



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

**DEPARTAMENTO DE
CIÊNCIAS DA TERRA**

Miguel Alberto Kilezi

Licenciado em Geociências com ênfase em Geofísica

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS COM BASE EM RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E DE ONDAS V_p e V_s

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2023

|

Estimação de parâmetros hidráulicos com base em resultados de resistividade elétrica e de ondas V_p e V_s

MIGUEL ALBERTO KILEZI

Licenciado em Geociências com ênfase em Geofísica

Orientadora: Paula F. da Silva, Professora Auxiliar,
NOVA School of Science & Technology

Coorientadora: Sofia Barbosa, Professora Auxiliar
NOVA School of Science & Technology

Júri:

Presidente: Doutor José António de Almeida, DCT, NOVA-FCT

Arguente: Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas DCT,
NOVA-FCT

Vogais: Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa DCT,
NOVA-FCT

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA

Universidade NOVA de Lisboa
Março, 2023

Estimação de parâmetros hidráulicos com base em resultados de resistividade elétrica e de ondas Vp e Vs

Copyright © MIGUEL ALBERTO KILEZI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder saúde e força durante a formação.

Às minhas orientadoras, Professora Paula da Silva e Professora Sofia Barbosa, e também a cada professor ou professora que cruzou o meu caminho durante a minha formação na Universidade NOVA de Lisboa.

Ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, por me conceder a oportunidade de me formar nesta instituição.

Por último, mas não menos importante, à minha família, aos meus familiares e amigos, pelo apoio incondicional e por acreditarem em mim.

RESUMO

Estudos recentes têm vindo a aplicar métodos geofísicos de superfície, com maior ênfase na resistividade elétrica e a sísmica de refração (velocidade das ondas P e S), para estimar algumas propriedades das rochas/solos no campo, tais como a porosidade, teor em água e teor em argila. Alguns desses estudos foram inclusive validados em obras geotécnicas ou na pesquisa de água por comparação dos perfis estimados de propriedades das rochas/solos e a identificação da presença de água em fraturas e nos poros. Nesta dissertação atualizam-se os conhecimentos no âmbito daquela temática através da consulta de literatura recentemente publicada.

Apesar dos métodos geofísicos de superfície serem muito promissores, ainda são poucos os casos de estudos publicados na área da engenharia para determinação de parâmetros hidráulicos em rochas sedimentares. A maioria dos autores tem utilizado mais os métodos da resistividade elétrica e refração sísmica para fins de caracterização geométrica dos sítios estudados, tais como investigar a espessura das camadas ou detetar o nível freático de aquíferos, bem como identificar os seus limites. Neste contexto, apresenta-se uma síntese das potencialidades e limitações da utilização da resistividade elétrica e refração sísmica neste contexto e discute-se a fiabilidade dos resultados já obtidos.

Palavras-chave: Porosidade, Grau de saturação, Teor em argilas, Resistividade elétrica, Velocidades de ondas refratadas.

ABSTRACT

Recent studies have been applying surface geophysical methods, with greater emphasis on electrical resistivity and seismic refraction (velocity of P and S-waves), to estimate some properties of rocks/soils in the field, such as porosity, water content and clay content. Some of these studies were even validated in geotechnical works or in groundwater exploitation by comparing the estimated profiles of rock/soil properties and identifying the presence of water in fractures and pores. In this dissertation, knowledge is updated within the scope of that theme through the consultation of recently published literature.

Although the surface geophysical methods are very promising, there are still few case studies published in the engineering area for the determination of hydraulic parameters in sedimentary rocks. Most authors have used electrical resistivity and seismic refraction methods for purposes of geometric characterization of the studied sites, such as investigating the thickness of the layers or detecting the groundwater table level of aquifers, as well as identifying their limits. In this context, a summary of the potentialities and limitations of the use of direct electrical resistivity and seismic refraction methods in this context is presented and the reliability of the results already obtained are discussed.

Keywords: Porosity, Degree of saturation, Clay content, Electrical resistivity, Refracted wave velocity.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMENTOS | VII |
| RESUMO..... | IX |
| ABSTRACT..... | XI |
| ÍNDICE | XIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XV |
| ÍNDICE DE TABELAS..... | XVII |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 ENQUADRAMENTO TEMÁTICO..... | 3 |
| 2.1 POROSIDADE | 3 |
| 2.2 TEOR EM ÁGUA..... | 5 |
| 2.3 TEOR EM ARGILA..... | 6 |
| 2.4 MÉTODOS GEOFÍSICOS DE SUPERFÍCIE | 6 |
| 2.4.1 Resistividade elétrica | 6 |
| 2.4.2 Refração sísmica..... | 12 |
| 2.4.3 Aplicação de Métodos Geofísicos em Engenharia | 19 |
| 3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA VERSUS POROSIDADE, TEOR EM ÁGUA E TEOR EM ARGILAS: CASOS DE ESTUDO EXPERIMENTAIS | 21 |
| 3.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA, GRAU DE SATURAÇÃO E CURVAS DE COMPACTAÇÃO EM SOLOS ARGILOSOS..... | 21 |
| 3.2 ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA COM O AUXÍLIO DE DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA | 23 |
| 3.3 RELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE DE UM SOLO E O SEU TEOR EM ÁGUA..... | 25 |
| 4 ONDAS VP E VS VERSUS POROSIDADE, TEOR EM ÁGUA E TEOR EM ARGILAS: CASOS DE ESTUDO EXPERIMENTAIS..... | 29 |
| 4.1 CORRELAÇÕES ENTRE A VELOCIDADE DAS ONDAS VP E VS E A POROSIDADE E PERMEABILIDADE DE TERRENOS COMPOSTOS POR ARENITOS | 29 |
| 4.2 CORRELAÇÕES ENTRE A VELOCIDADE DAS ONDAS ACÚSTICAS E O GRAU DE SATURAÇÃO DE TERRENOS ARENÍTIOS..... | 32 |
| 4.3 EFEITO NAS ONDAS VP DOS MINERAIS DAS ARGILAS E DO SEU GRAU DE SATURAÇÃO EM ÁGUA EM ENCHIMENTOS DE FALHA | 34 |
| 5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA E ONDAS SÍSMICAS VP E VS VERSUS POROSIDADE, TEOR EM ÁGUA E TEOR EM ARGILAS: CASOS DE ESTUDO NO CAMPO..... | 37 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 45 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DO LEVANTAMENTO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SEGUNDO A CONFIGURAÇÃO SCHLUMBERGER; ONDE A E B SÃO ELÉTODOS DE CORRENTE, M E N SÃO ELÉTODOS DE POTENCIAL (TRADUZIDO DE TELFORD ET AL, 1990)..... | 7 |
| FIGURA 2.2 - CONFIGURAÇÕES MAIS UTILIZADAS NO LEVANTAMENTO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA, ONDE C1 E C2 SÃO ELÉTODOS DE CORRENTE E P1 E P2 SÃO ELÉTODOS DE POTENCIAIS. (LOKE, 2011). | 8 |
| FIGURA 2.3 - EQUIPAMENTOS USADOS PARA A PROSPEÇÃO POR RESISTIVIDADE ELÉTRICA. | 9 |
| FIGURA 2.4 - DIAGRAMA DE COMO É CONDUZIDA A PROSPEÇÃO POR REFRAÇÃO SÍSMICA (SOUZA & GANDOLFO, 2021). | 14 |
| FIGURA 2.5 - EQUIPAMENTOS USADOS NA PROSPEÇÃO POR SÍSMICA DE REFRAÇÃO. (HTTPS://DGCINDIA.IN/REFRACTION.HTML) | 14 |
| FIGURA 3.1 - GEOMETRIA DOS MOLDES DE PVC E CONFIGURAÇÃO PARA A MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (GINGINE, DIAS, & CARDOSO, 2016) | 22 |
| FIGURA 3.2 - GRÁFICOS DE RESISTIVIDADE PARA O SOLO UTILIZANDO: A) AS EQUAÇÕES TEÓRICAS; B) OS VALORES MEDIDOS (GINGINE, DIAS, & CARDOSO, 2016)..... | 23 |
| FIGURA 3.3 - CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA MEDIDOS E ESTIMADOS A PARTIR DO TEOR EM ARGILA DE DISTINTOS MODELOS DE AREIA-ARGILA. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO: 0,79. A LEGENDA É BASEADA NA CLASSIFICAÇÃO DE SLATER E LESMES (2002) (MOUSATOV & RYJOV, 2006) | 24 |
| FIGURA 3.4 - GRÁFICOS TEÓRICOS DA RESISTIVIDADE DO SOLO VERSUS SALINIDADE DA ÁGUA DOS POROS PARA DIFERENTES VALORES DE TEOR EM ARGILA E GRÁFICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL. CURVAS A A F OBTIDAS A PARTIR DE MEDIÇÕES DA RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO DE DIFERENTES MISTURAS EXPERIMENTAIS DE SOLO . AS MISTURAS EXPERIMENTAIS A-F FORAM EFETUADAS PARA AREIA PURA (A), E PARA TEOR DE ARGILA 10% (B), 20% (C), 30% (D), 60% (E). (D), 60% (E) E ARGILA PURA (F). O CÁLCULO TEÓRICO FOI EFETUADO PARA O SEGUINTE MODELO DE SOLO CEC DA ARGILA - 1,73 G/L; POROSIDADE DA ARGILA - 0,55; POROSIDADE DA AREIA - 0,22; RAIOS DOS POROS DA ARGILA – 3×10^{-9} M.. (MOUSATOV & RYJOV, 2006) | 24 |
| FIGURA 3.5 - A) CAIXA DE SOLO E TAMPA UTILIZADAS NAS MEDIÇÕES DE RESISTIVIDADE; B) LIGAÇÕES E MULTÍMETROS PARA MEDIR A TENSÃO E A CORRENTE (ANSARI, NOROOZ, ZEYNOLABEDIN, FOADI, & GHIASSI, 2021)..... | 25 |
| FIGURA 3.6 - GRÁFICOS DA RESISTIVIDADE DO SOLO VERSUS TEOR EM ÁGUA: A) PARA EXPERIÊNCIAS COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE LIXIVIADO; B) PARA TEOR EM ÁGUA ENTRE 5 E 10% (ANSARI ET AL., 2021). | 27 |
| FIGURA 3.7 - GRÁFICO DA RESISTIVIDADE DO SOLO VERSUS CONCENTRAÇÃO DE LIXIVIADO PARA EXPERIÊNCIAS COM A) 32 V B) 18 V E C) 4,5 V DE TENSÃO DE ENTRADA (ANSARI ET AL., 2021). | 28 |
| FIGURA 4.1 - VELOCIDADE DE ONDA VP VERSUS POROSIDADE (HAMADA & JOSEPH, 2020). | 30 |
| FIGURA 4.2 - VELOCIDADE DE ONDA DE CORTE, VS, VERSUS POROSIDADE (HAMADA & JOSEPH, 2020)..... | 31 |
| FIGURA 4.3 - VP VERSUS PERMEABILIDADE (K), (HAMADA & JOSEPH, 2020)..... | 32 |
| FIGURA 4.4 - (A) VALORES MÉDIOS DAS MEDIÇÕES DE VP E VS EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO EM ÁGUA E (B) RÁCIOS DE VALORES MÉDIOS VP/VS EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO EM ÁGUA (AS AMOSTRAS DE ARENITO) (HAMADA & JOSEPH, 2020). | 33 |
| FIGURA 4.5 - VELOCIDADES DAS ONDAS P EM FRATURAS DE ROCHA PREENCHIDAS COM SOLO ARGILOSO E NA ROCHA PR. DITA SEM FRATURAÇÃO EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO DE ÁGUA. VJ – VELOCIDADE VP NAS FRATURAS | |

| | |
|--|----|
| (JUNTAS), VR – VELOCIDADE VP NA ROCHA NÃO FRATURADA, KS – CAULINITE E BS – BENTONITE (YANG, DUAN, & ZHU, 2023)..... | 35 |
| FIGURA 4.6 - RÁCIOS DE TRANSMISSÃO DAS ONDAS P (T) ATRAVÉS DE AMOSTRAS DE ROCHA COM FRATURAS EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO DE ÁGUA. TKS E TBS REPRESENTAM RESPECTIVAMENTE OS RÁCIOS DE TRANSMISSÃO ATRAVÉS DAS AMOSTRAS DE ROCHA FRATURADAS RESPECTIVAMENTE CAULINITE E BENTONITE (YANG, DUAN, & ZHU, 2023). | 35 |
| FIGURA 5.1 - ESQUEMA DA INSTALAÇÃO DA LINHA DE LEVANTAMENTO POR REFRAÇÃO SÍSMICA NO TÚNEL (IZUMOTANI ET AL., 2020)..... | 37 |
| FIGURA 5.2 - AS SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS PROPRIEDADES DAS ROCHAS ESTIMADAS PELO PROCEDIMENTO PROPOSTO. (A), (B), (C) MOSTRAM POROSIDADE, SATURAÇÃO DE ÁGUA E TEOR EM ARGILA, RESPECTIVAMENTE. AS ZONAS 1 A 5 MOSTRAM OS LOCAIS DE DEFORMAÇÃO E LINHAS VERTICAIS AZUIS MARCAM OS PONTOS DE VAZAMENTO DE ÁGUA (IZUMOTANI ET AL., 2020). | 39 |
| FIGURA 5.3 - PERFIL TRANSVERSAL REPRESENTANDO A VELOCIDADE SÍSMICA (TOPO); E PERFIL TRANSVERSAL REPRESENTANDO A VELOCIDADE SÍSMICA (INFERIOR), (SANDRA ET AL, 2021)..... | 40 |
| FIGURA 5.4 - PARÂMETROS GEOFÍSICOS (ESQUERDA), PARÂMETROS HIDRÁULICOS (DIREITA). A VELOCIDADE SÍSMICA FOI USADA PARA MODELAR A POROSIDADE E A RESISTIVIDADE ELÉTRICA FOI USADA PARA MODELAR O TEOR EM ÁGUA (STEINER ET AL, 2022). | 41 |
| FIGURA 5.5 - ILUSTRAÇÃO DA LINHA DE AQUISIÇÃO ONDE ΔG É O INTERVALO ENTRE OS GEOFONES E ΔS É O INTERVALO ENTRE OS TIROS/FONTES (PASQUET ET AL, 2015)..... | 42 |
| FIGURA 5.6 - (A) MAPA GEOLÓGICO E PRINCIPAIS FALHAS (MA ET AL., 2015); (B) COLUNA LITOSTRATIGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO E ENVOLVENTE AOS FUROS. (IMANI, P. ET AL, 2021). | 42 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 2.1 - VALORES DA POROSIDADE DE ROCHAS (OMAR, 2020) | 4 |
| TABELA 2.2 - ALGUNS MATERIAIS GEOLÓGICOS E RESPECTIVAS RESISTIVIDADES MEDIAS (EVERETT, 2013, GONZÁLEZ DE VALLEJO & FERRER, 2011). | 8 |
| TABELA 2.3 - VELOCIDADE DAS ONDAS DE COMPRESSÃO - Vp [M/S] (BELL, 2007; EVERETT, 2013)..... | 13 |
| TABELA 3.1 - PROPRIEDADES QUÍMICAS DAS SOLUÇÕES DE LIXIVIADOS (ANSARI ET AL., 2021). | 26 |

1 Introdução

A presente dissertação tem como objetivo completar os requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica pela NOVA *School of Sciences & Technology* (NOVA FCT) e constitui um breve estudo de recolha e revisão bibliográfica sobre a utilização potencial das grandezas geofísicas "resistividade elétrica", "velocidade das ondas sísmicas P" e "velocidade das ondas sísmicas S" na estimação de algumas das propriedades físicas das rochas, mais especificamente a porosidade, o teor em água e o teor em argilas.

A Geofísica, ciência que num sentido lato aplica os métodos ou conceitos da Física ao estudo da Terra, Lua e planetas, quando aplicada em sentido estrito aplica apenas a Física ao estudo da Terra, desde a sua superfície até ao núcleo interno; sendo que a geofísica aplicada estuda apenas a crosta e a subsuperfície, onde as atividades de engenharia se desenvolvem e ter-se-á iniciado há cerca de um século.

A principal vantagem dos métodos de estudo geofísicos executados à superfície, é a capacidade de executarem estudos do subsolo sem ser necessário realizar perfurações e os seus resultados permitirem elaborar um modelo geofísico do subsolo e, assim, orientar melhor a seleção e a localização dos métodos de prospeção mecânica, em particular as sondagens. Aqueles métodos são conhecidos como não invasivos e, entre eles, a resistividade elétrica e a sísmica de refração são os mais utilizados no estudo do terreno pela Engenharia Geológica, sendo frequentemente usados em fases preliminares de estudos de projetos de engenharia para fazer a investigação de uma dada área, até uma certa profundidade, ou ainda durante e após uma intervenção de engenharia, para monitorizar a sua eficácia.

As grandezas geofísicas "resistividade elétrica", "velocidade das ondas sísmicas P" e "velocidade das ondas sísmicas S" são amplamente consideradas em diversos estudos laboratoriais e de campo como forma de aferir parâmetros geotécnicos e reológicos em diversos tipos de materiais litológicos sujeitos a diversas condições e ações. O conhecimento de tais parâmetros é fundamental em projetos de engenharia de distintos contextos, tais como a engenharia civil, a engenharia mineira, a engenharia do petróleo e gás, a engenharia hidráulica, a engenharia geoambiental e, inclusive, a engenharia agronómica.

No presente estudo deu-se particular destaque aos parâmetros porosidade, teor em água e teor em argilas, que possuem fortes implicações no que diz respeito ao comportamento hidráulico dos materiais litológicos (em problemas à escala laboratorial) e de maciços terrosos ou rochosos (em problemas à escala real).

Em problemas à escala real, a resistividade elétrica e a sísmica de refração constituem opções que podem ser utilizadas para estimar diversos parâmetros e propriedades físicas dos terrenos "in situ", tais como a porosidade, o teor em águas e o teor em argilas.

