

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

*JOSÉ GUILHERME MOURÃO DANTAS*

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DENSIDADE E POROSIDADE  
DO MACIÇO ROCHOSO E ROCHA INTACTA A PARTIR DA VELOCIDADE  
SÔNICA DE CAMPO E LABORATORIAL.

Porto Alegre, 2018

JOSÉ GUILHERME MOURÃO DANTAS

Engenheiro Geólogo

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DENSIDADE E POROSIDADE  
DO MACIÇO ROCHOSO E ROCHA INTACTA A PARTIR DA VELOCIDADE  
SÔNICA DE CAMPO E LABORATORIAL.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), com parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Dr. André Cezar Zingano

Porto Alegre, 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

#### CIP- Catalogação na Publicação

Dantas, José Guilherme Mourão  
Estimativa da Resistência à Compressão, Densidade e Porosidade do Maciço Rochoso e da Rocha Intacta a Partir da Velocidade Sônica de Campo e Laboratorial / José Guilherme Mourão Dantas. -- 2018.  
97 f.  
Orientador: André Cezar Zingano.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Perfilagem Sônica. 2. Pundit. 3. Resistência à Compressão. 4. Densidade. 5. Porosidade. I. Zingano, André Cezar, orient. II. Título.

Elaborado pelo sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo (a) autor (a).

**JOSÉ GUILHERME MOURÃO DANTAS**

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DENSIDADE E POROSIDADE  
DO MACIÇO ROCHOSO E ROCHA INTACTA A PARTIR DA VELOCIDADE  
SÔNICA DE CAMPO E LABORATORIAL.**

A dissertação de mestrado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Dr. André Cezar Zingano

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Vlória Cristina G. de Souza (Doutora em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS): \_\_\_\_\_

Paulo Salvadoretti (Doutor em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS): \_\_\_\_\_

Roberto Heemann (Doutor em Engenharia) - Pontifício Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS): \_\_\_\_\_

Dedico esta dissertação aos meus pais Ângela e Dantas, pela dedicação em formar um homem forte e do bem. Meu irmão Marcelo, por tornar minha caminhada mais fácil e amorosa. E a Priscilla, por me mostrar o amor.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente agradeço a Deus, fonte infinita de amor e luz. A minha família por serem pacientes e acreditarem no meu potencial. Ao Professor André Zingano, pela oportunidade de pesquisa, ajuda e muitos ensinamentos. Aos antigos amigos que o mestrado uniu novamente: Roberto, Ryu e Flávio; e aos novos: Luiz, Igor, David, Augusto, Kaio, Cris <sup>2</sup>. À Priscilla, pelo apoio, incentivo, companheirismo e amor. À equipe de prospecção da Nexa, projeto Santa Maria, pelos ensinamentos e momentos de descontração em campo. Ao Laboratório de Mecânica de Rochas e toda a equipe de pesquisa e trabalho, vocês foram fundamentais para essa conquista. Ao Professor Paulo Salvadoretti, pelos ensinamentos e doação dos dados da pesquisa. E a CAPES pela provisão da bolsa de Mestrado.

O homem caminha no meio das suas  
próprias obras, portanto se o caminho  
se encontra áspero, não adianta p a  
Deus

Chico Xavier

## RESUMO

O conhecimento dos maciços rochosos é fundamental para o sucesso econômico e a segurança dos empreendimentos na área de mineração, principalmente subterrânea. Este tipo de conhecimento culmina no desenvolvimento de técnicas e ferramentas que possibilitam a identificação de condicionantes estruturais, previsão de comportamento e conhecimento geológico do maciço em questão à custos mais baixos e com uma maior velocidade de análise de dados. Apesar da maioria desses dados serem coletados na rotina das mineradoras, alguns são de difícil aquisição, uma vez que necessitam de ensaios laboratoriais para a sua obtenção, os quais são demorados e onerosos. Uma alternativa para estudar os maciços rochosos é através dos métodos de perfilagem e determinação de velocidade sônica em laboratório. Estes métodos são indiretos e permitem o levantamento de dados e análises de propriedades físicas e estruturais em situações onde análises diretas não são possíveis. Em minas de carvão Australianas, a determinação da velocidade de ondas sônicas é rotineiramente utilizada, com o objetivo de determinar a resistência da compressão do teto imediato e densidade. Dessa forma, os métodos indiretos têm sido uma boa alternativa, pois além de serem confiáveis, requerem menos tempo de execução e investimentos financeiros. Assim, o objetivo deste trabalho foi a aplicação dos métodos indiretos de perfilagem e laboratório a fim de definir o comportamento do maciço rochoso, através da determinação da velocidade sônica, resistência a compressão, densidade e porosidade do maciço rochoso e rocha intacta. Os resultados obtidos corroboraram a possibilidade da utilização de métodos indiretos (perfilagem geofísica e determinação de velocidade sônica em laboratório) para determinar parâmetros físicos do maciço rochoso, tais como resistência a compressão, densidade e porosidade. Todos estimados através de curvas de calibração / correlação e da utilização de fórmulas para os cálculos desses parâmetros. Esta pesquisa apresentou, resultados positivos para correlações entre  $V_p$  x UCS e  $V_p$  x Densidade. Onde o índice de correlação da  $V_p$ \_Sônico x UCS é de  $R^2=0,7531$ , enquanto que  $V_p$ \_Pundit x UCS é de  $R^2=0,7043$ . E os índices de correlação encontrados para  $V_p$ \_Sônico x Densidade, apresenta  $R^2=0,7981$ , e o entre o  $V_p$ \_Pundit x Densidade o  $R^2= 0,8378$ . Enquanto que o índice de correlação entre  $V_p$  x Porosidade, não foi determinado um índice de correlação tão favorável, o qual foi único que ficou abaixo da média adotada pela bibliografia que é de  $R^2=0,70$ . As



correlações entre  $V_p$ \_Sônico x Porosidade é de  $R^2=0,5453$ , e a entre  $V_p$ \_Pundit x Porosidade é de  $R^2=0,5585$ .

**Palavras-Chave:** Perfilagem Sônica. Pundit. Resistência à Compressão. Densidade. Porosidade.

## ABSTRACT

The rock mass knowledge is fundamental for economic success and security of the enterprises in underground mining actuation area . This kind of knowledge culminates in the development of techniques and tools that allow the identification of structural constraints, prediction of behavior and geological knowledge of the mass in question at lower costs and with a greater speed of data analysis. Although most of mass data are collected in the miner routine, some of them are difficult to be obtained, once they require laboratory tests to carry out, which are time-consuming and expensive. One alternative to study rock mass in laboratory is using profiling and sonic velocity methods. These methods are indirect and allow the collection of data and analysis of physical and structural properties in situations on which direct analysis are not possible to be done. Sonic velocity measure is routinely used in Australian coal mines to determine strength and density of rocks. Indirect methods have been a good alternative to rock masses determination due to their reliable characteristics, smaller executable time and lower financial investments requires. Thus, the goal of this study was to apply indirect profiling laboratory methods in order to define the behavior of rock mass: determining sonic velocity, compressive strength, density and porosity of the rock mass and intact rock. Our results corroborated the possibility of indirect methods use (as geophysical profiling and determination of sonic velocity in the laboratory) to determine physical parameters of rock mass, such as compressive strength, density and porosity. All of these parameters were estimated through calibration curves and use of formulas. This research presented positive results for correlations between  $V_p$  x UCS and  $V_p$  x Density. Where the correlation index of  $V_{p\_Sonic}$  x UCS is  $R^2 = 0.7531$ , while  $V_{p\_Pundit}$  x UCS is  $R^2 = 0.7043$ . And the correlation indexes found for  $V_{p\_Sonic}$  x Density, presents  $R^2 = 0.7981$ , and the one between  $V_{p\_Pundit}$  x Density and  $R^2 = 0.8378$ . While the correlation index between  $V_p$  x Porosity, a favorable correlation index was not determined, which was only below the average adopted by the bibliography, which is  $R^2 = 0.70$ . The correlations between  $V_{p\_Sonic}$  x Porosity is  $R^2 = 0.5453$ , and that between  $V_{p\_Pundit}$  and Porosity is  $R^2 = 0.5585$

**Key-Words:** Sonic Log. Pundit. Compressive Strength. Density. Porosity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1. Curva tensão versus deformação linear.....	18
Figura: 1.2 Mapa de localização do município de Candiota, RS. Em destaque a região de estudo.....	20
Figura 1.3.Coluna estratigráfica genérica da jazida de Candiota. ....	22
Figura 1.4: Metodologia adotada no trabalho. ....	24
Figura 2.1: Desenho esquemático da aplicação da tensão sobre o corpo de prova. b) Gráfico característico do resultado do ensaio de resistência a compressão uniaxial (tensão x deformação). ....	28
Figura 2.2: Resultado obtido no ensaio uniaxial em testemunho de rocha. ....	30
Figura 2.3: Corpo homogêneo de material isotrópico submetido a um campo de tensão triaxial. ....	32
Figura 2.4: Representação do bloco diagrama, da atuação da força de cisalhamento. ....	33
Figura 2.5: a) Perfis de perfilagem geofísica, proposto pelos irmãos Schlumberger, apresentado no congresso Internacional de Perfuração. B) Imagem do primeiro perfilador criado pelos irmãos Schlumberger ....	34
Figura 2.6: Imagem esquemática do equipamento de perfilagem acústica desenvolvido por Conrad Schlumberger em 1935. ....	37
Figura 2.7: Perfil esquemático de um perfilador sônico, que apresenta uma fonte emissora (T) e dois receptores (R1, R2). A representação da diferença da litologia é expressa por C e D. ....	38
Figura 2.8: Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com volume de investigação esférico ....	39
Figura 2.9: Perfilador composto, apresenta duas fontes (UT) e quatro receptores (R1, R2, R3 e R4), utilizado em furos inclinados e/ou com variação no diâmetro interno do furo. ....	40
Figura 2.10: Arranjo da primeira ferramenta de determinação da velocidade de onda. ....	41
Figura 2.11: Modelo de detecção completo das ondas acústicas ....	43
Figura 2.12: Ilustração esquemática da propagação da onda P ....	44
Figura 2.13: Ilustração esquemática da propagação da onda S. ....	45
Figura 2.14: Localização da frente de onda em um determinado instante. Onde em a) frente de onda em repouso, $t_0$ . b) início da movimentação de compressão da frente de onda. c) momento intermediário do movimento de compressão da frente de onda. d) final do movimento de compressão da frente de onda, momento onde acontece a máxima compressão gerada pelo deslocamento da onda compressional. ....	46
Figura 2.15: A imagem de Mavko <i>et al.</i> , (1998) ilustra o comportamento proporcional entre $V_p$ e a densidade, para diferentes tipos de rocha.....	49
Figura 2.16: Influência da densidade e do grau de intemperismo sobre a velocidade de onda P.....	50
Figura 2.17: Gráficos de correlação entre Porosidade e $V_p$ , em diferentes litologias. ....	51
Figura 2.18: Correlações obtidas para arenitos de diferentes autores e localidades. ....	52

