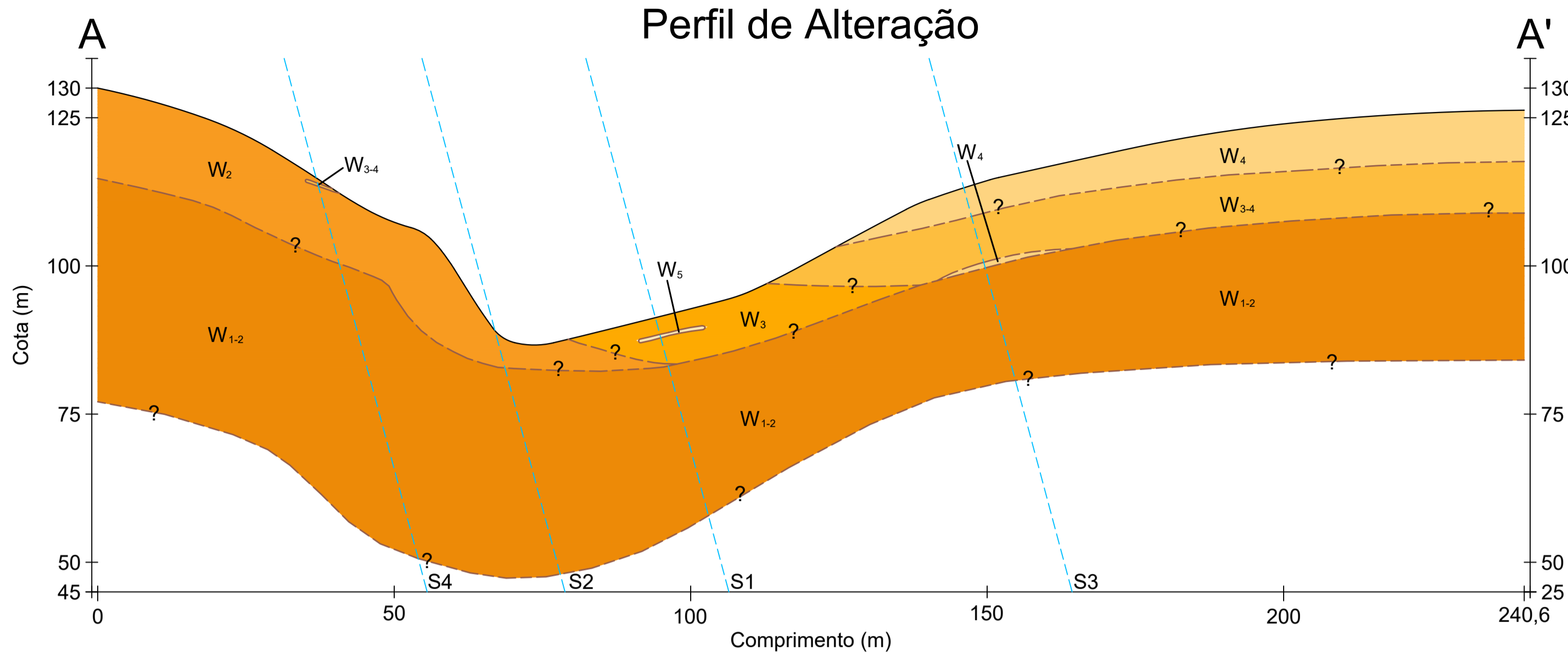
Legenda

- Sondagem
- Poço
- Perfil sísmico
- Perfil 1-1'
- Superfície do terreno
- Limite parâmetro provável

Anexo XVI - Perfis A-A'