Ambos os tipos de estudos referido serão abordados no contexto desta dissertação e dar-se-ão exemplos ilustrativos da sua aplicação e aplicabilidade através de casos de estudo, desejando contribuir para a maior utilização destes métodos no âmbito da Engenharia Geológica.

Esta dissertação está composta por seis capítulos que são:

- 1. Introdução;
- 2. Enquadramento temático;
- 3. Resistividade elétrica versus porosidade, teor em água, e teor em argila: casos de estudo experimentais;
- 4. Ondas V_p e V_s versus porosidade, teor em água e teor em argilas: casos de estudo experimentais;
- 5. Resistividade elétrica e ondas sísmicas V_p e V_s versus porosidade, teor em água e teor em argilas: casos de estudo no campo;
- 6. Conclusões.

Na introdução é feita uma apresentação sucinta do estudo desenrolado, incluindo os pontos-chaves e os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo, Enquadramento temático, aborda-se de forma sucinta os principais parâmetros geotécnicos analisados - porosidade, teor em água e teor em argilas, nalguns casos de estudo experimentais selecionados e apresentados nos capítulos seguintes, assim como em levantamentos do subsolo realizados à escala real. É igualmente desenvolvida uma descrição sucinta da forma de aquisição de dados à escala real pelos métodos geofísicos de resistividade elétrica e de sísmica de refração.

No terceiro capítulo é descrita a relação entre os parâmetros hidráulicos e a resistividade elétrica. É feito um enquadramento teórico e apresentam-se alguns casos de estudo experimentais.

No quarto capítulo é abordada a relação entre os parâmetros hidráulicos e as ondas V_p e V_s , a propósito dos quais se apresenta um enquadramento teórico e alguns casos de estudo experimentais.

No quinto capítulo é abordado a relação entre os parâmetros hidráulicos e a resistividade elétrica e ondas sísmicas, V_p e V_s , com base em casos de estudos feitos no campo.

No capítulo final, tecem-se considerações sobre os principais aspetos abordados.

2 Enquadramento temático

No presente capítulo faz-se o enquadramento dos principais aspetos que são abordados nos casos de estudo. Incluem-se, neste contexto: a porosidade, o teor em água e o teor em argila. São igualmente abordados os fundamentos teóricos dos dois métodos geofísicos considerados: a resistividade elétrica e a sísmica de refração. Para os principais parâmetros são apresentadas as definições e suas relações com as grandezas medidas em cada um dos métodos de geofísicos identificando-se o modo como estes parâmetros influenciam a resistividade elétrica e a propagação e intensidade das ondas sísmicas de refração. Ainda, para os dois métodos geofísicos abordados, discute-se, de um modo sucinto, a sua execução no âmbito de estudos da subsuperfície.

2.1 Porosidade

A porosidade avalia os espaços vazios, numa dada rocha entre os grãos que a constituem ou entre as partículas de diferentes dimensões que compõem o solo. Esses espaços vazios podem-se localizar entre os grãos, em cavidades e, ainda, em fissuras da rocha (Omar, 2020). A porosidade total (Φ) é calculada pela relação entre o volume dos vazios (V_v) e o volume total (V_t) da amostra (Eq. 1) e ela é adimensional, mas o resultado é apresentado com um valor entre 0 e 1 ou, muitas vezes, em percentagem.

$$\Phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{Equação 2.1})$$

A porosidade pode ser determinada através de medições diretas ou indiretas. A determinação direta é feita em laboratórios, baseando-se em medições de volumes ou, ainda, técnicas de deslocamento (Schön, 2015). Por sua vez, a determinação indireta é efetuada no campo, através de métodos geofísicos de superfície, como a resistividade elétrica e sísmica de refração, ou dentro de furos (diagrafias) e baseia-se em correlações entre outras propriedades do meio, como por exemplo a velocidade das ondas sísmicas, e a porosidade.

O valor da porosidade das rochas é afetado por vários fatores. As rochas metamórficas e ígneas geralmente são mais densas e praticamente não possuem porosidade natural. De entre os fatores que afetam a porosidade em rochas sedimentares referem-se os seguintes:

- Tamanho das partículas que as constituem;
- Forma das partículas;
- Estrutura das partículas
- Compactação das partículas.

O valor da porosidade aumenta em rochas com partículas do mesmo tamanho. Ou seja, rochas com partículas de tamanhos diversificados apresentam em regra menor porosidade. De igual modo, quanto mais arredondas forem as partículas, maior será a porosidade. As rochas com partículas com calibre semelhante normalmente têm maior porosidade do que rochas com partículas mal ordenadas. Uma mesma rocha, quanto mais compacta for, isto é, mais densa, menor é a porosidade.

Os valores da porosidade dos materiais geológicos na natureza variam pois eles podem alterar-se, retrair-se, expandir, fendilhar ou, ainda, sofrerem compactação. A Tabela 2.1 apresenta valores aproximados para algumas litologias/solos.

Tabela 2.1 - Valores da porosidade de rochas (Omar, 2020)

| Material geológico | Porosidade (%) |
|----------------------------|----------------|
| Argila | 0-45 |
| Arenito não compactado | 35-45 |
| Arenito compacto | 1-15 |
| Rocha carbonífera compacta | < 1-5 |
| Argilito xistoso | 0-45 |
| Conglomerado | 1-15 |
| Calcário | 5-10 |
| Dolomito | 10-30 |
| Granito | < 1 |
| Basalto | < 0,5 |

A porosidade numa rocha pode ser classificada de várias maneiras, geralmente dividindo-se em (Omar, 2020):

- Primária;
- Secundária;
- De fratura;
- Efetiva.

A porosidade de uma rocha sedimentar classificada como primária corresponde àquela que resulta da estrutura da deposição inicial dos sedimentos; a porosidade secundária resulta da dissolução das partículas, ambiente de deposição ou ainda dos cimentos que juntam as partículas. A porosidade de fratura resulta da deformação frágil a que a rocha esteve submetida. Finalmente, a porosidade efetiva é a relação entre o volume dos espaços vazios que comunicam entre si e o volume total da rocha, sendo também conhecida por porosidade aberta.

2.2 Teor em água

O teor em água pode ser definido como a quantia de água contida em um determinado material. No presente trabalho iremos abordar o teor em água de solos e rochas. O teor em água de solos e rochas é expresso em percentagem e pode ser calculado de forma gravimétrica (w) ou ainda de forma volumétrica (θ), (Lekshmi et al, 2014).

De forma gravimétrica o teor em água pode ser calculado com a seguinte formula:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (\text{Equação 2.2})$$

$$\theta = \frac{v_w}{v_t} \quad (\text{Equação 2.3})$$

onde:

w → Teor em água calculado de forma gravimétrica;

θ → Teor em água calculado de forma volumétrica;

m_w → massa da água;

m_s → massa do sólido;

v_w → volume da água;

v_t → volume total (tendo em conta o volume da água, do sólido e do ar).

As fórmulas do teor em água calculado por forma gravimétrica e volumétrica podem ser relacionadas da seguinte maneira:

$$\theta = w \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Onde γ_d é o peso volumétrico do material seco, e γ_w é o peso volumétrico do material com água.

A forma mais comum de determinar o teor em água de solos e rochas é através da técnica termo-gravimétrica de "Oven-Drying". Nessa técnica, a amostra é seca por 24 horas em um forno com a temperatura constante de 105 °C. Além da técnica termo-gravimétrica, o teor em água dos solos e rochas pode ser estimado usando métodos geofísicos como por exemplo a Refletometria no Domínio do Tempo (TDR), o Radar de Penetração no Solo (GPR), a Resistividade Elétrica e a Sísmica de Refração.

2.3 Teor em argila

Em termos geotécnicos, o teor de argila num solo refere-se à proporção ou percentagem de partículas de argila presentes na composição do mesmo. Esta medida é muito relevante em projetos de engenharia geotécnica, pois a presença, tipo e quantidade de argilas num solo afetam as suas propriedades e comportamento.

O teor de argila é geralmente expresso como uma percentagem em relação ao peso total do solo. Por exemplo, se um solo tiver um teor de argila de 30%, significa que 30% do peso total do solo é composto por partículas de argila.

O teor de argila é um fator importante na determinação da plasticidade e da compressibilidade dos solos. Solos com teores mais altos de argila tendem a ser mais plásticos e suscetíveis a maiores deformações quando submetidos a cargas/ tensões. Além disso, a presença de argila influencia a capacidade de retenção de água do solo, a sua permeabilidade e a resistência ao cisalhamento.

2.4 Métodos geofísicos de superfície

Entre os vários métodos geofísicos, e como referido previamente, esta dissertação incide sobre a resistividade elétrica e a sísmica de refração, que se referem em seguida, ilustrando a sua aplicabilidade na engenharia geológica.

2.4.1 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica deteta as estruturas no subsolo usando medições da propagação de correntes elétricas através da subsuperfície (Loke, 2011). Para isso, uma corrente elétrica é aplicada no solo através de dois elétrodos, designados de corrente, e a diferença de potencial induzida em outros dois elétrodos, designados de potencial. A resistência apresentada pelo subsolo à passagem de corrente elétrica, ou seja, a resistividade elétrica, está relacionada com vários parâmetros geológicos, tais como a porosidade dos terrenos, os minerais que ali se encontram, bem como os fluidos e a saturação do meio.

A resistividade elétrica faz uma cartografia das estruturas do subsolo através de medições elétricas (Loke et al, 2020). O método realizado a partir da superfície do terreno consiste na injeção de uma corrente elétrica no solo através de dois elétrodos designados de elétrodos de corrente, e a medição da correspondente diferença de voltagem gerada é efetuada através de outros dois elétrodos, designados de elétrodos de potencial (Figura 2.1). A verdadeira resistividade do terreno pode

ser estimada através de medições da diferença de potencial em diferentes posições dos elétrodos de corrente e de potencial, convertendo esses valores em resistividade aparente (ρ_a) e depois invertendo os dados (Loke, 2011). A resistividade aparente (ρ_a) é calculada através da Equação 2.5.

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \text{ (Equação 2.5)}$$

Onde, ΔV é a diferença de voltagem medida pelos elétrodos de potencial, I é a intensidade da corrente que foi injetada no solo, e o k é um fator geométrico que depende da configuração dos elétrodos de corrente e de potencial. A resistividade é medida em Ohm.m (Ωm).

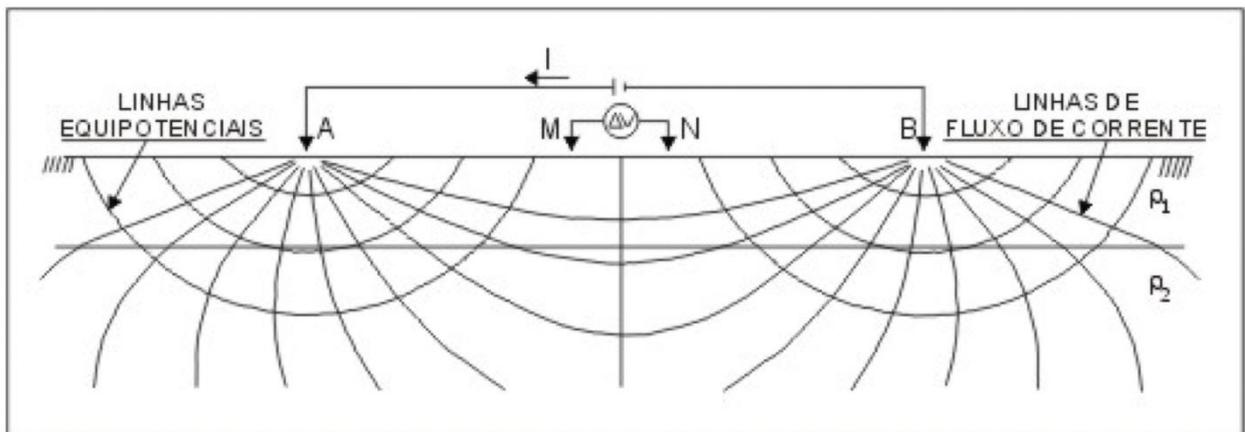
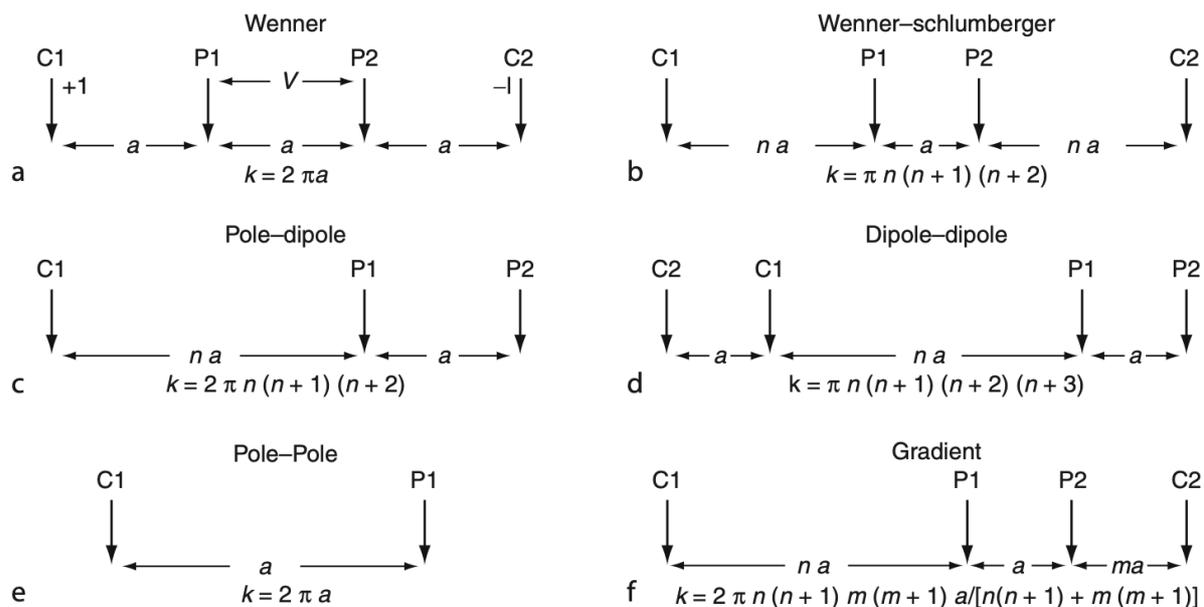


Figura 2.1 - Esquema ilustrativo do levantamento de resistividade elétrica segundo a configuração Schlumberger; onde A e B são elétrodos de corrente, M e N são elétrodos de potencial (traduzido de Telford et al, 1990)

No estudo de campo da resistividade elétrica podem ser usadas várias configurações as quais têm influência direta no valor de " k ". A Figura 2.2 inclui seis das configurações mais usadas para os perfis de resistividade elétrica e por baixo de cada configuração encontra-se a fórmula que possibilita calcular o valor de " k " para a respectiva configuração.

A resistividade dos terrenos é influenciada e relaciona-se com vários parâmetros intrínsecos, tais como a porosidade, os fluidos presentes, os minerais, e a temperatura. Baseados nesses parâmetros, desenvolveram-se diversos estudos para avaliar a ordem de grandeza da resistividade elétrica padrão de certas rochas (Tabela 2.2).



a) Configuração de Wenner; b) Configuração Wenner-Schlumberger; c) Configuração Polo-Dipolo; d) Configuração Dipolo-Dipolo; e) Configuração Polo-Polo; f) Configuração de gradiente

Figura 2.2 - Configurações mais utilizadas no levantamento de resistividade elétrica, onde C1 e C2 são elétrodos de corrente e P1 e P2 são elétrodos de potenciais. (Loke, 2011).

Tabela 2.2 - Alguns materiais geológicos e respectivas resistividades medias (Everett, 2013, González de Vallejo & Ferrer, 2011).

| Tipo de terreno | Resistividade (Ωm). |
|---------------------|-------------------------------|
| Argila | 1-20 |
| Argilito xistento | 1-500 |
| Calcário poroso | $100-10^3$ |
| Calcário compacto | 10^3-10^6 |
| Conglomerado | 10^3-10^4 |
| Rochas metamórficas | $50-10^6$ |
| Rochas Ígneas | 10^2-10^6 |
| Granito | $300-10^4$ |

2.4.1.1 Equipamentos utilizados na prospeção por resistividade elétrica

Para conduzir uma prospeção por resistividade elétrica podem ser usados vários tipos de equipamentos desde os mais sofisticados aos mais básicos. Os equipamentos necessários para aquisição de dados por prospeção de resistividade elétrica são (Figura 2.3):

- Resistímetro;

- Fonte de energia (normalmente uma bateria externa);
- Eléttodos (estacas de aço);
- Cabos elétricos;
- Fita métrica;



Figura 2.3 - Equipamentos usados para a prospecção por resistividade elétrica.

Outro material não menos importante é um computador portátil para poder transferir os dados obtidos na prospecção e posteriormente processar e interpretar os mesmos.

A) Aquisição de dados

Para a aquisição de dados usando o levantamento por resistividade elétrica podem ser seguidos os seguintes passos:

- Selecinar a localização;
- Decidir o intervalo dos eléctrodos;
- Colocar a fita métrica;
- Colocar as estacas metálicas (eléttodos);
- Conectar os eléctrodos e cabos elétricos;
- Fazer um teste para se certificar que os eléctrodos estão bem conectados;

vii. Fazer o levantamento.

I) Selecionar o local

O primeiro passo é sempre localizar a área em que o levantamento vai ser conduzido. Pode ser um local remoto ou um local bem dentro da comunidade.

II) Intervalo dos Eléttodos

O intervalo em que os elétrodos são instalados é de extrema importância pois tem um impacto direto na máxima resolução dos dados adquiridos. Para a decisão do espaço entre os elétrodos, tem de ter em conta que a profundidade de levantamento está relacionada com a quantidade de elétrodos e o comprimento em que os elétrodos são instalados. Por exemplo, quando usado o arranjo de dipolo-dipolo, normalmente é possível conseguir atingir uma profundidade de 20% do tamanho do comprimento em que os elétrodos são espalhados. O que significa que se tivermos um arranjo com 100 m de comprimento, poderemos conseguir atingir uma profundidade de 20 m.