Figura 3.1: Perfilador sônico Slim-Hole Full Waveform Triple Sonic. Utilizado nesta pesquisa.....	56
Figura 3.2: Imagem esquemática da posição dos conjuntos do transdutor ( $T_x$ ) e dos receptores ( $R_{x1}$ , $R_{x2}$ , $R_{x3}$ ).....	57
Figura 3.3: Figura esquemática da propagação da onda acústica emitida pelo transdutor ( $T_x$ ) e as chegadas de ondas nos respectivos receptores ( $T_{x1}$ , $T_{x2}$ , $T_{x3}$ ). .....	58
Figura 3.4 Foto da prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão uniaxial. a) componente do braço da prensa; b) componente do comando da prensa e c) computador. ....	59
Figura 3.5: Pundit e transdutores utilizados nos ensaios de determinação de $V_p$ . ....	60
Figura 3.6: Imagem representativa de caixa de testemunhos de sondagem. ....	61
Figura 3.7: Detalhe da imagem do centralizador instalado no perfilador e uma imagem esquemática da instalação do centralizador.....	64
Figura 3.8: Nivelamento da ferramenta na posição zero com a cota do furo (sonda sônica).....	64
Figura 3.9: Imagem do WellCad 4.0, identificando o esquema organizacional dos perfis de velocidade. ....	66
Figura 3.10: Inserção da formula para o cálculo do $V_p$ . ....	67
Figura 3.11: Comando Editor para gerar a planilha com as velocidades $V_p$ e suas respectivas profundidades.....	67
Figura 3.12: Etapa de zeragem do equipamento. ....	70
Figura 3.13: Leitura completa do tempo de trânsito da onda. ....	70
Figura 3.14: Tabela dos resultados do ensaio de compressão uniaxial. ....	72
Figura 3.15: Balança MARK M 3502, utilizada para a determinação das massas das amostras, durante a execução do ensaio de propriedade físicas.....	73
Figura 3.16: Imagem do processo de saturação das amostras. A) as amostras estão com 1/3 submersas em água, em b) as amostras estão com 2/3 submersas em água e na c) as amostras estão totalmente submersas. ....	74
Figura 3.17: Foto representativa da pesagem das amostras submersas. ....	75
Figura 3.18: Gráfico com correlação entre $V_p$ _Pundit x $V_p$ _Sônico. Com o intervalo amostral referente ao limite mínimo de detecção do perfilador. ....	77
Figura 3.19: Gráfico com correlação entre $V_p$ _Pundit x $V_p$ _Sônico. Com o intervalo amostral referente ao intervalo de resultados constantes. ....	78
Figura 3.20: Gráfico com correlação entre $V_p$ _Pundit x $V_p$ _Sônico. Com o intervalo amostral referente ao tamanho das amostras da sondagem. ....	79
Figura 3.21: Gráfico com correlação entre $V_p$ _Pundit x $V_p$ _Sônico com o intervalo amostral referente ao tamanho da espessura da camada geológica. ....	80
Figura 4.1: Gráfico de correlação geral entre $V_p$ _Sônico x UCS, não individualiza as litologias presentes.....	81
Figura 4.2: : Gráfico de correlação entre $V_p$ _Sônico x UCS, individualizando as litologias presentes.....	82
Figura 4.3: : Gráfico de correlação geral entre $V_p$ _Pundit x UCS, não individualiza as litologias presentes.....	83
Figura 4.4: Gráfico de correlação entre $V_p$ _Pundit x UCS, individualizando as litologias presentes.....	84

Figura 4.5: Gráfico de correlação entre Vp_Sônico x Densidade, não individualiza as litologias presentes.....	85
Figura 4.6: Gráfico de correlação entre Vp_Sônico x Densidade, individualizando as litologias presentes.....	86
Figura 4.7: Gráfico de correlação geral entre Vp_Pundit x Densidade, não individualizando as litologias presentes. ....	87
Figura 4.8: Gráfico de correlação entre Vp_Pundit x Densidade, individualizando as litologias presentes.....	87
Figura 4.9: Gráfico de correlação entre Vp x Porosidade, não individualizando as litologias. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tabela contendo as fórmulas, para cálculo de alguns módulos elásticos (Módulo de cisalhamento, de massa e Elasticidade e a Razão de Poisson). .....	48
Tabela 2.2. Equações de correlação entre $V_p$ e UCS, de diferentes autores.....	53
Tabela 3.1: Tabela com organograma da Metodologia utilizada neste trabalho. ....	55
Tabela 3.2: Especificações técnicas do perfilador sônico. ....	57
Tabela 3.3: Especificações técnicas do Pundit PL-200.....	60
Tabela 3.4: Especificações técnicas da serra Core Trimmer DS-36. ....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$V_p$ : Velocidade da Onda P;  
 $V_s$ : Velocidade da Onda S;  
 $R^2$ : Coeficiente de Correlação de Pearson;  
K: Módulo Volumétrico;  
G: Módulo Cisalhante;  
E: Módulo de Young;  
 $\nu$ : Razão de *Poisson*;  
 $\rho$ : Densidade  
 $\phi$ : Porosidade;  
 $\lambda$ : Comprimento de Onda;  
 $f$ : Frequência;  
 $S$ : Volume de Área;  
 $E_{av}$ : Módulo Médio de Young;  
 $E_{av}$ : Módulo de Young Secante;  
 $\sigma$ : Tensão;  
 $\epsilon$ : Deformação;  
 $\epsilon_a$ : Deformação Axial Total;  
 $\epsilon_r$ : Deslocamento Radial;  
 $\epsilon_2$ : Direção Perpendicular à Aplicação da Tensão;  
 $\epsilon_1$ : Deformação Sofrida ao Longo da Direção Paralela a Tensão Aplicada;  
 $\sigma_a$ : Tensão Axial Média;  
 $\frac{\Delta v}{v}$ : Deformação volumétrica;  
 $\Delta d$ : tamanho do corpo de prova (cm);  
 $\Delta t$ : tempo de transição do pulso no corpo de prova ( $\mu$ );  
OPTV: Televisionamento Ótico;  
ATV: Televisionamento Acústico;  
FWS: *Full Wave Sonic*;  
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;  
ASTM: *American Society Testing and Materials*;  
ISRM: *International Society for Rock Mechanics*;  
UCS: Resistência à Compressão Uniaxial;  
GSI: *Geological Strength Index*;  
LVDT: *Linear Variable Differential Transformer*;  
BHC: *Borehole Compensater*;  
TX: Transdutor Eletroacústico;  
RX1, RX2, RX3: Receptores Ultrassônicos;  
TIME TX1 –RX2: Tempo de Trânsito da Onda P até o Receptor RX2;  
TIME TX1-RX1: Tempo de Trânsito da Onda P até o Receptor RX1.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	19
1.2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	20
1.3. JUSTIFICATIVA.....	22
1.4. OBJETIVO E METAS DA DISSERTAÇÃO.....	23
1.5. METODOLOGIA.....	24
1.6. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ROCHAS.....	25
2.2. PROPRIEDADES ELÁSTICAS.....	26
2.2.1. Resistência à Compressão.....	27
2.2.2. Módulo de <i>Young</i> (E).....	28
2.2.3. Coeficiente de <i>Poisson</i> ( $\nu$ ).....	30
2.2.4. Módulo volumétrico (K).....	31
2.2.5. Módulo de cisalhamento (G).....	32
2.3. HISTÓRICO DA PERFILAGEM GEOFÍSICA.....	33
2.4. PERFILAGEM SÔNICA.....	35
2.5. DETERMINAÇÃO DE $V_P$ EM LABORATÓRIO VIA <i>PUNDIT</i> .....	41
2.6. ONDAS ACÚSTICAS.....	43
2.7. TIPOS DE ONDA.....	44
2.8. RELAÇÕES MATEMÁTICAS RELACIONADAS COM $V_P$ E $V_S$ .....	45
2.9. FATORES QUE INTERFEREM NA VELOCIDADE DA ONDA.....	48
3. MATERIAS E MÉTODOS.....	54
3.1. MATÉRIAS.....	56
3.1.1. Perfilador sônico.....	56
3.1.2. Prensa hidráulica:.....	58
3.1.3. <i>Pundit Proceq</i> .....	59
3.2. SONDAGEM DIAMANTADA.....	61
3.3. DESCRIÇÃO DOS FURO DE SONDAGEM.....	62
3.4. PERFILAGEM SÔNICA.....	62
3.4.1. Montagem do equipamento de perfilagem.....	63
3.4.2. Nivelamento da posição do perfilador.....	64
3.4.3. Montagem do <i>MicroLogger</i> .....	65
3.4.4. Execução da perfilagem.....	65
3.5. AMOSTRAGEM.....	67



3.6.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	68
3.7.	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	69
3.7.1.	Determinação de $V_p$ em laboratório .....	69
3.7.2.	Determinação do UCS.....	71
3.7.3.	Determinação das propriedades físicas .....	72
3.8.	TRATAMENTO DOS DADOS.....	75
3.8.1.	Correlação $V_{p\_Sônico}$ x $V_{p\_Pundit}$ .....	76
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
4.1.	CORRELAÇÕES $V_P$ X UCS.....	81
4.2.	CORRELAÇÕES $V_P$ X DENSIDADE .....	84
4.3.	CORRELAÇÕES $V_P$ X POROSIDADE .....	88
5.	CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTURO .....	89
5.1.	CONCLUSÃO.....	89
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	90
6.	REFERÊNCIAS .....	91
	ANEXO A.....	97
	ANEXO B.....	102

## 1. INTRODUÇÃO

A caracterização do maciço rochoso é um procedimento praticado em todos os projetos de mineração e obras subterrâneas, pois esta atividade requer o conhecimento intrínseco das propriedades geológicas (situação do maciço rochoso em subsuperfície, localização das descontinuidades, grau de intemperismo, entre outros) e físicas (resistência à compressão uniaxial, tensões *in situ*, módulos elásticos dinâmicos).

A mecânica de rochas é definida por Jaeger *et al.* (2007), como sendo a análise da atuação, comportamento e reações do maciço rochoso em escala de projetos de engenharia. Para classificar o maciço rochoso com uma boa precisão é necessário a utilização do máximo de informações possíveis, como: resistência à compressão uniaxial, frequência e persistência das fraturas, condição das descontinuidades e a presença de água.

Apesar da maioria desses dados serem coletados na rotina das mineradoras, alguns são de difícil aquisição, uma vez que necessitam de ensaios laboratoriais para a sua obtenção, os quais são demorados e onerosos. Sendo assim, surgiu a necessidade de desenvolvimento dos métodos indiretos, os quais têm se mostrado uma boa alternativa, pois além de serem confiáveis, requer menos tempo de execução e investimentos financeiros.

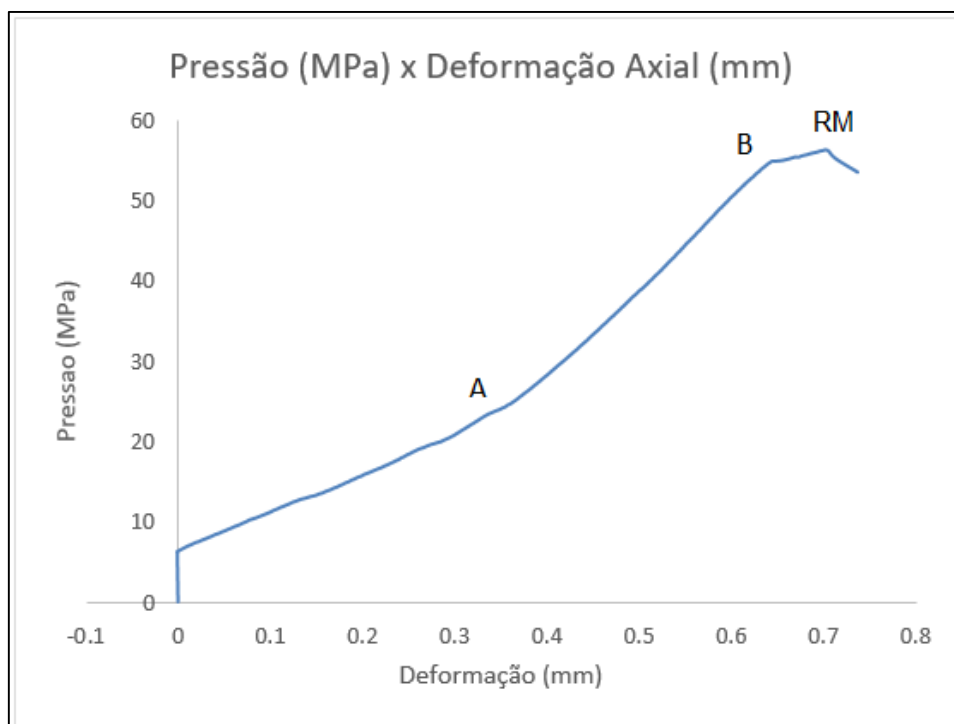
Sendo assim, os métodos geofísicos de perfilagem de poços, têm despertado o interesse e a atenção dos pesquisadores com objetivo de classificar os maciços rochosos, uma vez que se destacam como uma ferramenta complementar a caracterização geomecânica. Esses métodos, são empregados para identificar litologias e características físicas em subsuperfície por meio de propriedades físicas das rochas (PALMSTROM, 2000). Tais métodos são bastantes explorados na indústria do petróleo e se mostraram capazes de determinar algumas propriedades, dentre as quais algumas possuem aplicação direta na mecânica de rochas, como: módulos elásticos dinâmicos, velocidade de onda sísmica, densidade, imageamento da parede do furo de sondagem e imagens criadas a partir do televisionamento acústico. Todas essas características auxiliam na caracterização de uma estrutura com medidas precisas ou fornecem estimativas com um bom grau de confiabilidade.