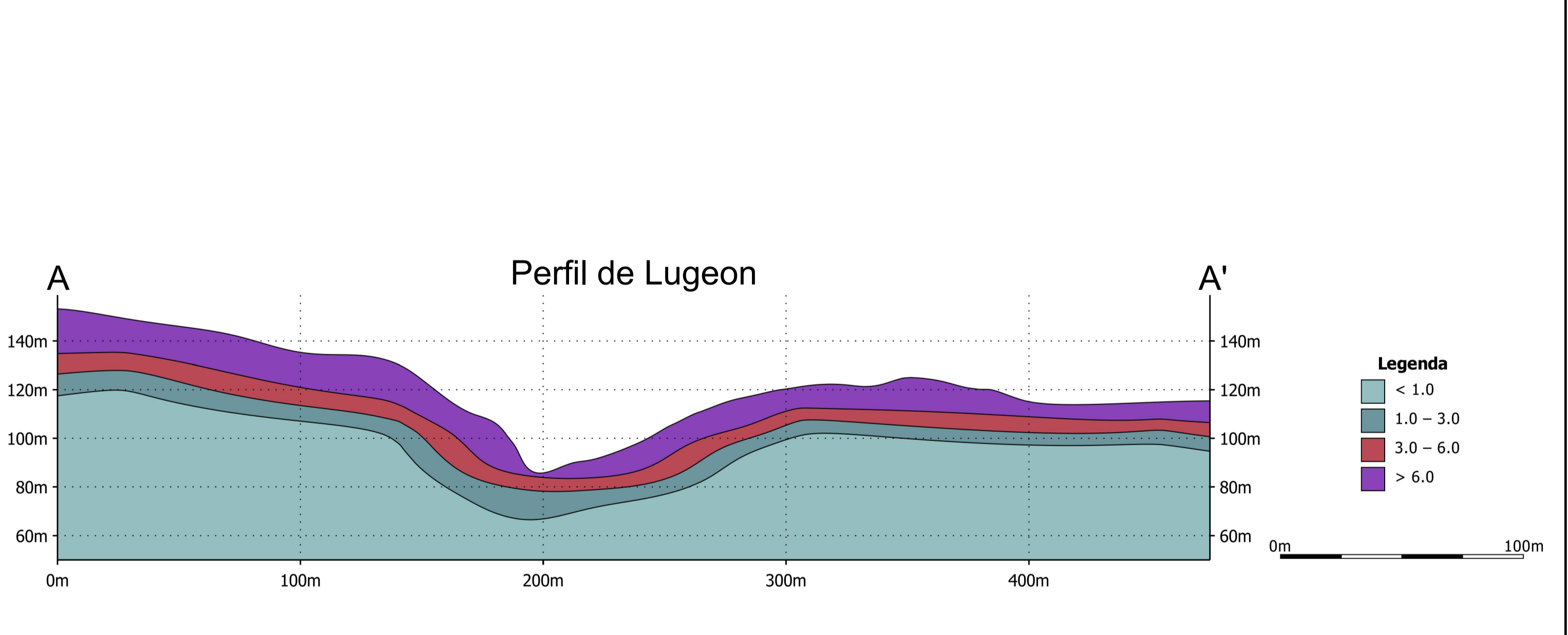
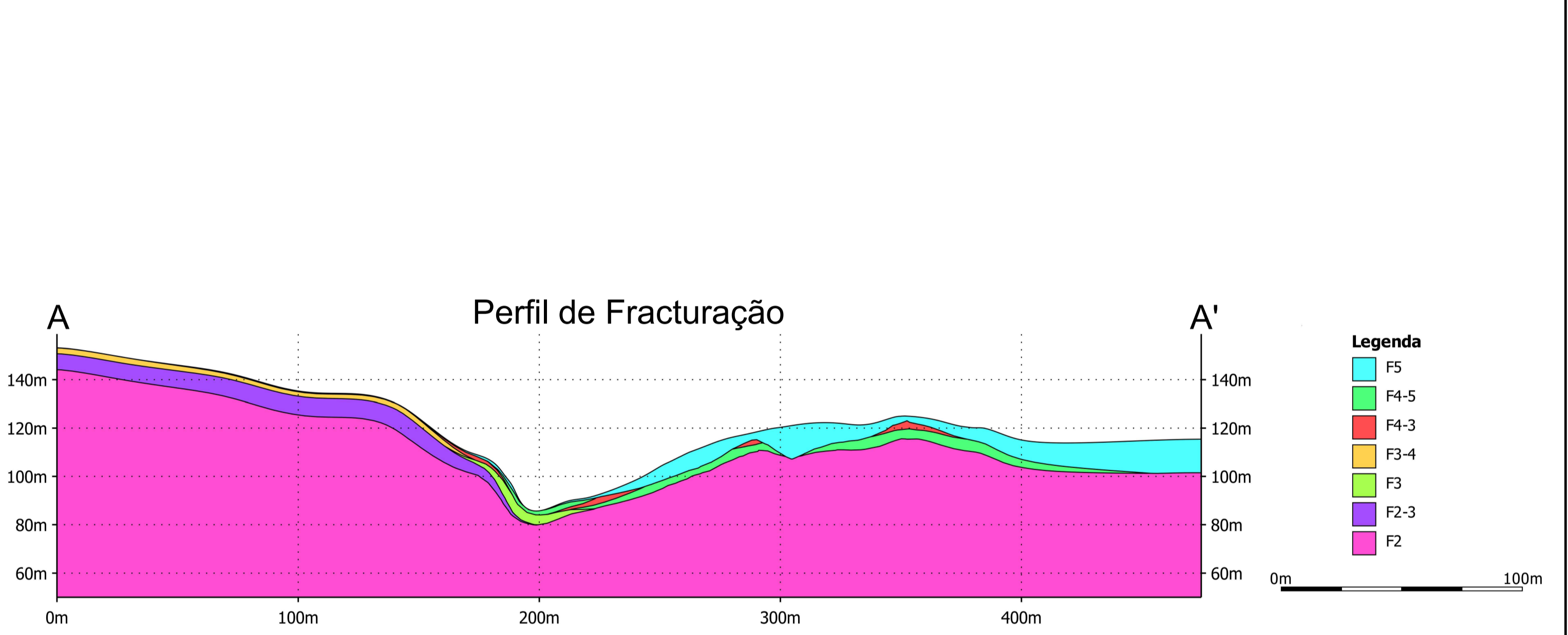
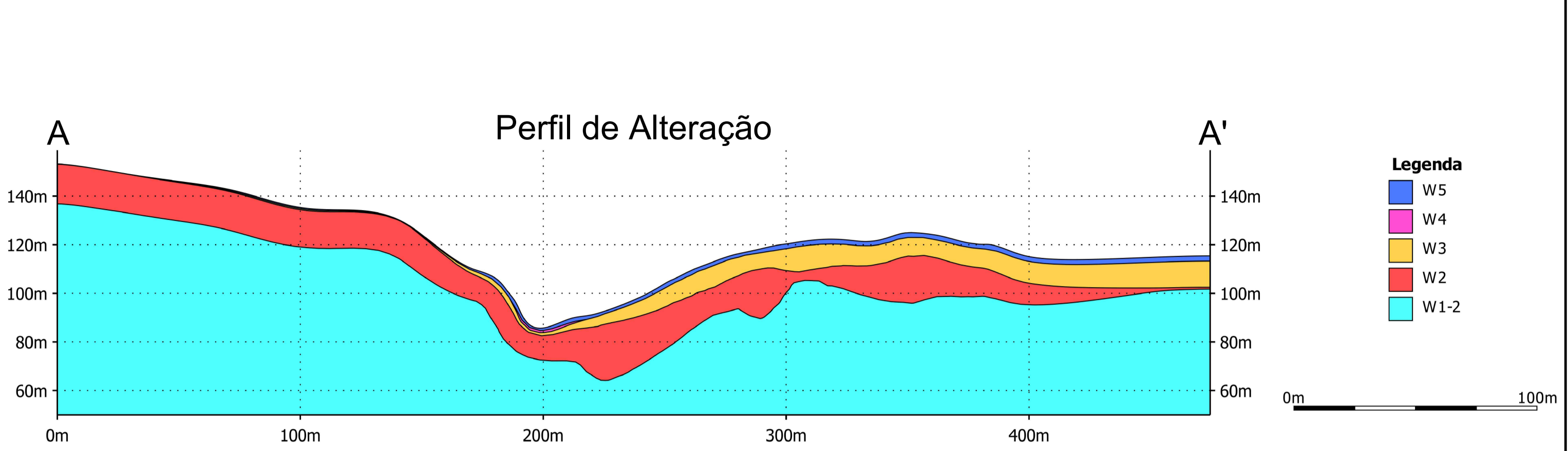
Perfis A-A' - Abordagem Clássica

Escala 1/100



Perfis A-A' - Leapfrog Geo

Escala 1/160



DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, **Domingos Xavier Mendanha Ferreira**, N.º CC: 14618325,

Declaro ter conduzido e desenvolvido este trabalho académico com integridade e ética. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à elaboração da dissertação/projeto/estágio.

Declaro ainda que recorri pontualmente a ferramentas de inteligência artificial (IA) — texto, imagem, vídeo ou outro formato — para fins académicos de pesquisa avançada de tópico específico e ainda fiz devida citação dos recursos bibliográficos sem colocar em causa os direitos de autor ou uso indevido de informações ou falsificação de conteúdos.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 17 de Setembro de 2025

Domingos Xavier Mendanha Ferreira