III) Colocar a fita métrica e os elétrodos

Depois de decidir qual será o espaçamento entre os elétrodos e o comprimento, chega a hora de colocá-los nos devidos lugares. A fita métrica é usada para ter a certeza de que os elétrodos são colocados na distância correta um dos outros. Aconselha-se o uso de uma fita métrica não metálica e com um comprimento de pelo menos 100 m. As fitas métricas metálicas podem interferir com o procedimento caso sejam esquecidas próximo dos elétrodos. O uso de um aparelho de GPS é também recomendado para poder registar a posição exata de em que cada eléttodo foi instalado.

IV) Conectar os cabos elétricos aos elétrodos, fazer o teste, e conduzir o levantamento

Com os elétrodos já instalados, é hora de conectá-los aos cabos elétricos, a bateria e ao resistímetro. Uma vez conectados, um teste é conduzido para certificar que todos os elétrodos estão corretamente conectados e instalados. Por último, o levantamento é conduzido e os dados recolhidos.

V) Processamento de dados

Após os dados serem adquiridos no campo, eles são transferidos para um computador para posteriormente serem processados e interpretados. O que é coletado no campo é a resistividade aparente. Essa resistividade depois de processada em softwares, como por exemplo o AGI Earthimager, pode proporcionar um modelo do subsolo em 2D ou 3D.

2.4.1.2 Fatores que influenciam a resistividade elétrica de um solo

São fatores que influenciam a resistividade elétrica de um solo: o teor em água, o teor em argilas, a mineralogia, o grau de compactação do solo e a presença de materiais orgânicos. Destacam-se aqui os efeitos devidos ao teor em argilas, teor em água e porosidade:

- Teor em água – Resistividade elétrica
 - Resistividade elétrica diminui com o aumento do teor em água (Kazmi et al, 2016 & Park et al, 2016).
- Teor em argilas – Resistividade elétrica
 - Resistividade elétrica diminui com o aumento do teor em argila. Isso acontece porque as partículas de argila facilitam a condução de corrente elétrica (Long et al., 2012).
- Porosidade – Resistividade elétrica
 - Resistividade elétrica diminui com o aumento da porosidade. Materiais compactos tendem a conduzir melhor as correntes elétricas (Steiner et al, 2022).

Por definição, a resistividade elétrica de um solo é inversamente relacionada à sua porosidade. A resistividade elétrica mede a capacidade do solo em resistir ao fluxo de corrente elétrica, enquanto a porosidade mede a quantidade de vazios ou espaços porosos no solo. Quando um solo apresenta uma alta porosidade, possui uma maior quantidade de espaços vazios entre as partículas sólidas. Esses espaços vazios podem ser preenchidos com ar, água ou uma combinação de ambos. Em geral, a água é um bom condutor de eletricidade, enquanto os sólidos do solo tendem a ser maus condutores. Desta forma, quanto maior for a porosidade de um solo, maior será a quantidade de espaços disponíveis para a circulação de água que poderá resultar numa maior disponibilidade de água para conduzir a corrente elétrica através do solo diminuindo conseqüentemente a sua resistividade elétrica. Ao contrário, solos com baixa porosidade têm menor quantidade de espaços vazios e, portanto, menores disponibilidades em água para conduzir a corrente elétrica o que resulta numa maior resistência à passagem do fluxo de eletricidade e, conseqüentemente, numa maior resistividade elétrica.

A água é um bom condutor de eletricidade, enquanto os sólidos presentes no solo, como partículas minerais e matéria orgânica, tendem a ser maus condutores. Quanto maior for o teor de água no solo, menor será a resistividade elétrica devido à maior disponibilidade de água para conduzir a corrente elétrica. À medida que o teor em água aumenta, a água preenche os poros do solo e forma uma rede condutora contínua. Essa rede permite que a corrente elétrica flua mais facilmente através do solo, resultando numa menor resistividade elétrica. Por outro lado, à medida que o teor de água diminui, a quantidade de água disponível para conduzir a corrente elétrica também diminui o que conduz a um aumento da resistência do solo à passagem da corrente elétrica e, conseqüentemente, a um aumento da resistividade elétrica.

A relação entre resistividade elétrica e teor em água em um solo é frequentemente usada em geofísica e hidrogeologia para avaliar o teor de humidade dos solos, identificar a presença de águas subterrâneas e avaliar o modo de distribuição espacial de água no subsolo.

A resistividade elétrica de um solo é influenciada pelo seu teor em argila. A argila é um material fino e tem uma alta capacidade de retenção de água. Quando o solo contém uma quantidade significativa de argila, a sua estrutura é caracterizada por possuir partículas minerais finas, poros mais estreitos e uma maior quantidade de água retida nos poros. Nestas condições, de maior grau de saturação e presença de partículas de argila, são criados caminhos preferenciais para a condução de corrente elétrica no solo. Os minerais de argila possuem geralmente carga negativa e a água contida nos poros pode facilitar a transferência de iões, razão pela qual solos com alto teor de argila tendem a apresentar menor resistividade elétrica devido à maior condutividade proporcionada pelos caminhos preferenciais referidos.

Por outro lado, solos com menor teor de argila, como os solos mais arenosos, possuem partículas maiores e poros mais amplos, o que dificulta a passagem da corrente elétrica resultando numa resistividade elétrica maior.

2.4.2 Refração sísmica

A técnica de sísmica de refração baseia-se na medição do tempo de percurso das ondas sísmicas refratadas nas interfaces entre horizontes com diferente composição do subsolo e que possuem velocidades diferentes (Anomohanran, 2013), mas crescentes em profundidade. As ondas sísmicas são geradas à superfície do terreno em função da profundidade que se pretende investigar e, para tal, podem ser usados martelos sísmicos pesados, detonação de pequenas cargas de explosivos ou, ainda, geradores de ondas, como camiões com vibrador sísmico. Estas ondas geradas atravessam o subsolo e depois são refratadas na interface entre horizontes sísmicos, de volta para a superfície, onde são registadas em geofones. Estes, são equipamentos que identificam as vibrações das partículas dos terrenos devido à propagação de ondas acústicas e convertem-nas em voltagem que, por sua vez, são transformados num sinal elétrico e transferidos para um sismógrafo para armazenamento dos dados.

A técnica da refração sísmica é muito utilizada nas engenharias e ciências da terra principalmente para estudar as condições geológicas em profundidade, tais como variações de litologia, a profundidade do nível freático, o perfil de meteorização dos maciços rochosos bem com a presença de algumas estruturas. Como referido anteriormente, o método baseia-se na medição do tempo de propagação de ondas sísmicas refratadas nas fronteiras entre camadas com diferentes propriedades físicas no subsolo e que se traduzem em variações nas velocidades das ondas acústicas.

O método da refração sísmica baseia-se no princípio de que a velocidade da onda acústica aumenta com a profundidade. Porém, esse princípio pode deixar o método pouco sensível a camadas do subsolo com velocidade baixa intercaladas entre outras duas com maiores velocidades e crescentes em profundidade (Anomohanran, 2013), o que constitui uma forte limitação da técnica para algumas situações geológicas, como por exemplo em zonas onde o material muda de uma camada compacta para uma camada com rochas fraturadas ou saturadas. A Tabela 2.3 ilustra o gama de valores médios da velocidade das ondas de compressão em alguns materiais geológicos e na água.

Tabela 2.3 - Velocidade das ondas de compressão - V_p [m/s] (Bell, 2007; Everett, 2013).

| Material | Velocidade da Onda P (V_p) [m/s] |
|----------------|--------------------------------------|
| Água | 1450 |
| Ar | 330 |
| Areia Saturada | 800-1900 |
| Areia Seca | 200-800 |
| Arenito | 1500-4500 |
| Argila | 1100-2500 |
| Basalto | 5000-8400 |
| Calcário | 2500-6500 |
| Gelo | 3000-4000 |
| Granito | 3600-7000 |
| Mármore | 3700-6900 |
| Gabro | 6500-6700 |

2.4.2.1 Equipamentos utilizados na prospeção por refração sísmica

Os sinais das ondas geradas nos pontos de impacto (também designados por tiro) – Figura 2.4, viajam quer diretamente na camada superior até aos geofones (onda direta), ou atravessam o subsolo e posteriormente são refratadas de volta à superfície e consequentemente registados pelos geofones. As ondas de compressão, também designadas de ondas longitudinais ou P, são mais rápidas que as ondas de corte, também designadas de ondas transversais ou S, e ambas podem ser registadas pelos geofones, se bem que nem todos os geofones são sensíveis a ambas.

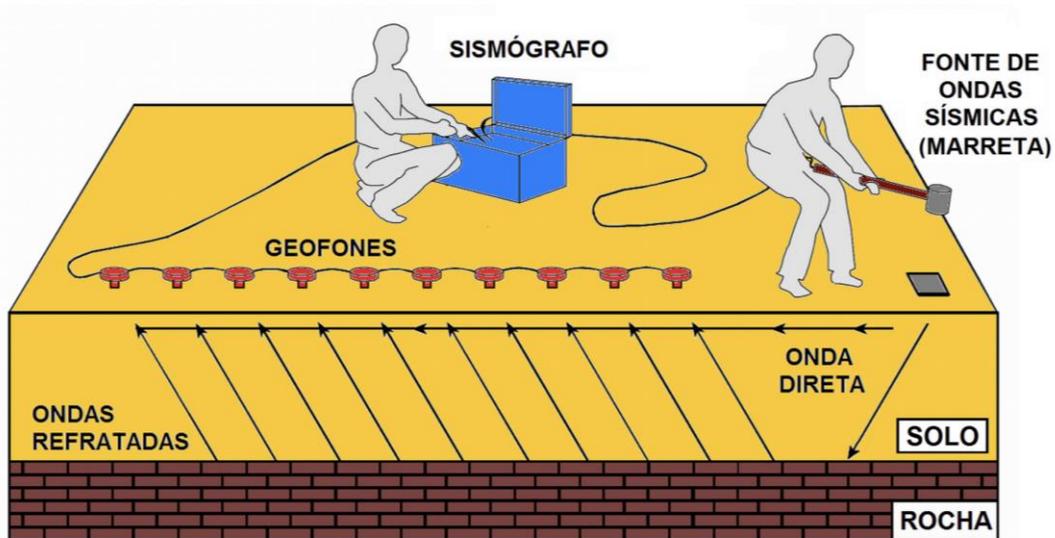


Figura 2.4 - Diagrama de como é conduzida a prospecção por refração sísmica (Souza & Gandolfo, 2021).

Para poder executar a prospecção usando a sísmica de refração são necessários os seguintes equipamentos (ilustrados na Figura 2.5):

- Sismógrafo;
- Geofones;
- Martelo/marreta sísmica;
- Placa metálica;
- Fita métrica;
- Cabos sísmicos.



Figura 2.5 - Equipamentos usados na prospecção por sísmica de refração (<https://dgcindia.in/refraction.html>)

Alem dos equipamentos citados acima, é também indispensável o uso de computador para poder transferir e processar os dados obtidos no levantamento. Outro acessório também importante é aparelho de GPS para poder registrar as coordenadas do local em que está a ser conduzido o levantamento bem como as coordenadas de cada geofone.

Aquisição de dados

De modo a conduzir o levantamento no campo, é necessário um sismógrafo que tenha no mínimo 12 canais de registo, porém, o ideal e o mais recomendado é ter um sismógrafo com 24 canais de registo. Os geofones são instalados em distâncias iguais uns dos outros. É importante evitar a instalação da linha sísmica em terrenos com topografia muito irregular. Um mínimo de três pontos de tiro é necessário em cada base sísmica. Esses três pontos de tiro devem estar localizados um em cada extremidade, e o outro no centro do arranjo de levantamento. Caso a linha de levantamento não cubra a área de interesse, o arranjo deve ser repetido sequencialmente até cobrir a área, e ainda ter o cuidado de começar a linha sucessora bem onde terminou a antecessora de modo a não ter uma falha ou intervalo entre os levantamentos. Ainda, é necessário fazer o levantamento das coordenadas e altitude de cada geofone instalado no arranjo de levantamento (Souza & Gandolfo, 2021).

Processamento de dados

Depois da aquisição dos dados no campo, eles são transferidos para um computador onde são processados e posteriormente interpretados. Em primeira instância o processamento de dados da sísmica de refração traduz-se em detetar e verificar as primeiras chegadas das ondas sísmicas e com estes dados criar gráficos de tempo vs. distância. Este mesmo gráficos são interpretados e transformados em modelos 2D de estratos sísmicos que nos oferece velocidades sísmicas e ainda a profundidade e espessura das camadas abaixo do local do levantamento (Souza & Gandolfo, 2021).

2.4.2.2 Fatores que influenciam a intensidade e propagação das ondas sísmicas de refração num solo

A composição e a estrutura geológica do solo influenciam a propagação das ondas sísmicas. Alguns tipos de solo são mais eficientes na propagação das ondas sísmicas, enquanto outros podem absorvê-las ou dispersá-las. Por exemplo, solos granulares, compostos maioritariamente por areia, tendem a transmitir ondas com menor intensidade do que solos rochosos.

Em certas condições geológicas, o solo pode amplificar as ondas sísmicas. Tal situação pode ocorrer quando camadas de solo de diferentes propriedades estão presentes, criando um fenómeno conhecido por "efeito de amplificação de sítio". O efeito de amplificação provocado pelo solo pode resultar num aumento significativo na intensidade das ondas em determinadas áreas.

À medida que as ondas sísmicas se propagam através do solo, estas tendem a perder energia devido a processos de absorção, dispersão e conversão de energia em calor. A atenuação das ondas pode ser influenciada pela densidade do solo, grau de humidade, presença de falhas geológicas entre outros fatores.

A intensidade e propagação das ondas sísmicas num solo, geradas pelo método geofísico de refração sísmica, são influenciadas por diversos fatores, destacando-se:

- A velocidade das ondas sísmicas: é um fator crítico que determina a direção de propagação e a refração das ondas. A velocidade das ondas sísmicas depende das propriedades do solo, como a densidade, rigidez e compressibilidade. Variações nessas propriedades podem resultar em mudanças na velocidade das ondas sísmicas e, conseqüentemente, afetar os efeitos de refração das ondas.
- As variações na estrutura do solo. Diferentes camadas de solo com diferentes propriedades físicas, como densidade e rigidez, podem causar mudanças na velocidade das ondas sísmicas. A presença de camadas com velocidades de onda significativamente diferentes pode resultar em refração acentuada das ondas sísmicas.
- A inclinação e a geometria das camadas. A inclinação e geometria das camadas de solo podem causar desvio e refração das ondas sísmicas. Quando as camadas possuem uma certa inclinação, as ondas sísmicas podem ser refratadas segundo diferentes ângulos, seguindo as mudanças na geometria das camadas.
- O teor em água no solo. O teor em água presente no solo afeta as suas propriedades físicas, como a rigidez e densidade, e, por sua vez, influencia a velocidade das ondas sísmicas. Solos saturados podem ter velocidades de ondas sísmicas diferentes dos solos secos, devido a efeitos de refração distintos das ondas sísmicas.
- Frequência das ondas sísmicas. A frequência das ondas sísmicas também pode afetar a refração. O comportamento das ondas sísmicas pode variar com a frequência, resultando em diferentes padrões de refração.

Diversos parâmetros do solo, como a sua composição, a mineralogia, o tipo de partículas, a sua textura e estrutura, o grau de compactação, o teor em argila, o teor em água e a porosidade podem desempenhar um papel relevante no tipo de resposta a indicações de natureza sísmica.

A porosidade do solo afeta a propagação das ondas sísmicas de duas maneiras principais:

- Velocidade das ondas sísmicas. A velocidade das ondas sísmicas depende das propriedades físicas do meio em que se propagam. Em geral, a velocidade das ondas sísmicas é maior em meios mais densos e rígidos, e menor em meios menos densos e menos rígidos. A porosidade

do solo relaciona-se diretamente com a densidade e a rigidez efetivas do solo. Quando a porosidade aumenta, o preenchimento dos poros com fluidos (como a água) reduz a densidade efetiva e, conseqüentemente, a velocidade das ondas sísmicas. Assim, a velocidade de propagação das ondas sísmicas tende a diminuir em solos mais porosos.

- Atenuação das ondas sísmicas. Os poros podem agir como dissipadores de energia, absorvendo parte da energia das ondas sísmicas à medida que se propagam. Isto resulta numa diminuição da intensidade ou amplitude das ondas sísmicas. Solos mais porosos tendem a ter maior capacidade em absorver energia sísmica e, portanto, podem apresentar uma atenuação maior das ondas sísmicas em comparação com solos menos porosos.

O teor em água em um solo tem uma relação significativa com a propagação e intensidade das ondas sísmicas. A presença de água no solo afeta as suas propriedades físicas e, por sua vez, influencia o comportamento das ondas sísmicas. Algumas das relações entre o teor de água do solo e as ondas sísmicas são:

- Velocidade das ondas sísmicas. A presença de água nos poros do solo altera a rigidez e a densidade efetiva do material. A água, em comparação com o ar, é um meio mais rígido e denso. Portanto, quando o teor de água aumenta, a rigidez e a densidade efetiva do solo aumentam resultando, por sua vez, num aumento na velocidade das ondas sísmicas.
- Atenuação das ondas sísmicas. O teor de água também pode afetar a atenuação das ondas sísmicas. A água nos poros do solo atua como um dissipador de energia, absorvendo parte da energia das ondas sísmicas durante a sua propagação. Quanto maior for o teor de água, maior será a capacidade do solo em absorver energia sísmica resultando numa atenuação maior das ondas sísmicas e, conseqüentemente, numa diminuição na intensidade ou amplitude das ondas.
- Efeitos de refração: A presença de água nos poros do solo também pode influenciar a refração das ondas sísmicas nas interfaces entre camadas com diferentes propriedades físicas. Interfaces entre camadas com diferentes teores de água resultam em variações nas velocidades das ondas sísmicas, levando a refrações significativas das ondas.