Dentre os métodos existentes, os que possuem maior aplicação à geotecnia são a perfilagem sônica, perfil de densidade e o imageamento acústico e o ótico televiewer.

Os métodos de perfilagem geofísica, são levantamentos completos de poços e/ou furo de sondagem. As aquisições de dados são realizadas por sondas ou perfiladores, os quais apresentam diferentes tipos de sensores atribuídos a ponderar propriedade físicas da rocha, por exemplo: condutividade, resistividade, tempo de trânsito e amplitude das ondas elásticas, radiação natural, entre outras (SILVA, 2012). Os perfis geofísicos fornecem informações de forma contínua em um poço, os quais possibilitam o cálculo das propriedades elásticas dinâmicas da rocha, no intervalo perfilado (BARTON, 2007). Pereira *et al.* 2015a, 2015b, ressaltam a importância da necessidade da utilização de ferramentas que apresentem resultados com um índice de confiabilidade em todos os tipos de maciços rochoso e em qualquer contexto geológico e operacional.

O comportamento do maciço rochoso possui uma estrita relação com as condições físicas submetidas à matriz rochosa. A curva de tensão e deformação denominada de curva característica do ensaio, resultante do ensaio uniaxial, da Figura 1, obtida em laboratório, indica três tipos de comportamentos da amostra. O ponto “A” é o limite de elasticidade, ao qual a deformação na amostra ainda é reversível e diretamente proporcional ao estado de tensão aplicado. O ponto “B” é o limite de plasticidade, onde no intervalo (AB) a alteração da forma e volume da amostra mantém-se de modo permanente. Este caso relaciona a deformação permanente com fechamento das microfraturas existentes na rocha. Após o ponto “B” a amostra atinge a resistência máxima (RM), ocasionando a ruptura da mesma (SOARES 1992).

Figura 1.1. Curva tensão versus deformação linear.



Fonte: Autoria própria.

Para a caracterização de maciços rochosos é de suma importância conceituar as propriedades elásticas estáticas ou mecânicas da matriz rochosa, que são as propriedades medidas em laboratório, através da aplicação de tensão sobre a amostra, na qual gera como resultado uma curva de tensão *versus* deformação (Figura 1). O módulo de *Young* ( $E$ ) é o coeficiente de proporcionalidade existente entre a tensão aplicada e a deformação, dentro do intervalo de deformação elástica e pode ser relacionado com a resistência da rocha à deformabilidade causada pela tensão imposta.

De acordo com Soares (1992), a aplicação de tensão compressiva sobre uma amostra, em certa direção, ocasiona a diminuição do comprimento da amostra, no mesmo sentido da aplicação da tensão, enquanto aumenta o diâmetro da mesma, nas direções perpendiculares. Da mesma forma se uma força de tração for aplicada os efeitos anteriores será o inverso do ocorrido com a tensão compressiva. A razão existente entre as deformações (perpendiculares e paralelas) da amostra é conhecida como coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ).

A determinação de três propriedades elásticas quaisquer, tais como ( $E$ ,  $\nu$  e a densidade ( $\rho$ )), são suficientes para determinar o comportamento elástico de uma amostra de rocha, que é um material anisotrópico.

As propriedades elásticas dinâmicas, no entanto, são determinadas mediante estudos do comportamento dos pulsos, de ondas sônicas, que se propagam pela amostra de rocha ou maciço rochoso. Podem ser executadas em laboratórios, com amostras de rocha, ou *in situ*, com a utilização de um perfilador sônico, pela medida do tempo de trânsito de onda acústica (BASSIONI, 1994).

Soares (1992) ressalta as vantagens da determinação das propriedades elásticas a partir do método dinâmico, ou seja, com a utilização de perfilagem sônica que são: (i) a aquisição dos dados ser realizada dentro do poço, onde todas as características originais do maciço rochoso estão preservadas e (ii) diminui a utilização de sondagem testemunhada, a qual tem um valor muito elevado.

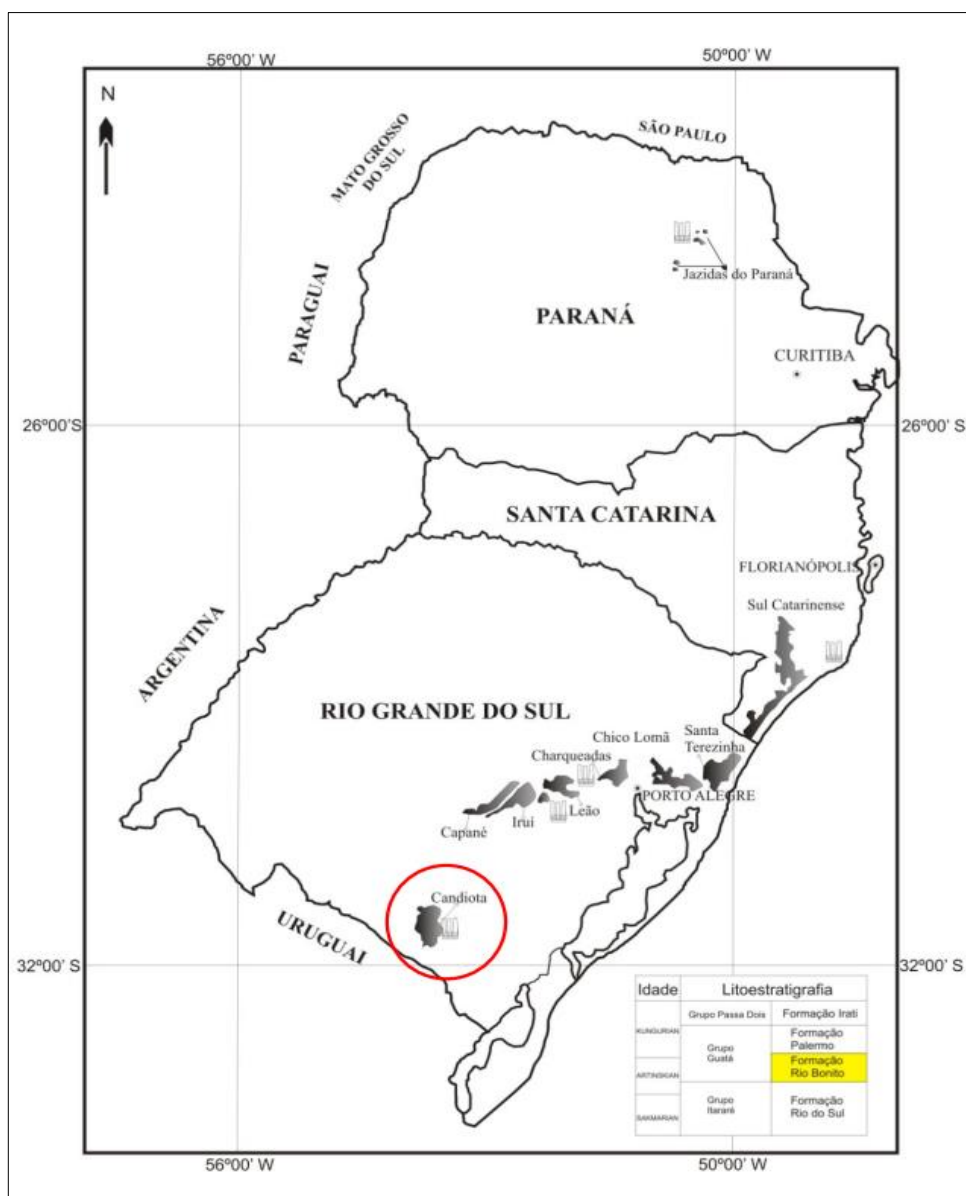
Trabalhos que correlacionam os resultados dos ensaios laboratoriais de resistência à compressão em amostras oriundas dos testemunhos de sondagem, com os resultados de perfilagens, para a caracterização dos maciços rochoso já são aplicados na Geotecnia. Tais métodos seguem rigorosamente normas específicas como (ISRM, 1981) para gerar resultados representativos e confiáveis.

Este trabalho utiliza a perfilagem sônica, para determinar as velocidades de ondas mecânicas (onda de compressão, longitudinal ou  $V_p$ ) através do maciço rochoso e realizar a regressão com coeficiente de determinação confiável ( $R^2$ ) com as constantes elásticas do maciço rochoso e as propriedades mecânicas. E também gerar uma curva de calibração para determinação da resistência à compressão do mesmo.

### 1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

Este trabalho, foi desenvolvido na mina de carvão de Seival, localizada no município de Candiota – RS, ao sul do estado do Rio Grande do Sul (Figura 2). A mina de Seival, é um projeto da empresa Seival Sul Mineração, pertencente ao grupo Copelmi Mineração LTDA.

Figura: 1.2 Mapa de localização do município de Candiota, RS. Em destaque a região de estudo.



Fonte: Lunkes, 2010.

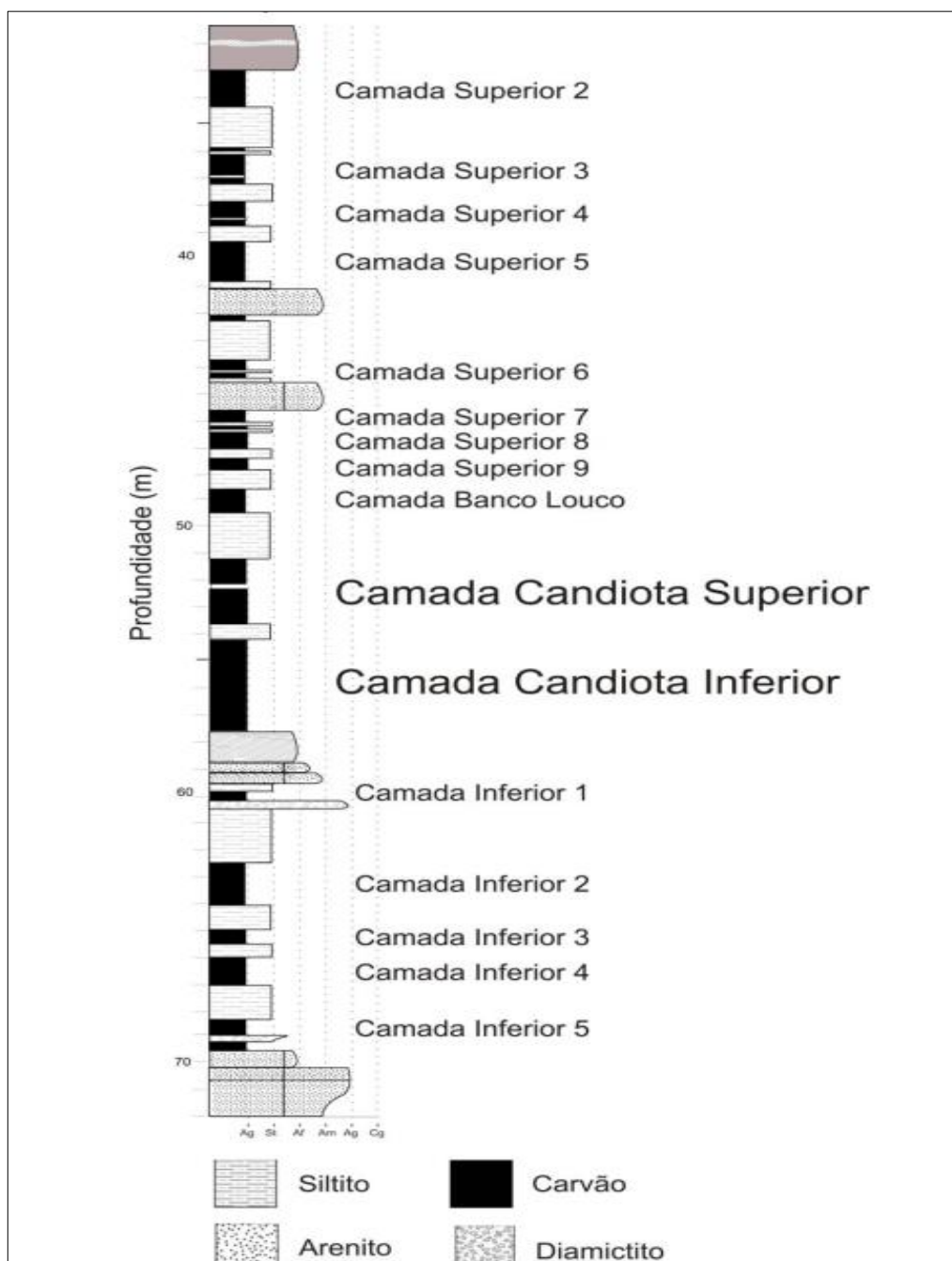
## 1.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A jazida de Candiota (contexto geológico da mina Seival) está inserida na bacia do Paraná situada na porção centro leste do Continente Sul Americano, e distribuída entre Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina. De acordo com Zalan *et. al.* (1990), a bacia do Paraná é uma bacia intracratônica ao qual se desenvolveu sob a crosta continental, é preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, datadas do Ordoviciano até o Cretáceo. O pacote vulcano-sedimentar que compõe a bacia do Paraná, é composto por seis sequências deposicionais limitado por discordâncias

regionais: ordoviciano-siluriana, devoniana, carbonífera-eotriássica, neotriássica, jurássica e neocretácea (MILIANI *et. al* 1994).

Schneider *et. al.*, (1974), definiu que o contexto do carvão encontrado na região é atribuído à Formação Rio Bonito, a qual é composta por arenitos fluviais até marinhos, siltitos carbonosos e folhelhos datados do Permiano Inferior. No depósito de Seival, ocorre o desenvolvimento de 17 camadas de carvão, onde os maiores interesses econômicos são: as Camadas Candiota Superior, Camada Banco Louco e a Camada Candiota Inferior, presentes ainda no arcabouço geológico, Camadas Inferiores 1-5 e as Camadas Superiores 1-9. Podendo aparecer camadas menores as quais não apresentam uma continuidade lateral significativa, onde estas são denominadas camadas Leito (Figura 3).

Figura 1.3. Coluna estratigráfica genérica da jazida de Candiota.



Fonte: Lunkes, 2010.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

A motivação principal desse trabalho surgiu na tentativa de reduzir gastos e obter as informações geotécnicas com maior agilidade, em relação à aquisição de dados para classificação de maciços rochosos usual, sem diminuir a confiabilidade e



segurança dos projetos, já que a esta etapa de projeto é parte fundamental do cotidiano dos trabalhos na mineração, uma vez que os métodos convencionais de ensaios e caracterização geomecânica são muito caros e onerosos. Além disso, muitas vezes embatem em restrições relativas a obtenção de amostras e nas dimensões das mesmas para os respectivos testes. Gokceoglu e Zorlu, (2004) partilham dessa ideia já que acreditam que a medida de resistência da rocha pode ser limitada devido à exigência de amostras com dimensões mínimas, minuciosa preparação e alto custo de execução.

A partir dessa ideia, optou-se pela utilização do perfilador sônico, já que o mesmo apresenta uma gama de aplicação para os dados adquiridos. O perfilador sônico possibilita a aquisição de várias características e informações sobre a rocha, como: estimar a porosidade, fazer correlação poço a poço, estimar o grau de compactação das rochas e as constantes elásticas, detectar fraturas e suas características, como mergulho e preenchimento e fornecer suporte para a elaboração do sismograma sintético.

#### 1.4. OBJETIVO E METAS DA DISSERTAÇÃO

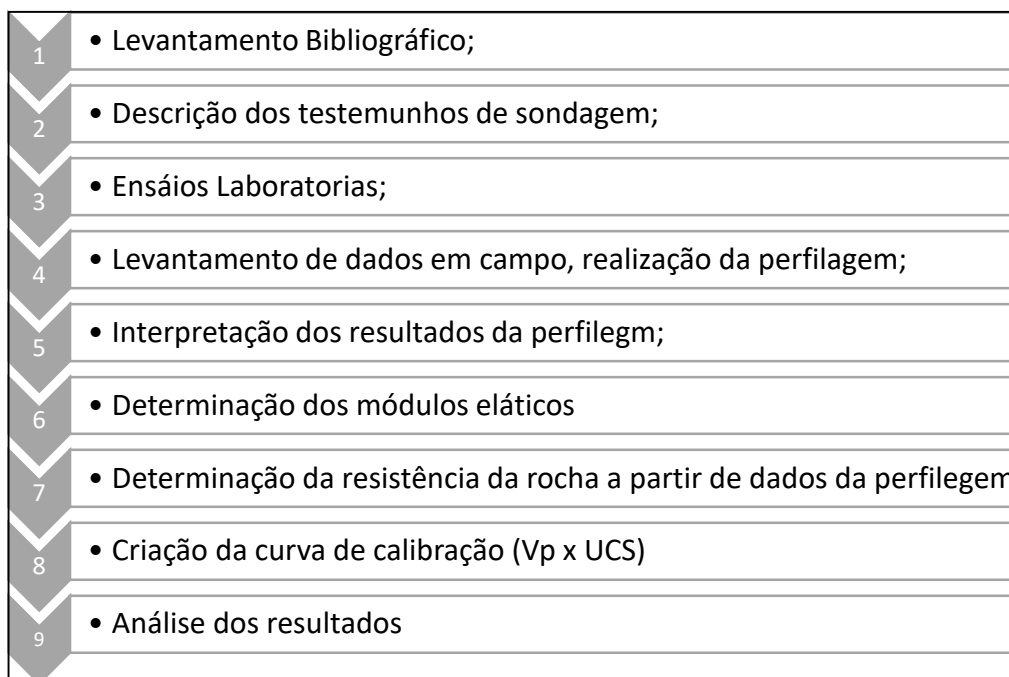
O objetivo deste trabalho é estimar as propriedades físicas, como resistência a compressão, densidade e porosidade do maciço rochoso e de amostras indeformadas, a partir da velocidade sônica ( $V_p$ ). Determinadas, através da perfilagem sônica e da definição de  $V_p$  em laboratório, por meio do *Pundit*.

Enquanto que a meta é desenvolver uma curva de calibração para a determinação das propriedades físicas, a partir da determinação da velocidade sônica, e da resistência à compressão, a partir do ensaio de compressão uniaxial. Almeja-se a determinação dessas propriedades em função de métodos indiretos e não destrutivos, com a utilização desta curva de calibração, gerando agilidade no processo de caracterização de maciços rochosos, mantendo um grau de confiabilidade aceitável.

## 1.5. METODOLOGIA

A sequência da metodologia, adotada para a confecção deste trabalho, é apresentada na Figura 1.4. Inicialmente foi realizado um estudo prévio sobre os temas abordados, a fim de obter subsídios teóricos e técnicos para o planejamento e execução deste trabalho. Após o estudo bibliográfico, foram executos os trabalhos de campo e a aquisição dos dados da perfilagem sônica. Em seguida foram realizadas a interpretação dos dados, determinando as características mecânicas e elásticas dinâmicas da rocha. De acordo com os dados obtidos determinou-se uma curva de calibração, correlacionando os dados da determinação das velocidades das ondas ( $V_p$ ), com os valores dos ensaios de compressão uniaxial.

Figura 1.4: Metodologia adotada no trabalho.



Fonte: Autoria Própria, 2018.

## 1.6. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho, foi dividido em seis capítulos. No capítulo 1, é apresentado uma breve introdução sobre o tema abordado neste trabalho e os objetivos propostos. Além de abordar os aspectos geológicos onde a mina está inserida.

Já o capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica, sobre o tema abordado. Aborda assuntos pertinentes aos principais métodos de perfilagem geofísica, suas características intrínsecas e as principais aplicações da perfilagem geofísica e as possibilidades da utilização para cada método. Outro assunto abordado são as características da rocha: como constantes elásticas, resistência à compressão e tensões, e suas aplicações na classificação de maciços rochosos.

O capítulo 3 demonstra a aplicação do método de perfilagem sônica, no contexto da mecânica de rochas. A metodologia experimental utilizada para a realização da identificação das constantes elásticas e a criação da curva de calibração ( $V_p$  x UCS). Os resultados dos ensaios realizados em cada amostra.

O capítulo 4 apresenta a análise dos resultados adquiridos na pesquisa. Comparação dos resultados obtidos através da perfilagem com os resultados obtidos pelos ensaios laboratoriais, e a determinação da curva de calibração para a determinação da resistência à compressão da rocha através da perfilagem sônica.

O capítulo 5 expõem as conclusões alcançadas através da metodologia descrita neste trabalho, sugestões para trabalhos futuros e respostas propostas nos objetivos.

E por fim o capítulo 6 que apresenta as bibliografias utilizadas nesta pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo expõem algumas definições e fundamentos teóricos do tema abordado na dissertação, com o objetivo de uma boa compreensão dos assuntos, aplicação do perfilador sônico e da análise dos dados adquiridos.

### **2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ROCHAS**

O estudo do comportamento da rocha intacta é de essencial importância para as operações mineiras, sendo tratada por diversos autores ao longo de várias décadas. Em Bieniawski (1984) relata-se a importância da mecânica de rocha em seu contexto, o que abrange a geologia de engenharia, desde a pesquisa mineral, até as

etapas de pré-projeto e execução das operações unitárias, até mesmo na manutenção dos taludes finais até o fechamento de mina e descomissionamento.

Oliveira & Brito (1998), definiu que o maciço rochoso, dentro do âmbito de engenharia, é um conjunto de blocos de rocha, justapostos e articulados, heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, os quais são resultados da evolução crustal/geológica que o maciço rochoso foi submetido ao longo de seus estágios evolutivos. Para completar essa definição Azevedo e Marques (2006), incorporam a presença de água e o estado das tensões existentes no maciço como fatores que o compõe.

A importância da classificação geomecânica dos maciços rochoso e a sua participação na determinação da qualidade geotécnica do maciço, na caracterização e levantamento das descontinuidades, associados com os ensaios expeditos em laboratório geram, com confiabilidade, resultados quantitativos e qualitativos que possam ser utilizados para efeito de engenharia (DOBEREINER *et al.*, 2001).

Soares (1992) salientou a importância da diferenciação entre duas propriedades elásticas inerentes à rocha, as propriedades elásticas estáticas ou mecânicas e as propriedades elásticas dinâmicas, uma vez que podem ser de pesos diferentes, justamente nos intervalos onde existe proporcionalidade entre tensão e deformação. Essa diferença pode ser atribuída ao comportamento heterogêneo da rocha, pois materiais isotrópicos tendem a apresentar comportamentos similares entre suas componentes estáticas e dinâmicas.

## 2.2. PROPRIEDADES ELÁSTICAS

Este item apresenta um sumário das propriedades elásticas das rochas. Serão abordadas ainda as diferentes metodologias de amostragem para a determinação dessas propriedades, tanto os métodos destrutivos / não destrutivos e métodos diretos / indiretos. As propriedades elásticas são atributos específicos das rochas os quais representam a proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pela rocha, quando em regime elástico.

Barton (2007) dissertam-se acerca da relação entre as propriedades elásticas e suas propriedades físicas como a porosidade, densidade e grau de intemperismo.

E como a rocha é um meio anisotrópico, está sujeita a apresentar variações das propriedades físicas e estruturais pode ser vista em Komar (1971).