A relação entre o teor em água do solo e as ondas sísmicas também depende de outros fatores, como a distribuição da água e grau de saturação nas camadas, a geometria das camadas do solo e a frequência das ondas sísmicas. Igualmente, outros parâmetros do solo, como a porosidade e a mineralogia, também podem interagir com o teor de água para influenciar a resposta sísmica do solo sendo necessário realizar uma análise abrangente das propriedades do solo para uma compreensão completa da relação entre o teor de água e as ondas sísmicas.

A presença de argila num solo pode ter um impacto significativo na propagação e intensidade das ondas sísmicas. A relação entre o teor de argila e as ondas sísmicas pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- Velocidade das ondas sísmicas. A argila é um material com propriedades físicas distintas, como baixa rigidez e alta plasticidade o que resultará numa diminuição na velocidade das ondas sísmicas quando o teor de argila aumenta. As partículas de argila tendem a interagir e transmitir as ondas sísmicas mais lentamente em comparação com outros minerais do solo. Consequentemente, quanto maior o teor em argila, menor tende a ser a velocidade de propagação das ondas sísmicas.
- Atenuação das ondas sísmicas. A presença de argila no solo também pode contribuir para a atenuação das ondas sísmicas. A natureza porosa e a plasticidade da argila permitem que ela absorva e dissipe a energia das ondas sísmicas à medida que se propagam pelo solo resultando numa diminuição da intensidade e amplitude das ondas sísmicas.
- Reflexão e dispersão das ondas sísmicas. As partículas de argila tendem a ter formas irregulares e tamanhos variados, o que pode levar à reflexão e dispersão das ondas sísmicas. Essa reflexão e dispersão ocorrem quando as ondas encontram interfaces entre diferentes materiais do solo ou quando encontram partículas de argila que são pequenas em relação ao comprimento de onda das ondas sísmicas. Esses fenómenos podem causar reflexões múltiplas das ondas sísmicas, resultando numa propagação menos direta e numa distribuição mais complexa da energia sísmica.
- Amplificação de movimentos sísmicos. A presença de argila no solo pode contribuir para a amplificação de movimentos sísmicos. Devido à sua alta plasticidade, a argila pode sofrer deformações significativas sob ação das ondas sísmicas, resultando num comportamento não-linear. Esta não-linearidade pode levar a um aumento da amplificação dos movimentos sísmicos em comparação com solos sem argila.

É importante considerar que a influência do teor de argila na propagação e intensidade das ondas sísmicas pode variar dependendo de outros fatores, como a mineralogia e a composição do solo, o conteúdo de água, a compactação e a estrutura geológica local

Muito resumidamente, as relações entre teor em argila, teor em água, porosidade e ondas sísmicas são as seguintes:

- Teor em argila – Ondas sísmicas
 - Ondas sísmicas diminuem com o aumento da do teor em argila. (Han et al, 1986)
- Teor em água – Ondas sísmicas
 - Ondas sísmicas diminuem com o aumento do teor em água.
- Porosidade – Ondas sísmicas
 - Ondas sísmicas diminuem com o aumento da porosidade. Materiais compactos tendem a conduzir melhor as ondas sísmicas (Steiner et al, 2022).

2.4.3 Aplicação de métodos geofísicos em Engenharia

Nos dias de hoje verifica-se uma utilização crescente dos métodos geofísicos de superfície como a resistividade elétrica e sísmica de refração na engenharia geológica. Estes métodos podem ser aplicados para (Souza & Gandolfo, 2021):

- Determinar espessura e profundidade de rocha;
- Localizar fraturas em rochas;
- Localizar falhas;
- Localizar cavidades e zonas carsificadas;
- Determinar a posição do nível freático;
- Investigação de águas subterrâneas;
- Determinar módulos elásticos de maciços para fundações;
- Monitorar pavimentos e estruturas de betão;
- Identificar salinidade nos solos;
- Identificar e mapear plumas de contaminantes;
- Determinar a ripabilidade de futuras escavações.

Alem das vantagens da aplicação dos métodos geofísicos da resistividade elétrica e da sísmica de refração, existem também algumas limitações que na maioria dos casos estão relacionados com as configurações geológicas do local em estudo.

Algumas das limitações da sísmica de refração são (Haeni, 1988):

- Detetar camadas intermediárias finas e com pouco contraste de velocidade sísmica;
- Detetar diferentes camadas quando o contraste da velocidade sísmica é insuficiente;
- Configurações geológicas onde uma camada de alta velocidade sísmica sobrepõe uma camada de baixa velocidade.

Por sua vez, algumas das limitações da resistividade elétrica são (adaptado de Martinho, 2002):

- Morosidade do trabalho;
- Requerer dois ou mais operadores no campo;
- Os dados são suscetíveis a ruídos que podem ser provocados pela presença de materiais metálicos no local;
- Os dados são influenciados pela condutividade das camadas superficiais. Existe a possibilidade de não conseguir colher dados abaixo da camada superficial caso essa tenha uma condutividade elevada.

É importante também frisar que os métodos geofísicos de superfícies possuem outras limitações mais generalizadas como por exemplo, a resolução dos dados adquiridos é diretamente dependente a profundidade, o que significa que a resolução diminui com a profundidade. Adicionalmente, a maioria dos dados não resolve as ambiguidades do local de estudo e há necessidade de informações adicionais como dados de um poço de observação. Por último, um conjunto de dados

adquiridos pelos métodos geofísicos não pode ser associado com um único tipo de condição geológica no subsolo (A. S. T. M., 2011 & Lin et al, 2015). Desse modo, convém usar sempre dois métodos geofísicos diferentes para ter uma melhor definição do modelo geofísico conceptual e, frequentemente, a resistividade elétrica e a sísmica de refração são utilizadas em conjunto.

3 Resistividade elétrica versus porosidade, teor em água e teor em argilas: casos de estudo experimentais

3.1 Resistividade elétrica, grau de saturação e curvas de compactação em solos argilosos

Em solos granulares grosseiros, a resistividade elétrica é afetada pela porosidade/tortuosidade do solo e também pela natureza do fluido dos poros. A estrutura do solo pode influenciar o fluxo elétrico porque a disposição dos poros pode proporcionar diferentes percursos para a corrente. Em solos de grão fino a resistividade elétrica também depende dos minerais presentes, em especial dos minerais das argilas, uma vez que a corrente elétrica pode fluir através das superfícies eletricamente carregadas dos minerais argilosos. Igualmente, a capacidade de troca catiónica de um determinado mineral pode desempenhar um papel importante na condutividade da corrente elétrica na fase sólida do solo.

Tradicionalmente, os ensaios de resistividade elétrica são utilizados para a caracterização geofísica, mas as propriedades elétricas dos solos também podem ser exploradas para o controlo das condições de compactação em obras geotécnicas. As curvas para valores específicos de resistividade elétrica considerando diferentes graus de saturação e porosidades são tabelados e podem ser utilizada para o controlo da compactação de solos argilosos.

Neste caso de estudo experimental a resistividade elétrica foi medida em diferentes provetes de caulino branco moldados e compactados segundo diferentes índices de vazios e teores em água.

Considerou-se a Equação 3.1 para a definição das curvas teóricas da resistividade elétrica. Estas curvas foram comparadas com as curvas experimentais encontradas.

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{G_s}{S_r} W} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{G_s}{\left(\frac{\rho}{\rho_{sat}}\right)^{-1/B} W}} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Foi utilizado o método de Wenner (com 4 pinos) adotando-se uma distância de 25 mm entre eléctrodos, que é recomendada na norma BS 1377. Utilizando o método de Wenner, o valor da resistividade aparente do solo é dado pela Equação 3.2:

$$\rho = 2\pi aR \quad (\text{Equação 3.2})$$

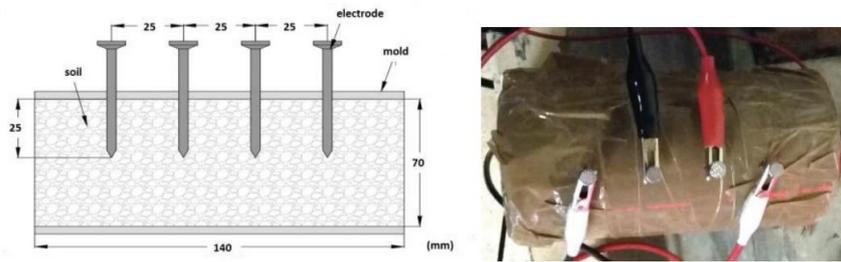


Figura 3.1 - Geometria dos moldes de PVC e configuração para a medição da condutividade elétrica (Gingine, Dias, & Cardoso, 2016)

Os gráficos de resistividade teóricos e os experimentais foram comparados (Figura 3.2) verificando-se que as linhas teóricas são semelhantes às experimentais apenas perto da saturação. As curvas de ambas as figuras apresentam tendências semelhantes. No entanto, para os teores em água e pesos volumétricos secos mais baixos, as curvas teóricas da Figura 3.2a correspondem a valores de resistividade mais elevados do que os da Figura 3.2b. Além disso, as curvas da Figura 3.2b são côncavas para valores de resistividade superiores a 40 $\Omega \cdot m$. Estas diferenças refletem o comportamento elétrico do solo argiloso, que é afetado não só pela quantidade de água nos poros, mas também pela estrutura do solo e pela presença da carga elétrica dos minerais argilosos. De facto, as densidades mais elevadas/razão de vazios baixa, tanto fração sólida (minerais argilosos eletricamente carregados e água adsorvida) como o meio líquido (água retida nos macro e microporos) conduzem a corrente elétrica em paralelo, diminuindo assim a resistividade do solo. A fase sólida começa a dominar quando as dimensões dos vazios diminuem ou quando o grau de saturação diminui dependendo ambos dependem da compactação (água e energia).

Assim, no caso de condições não saturadas, para além do grau de saturação, deve ser considerada a estrutura induzida pelo processo de compactação e a presença de carga elétrica nos minerais de argila. A fase sólida começa a dominar quando o tamanho dos espaços vazios diminui ou quando o grau de saturação diminui. No primeiro caso, a quantidade de água na fase líquida diminui. No segundo, a fase líquida perde continuidade.

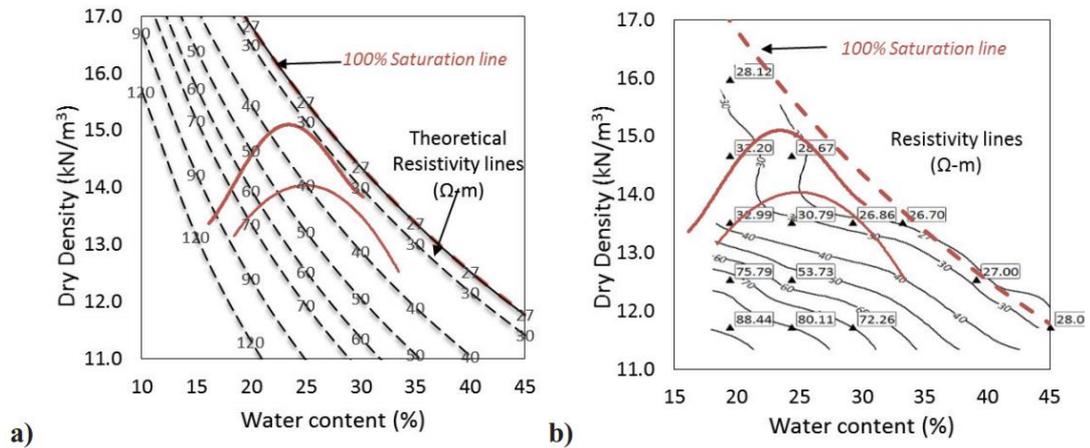


Figura 3.2 - Gráficos de resistividade para o solo utilizando: a) as equações teóricas; b) os valores medidos (Gingine, Dias, & Cardoso, 2016).

A recorrência a tabelas e gráficos da evolução dos valores de resistividade em função do grau de saturação / compactação (curvas de compactação) pode constituir uma ferramenta alternativa para o controlo da compactação no campo, desde que as mesmas estejam calibradas para o tipo específico de solo em questão. As curvas teóricas não devem ser utilizadas em materiais argilosos compactados, uma vez que não consideram a existência de superfícies eletricamente carregadas com água adsorvida, mas a sua forma pode ser utilizada junto à curva de compactação, desde que calibrada com dados de medições.

3.2 Estimativa da condutividade hidráulica com o auxílio de dados de resistividade elétrica

Neste caso de estudo considera-se a possibilidade em estimar a condutividade hidráulica com base em resultados de salinidade e do teor em argila medidos indiretamente através de resultados de resistividade elétrica. A estimativa da condutividade hidráulica a partir do teor de argila pode ser útil quando a geofísica fornece informação necessária para este efeito. No presente caso de estudo, foi desenvolvida uma técnica que permite estimar o teor em argila a partir de medições de resistividade do solo *versus* salinidade da água dos poros em laboratório (Shevnin et al., 2004). A curva de resistividade do solo *versus* salinidade da água foi interpretada com o software Petrowin (Rylov & Sudoplatov, 1990; Shevnin et al., 2005) para estimar os parâmetros dos modelos areia-argila: teor em argila, porosidade da areia e da argila e capacidade de troca catiónica da argila (Figura 3.3). Esta técnica foi então verificada em misturas de solos de areia calibrada e argila montmorilonítica com teor de argila de 0 a 100% (Figura 3.4). Neste caso, o erro máximo de estimativa do teor em argila

foi de 18%. Este nível de erro permite uma estimativa fiável dos principais tipos litológicos de solos areno-argilosos, tais como: areia, solos franco-arenosos, solos franco-argilosos e argila.

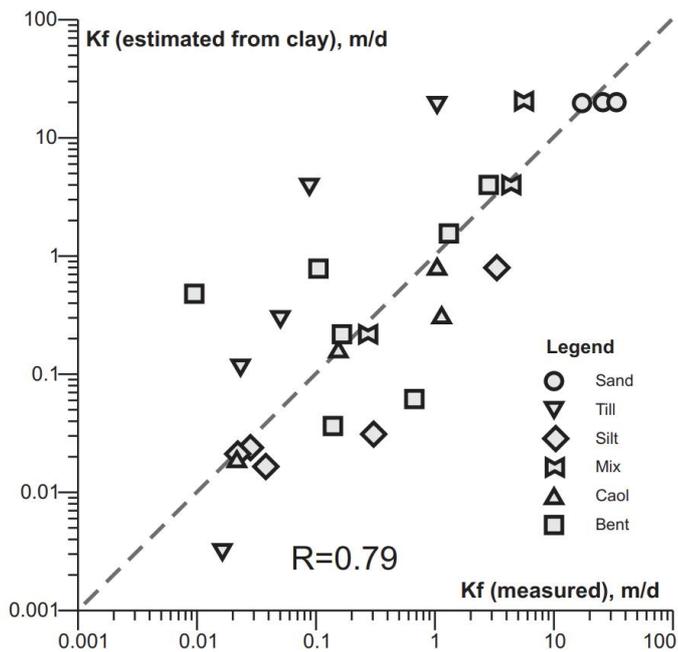
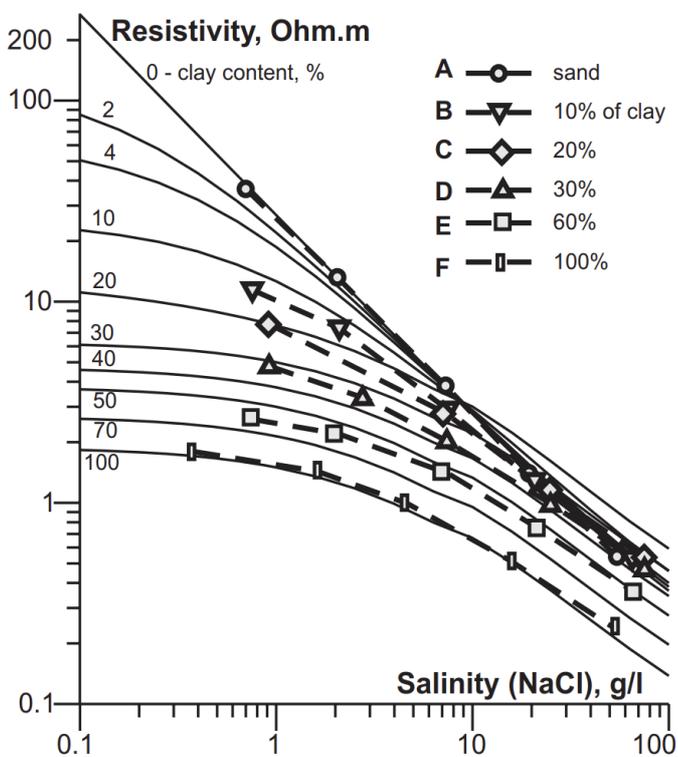


Figura 3.3 - Correlação entre os valores da condutividade hidráulica medidos e estimados a partir do teor em argila de distintos modelos de areia-argila. Coeficiente de correlação: 0,79. A legenda é baseada na classificação de Slater e Lesmes (2002) (Mousatov & Ryjov, 2006)



Valores das curvas teóricas do teor médio em argila em %

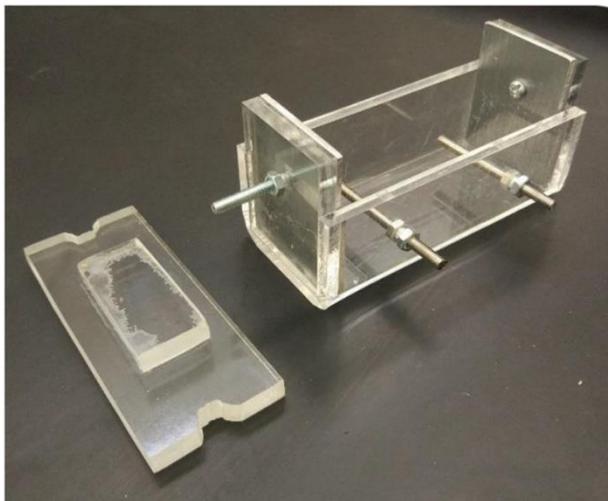
Figura 3.4 - Gráficos teóricos da resistividade do solo versus salinidade da água dos poros para diferentes valores de teor em argila e gráficos obtidos através do procedimento experimental. Curvas A a F obtidas a partir de

medições da resistividade em laboratório de diferentes misturas experimentais de solo. As misturas experimentais A-F foram efetuadas para areia pura (A), e para teor de argila 10% (B), 20% (C), 30% (D), 60% (E). (D), 60% (E) e argila pura (F). O cálculo teórico foi efetuado para o seguinte modelo de solo CEC da argila - 1,73 g/l; porosidade da argila - 0,55; porosidade da areia - 0,22; raio dos poros da argila - 3×10^{-9} m.. (Mousatov & Ryjov, 2006)

3.3 Relação entre a resistividade de um solo e o seu teor em água

Neste trabalho, foram realizadas medições de resistividade 1D à escala laboratorial em amostras de um solo contaminado por lixiviados e os dados obtidos foram utilizados para determinar a correlação entre o teor de humidade, os valores de tensão e os valores de resistividade elétrica.

Utilizou-se para este efeito uma pequena caixa que permite utilizar pequenas quantidades de solo para cada grupo de medições. Esta caixa possui dois elétrodos de placa de alumínio instalados nas extremidades que injetam corrente elétrica na amostra de solo. Foram utilizados outros dois elétrodos de haste em aço inoxidável com um comprimento de 3 cm que mediram valores do potencial elétrico (Figura 3.5).



(a)



(b)

Figura 3.5 - a) Caixa de solo e tampa utilizadas nas medições de resistividade; b) Ligações e multímetros para medir a resistividade e a corrente (Ansari et al, 2021).

A preparação das amostras de solo e das soluções poluentes foi o pré-requisito para estas medições. A amostragem do solo foi efetuada de forma aleatória e baseou-se na norma ASTM C702. A diluição do lixiviado foi efetuada com água destilada. Devido à presença de argila no solo, as misturas de solo com as soluções lixivantes foram armazenadas em recipientes durante oito horas para garantir a homogeneidade e o equilíbrio das amostras. Posteriormente, as amostras foram colocadas na caixa de solo transparente e foi efetuada a medição da resistividade do solo. Foram utilizados os teores de humidade de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% nas amostras de solo. Uma vez que o limite

líquido para este tipo de solo é de 36,5%, foi considerado o valor máximo de humidade de 30%. As concentrações de lixiviado foram de 25, 50, 75 e 100%.

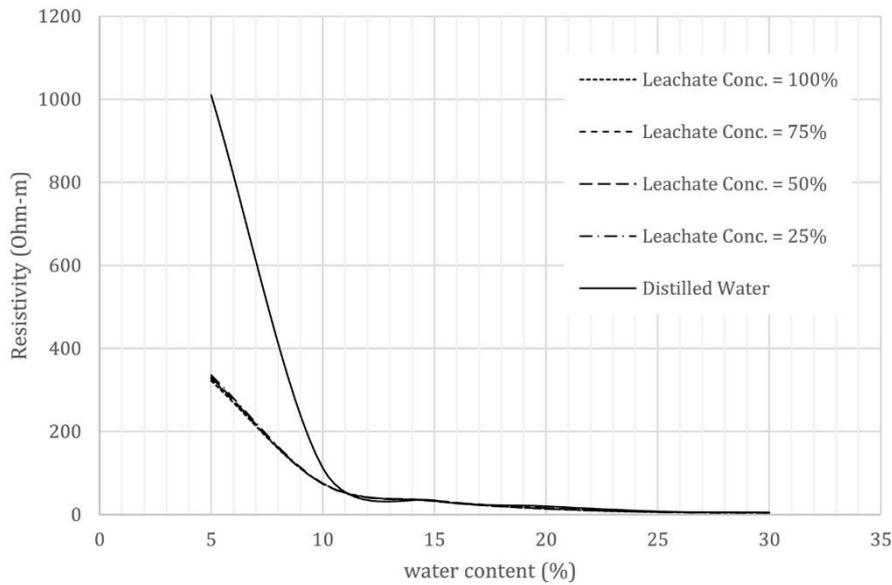
Em cada experiência, foi utilizada uma solução combinada com água destilada e lixiviado residual. Devido ao efeito intenso do lixiviado puro na resistividade do solo, ou seja, uma diminuição súbita da resistividade do solo quando se introduzem pequenas quantidades de lixiviado puro, procedeu-se à diluição do lixiviado para observar as alterações passo a passo. Para tal, utilizou-se água destilada numa base volumétrica, tendo sido seleccionadas quatro concentrações de lixiviado. A condutividade elétrica, a CQO, a salinidade, o TDS (total de sólidos dissolvidos) e o pH das soluções foram medidos antes de serem misturados com as amostras de solo, o que foi resumido na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades químicas das soluções de lixiviados (Ansari et al., 2021).

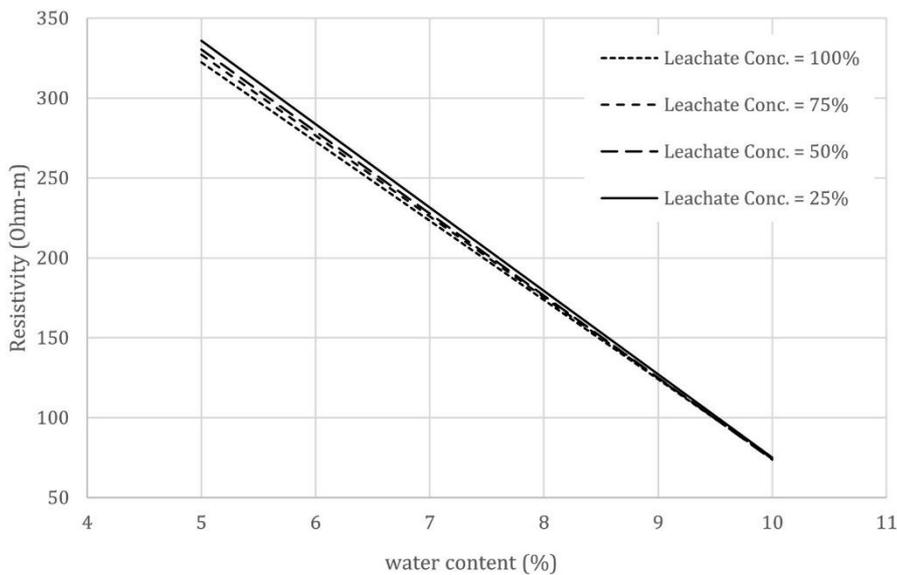
| Conc (%) | T (°C) | pH | CE (mS/cm) | Salinidade (g/l) | Resistividade (Ω.cm) | TDS (g/l) | CQO (mg/l) |
|----------|--------|-----|------------|------------------|----------------------|-----------|------------|
| 100 | 29.0 | 5.5 | 19.4 | 11.5 | 51.6 | 11.4 | 12.3 |
| 75 | 29.0 | 5.8 | 18.2 | 9.1 | 53.6 | 10.2 | 92.0 |
| 50 | 29.0 | 6.2 | 16.5 | 5.8 | 57.2 | 9.8 | 6148.0 |
| 25 | 29.0 | 6.7 | 15.9 | 2.9 | 59.4 | 8.6 | 3074.0 |

As experiências foram realizadas em duas partes. Na primeira parte (grupo A), foi investigado o efeito das concentrações de contaminantes na resistividade elétrica e, na segunda parte (grupo B), foi investigado o efeito da tensão CC injetada. Foi usado um solo do tipo SP-SC para todas as experiências com teores de humidade até um máximo de 30% e variações na concentração de lixiviados. No grupo B foram variadas as voltagens de injeção de corrente elétrica (32V, 18V e 4,5V)

Na Figura 3.6 mostra-se o gráfico da resistividade do solo versus teor de humidade para experiências realizadas com diferentes percentagens de lixiviado e o gráfico da resistividade do solo versus teor de humidade entre 5 e 10%. Na Figura 3.7 mostra-se o gráfico da resistividade do solo versus concentração de lixiviado para experiências com a) 32 V b) 18 V e c) 4,5 V de tensão de entrada.



(a)



(b)

Figura 3.6 - Gráficos da resistividade do solo versus teor em água: a) para experiências com diferentes percentagens de lixiviado; b) para teor em água entre 5 e 10% (Ansari et al., 2021).

Com as experiências realizadas foi possível verificar que a resistividade aparente do solo diminuiu à medida que a quantidade de mistura de água e lixiviado aumentou no corpo do solo. O preenchimento dos poros do solo com a solução de lixiviado e a formação de pontes de ligação foi considerado o mecanismo mais importante de condução da corrente elétrica. O elevado teor de humidade e a existência de lixiviado como fluido dos poros permitiram que a corrente elétrica se movesse livremente em direção aos eléctrodos. A cerca de 13% do teor de humidade, que é igual ao limite plástico do solo, ocorreu uma queda na taxa de redução da resistividade com a adição do teor

de humidade. Para um teor de humidade inferior ao limite plástico do solo, a resistividade diminuiu acentuadamente, enquanto que, para além desse ponto, o declive da redução da resistividade diminuiu para cerca de 0,1 vezes.

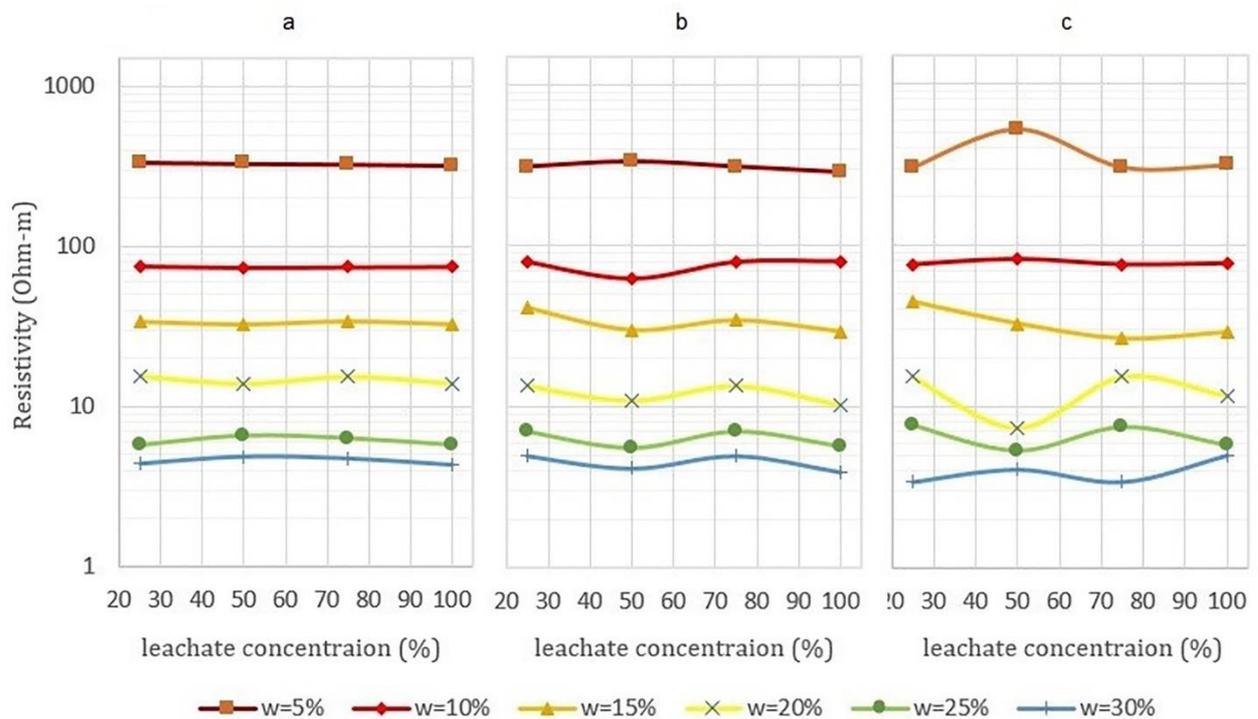


Figura 3.7 - Gráfico da resistividade do solo versus concentração de lixiviado para experiências com a) 32 V b) 18 V e c) 4,5 V de tensão de entrada (Ansari et al., 2021).

Foi igualmente possível verificar que para baixos teores de fluido dos poros, ou seja, abaixo do PL do solo, a existência de lixiviado causou uma queda significativa na resistividade em comparação com a água destilada. Mas para além da PL do solo, o mecanismo eletrolítico de condução de corrente tornou-se dominante e a existência de lixiviado ou de água destilada tem o mesmo efeito na resistividade do solo. Esta é uma conclusão importante desta investigação, que pode ser útil na interpretação dos resultados do estudo da resistividade elétrica para localizar áreas poluídas por lixiviados em trabalhos práticos de campo de engenharia em torno de aterros sanitários ou lixeiras.

Por último foi possível constatar que, à medida que a tensão aumenta, o gráfico dos valores de resistividade em função do teor de humidade apresenta menos flutuações. Parece que, a baixas tensões, a corrente é muito sensível às mais pequenas alterações no ambiente de passagem, incluindo a condução mínima dentro da amostra.

4 Ondas Vp e Vs *versus* porosidade, teor em água e teor em argilas: casos de estudo experimentais

4.1 Correlações entre a velocidade das ondas Vp e Vs e a porosidade e permeabilidade de terrenos compostos por arenitos

Na avaliação de reservas de combustíveis fósseis é necessário determinar com exatidão certas propriedades petrofísicas, como a porosidade e a permeabilidade das rochas reservatório e as propriedades mecânicas das rochas a serem envolvidas no futuro processo de extração. A aplicação de ondas sísmicas é muito útil para a determinação da porosidade e permeabilidade de amostras de arenito, especialmente quando as características da rocha são desconhecidas (Hamada & Joseph, 2020; Knackstedt et al., 2005; Sethi, 1981). Uma das relações simples entre VP e porosidade é proposta por Wang et al. (2019), em que a velocidade acústica é usada para estimar a porosidade [Dobrin e Savit (1988)] através da seguinte equação:

$$\frac{1}{V_P} = \frac{\emptyset}{V_{fluid}} + \frac{1-\emptyset}{V_{solid}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

No entanto, e apesar de a Eq. 4.1 ter sido aplicada em vários estudos, sabe-se que os resultados obtidos superestimaram ou subestimaram o valor da porosidade. Isto deve-se ao facto de a equação ser aplicável em certos contextos muito específicos.

Neste estudo, as velocidades das ondas sonoras foram medidas com recurso à técnica de ultrasons em diferentes amostras de arenitos, tendo sido alcançadas boas correlações entre as velocidades das ondas sonoras (VP e VS) e certas propriedades petrofísicas e mecânicas, destacando-se aqui a porosidade e a permeabilidade.

A velocidade das ondas de compressão é mais baixa em rochas mais porosas devido ao efeito dos vazios. Comparativamente, as ondas possuem maiores velocidades em meios mais compactados (rochas pouco porosas) que são menos compressíveis. Uma energia de onda mais elevada ao propagar-se no meio rochoso induz vibrações mais acentuadas nas partículas de rocha e nos seus grãos adjacentes, aumentando assim as velocidades das ondas. Os resultados experimentais da relação

entre a velocidade da onda sísmica (V_p) e a porosidade, apresentados na Fig. 4.1, mostram um coeficiente de representatividade elevado, $R^2 = 0,9754$, que segue a seguinte equação:

$$V_p = -105.43\phi + 3906.1 \quad (\text{Equação 4.2})$$

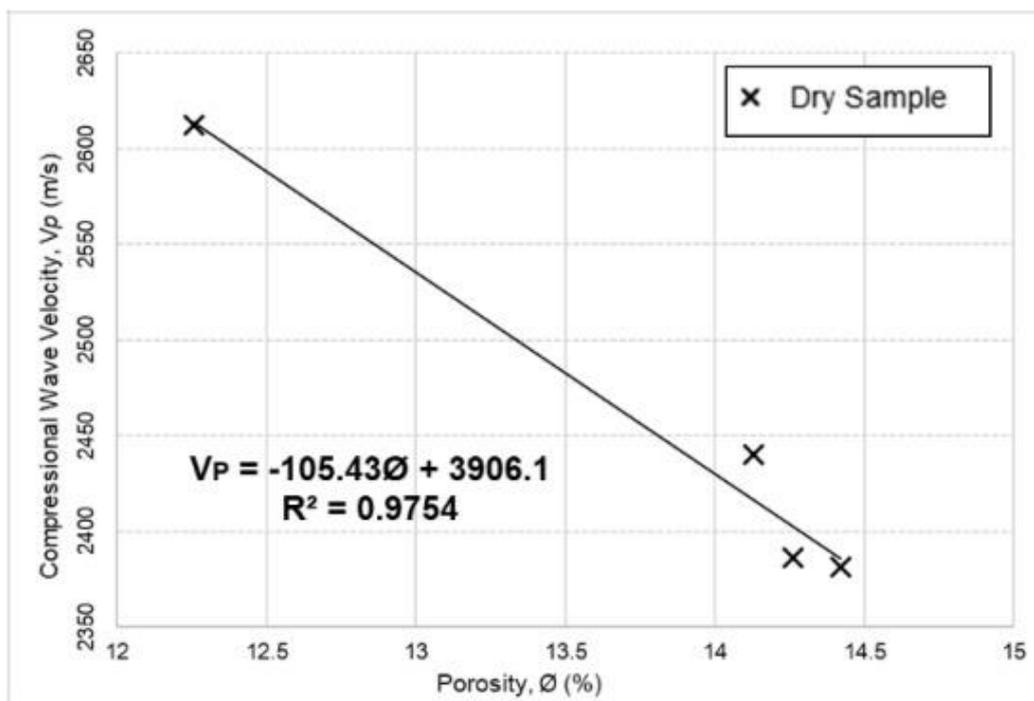


Figura 4.1 - Velocidade de onda V_p versus porosidade (Hamada & Joseph, 2020).