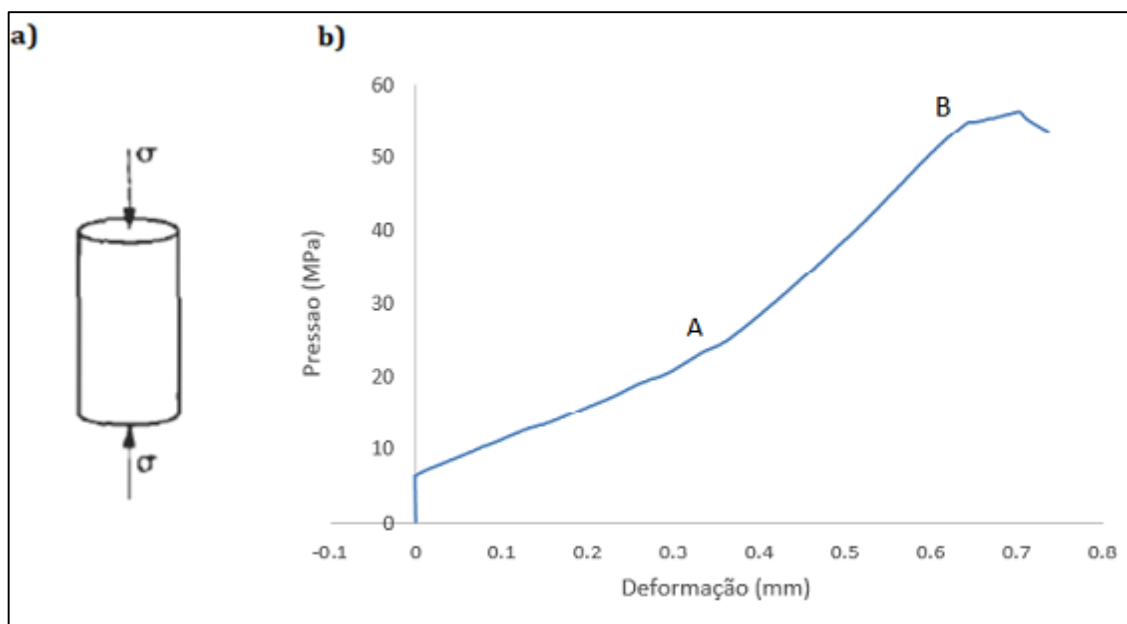
O módulo de *Young* ( $E$ ) e o coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) são considerados parâmetros fundamentais para o entendimento da resistência à compressão da rocha, importante para a compreensão da interação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida. Esses parâmetros são componentes fundamentais na caracterização dos maciços rochosos.

### 2.2.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é uma propriedade elástica estática obtida geralmente por métodos diretos, mas podem ser investigados a partir de métodos indiretos, *Point load test*, esclerômetro de Schmit e o *Pundit*. De acordo com Hoek e Brown (1980), a resistência à compressão realizados com o ensaio uniaxial (UCS) é a propriedade mecânica mais citada no ambiente acadêmico quanto no industrial, já que apresenta uma grande amplitude de utilizações, propiciando uma primeira concepção da resistência mecânica da rocha intacta.

A resistência à compressão é característica da rocha intacta, onde a mesma suporta uma força compressiva aplicada de forma axial por unidade de área que provoca a quebra ou falhamento da amostra (Figura 2.1). Este valor é calculado dividindo a pressão aplicada até a ruptura da amostra pela área da seção transversal da amostra (RAO, 2015). O ensaio para aquisição dessa propriedade segue a norma da *American Society for testing and Materials* (ASTM) e *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) sendo um dos ensaios mais aceitos para medir a resistência à compressão da rocha intacta.

Figura 2.1: Desenho esquemático da aplicação da tensão sobre o corpo de prova. b) Gráfico característico do resultado do ensaio de resistência a compressão uniaxial (tensão x deformação).



Fonte: Adaptado de Dillon *et al.*, (1989).

A partir da curva característica do teste de resistência à compressão, é possível calcular os parâmetros como o módulo de *Young* ( $E$ ). Para a determinação do coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) é necessário dispositivos acessórios. O módulo de *Young* ( $E$ ) é calculado pelo segmento linear da curva, correspondendo a razão entre tensão de 40% e 60% da resistência a compressão e sua elongação transversal. Nesse trecho a amostra apresenta um comportamento elástico e, portanto, sua deformação é proporcional a tensão.

Já o coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) corresponde a deformação transversal sobre a longitudinal da amostra, e só pode ser calculado com o auxílio de *strain gauges* (entre outros), que são dispositivos soldados na amostra para medir a deformação horizontal e vertical do corpo de prova.

### 2.2.2. Módulo de *Young* ( $E$ )

Também conhecido como módulo de deformação ou módulo de rigidez, segundo a Lei de Hooke, este consiste em uma razão de proporcionalidade entre a tensão ( $\sigma$ ) e deformação ( $\epsilon$ ), quando o aumento da deformação é causado justamente

pelo aumento da tensão. Por via de regra o módulo de *Young* pode ser calculado através da aproximação linear do gráfico tensão( $\sigma$ ) x Deformação ( $\varepsilon$ ).

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.1)$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão aplicada (Pa);

$E$  = Módulo de *Young* (Pa);

$\varepsilon$  = Deformação relativa sofrida pelo corpo.

O módulo de *Young* é estimado a partir de ensaio de resistência à compressão simples. A Figura 1.1, exemplifica os resultados obtidos a partir desse ensaio. A força axial é aplicada durante todo o ensaio de forma constante e dividida pela seção transversal inicial da amostra pela tensão axial média ( $\sigma_a$ ), o qual é correlacionado e traçado com a deformação axial total ( $\varepsilon_a$ ), com o deslocamento radial ( $\varepsilon_r$ ). Onde a deformação no pós-pico é registrada.

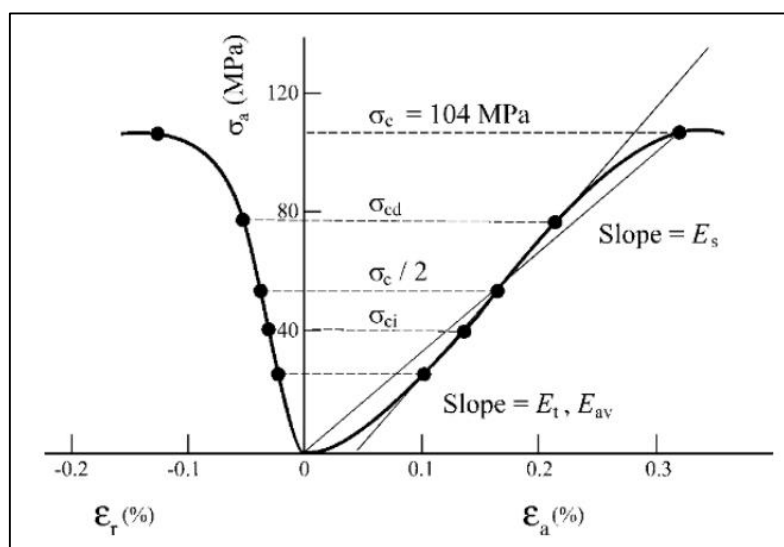
A atuação da deformação no carregamento e o desenvolvimento progressivo das fraturas de tração e o acúmulo de deformação geralmente exibem quatro estágios ilustrados na Figura 2.1. No primeiro caso, (até o ponto A), os bandamentos e as microestruturas presentes na rocha estão intactas. O comportamento da rocha entra no regime elástico a partir da aplicação de uma força de tração uniaxial ( $\sigma_{ci}$ ), nesta etapa as microfissuras e os espaços vazios presentes começam a se fechar (entre os pontos A e B). Com o contínuo aumento da tensão uniaxial ( $\sigma_{cd}$ ) aumenta-se as fissuras e nesse caso a deformação é irreversível (estado rúptil). Essa região contínua até o pico de resistência ou resistência a compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) é atingida (após o ponto B).

De acordo com a Figura 2.2, observa-se que o Módulo de *Young*, não é constante no decorrer do ensaio e é característico do material ensaiado, sendo mais evidenciado em rochas sedimentares, devido o colapso dos poros. Podendo ser calculada de várias maneiras:

- a) O módulo tangente de *Young* ( $E_t$ ), calculado pela inclinação da curva de tensão axial de tensão-deformação, em alguns porcentagem fixa, geralmente é de 50%, da força de pico. Na Figura 2.2  $E_t=51,0$  Gpa;

- b) O módulo médio de *Young* ( $E_{av}$ ), é o declive médio da reta mais ou menos porção da linha da curva de tensão deformação axial. Para o exemplo mostrado na Figura 2.2, o valor de  $E_t=51,0$  Gpa;
- c) O módulo de *Young* secante ( $E_s$ ), é o declive de uma linha reta que une a origem da curva tensão-deformação axial para um ponto na curva em alguma porcentagem fica da força máxima. Na Figura 2.2 o  $E_s=32,1$  Gpa.

Figura 2.2: Resultado obtido no ensaio uniaxial em testemunho de rocha.



Fonte: Hoek *et al.*, 1995

### 2.2.3. Coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ )

O coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) é uma propriedade adimensional, que reflete a deformação radial em relação à deformação axial, em um determinado corpo de prova submetido a atuação de uma certa tensão. O coeficiente de *Poisson*, singularmente apresenta a relação entre as deformações ortogonais e não entre a tensão e deformação.

Para ser capaz de determinar o coeficiente de *Poisson*, os corpos de prova são submetidos a ensaios de tração ou de compressão (uniaxial e/ou triaxial). Durante o ensaio é necessário a existência de uma proporcionalidade entre a extensão lateral dos corpos de prova, com a extensão direta do mesmo, mas com o sinal contrário a extensão direta (BARBOSA, 2011).



O coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ), considerando que o corpo é homogêneo e isotrópico  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ , é definido como sendo a razão entre a deformação sofrida pela amostra (direção perpendicular à aplicação da tensão ( $\varepsilon_2$ )) e a deformação sofrida ao longo da direção paralela a tensão aplicada ( $\varepsilon_1$ ), pode ser calculado pela Equação 2.2 (SOARES 1992). De acordo com Barbosa (2011), considerando que as mesmas características acima, o valor do coeficiente de *Poisson* é sempre menor ou igual a 0,5. A sua aplicabilidade é o input de entrada para os modelos numéricos através das classificações do maciço rochoso, pode ser calculado pelo ensaio de compressão uniaxial ou pode ser estimado de acordo com Hoek *et al.* (1995), através da Equação 2.3. GSI, é um sistema auxiliar qualitativo, de classificação de maciço rochoso, desenvolvido por Hoek *et al.* (1985). O qual leva em consideração a presença de descontinuidades juntamente com o grau intempérico do maciço.

$$\nu = - \varepsilon_2 / \varepsilon_1 = - \varepsilon_3 / \varepsilon_1 \quad (2.2)$$

$$\nu = 0,32 - 0,0015 * GSI \quad (2.3)$$

$$\nu = \frac{\Delta\sigma_a / \Delta\varepsilon_a}{\Delta\sigma_a / \Delta\varepsilon_r} \quad (2.4)$$

O sinal negativo presente na Equação 2.2, é resultado do sentido oposto ao qual as deformações transversais e longitudinais apresentam.

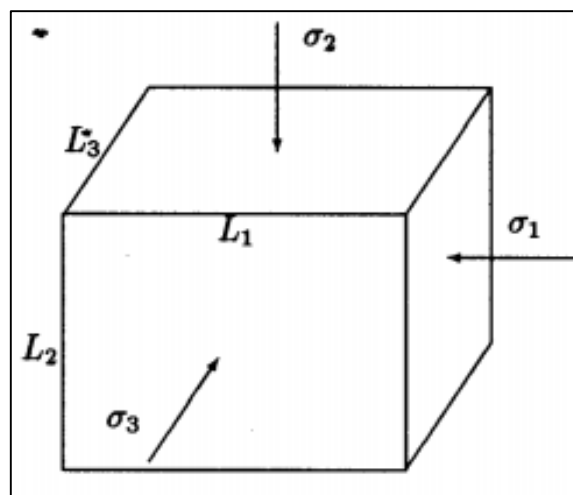
#### 2.2.4. Módulo volumétrico (K)

Também conhecido como *Bulk Modulus*, representa a tendência de deformação em todas as direções, quando submetido a uma pressão/carregamento igualmente distribuída em todas as direções. É definido pela tensão volumétrica sobre a deformação volumétrica da amostra. Pode ser expressa pela relação entre a tensão aplicada a um corpo ( $\sigma$ ) e a deformação volumétrica sofrida pelo mesmo ( $\frac{\Delta v}{v}$ ) (SOARES, 1992). Genericamente a fórmula de cálculo de K é apresentada por:

$$K = - \frac{\Delta P}{\Delta V / V_0} \quad (2.5)$$

Considerando uma situação hipotética (Figura 2.3), onde um corpo cúbico, formado por um material elástico homogêneo isotrópico. Sofre um carregamento de tensões em um campo tridimensional e ponderando particularmente cada componente da tensão a ele aplicada, podemos extrair uma relação de K e os parâmetros fundamentais.