Verifica-se uma tendência semelhante entre a velocidade das ondas V_s e a porosidade (ϕ) conforme mostrado na Figura. 4.2. Neste caso o coeficiente de representatividade é de $R^2 = 0,678$, ou seja, não tão significativo como para o caso das ondas V_p sendo a relação dada pela equação:

$$V_s = -49.564\phi + 1679.8 \quad (\text{Equação 4.3})$$

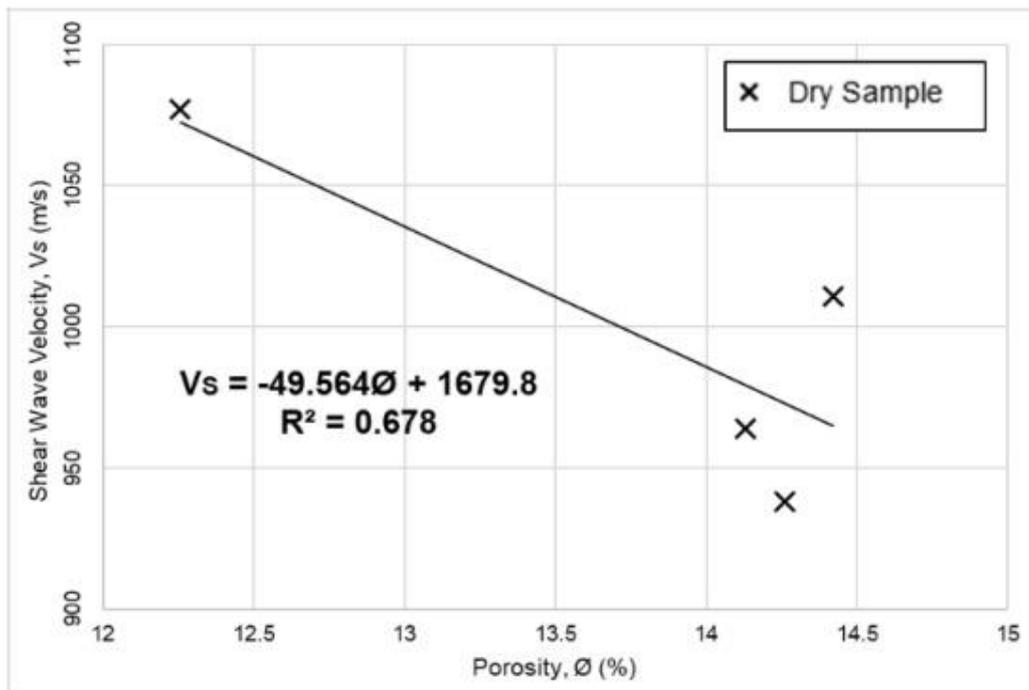


Figura 4.2 - Velocidade de onda de corte, Vs, versus porosidade (Hamada & Joseph, 2020).

Muito poucos estudos foram realizados considerando o efeito da permeabilidade na velocidade das ondas Vp e Vs. (Kassab & Weller, 2015) ilustraram que não há uma tendência clara entre Vp e permeabilidade, sugerindo assim que o efeito da permeabilidade por si só é insignificante. Por outras palavras, o efeito da permeabilidade na velocidade das ondas P é mínimo em comparação com o efeito da porosidade e do teor em argila.

Os resultados encontrados para as ondas Vp relativamente à permeabilidade K constam na Fig. 4.3, e apresentam uma correlação favorável embora com um valor de regressão de $R^2 = 0,6163$. Destes resultados, pode-se inferir que, quanto maior for a permeabilidade, menor será a Vp. A relação entre Vp e K apresentam um decréscimo tendencialmente linear de acordo com a equação:

$$V_p = -3.4976k + 2604.4 \quad (\text{Equação 4.4})$$

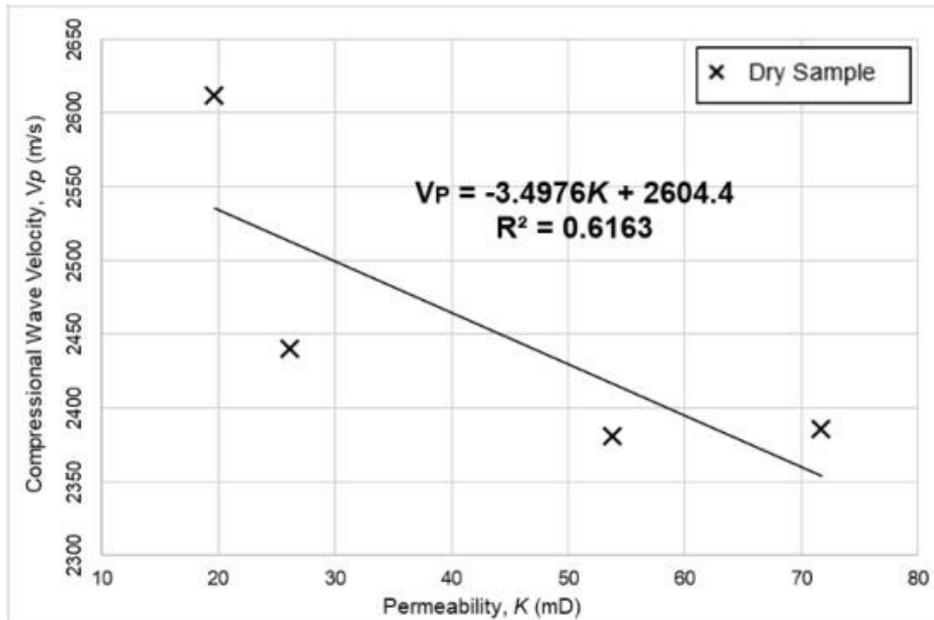


Figura 4.3 - Vp versus permeabilidade (K), (Hamada & Joseph, 2020).

4.2 Correlações entre a velocidade das ondas acústicas e o grau de saturação de terrenos areníticos

Sabe-se que as propriedades dos fluidos de saturação (gás, óleo ou água) têm maior efeito sobre as velocidades de compressão do que sobre as velocidades de cisalhamento. As velocidades das ondas de compressão V_p são mais elevadas quando a rocha está saturada em água do que quando está seca ou saturada em gás. Para as ondas de cisalhamento V_s , o comportamento é geralmente oposto, com velocidades de cisalhamento mais elevadas no caso seco ou saturado em gás do que no caso saturado em água (Toksoz et al., 1976; Si et al., 2016).

Este estudo evidencia as variações das velocidades sob 0% de saturação em água (amostra de testemunho de sondagem seca) e para amostras totalmente saturadas (grau de saturação de 100%) em água. Para este efeito, foram medidas as velocidades das ondas de compressão V_p e a velocidade da onda de cisalhamento V_s sob diferentes graus de saturação em água, 0%, 30%, 45%, 65% e 100%, para amostras de testemunho de sondagem compostas por arenitos.

Genericamente, as velocidades das ondas sísmicas medida para todas as amostras apresentaram um perfil semelhante, em que a velocidade das ondas aumenta e depois diminui com o aumento da saturação de água, enquanto o rácio das velocidades V_p/V_s diminui e depois aumenta com o aumento da saturação de água. Como ilustrado na Fig. 4.4, a exatidão de resultados alcançada tanto para as ondas V_p como para as ondas V_s é elevada, $R^2 = 0,8853$ e $R^2 = 0,8$, respetivamente. A 0%-

30% de saturação de água, as velocidades das ondas sísmicas medidas mostram uma tendência crescente.

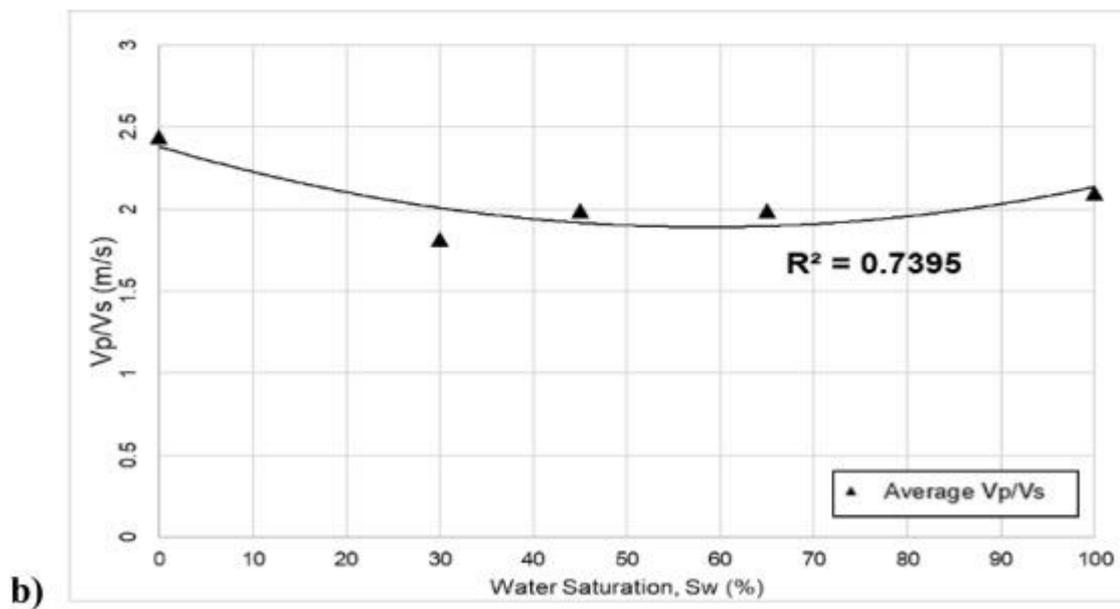
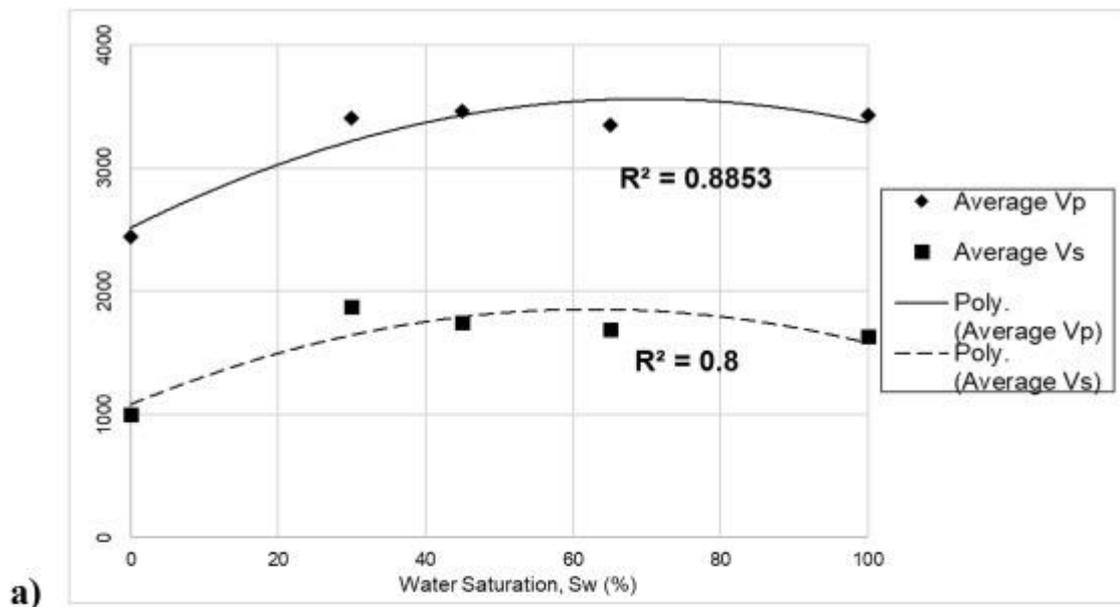


Figura 4.4 - (a) Valores médios das medições de Vp e Vs em função do grau de saturação em água e (b) rácios de valores médios VP/VS em função do grau de saturação em água (as amostras de arenito) (Hamada & Joseph, 2020).

4.3 Efeito nas ondas Vp dos minerais das argilas e do seu grau de saturação em água em enchimentos de falha

A compreensão da propagação de ondas sonoras através dos sistemas de fraturas em maciços rochosos é de grande importância em estudos e distintos tipos de projetos de engenharia. São diversos os estudos em que se mostra que o comportamento das ondas através dos sistemas de fraturação é fortemente afetado pelas propriedades dos materiais de preenchimento. No entanto, a forma como os minerais de argilas presentes nos materiais de preenchimento e o seu grau de saturação afetam as características destas ondas é ainda pouco conhecida. Neste estudo, foram realizados ensaios por ultrassons em rochas preenchidas com caulinite e bentonite para investigar o papel dos minerais argilosos e do grau de saturação em água no comportamento elástico das ondas P em fraturas de rocha com preenchimento. Foram considerados dois solos argilosos bem representativos em termos de composição em caulinite e bentonite, para produzir uma série de amostras de preenchimento com diferentes graus de saturação de água. A caulinite e a bentonite foram extraídas respectivamente do sudoeste de Inglaterra, no Reino Unido, e da zona de Neubrandenburg, na Alemanha. As amostras de rocha fraturada foram preparadas utilizando-se gabros negros de Shanxi (China) devido à sua excelente homogeneidade e isotropia.

Os resultados das velocidades da onda P medidas nas várias amostras de rocha com preenchimentos distintos e diferentes graus de saturação são apresentados na Figura 4.5.

Pode-se observar que as variações na velocidade das ondas P na rocha são semelhantes às variações na velocidade da onda P através das correspondentes fraturas preenchidas com solo argiloso, o que estará a evidenciar que as fraturas individuais preenchidas com solo argiloso dominam o comportamento da velocidade das ondas P nos maciços rochosos. A Figura 4.5 também mostra que a dependência da velocidade das ondas P relativamente ao grau de saturação nos preenchimentos de falhas com caulinite tem comportamento aproximadamente oposto relativamente aos casos de preenchimento com bentonite. Este comportamento é também evidenciado pelos resultados apresentados na Figura 4.6 que mostram os rácios de transmissão das ondas P (T) através de amostras de rocha com fraturas em função do grau de saturação de água. TKS e TBS representam respectivamente os rácios de transmissão através das amostras de rocha fraturadas respectivamente caulinite e bentonite.

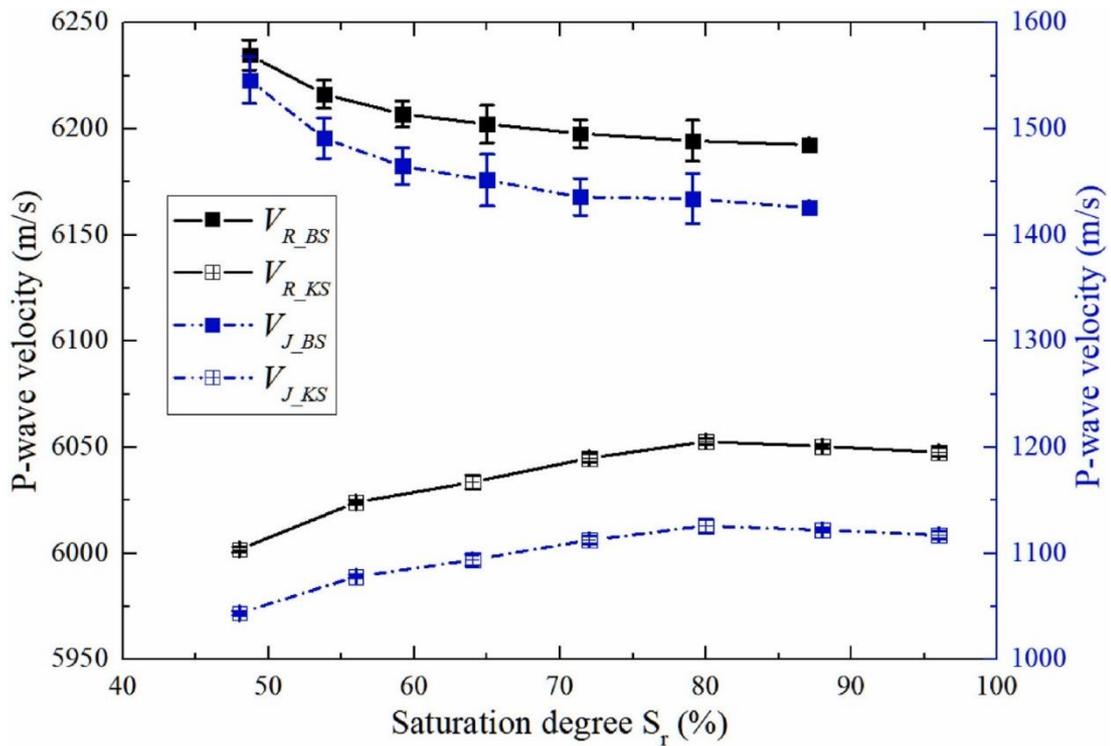


Figura 4.5 - Velocidades das ondas P em fraturas de rocha preenchidas com solo argiloso e na rocha pr. Dita sem fraturação em função do grau de saturação de água. VJ – velocidade Vp nas fraturas (juntas), VR – velocidade Vp na rocha não fraturada, KS – Caulinite e BS – Bentonite (Yang et al 2023).