Figura 2.3: Corpo homogêneo de material isotrópico submetido a um campo de tensão triaxial.



Fonte: Soares 1992.

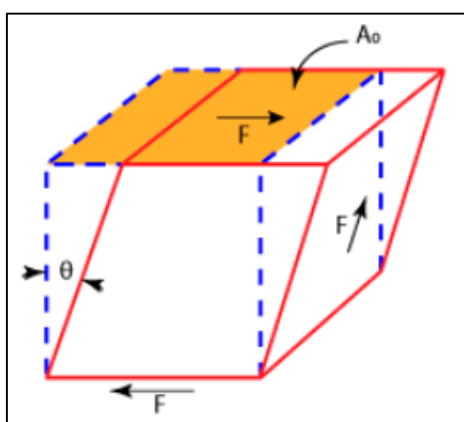
### 2.2.5. Módulo de cisalhamento (G)

O módulo de cisalhamento pode ser definido pela divisão da força de cisalhamento atuante sobre o corpo, pela deformação angular sofrida pelo mesmo corpo. De acordo com a Equação (2.6). A determinação do módulo de cisalhamento é um fator crucial para desenvolvimentos de projetos de estabilidade de taludes.

$$G = \frac{\tau}{\varphi} \quad (2.6)$$

De acordo com Soares (1992), quando duas forças cisalhantes atuam tangencialmente sobre uma face de um bloco diagrama, conforme a Figura (2.4), é equivalente a atuação de um par de forças perpendiculares entre si, mas uma força atua em uma diagonal a qual funciona como tensão de tração enquanto que dá outra diagonal contrária a força atuando equivale a uma tensão de compressão. Se baseando nesta observação, é possível analisar a consequência da tensão de cisalhamento aplicado somente ao longo de uma das diagonais.

Figura 2.4: Representação do bloco diagrama, da atuação da força de cisalhamento.



Fonte: Cossolino e Pereira, (2010)

A partir da análise da lei de Hooke, podemos inferir a seguinte Equação para o cálculo de G:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.7)$$

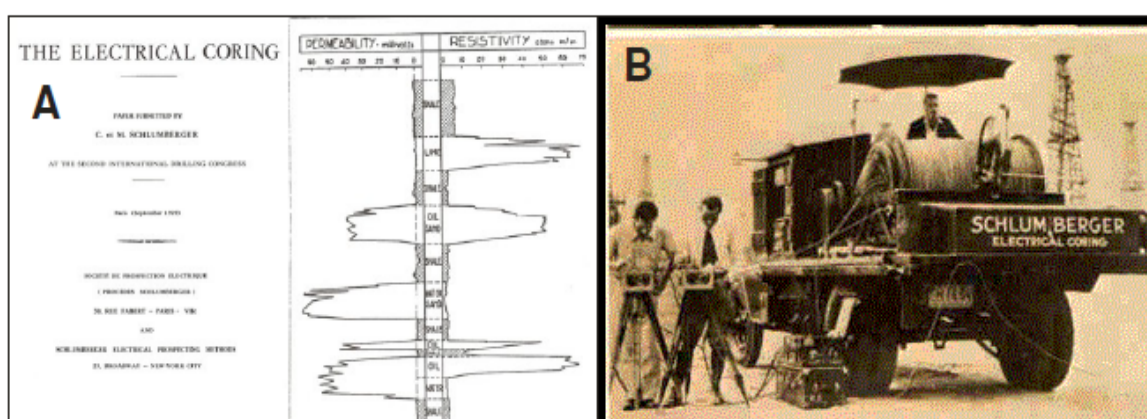
### 2.3. HISTÓRICO DA PERFILAGEM GEOFÍSICA

A perfilagem geofísica consiste em uma atividade de aquisição de dados/respostas indiretas do maciço rochoso. A aquisição de dados geofísicos consiste na introdução dos perfiladores geofísicos, dentro de poços e/ou furos de sondagem abertos, a fim de medir propriedades físicas de interesse do pesquisador. Os equipamentos modernos são compostos por sensores e alguns também por fontes emissoras, onde a ferramenta capta a respotas das fontes emissoras (SERRA, 2008).

A indústria petrolífera, tendo uma grande necessidade de investigar a geologia e as propriedades das rochas em subsuperfície, o que vem acompanhado da necessidade de reduzir os custos da investigação e a obtenção de respostas confiáveis e rápidas. Uma vez que a amostragem total do furo de sondagem para ensaios, pode inviabilizar a pesquisa e investigação pelo alto custo de aquisição das amostras. A partir dessa necessidade começou a se desenvolver a os perfiladores de poços. A perfilagem, baseia-se nas propriedades da geofísica de superfície, para ser utilizada em furos de sondagem. Já que a utilização dos métodos geofísicos possibilitam a investigação da geologia e características da rocha em subsuperfície para a geologia de engenharia, mineração, comercial e demais utilidades (KEAREY *et al.* 2002) sem a necessidade de amostragem.

No início da década de 20 a indústria petrolífera iniciou o desenvolvimento e utilização das ferramentas de perfilagem geofísica através dos irmãos Schlumberger. O qual em 1929 resultou na elaboração de um perfil de resistividade elétrica (Figura 2.5) (CRAIN e CALDWELL, 1984). Essa pesquisa alavancou a pesquisa na indústria do petróleo, originando também na criação da maior empresa de pesquisa e exploração de petróleo (PEREIRA 2017).

Figura 2.5: a) Perfis de perfilagem geofísica, proposto pelos irmãos Schlumberger, apresentado no congresso Internacional de Perfuração. B) Imagem do primeira perfilador criado pelos irmãos Schulumberger



Fonte: Pereira 2017.

Crain (2015) assegura que durante os anos de 1930 a 1960, foram elaborados diversos perfiladores geofísicos, dentre eles o perfilador sônico e o de densidade. Uma

decada depois, as ferramentas existentes começaram a serem desenvolvidas e aplicaram a utilização de fontes radioativas nos perfiladores.

Com o desenvolvimento das pesquisas para a prospecção de petróleo, mais pesquisas foram sendo desenvolvidas possibilitadas pela industria do petróleo, até o surgimento dos perfiladores multi-ferramentas e *softwares* mais modernos para aquisição e interpretação de dados de perfilagem geofísica (DARLING, 2005)

A perfilagem de poços (consiste na aplicação de registros detalhado das formações geológicas atravessadas pela perfuração) defini-se pelo levantamento das características específicas da rocha. Sendo aplicada em furos de sondagem onde a ferramenta realiza os levantamentos das propriedades físicas da rocha, realizando leituras que são características das rochas e suas propriedades, onde essas informações podem ter aplicações diversas como na indústria petrolífera, mineração, geologia de engenharia e até comercial (FONSECA, 2014).

Todavia a utilização da perfilagem geofísica sempre teve o seu foco na industria do petróleo, na prospecção, pesquisa e caracterização de reservatórios petrolíferos. Ofwona (2011) e afirmam que a perfilagem geofísica tinha pouca aplicação na industria da mineração, o que ainda é uma realidade. A área da geotecnia, nos dias atuais, vem desenvolvendo e inserindo essas ferramentas no dia a dia de trabalho, principalmente na caracterização dos maciços rochoso (PEREIRA 2017). Os métodos de perfilagem mais utilizados na Mecânica de Rochas são os: Perfilagem sônica, Televisionamento Ótico (OPTV) e Televisionamento Acústico (ATV). Uma vez que White (1983) assume que os parâmetros geomecânicos além de terem associação direta com a densidade, apresenta uma conexão com o tempo de propagação das ondas acústicas.

#### 2.4. PERFILAGEM SÔNICA

A perfilagem sônica, foi desenvolvida pela industria do petróleo, por ser uma medida direta das propriedades físicas dos reservatórios, dentre elas porosidade, permeabilidade e saturação em óleo, gás e água através de métodos de aquisição indireta (TITTIMAN, 1986; BASSIONI, 1994). Hoje em dia essa ferramenta é requisito

fundamental para a pesquisa e prospecção de reservatório petrolíferos (ELLIS & SINGER, 2007).

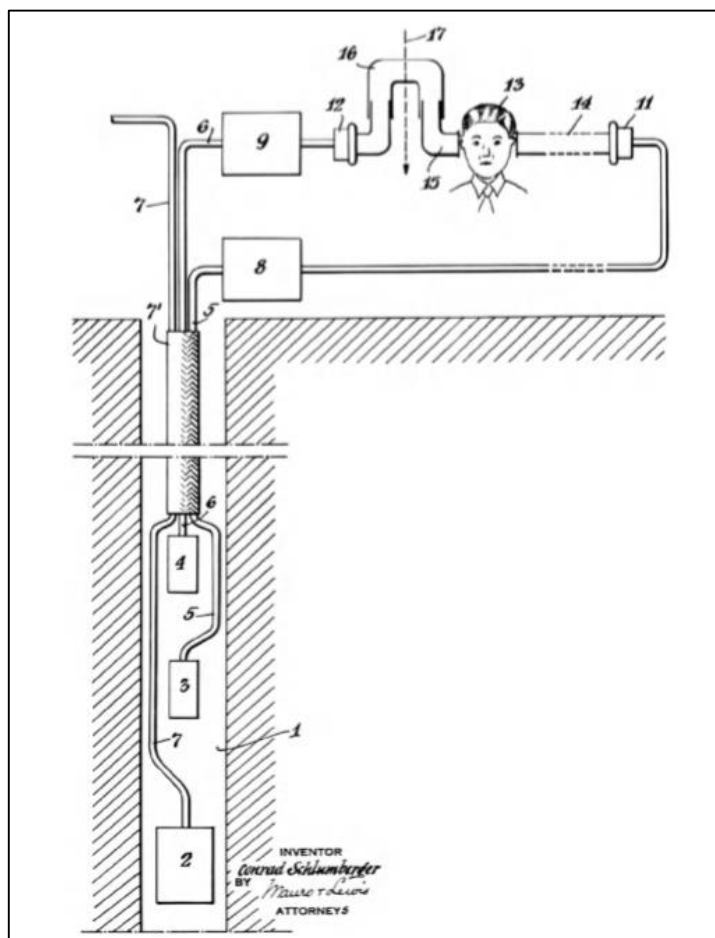
A perfilagem sônica, também conhecidas como: perfil acústico, perfil de velocidade e também por *full wave sonic* (FWS). De acordo com Fonseca (2014), o nome sônico, deriva do perfil de onda P o qual equivale à onda sonora. O método mais simples de operação consiste em mensurar o tempo de trânsito de ondas compressoriais (Ondas P) em um meio elástico (KINSLER e FREY, 1961). A sonda emite pulsos sônicos o qual se desloca através do fluido presente no furo até alcançar a parede do mesmo, onde logo após a esse trajeto das ondas sônicas é detectada por receptores.

O início da pesquisa sobre velocidade de onda, teve início na primeira guerra mundial, onde era utilizada para detectar a posição da artilharia rival através do método de triangulação. A indústria petrolífera em meados de 1920 começou a adaptar essa mesma metodologia afim de localizar e mapear domos salinos (SMIL, 2011).

Este método foi perpetuado ao final da segunda guerra mundial, uma vez que até então existiam vários problemas, sendo o principal foi a falta de correlação existente entre o tempo de trânsito e a velocidade das ondas sônicas em diferentes tipos de rocha (ELLIS e SINGER, 2007).

Em 1935 Conrad Schlumberger, através da possibilidade de aplicar esses métodos anteriores em poços, propiciou o desenvolvimento da perfilagem. Onde o perfilador determinava a medição direta, sendo essencialmente interpretativa, já que o equipamento possibilitava escutar os sons vindo do interior do furo (Figura 2.6) (ELLIS & SINGER, 2007).

Figura 2.6: Imagem esquemática do equipamento de perfilagem acústica desenvolvido por Conrad Schullumberger em 1935.



Fonte: ELLIS & SINGER, 2007.

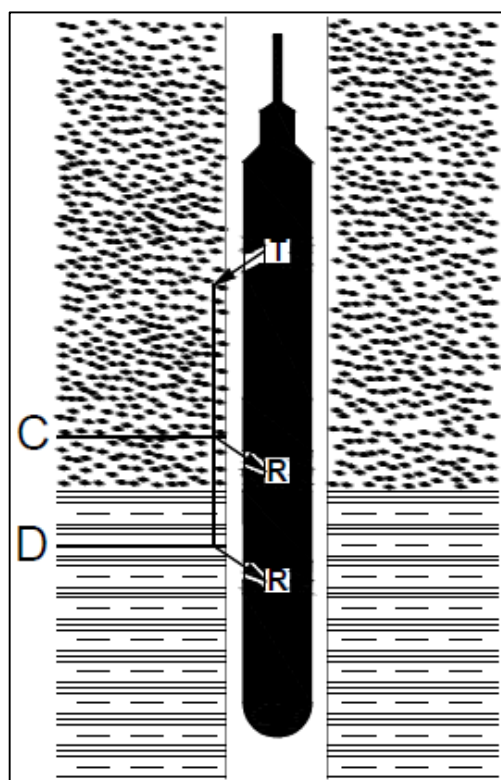
Ellis e Singer (2007), assumem que a perfilagem sônica é totalmente dependente de propriedades físicas do meio pela qual se propaga, neste caso o maciço rochoso. São essas características, porosidade, grau de intemperismo, grau de compactação, grau de vazios, grau de fraturamento e características das discontinuidades. Uma vez que essas características alterarão a velocidade de propagação das ondas acústicas. O comportamento da onda acústica no maciço rochoso, depende fundamentalmente das características elásticas do meio (TELFORD *et al.*, 1990).

A forma mais simples da aplicação da perfilagem sônica equivale na determinação de tempo de onda acústica no meio elástico (KINSLER & FREY, 1961). Mas com o desenvolvimento dos equipamentos perfiladores sônicos e as técnicas empregadas nas aquisições e tratamento de dados, além das estimativas da

porosidade e permeabilidade (parâmetros fundamentais na indústria petrolífera). Hoje a perfilagem sônica permite determinar a densidade, tensões *in situ*, quantidade de argila, presença de vazios (TITTMAN, 1986), podendo até mesmo identificar a qualidade da cimentação dos poços e dissoluções dos preenchimentos das descontinuidades (BASSIONI, 1994).

As sondas de perfilagem sônica geralmente apresentam uma constituição similar. Possuem dois ou três pares de receptores com intervalos entre eles de 200 – 300 mm e uma fonte emissora acústica a um afastamento de 900 – 1500 mm do primeiro receptor. As fontes originam pulso ultrassônicos de baixa frequência, com cerca de 20 – 40 KHz (KEAREY *et al.*, 2002).

Figura 2.7: Perfil esquemático de um perfilador sônico, que apresenta uma fonte emissora (T) e dois receptores (R1, R2). A representação da diferença da litologia é expressa por C e D.



Fonte: Adaptado de Oyler *et al.*, 2007.

Os pulsos emitidos pela fonte, viajam através do fluido até atingirem a parede do furo, o qual sofre reflexão ou refração, sendo detectados pelos receptores em tempos distintos. A partir da diferença dos tempos medidos pelos receptores, determina-se o tempo de trânsito do pulso acústico. O tempo de trânsito é

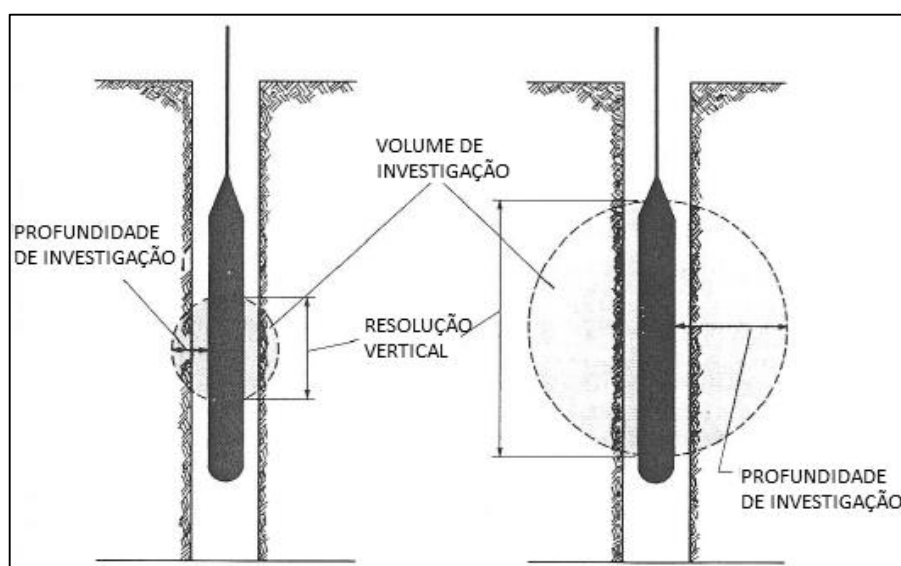


inversamente proporcional à velocidade de propagação do pulso, onde podem ser expressos em pés por segundo (ft/s) ou metros por segundo (m/s), (FONSECA, 2014).

As ferramentas de perfilagem sônica são compostas por receptores, que são sensores piezelétricos e de transmissores, os quais podem ser fabricados de cristais, cerâmica ou bobinas magnéticas. Os receptores têm a função de gerar um sinal elétrico quando identifica a chegada do pulso sônico. Já o transmissor tem a função de gerar uma deformação mecânica em resultado a um sinal elétrico (FONSECA, 2014).

Este tipo de perfilagem, apresenta um volume de investigação relativamente limitado, comparados com outro métodos de perfilagem geofísicos. O limite de investigação (Figura 2.8) do perfilador sônico é baixo, uma vez que os pulsos sônicos penetram apenas pouco centímetros na parede do furo, possibilitando a investigação de apenas alguns decímetros. Entretanto podem sofrer com interferências relativas às imperfeição na parede do furo e de discontinuidades presentes próxima à região investigada. Para sanar esses pequenos problemas aumenta-se o comprimento da ferramenta, o que acarreta em um maior distanciamento entre receptores (CARRASQUILLA, 2012). A resolução vertical desta ferramenta, está em torno de 200 – 300 mm, uma vez que esse comprimento depende do espaçamento existente entre os receptores (BUSTAMANTE, 2012).

Figura 2.8: Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com volume de investigação esférico

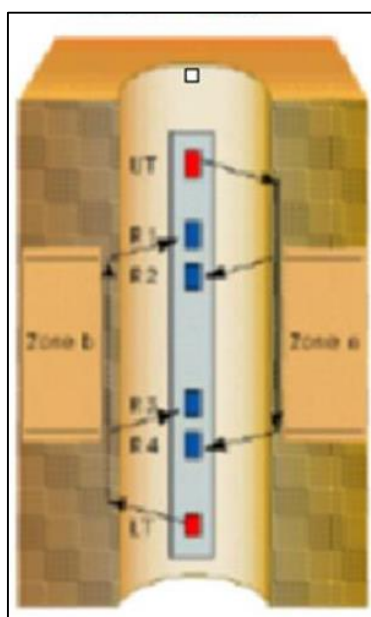


Fonte: Hoffman *et al.*, 1982.

Sondas com boa resolução vertical conseguem gerar dados na casa dos milímetros, sendo consideradas de alta resolução. Regiões que apresentam camadas finas requerem a utilização de sondas deste modelo, pois a outra, de menor resolução irá fornecer dados da média das camadas, podendo ocorrer a não identificação de camadas que apresenta espessura menor do que a resolução vertical.

Carrasquilla (2012) aborda outros problemas que esse tipo de perfilagem pode apresentar. Caso o furo, a ser perfilado for inclinado ou se o furo apresentar variações em seu diâmetro, pode acarretar a diferenciação do comprimento da trajetória dos pulsos sônicos, acarretando em medições de tempo de trânsito errôneas, os quais devem ser tratados de maneira diferenciada, se não leva a erros na interpretação desse dado. Porém esses erros de medição podem ser contornados com a utilização de uma segunda fonte transmissora (Figura 2.9), de forma que as variações existentes são compensadas quando todas as trajetórias forem analisadas no tratamento de dados, gerando um novo tipo de perfil, o Perfil Compensado de Furo ou *Borehole Compensater (BHC)* (FONSECA, 2014).

Figura 2.9: Perfilador composto, apresenta duas fontes (UT) e quatro receptores (R1, R2, R3 e R4), utilizado em furos inclinados e/ou com variação no diâmetro interno do furo.



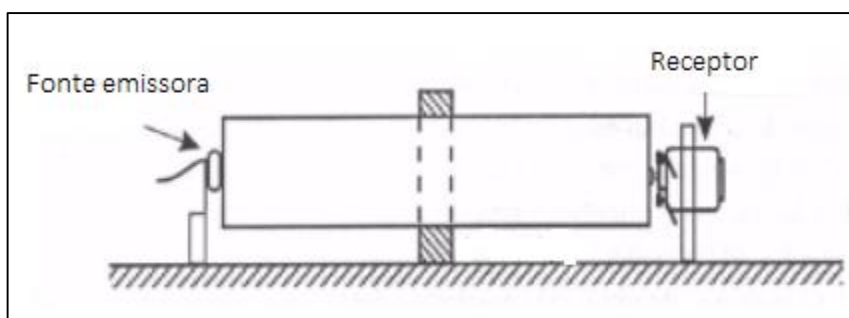
Fonte: Carrasquilla, 2012.

## 2.5. DETERMINAÇÃO DE $V_P$ EM LABORATÓRIO VIA *PUNDIT*

Kiliç (2006), argumenta que o início da medição de ondas ultrassônicas em laboratório se deu primeiramente na área da indústria da construção civil, evoluindo para a engenharia de Biossistemas e Engenharia de Minas (BARTON, 2007). A partir da necessidade de estudos para determinar a qualidade do concreto, empregando metodologias de ensaios. A combinação dos diferentes resultados (dureza superficial, densidade e estimativa da resistência a compressão uniaxial e módulos elásticos), obtidos através de ensaios diretos e indiretos foram empregados para a determinação da qualidade do concreto (MALHOTRA *et al.*, 1994).

As pesquisas utilizando a determinação das velocidades de ondas, iniciaram-se em 1940 (EVANGELISTA, 2002). Mas apenas em meados de 1960 foi desenvolvido um instrumento portátil, capaz de medir e determinar a velocidade das ondas ultrassônicas (CHUNG e LAW, 1983). De acordo com Neville e Brooks (1997), esta ferramenta emite vibrações amplificadas pela fonte emissora e detecta essas vibrações através do coletor, (Figura 2.10) determinando o tempo de trânsito do pulso.

Figura 2.10: Arranjo da primeira ferramenta de determinação da velocidade de onda.



Fonte: Adaptado de Neville e Brooks, 1997.

No ano de 2008 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) emitiu norma técnica NBR 15630, a qual estabelecia procedimentos para a determinação do módulo de elasticidade dinâmica, por meio da utilização da velocidade de onda ultrassônica. A NBR 8522 (1984) determinava os módulos mecânicos de elasticidade comparando com o módulo de elasticidade dinâmica (BASTOS, 2003. KUDO e MARTINS NETO, 2001). Mas a norma técnica internacional para esse ensaio é a ASTM D 2845-08.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é determinada com a utilização do *Pundit* (*Portable ultrasonic nondestructive index tester*), os ensaios são simples e com baixo custo. Esse método de ensaio descreve as medições laboratoriais das velocidades de compressão (onda P) e cisalhante (onda S) da rocha.

Essas velocidades podem ser influenciadas pela porosidade, grau de absorção da água, composição mineralógica e presença de descontinuidades. A velocidade de propagação de onda depende das propriedades elásticas do material. Quanto maior a resistência mecânica, maior será a coesão e maior será a velocidade de propagação que também é influenciada pela densidade dos minerais constituintes.

A metodologia para a medição das ondas ultrassônicas, funcionam basicamente com a transmissão de ondas que se propaga no meio elástico. O qual é dependente das propriedades do meio (BURGEY, 1989). A emissão das ondas é realizado pelo gerador que vibra a uma determinada frequência ao receber impulsos elétricos (SOARES, 1992). O receptor é capaz de calcular médias sobre as milhares de ondas captadas, otimizando o resultado e diminuindo o ruído. O sinal médio é determinado pelo *Pundit* e armazenado na memória interna (MANUAL PUNDIT, 1994).