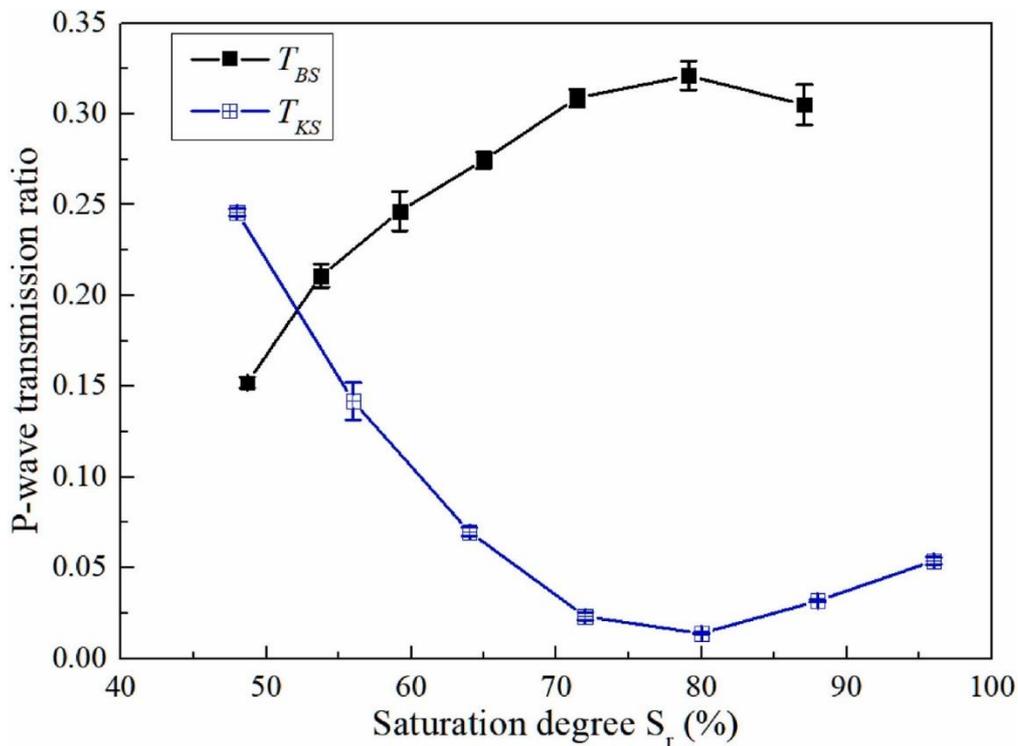


Figura 4.6 - Rácios de transmissão das ondas P (T) através de amostras de rocha com fraturas em função do grau de saturação de água. TKS e TBS representam respetivamente os rácios de transmissão através das amostras de rocha fraturadas respetivamente caulinite e bentonite (Yang et al 2023).

O rácio de transmissão das ondas P para fraturas preenchidas por caulinite diminui primeiro e depois aumenta com o aumento progressivo do grau de saturação da água, enquanto as fraturas preenchidas com bentonite apresentam uma tendência oposta. Isto sugere que os minerais argilosos dos preenchimentos governam a dependência do grau de saturação na transmissão das ondas P através dos sistemas de fraturas. Na maioria das circunstâncias de saturação (i.e., acima de ~52% para este estudo), a razão de transmissão da onda P para as fraturas de rocha preenchidas com bentonite é mais significativa do que para as fraturas de rocha preenchidas com caulinite, indicando que preenchimentos com caulinite tendem a atenuar mais a energias das ondas Vp.

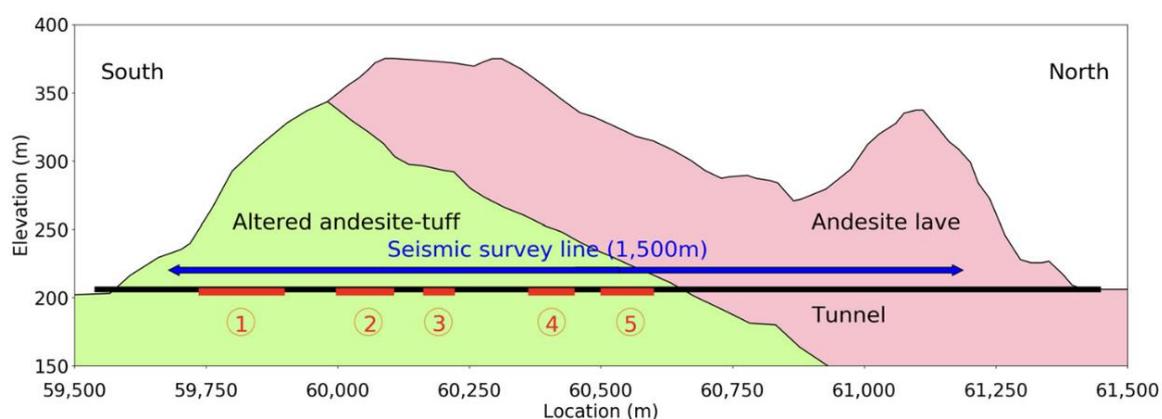
Os resultados dos ensaios mostram que o grau de saturação em água dos preenchimentos e as composições mineralógicas têm efeitos combinados nas assinaturas das ondas P. Em particular, nos casos em que as fraturas que se encontram preenchidas com caulinite, a velocidade das ondas P começa por aumentar diminuindo depois ligeiramente com o aumento do grau de saturação em água. Por seu turno, nos preenchimentos de fraturas com bentonite, um aumento na saturação em água provoca diminuições graduais na velocidade.

5 Resistividade elétrica e ondas sísmicas V_p e V_s versus porosidade, teor em água e teor em argilas: casos de estudo no campo

Ao longo dos últimos anos é notável o crescimento na utilização de métodos geofísicos não-intrusivos para estudos de várias propriedades do subsolo com o objetivo de aprender mais. Parâmetros hidráulicos como a porosidade, teor em água e teor em argila têm normalmente sido estudados usando métodos intrusivos o que significa a criação de poços de sondagens, daí surgiu a necessidade de estudar esses mesmo parâmetros usando métodos geofísicos de superfície sem a necessidade de criar poços de sondagens. Diversas literaturas e pesquisas já foram executadas e recentemente podemos notar o surgimento de novas literaturas com maior destaque na determinação da porosidade usando resistividade elétrica e refração sísmica.

Em Izumotani et al. (2020), um estudo usando a refração sísmica foi conduzido num túnel abandonado em Hokkaido no Japão. Esse túnel tem um comprimento de 1900 m. O objetivo do estudo era estimar propriedades das rochas como porosidade, teor em argila e saturação em água usando uma nova interpretação das ondas P (V_p) e ondas S (V_s) baseadas em teorias anteriores, como a de Gassmann.

O local de estudo possuía uma litologia composta por andesito. Porém, o andesito da parte sul era mais fraco e alterado em comparação com o andesito da parte mais a norte que eram mais rígidos. Para o levantamento sísmico por refração sísmica, uma linha de 1500 m de comprimento foi instalada no túnel (Figura 5.1). Uma máquina de impacto hidráulico foi utilizada como fonte das ondas sísmicas e geofones de três componentes foram instalados em intervalos de 6 m e 3 m foram usados para colher os dados.



Verde (andesito fraco); Rosa (andesito rígido); Preto (túnel); Azul (linha de levantamento sísmico)

Figura 5.1 - Esquema da instalação da linha de levantamento por refração sísmica no túnel (Izumotani et al., 2020)

O tempo de propagação das ondas P e S sofreram inversão para poder criar uma tomografia da área de estudo baseando-se na velocidade. Foram criadas tomografias das ondas P (V_p), ondas S (V_s) e V_p/V_s . Dessas tomografias foram derivadas secções transversais de Porosidade, Saturação em Água e Teor em Argila com as respectivas estimações.

Para o cálculo da porosidade, teor em argila, e saturação em água foram usadas as seguintes equações:

$$\Phi = -a - \sqrt{a^2 + \frac{D_m}{D_t - 1}} \quad (\text{Equação 5.1})$$

$$a = \frac{D_m}{2(D_f S_w + D_g(1 - S_w))} - 1 \quad (\text{Equação 5.2})$$

$$L = G_U - G_I \quad (\text{Equação 5.3})$$

$$L_a = G_U - G \quad (\text{Equação 5.4})$$

$$V_{clay} = \frac{L_a}{L} \quad (\text{Equação 5.5})$$

$$S_w = \frac{L_v}{L} \quad (\text{Equação 5.6})$$

As equações 5.1 e 5.2 são usadas no cálculo da porosidade, as equações 5.3 a 5.5 são usadas no cálculo do teor em argila e a equação 5.6 para o cálculo da saturação em água.

Os autores concluíram que as propriedades e parâmetros estimados utilizando sísmica de refração podem ser usados para interpretar fenómenos como deformação e dispersão de água no subsolo - Figura 5.2. Também, concluíram que este procedimento pode ser importante para vários ramos da engenharia pois permite modelar o subsolo e, através das ondas sísmicas, avaliar propriedades das rochas tais como porosidade, teor em água e teor em argilas, uma vez que elas auxiliam na identificação de cavidades, fraturas e fluidos nos poros. Por fim, um dos grandes benefícios da utilização dos métodos de refração sísmica para obter os parâmetros, é diminuir a utilização de outros métodos de estudos, nomeadamente de métodos invasivos, o que se traduz numa economia dos custos financeiros, bem como do tempo de execução do trabalho de prospeção.

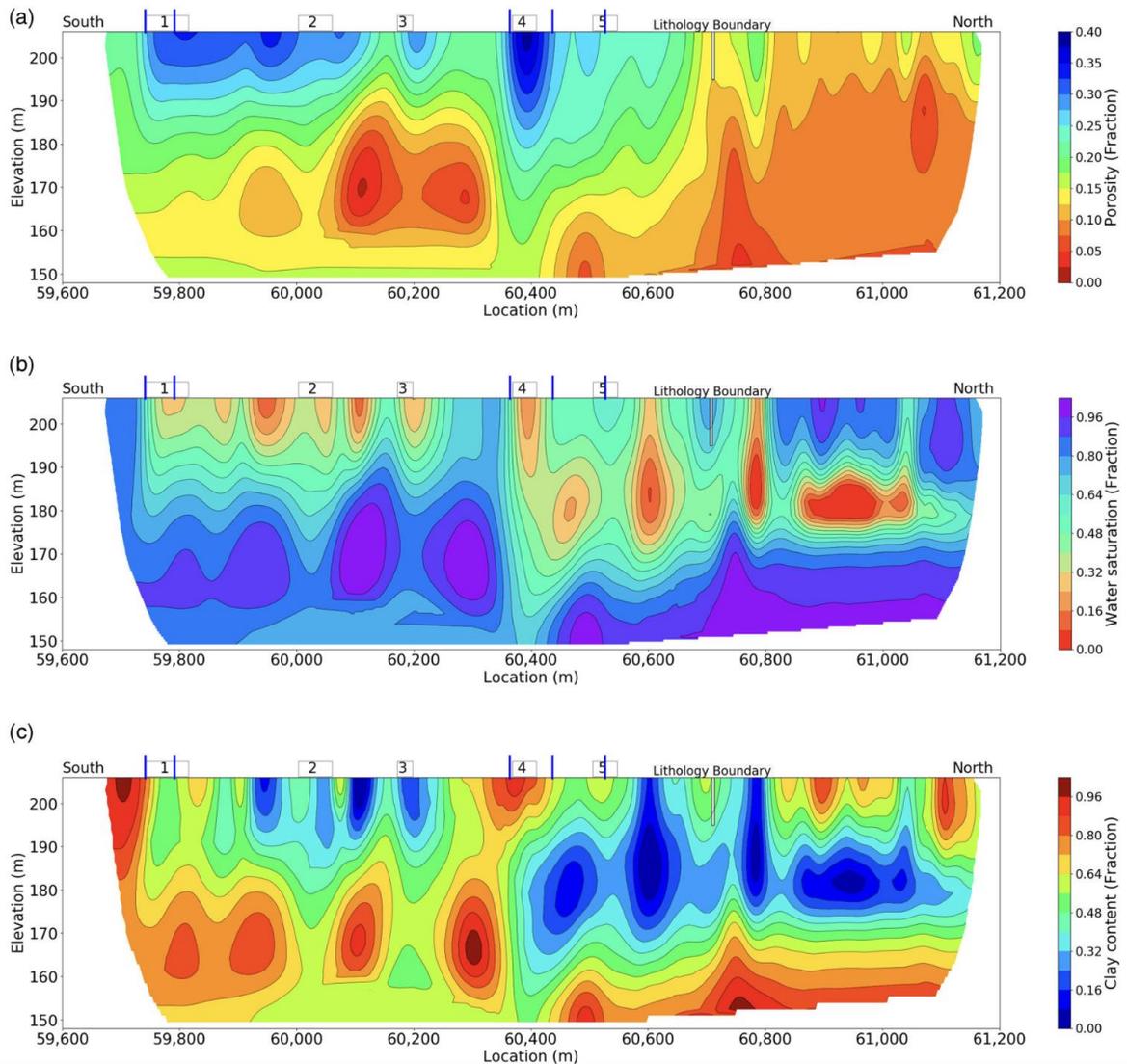


Figura 5.2 - As seções transversais das propriedades das rochas estimadas pelo procedimento proposto. (a), (b), (c) mostram porosidade, saturação de água e teor em argila, respetivamente. As zonas 1 a 5 mostram os locais de deformação e linhas verticais azuis marcam os pontos de vazamento de água (Izumotani et al., 2020).

Sandra et al. (2021), estimaram porosidades em rochas usando refração sísmica. Os estudos foram conduzidos na vila de Bora no distrito de Sigi, na província de Sulawesi Central na Indonésia. O estudo tinha como objetivo determinar a distribuição da porosidade nas rochas de um local geotérmico.

Seis linhas de levantamento sísmico de refração foram instaladas e cada uma dessas linhas tinha um comprimento de 33 m. Como fonte das ondas sísmicas foi utilizado um martelo pesado. Essas ondas sísmicas foram gravadas por 12 geofones com equidistância de 3 m.

Para a correlação entre a velocidade e a porosidade foram usadas as seguintes equações empíricas:

$$V_p = 7.121 - 0.227\Phi_c \text{ (com Pressão de 10 MPa) (eq. 5.7)}$$

$$V_p = 8.227 - 0.253\Phi_c \text{ (com Pressao de 100 MPa) (eq. 5.8)}$$

onde V_p é a velocidade da onda sísmica e Φ_c é a porosidade crítica.

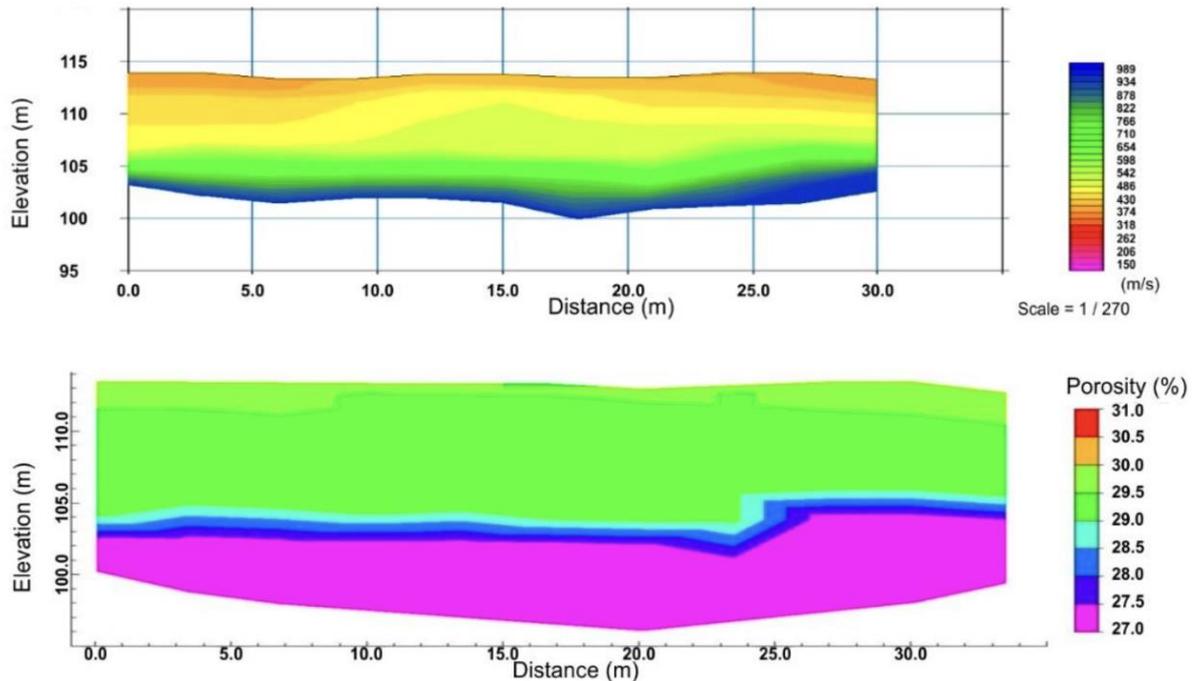


Figura 5.3 - Perfil transversal representando a velocidade sísmica (topo); e perfil transversal representando a velocidade sísmica (inferior), (Sandra et al, 2021)

Baseando nos dados obtidos nos levantamentos por refração sísmica foi concluído que as velocidades das ondas sísmicas aumentam com a profundidade - Figura 5.3, o que está em concordância com a suposição que afirma que as rochas no subsolo se tornam mais compactadas com o aumento do recobrimento. Ou seja, a sua compactidade aumenta com o aumento da profundidade. Quanto à porosidade, os dados obtidos sugerem que as porosidades das rochas estão inversamente relacionadas com a velocidade das ondas sísmicas, o que significa que quanto maior for a porosidade, a rocha se torna menos coesa e compacta o que diminui a velocidade de propagação das ondas.

Steiner et al. (2022), conduziram um estudo onde combinaram a resistividade elétrica e a refração sísmica para poder determinar a porosidade e o teor em água em um aterro. Os estudos foram levados a cabo no aterro de Heferlbach, em Viena de Áustria. Para o levantamento por refração sísmica foram usados 24 geofones que gravaram as componentes verticais das ondas sísmicas. Esses geofones foram instalados com 2 m de equidistância. Para levantamento por resistividade elétrica, foram usados 64 elétrodos que foram instalados com 1 m de distância entre si.

As seguintes equações foram usadas no estudo:

$$\Phi = 1 - f_r = 1 - f_w + f_a \quad (\text{eq. 5.9})$$

$$WC = \frac{f_w \rho_{water}}{f_r \rho_{solid} + f_w \rho_{water}} \quad (\text{eq. 5.10})$$

A primeira equação (5.9) foi usada para computar a porosidade, onde Φ é a porosidade, f_r é o volume das rochas/sólidos no aterro, f_w é o volume do teor em água no aterro e f_a é o volume do teor de ar no aterro. Por sua vez, a equação (5.10) foi usada para computar o teor em água (*water content* - "WC") onde ρ_{water} é a densidade da água, com o valor de 997 kg/m³, e o ρ_{solid} é a densidade dos sólidos, com o valor de 1200 kg/m³. Os resultados incluem a Figura 5.4.

No final dos estudos, os autores concluíram que usar a combinação dos métodos de resistividade elétrica e da refração sísmica reduz a incerteza durante a interpretação dos resultados obtidos no estudo o que conseqüentemente torna o estudo/investigação mais confiável. Porém, ainda sugeriram que estudos conduzidos eles devem ser executados em aterros diferentes para estudar a sua fiabilidade.

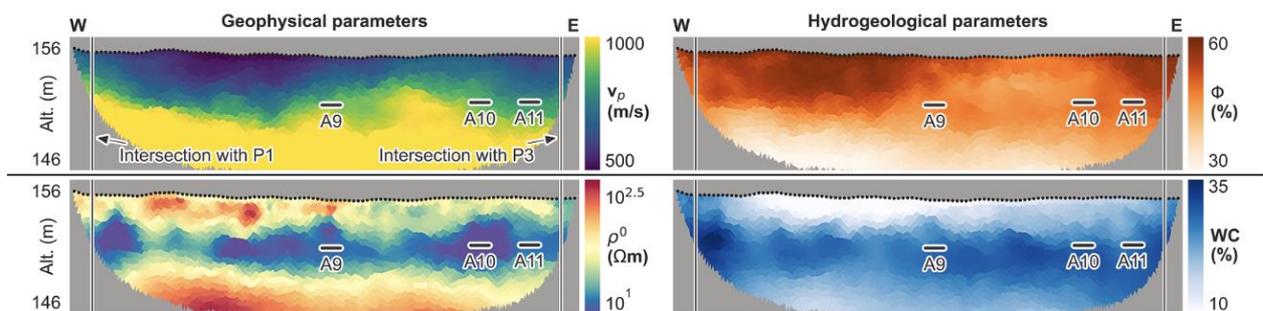


Figura 5.4 - Parâmetros geofísicos (esquerda), parâmetros hidráulicos (direita). A velocidade sísmica foi usada para modelar a porosidade e a resistividade elétrica foi usada para modelar o teor em água (Steiner et al, 2022).

Em Pasquet et al. (2015), o levantamento sísmico de refração foi usado para estimar diferentes níveis do nível freático. Nesse estudo os autores combinaram ondas de superfícies P e S. Os estudos foram conduzidos na bacia de Orgeval, a 70 km de Paris, perto de uma localidade chamada Les Granges. Antes da execução dos estudos do nível freático usando a sísmica de refração, o local foi delineado usando a resistividade elétrica o que auxiliou na caracterização do perfil estratigráfico do local.

A aquisição dos dados usando a sísmica de refração foi feita durante dois períodos, um com o nível freático alto e outro com o nível freático baixo. Foi usado uma configuração de aquisição múltipla com 72 geofones com espaçamento de 0,5 m entre si, o que fez um perfil de aquisição de

35,5 m. Uma marreta de 7 kg foi usada para gerar as ondas sísmica e 73 tiros foram gravados ao longo do perfil (Figura 5.5).

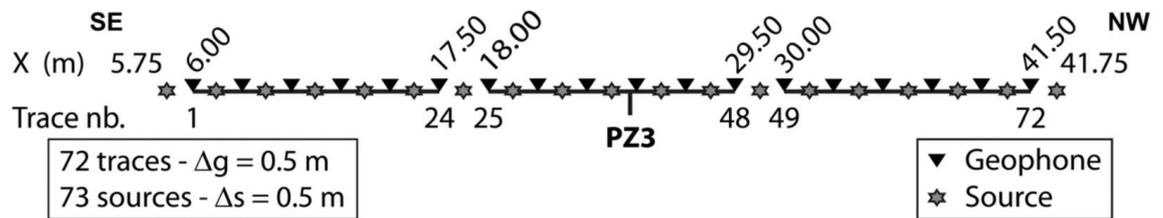


Figura 5.5 - Ilustração da linha de aquisição onde Δg é o intervalo entre os geofones e Δs é o intervalo entre os tiros/fontes (Pasquet et al, 2015).

Após a aquisição e estudo dos dados, os autores concluíram que a utilização do levantamento sísmico ainda não é suficiente para determinar o nível freático, pois ainda precisa do auxílio de outros estudos complementares, como a utilização de piezômetros e resistividade elétrica. Porém, é um método promissor devido a sua eficiência em termos de tempo e custos de execução.

Imani et al. (2021), combinaram a resistividade elétrica e a sísmica de refração para estudar e caracterizar um deslizamento de terra. O estudo teve lugar na cidade de Hangzhou, na província de Zhejiang que fica ao sudeste da China. A zona de Hangzhou é caracterizada por três unidades geológicas que são as rochas clásticas e carbonatadas do Paleozoico, as rochas vulcânicas do Jurássico superior, e os sedimentos empíricos e fluviolacustres do Quaternário.

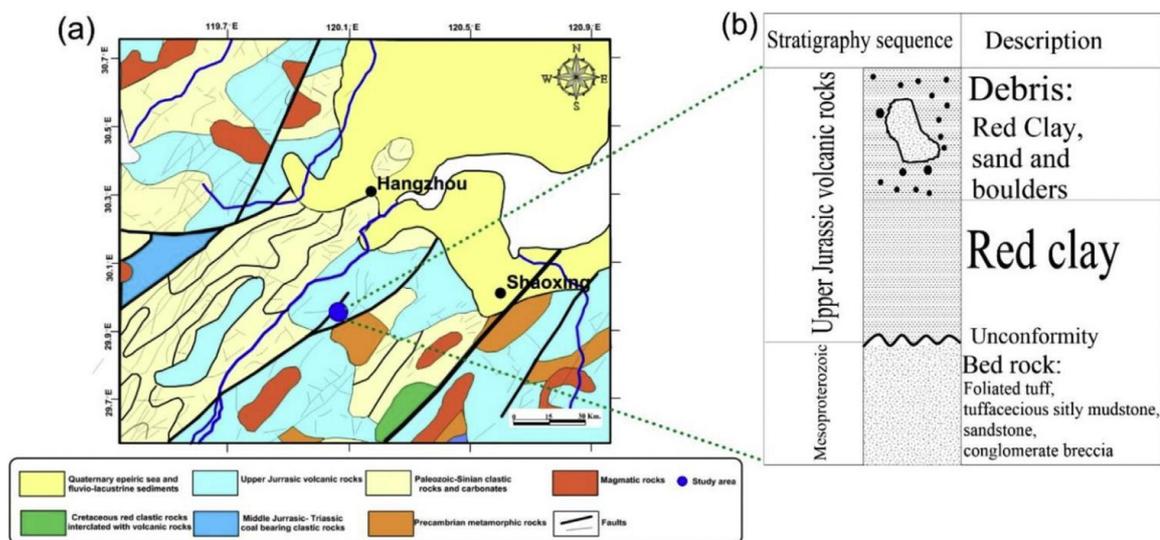


Figura 5.6 - (a) Mapa geológico e principais falhas (Ma et al., 2015); (b) Coluna litostratigráfica da área de estudo e envolvente aos furos. (Imani, P. et al, 2021).

Os dados do local (Figura 5.6) foram adquiridos usando a resistividade elétrica e a sísmica de refração. Para a resistividade elétrica foi usado a configuração de Wenner e foram executados quatro perfis de levantamento, onde dois deles tiveram o comprimento de 56 m, um com 88 m e outro com

80 m. Os elétrodos foram instalados a uma distância de 1 m entre si. Por sua vez, para a sísmica de refração foram executados, também, quatro perfis com a mesma localização e comprimento dos perfis de resistividade elétrica, sendo dois com 56 m, um com 88m e outro com 80 m. Foi utilizado um sismógrafo de 24 canais e uma marreta de 9 kg como fonte das ondas sísmicas.

Os autores concluíram que as propriedades de um deslizamento de terra, como o teor em argila e fraturas, podem ser monitorizadas usando a combinação dos métodos geofísicos da resistividade elétrica e sísmica de refração, o que também diminui a quantidade de pontos de observação necessários abrir no local. Comparando os modelos obtidos nos métodos geofísicos aplicados no estudo, deu para notar que a sísmica de refração não é tão efetiva em definir detalhes estruturais do subsolo quanto a resistividade elétrica. Porém, a sísmica de refração pode definir a geometria do deslizamento de terra. Portanto, a integração dos dois métodos (resistividade elétrica e sísmica de refração) pode ajudar a suprir as deficiências e ambiguidades de cada um daqueles métodos.

6 CONCLUSÕES

Os métodos de resistividade elétrica e de sísmica de refração para estudar o subsolo existem há cerca de uma centena de anos, mas ainda são pouco utilizados face às vantagens que proporcionam no estudo de características dos terrenos para fins de engenharia. Após a pesquisa e revisão de alguma literatura temática, foi possível verificar que, apesar dos métodos geofísicos de superfície serem muito promissores, ainda há poucos exemplos publicados de casos de estudos experimentais de laboratório e de campo, na área da engenharia, para determinação da porosidade e teor em água, sendo mais utilizados para fins de caracterização geométrica dos sítios estudados tais como detetar a espessura das camadas ou identificar os seus limites.

A sísmica de refração pode ser importante para vários ramos da engenharia pois permite modelar o subsolo e, através das ondas sísmicas, avaliar propriedades das rochas tais como porosidade, teor em água e teor em argilas, uma vez que elas auxiliam na identificação de cavidades, fraturas e fluidos nos poros. Os resultados dos ensaios que foram selecionados como casos de estudo mostram que o grau de saturação em água dos preenchimentos de fraturas e as respetivas composições mineralógicas têm efeitos combinados nas assinaturas das ondas P. Em particular, nos casos em que as fraturas se encontram preenchidas com caulinite, a velocidade das ondas P começa por aumentar, diminuindo depois ligeiramente com o aumento do grau de saturação em água. Por seu turno, nos enchimentos de fraturas com bentonite, um aumento na saturação em água provoca diminuições graduais na velocidade. Estes estudos indicam que um dos grandes benefícios da utilização dos métodos de sísmica de refração para obter parâmetros intrínsecos às unidades, é diminuir a utilização de outros métodos de estudos, nomeadamente de métodos invasivos, o que se traduz numa economia dos custos financeiros, bem como do tempo de execução do trabalho de prospeção.

Baseando nos dados obtidos nos levantamentos por refração sísmica foi concluído que as velocidades das ondas sísmicas aumentam com a profundidade - Figura 5.3, o que está em concordância com a suposição que afirma que as rochas no subsolo se tornam mais compactadas com o aumento do recobrimento. Ou seja, a sua compacidade aumenta com o aumento da profundidade. Quanto à porosidade, os dados obtidos sugerem que as porosidades das rochas estão inversamente relacionadas com a velocidade das ondas sísmicas, o que significa que quanto maior for a porosidade, a rocha se torna menos coesa e compacta o que diminui a velocidade de propagação das ondas.

Verifica-se que, por si só, o uso da sísmica de refração ainda não é suficiente para determinar adequadamente o nível freático, pois ainda precisa do auxílio de outros estudos complementares, tais como o recurso a piezómetros ou à resistividade elétrica.

No entanto, estes estudos geofísicos ainda precisam de ser complementados, quer por ensaios de laboratório, quer por outros métodos de prospeção, em particular os diretos de prospeção mecânica.

Os estudos analisados permitem também concluir que a utilização da combinação dos métodos de resistividade elétrica e da refração sísmica reduz a incerteza durante a interpretação dos resultados obtidos o que, conseqüentemente, torna a investigação mais confiável e a sua validação ulterior por métodos mecânicos menos dispendiosa e demorada.

Futuramente, é ainda necessário continuar a investigar a obtenção e padronização de equações para a correlação das velocidades das ondas sísmicas de refração (ondas P e S) e dos valores da resistividade elétrica com os parâmetros intrínsecos das rochas e dos solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anomohanran, O. (2013). Seismic refraction method: A technique for determining the thickness of stratified substratum. *American Journal of Applied Sciences*, 10, 857-862. doi:10.3844/ajassp.2013.857.862.

Ansari, S., Norooz, R., Zeynolabedin, A., Foadi, H., & Ghiassi, R. (2021). Experimental investigation of correlations between electrical resistivity, moisture content and voltage values for leachate contaminated clayey sand. *Journal of Applied Geophysics*, 193, 104391. doi:10.1016/j.jappgeo.2021.104391

Bell, F. G. (2007). *Engineering geology* (2nd ed.). Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

Benson, R. C., Glaccum, R. A., & Noel, M. R. (1984). Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Everett, M. E. (2013). *Near-surface applied geophysics*. Cambridge University Press.

Gingine, V., Dias, A. S., & Cardoso, R. (2016). Compaction control of clayey soils using electrical resistivity charts. *Procedia Engineering*, 143, 803–810. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.130

González de Vallejo, L. I., & Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. Leiden: The Netherlands.

Haeni, F. P. (1988). Application of seismic-refraction techniques to hydrologic studies. Department of the Interior, US Geological Survey.

Hamada, G., & Joseph, V. (2020). Developed correlations between sound wave velocity and porosity, permeability and mechanical properties of sandstone core samples. *Petroleum Research*, 5(4), 326–338. doi:10.1016/j.ptlrs.2020.07.001

Han, D., Nur, A., & Morgan, D. (1986). Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51(11), 2093–2107. doi:10.1190/1.1442062

Imani, P., Tian, G., Hadiloo, S., El-Raouf, A. A. (2021). Application of combined electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction tomography (SRT) methods to investigate xiaoshan district landslide site: Hangzhou, China. *Journal of Applied Geophysics*, 184, 104236. doi:10.1016/j.jappgeo.2020.104236

Izumotani, S., Takeuchi, M., Murayama, H., & Okazaki, K. (2020). Estimating rock properties using seismic refraction survey data: A case study in an abandoned road tunnel. *Exploration Geophysics*, 52(4), 409–418. doi:10.1080/08123985.2020.1828856

Kazmi, D., Qasim, S., Fahad, I., Siddiqui, & Azhar, S. (2016). Exploring the Relationship between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils. 33-35.

Lin, C. P., Lin, C. H., Wu, P. L., Liu, H. C., & Hung, Y. C. (2015). Applications and challenges of near surface geophysics in geotechnical engineering. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(8), 2664-2680.

Loke, M. H. (2011). Electrical Resistivity Surveys and Data Interpretation. *Electrical & Electromagnetic*. 276-283. 10.1007/978-90-481-8702-7_46.

Loke, M. H., Rucker, D. F., Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., & Kuras, O. (2020). Electrical resistivity surveys and Data Interpretation. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 1–6. doi:10.1007/978-3-030-10475-7_46-1

Long, M., Donohue, S., L'Heureux, J.-S., Solberg, I.-L., Rønning, J. S., Limacher, R., O'Connor, P., Sauvin, G., Rømoen, M., & Lecomte, I. (2012). Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(10), 1158–1168. doi:10.1139/t2012-080

Ma, T., Li, C., Lu, Z., & Bao, Q., (2015). Rainfall intensity–duration thresholds for the initiation of landslides in Zhejiang Province, China. *Geomorphology* 245, 193–206.

Martinho, E. (2002). Estudo Integrado de Problemas Ambientais por Métodos Geofísicos. *Dissertação de Doutoramento*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 269 p.

Mousatov, A., & Ryjov, A. (2006). Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. *Geofísica Internacional*, 45(3), 195–207. doi:10.22201/igeof.00167169p.2006.45.3.205

Omar, G. T. A.-A. (2020). *Fundamentals of Reservoir Rock Properties*. Springer.

Park, S., Shin, S. L. D.K., Kim, C.R., & Son, J.-S. (2016). Relationship between Electrical Resistivity and Physical Properties of Rocks. 10.3997/2214-4609.201602101.

Pasquet, S., Bodet, L., Dhemaied, A., Mouhri, A., Vitale, Q., Rejiba, F., Flipo, N., & Guérin, R. (2015). Detecting different water table levels in a shallow aquifer with combined P-, surface and SH-wave surveys: Insights from VP/VS or Poisson's ratios. *Journal of Applied Geophysics*, 113, 38–50. doi:10.1016/j.jappgeo.2014.12.005

Sandra, Efendi, R., Astuti, M., Rusydi, Badaruddin, & Iqbal. (2021). Rock porosity estimation research using refraction seismic waves in Bora village, Sigi Regency. *Journal of Physics: Conference Series*, 1763(1), 012027. doi:10.1088/1742-6596/1763/1/012027

Schön, J. (2016). *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of Petrophysics*. Elsevier.

Slater, L.D. & Lesmes, D. (2002) IP Interpretation in Environmental Investigations. *Geophysics*, 67, 77-88.

Souza, L., & Gandolfo, O. (2021). *Geofísica Aplicada à Geologia de Engenharia e Meio Ambiente - Manual de Boas Práticas* (1st ed.). ABGE.

Standard, A. S. T. M. (2011). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Sub-surface Investigation*. ASTM International, West Conshohocken, PA D5777–00.

Steiner, M., Katona, T., Fellner, J., & Flores Orozco, A. (2022). Quantitative water content estimation in landfills through joint inversion of seismic refraction and electrical resistivity data considering surface conduction. *Waste Management*, 149, 21–32. doi:10.1016/j.wasman.2022.05.020

Lekshmi S.U., S., Singh, D. N.; Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of Soil moisture measurement. *Measurement*, 54, 92–105. doi:10.1016/j.measurement.2014.04.007

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (2004). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.

Yang, H., Duan, H.-F., & Zhu, J. (2023). Experimental study on the role of clay mineral and water saturation in ultrasonic p-wave behaviours across individual filled rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 168, 105393. doi:10.1016/j.ijrmms.2023.105393