O início da pesquisa para a determinação da velocidade de onda, através do *Pundit*, foi muito difundida pelo grande interesse na possibilidade de determinação da resistência à compressão das amostras de concreto. Autores como Ling & Wu (2002), Matusic *et al.* (2004), Popovics *et al.*, (1990) e Voigt *et al.* (2006), deram início à linhas de pesquisa para determinação de curvas de calibração para determinar a resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de ondas ultrassônicas.

Com base no desenvolvimento dessa linha de pesquisa, pesquisadores da indústria petrolífera, questionaram a possibilidade de empregar essas correlações na caracterização dos compôs petrolíferos. Com base nessa linha de pesquisa diversas equações de correlações empíricas foram desenvolvidas, todos com ajuste de uma equação a nuvem de pontos, para determinação do índice de correlação ( $R^2$ ) (SHARMA *et al.*, 2010). Dentre os principais modelos criados três propriedades foram as mais exploradas: velocidade de onda P ( $V_p$ ) com a porosidade ( $\phi$ ) e do módulo compressional ( $M = \rho V_p^2$ ). Vernik *et al.*, (1993) e Edlmann *et al.*, (1998) foram precursores da aplicação destas correlações à exploração petrolífera. Com relação ao módulo compressional, Moos *et al.* (1999) e Inoue e Ohomi (1981) realizaram

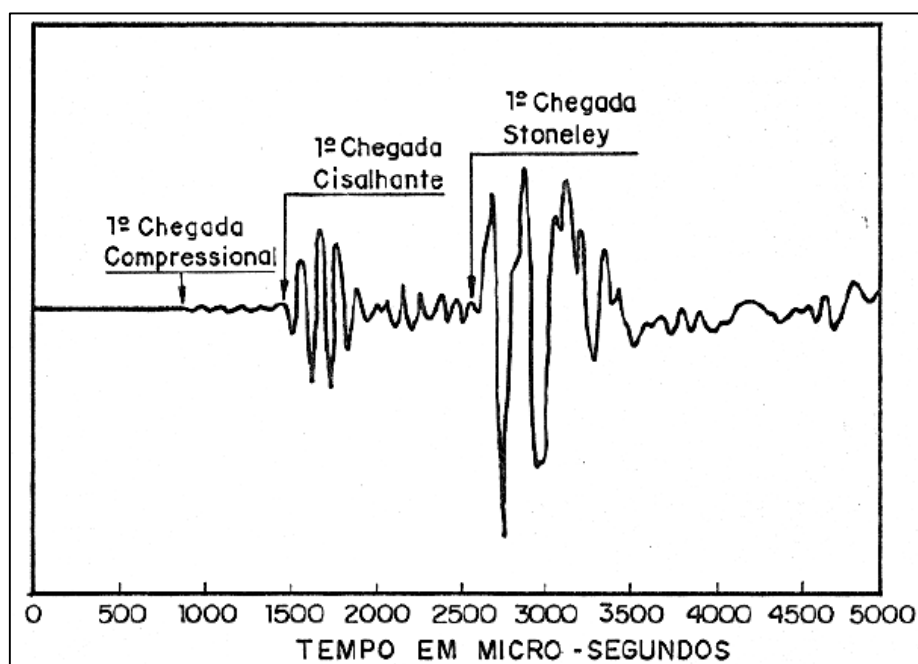
trabalhos obtendo correlações entre as rochas conglomeráticas e anfibólitos, respectivamente. Já a velocidade de onda P, é a que tem sido mais explorada, apresentando tanto trabalhos em laboratório quanto em campo.

## 2.6. ONDAS ACÚSTICAS

Em um meio com partícula muito pequenas, quando acometida por uma alteração no meio esta é disseminada às partícula vizinhas. E justamente essa o efeito que propicia a propagação de ondas. O principal atributo dessas ondas acústicas é a capacidade de permitir o deslocamento de energia por meio da vibração das partículas presente no meio à volta do seu ponto de equilíbrio (SOARES, 1992).

Em meios elásticos, ondas acústicas de diferentes tipos se propagam (Figura 2.11). Sendo os principais tipos de ondas as ondas compressoriais (ondas P) e as ondas cisalhantes (ondas S). As ondas P, geram alteração no sentido da propagação da onda, já a onda S, gera alteração no sentido perpendicular da propagação da onda (BEDFORD e DRUMHELLER, 1994).

Figura 2.11: Modelo de detecção completo das ondas acústicas

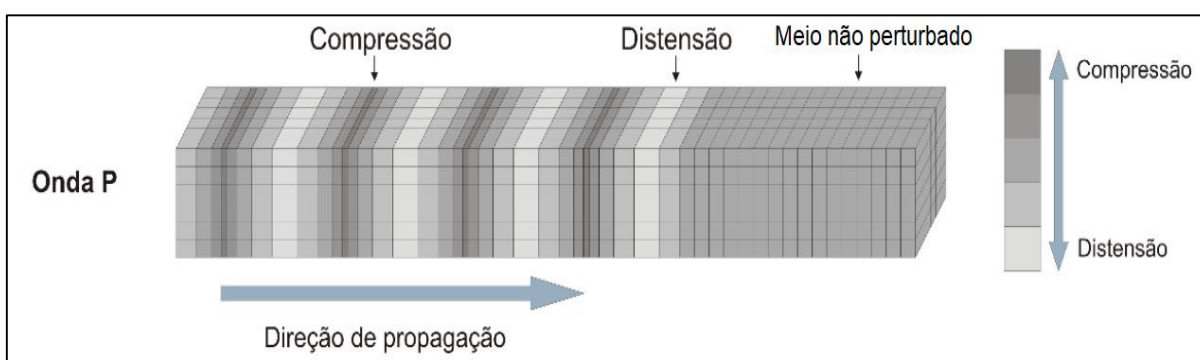


Fonte: Soares, 1992.

## 2.7. TIPOS DE ONDA

As primeiras ondas a serem detectadas pelo sensor é a onda compressional conhecida também como onda P. É o tipo de onda mais rápida e apresenta a propriedade de gerar compressão e distensão no meio (Figura 2.12). Em razão das características mecânicas da onda P, esta preserva uma associação com a compressibilidade do meio (SERRA 2008; PEREIRA 2017). A sua velocidade depende integralmente das características do meio onde ocorrem, sendo que esta é a única que se propaga no fluido.

Figura 2.12: Ilustração esquemática da propagação da onda P

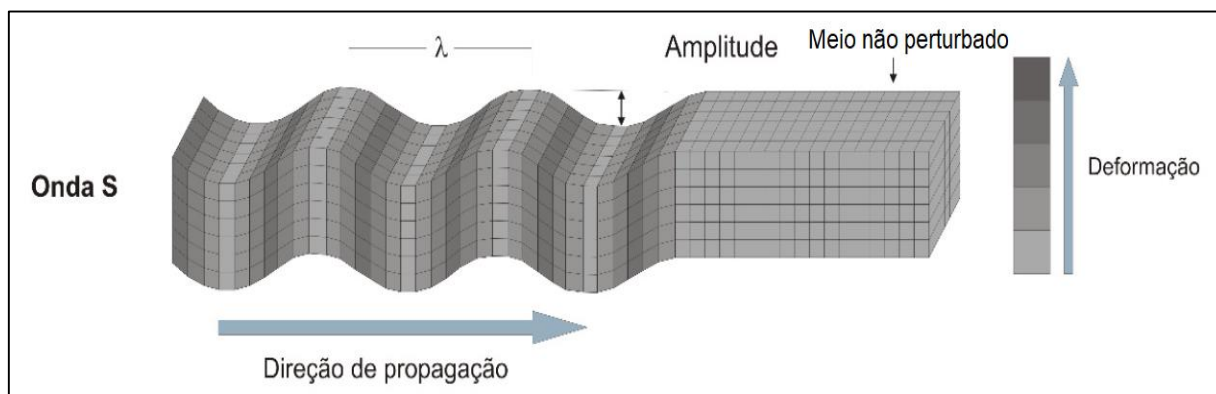


Fonte: adaptado de Pereira, 2017.

A segunda onda a ser detectada é a onda cisalhante, conhecida como onda S. Apresenta um velocidade de propagação cerca de 1,6 a 2,0 vezes mais lenta do que a onda P. É caracterizada por gerar deformação do meio na direção perpendicular à direção de propagação do pulso (SERRA, 2008). Essa onda apresenta um relação entre a velocidade de propagação, amplitude de onda e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) com as características do meio (Figura 2.13) (PEREIRA, 2017).

Em razão das características mecânicas da onda S, esta apresenta uma correlação a suscetibilidade ao cisalhamento do maciço rochoso. Essas correlações que levam em conta as ondas P e S viabiliza a determinação de parâmetros elástico do maciço rochoso (WHITE, 1983).

Figura 2.13: Ilustração esquemática da propagação da onda S.



Fonte: adaptado de Pereira, 2017.

De acordo com Soares (1992) a onda Stoneley, é a última onda a ser detectada. Mas este tipo de onda é a menos importante. Em maciços rochosos não consolidados, a onda Stoneley, pode ser detectada antes da onda S, dificultando a análise da última. Nesses casos Liu (1984), afirma que o cálculo de  $V_s$  pode ser feita com o tempo de trânsito da onda Stoneley (Figura 2.11).

## 2.8. RELAÇÕES MATEMÁTICAS RELACIONADAS COM $V_p$ E $V_s$

A velocidade de uma onda compressional ( $V_p$ ), que se desloca através de um meio, com uma frequência  $f$  e um comprimento de onda  $\lambda$ . Pode ser calculada como:

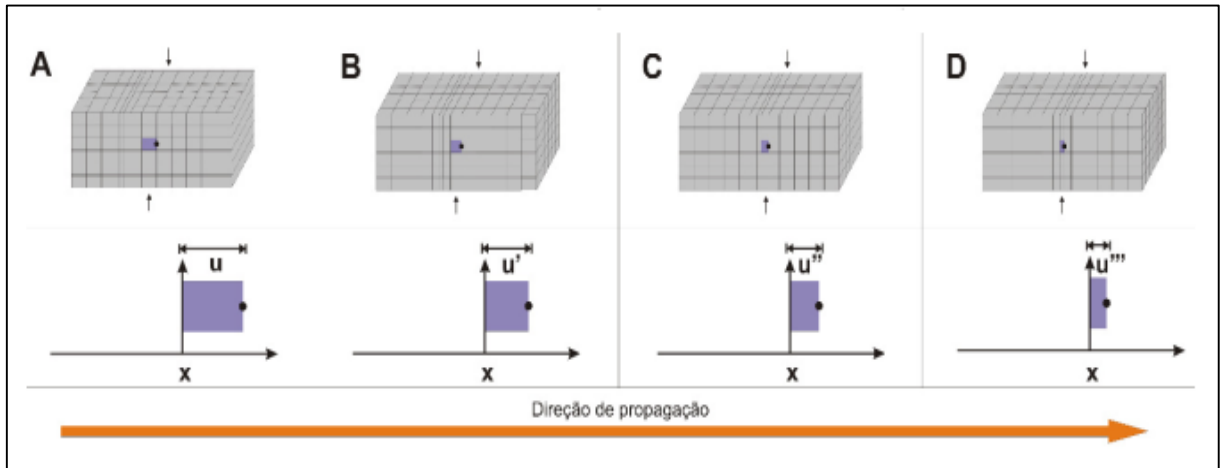
$$V_p = \lambda f \quad (2.8)$$

Onde  $\lambda$ , de acordo com Tipler e Mosca (2008) a mesma definição que é aplicado, em onda do tipo S também pode ser aplicado para onda P. O qual  $\lambda$  é a corresponde ao intervalo entre dois picos entre dois vales da onda que se propaga em um meio elástico (Figura 2.13). Ellis e Singer (2007), definem que  $V_s$

tem que ser aproximadamente 40% da  $V_p$ .

A análise cinemática do pulso de onda é base primordial para cálculos de  $V_p$  e  $V_s$ . Sendo fundamental definir a posição da frente de onda, em um certo momento. Averiguando o movimento da frente de onda, incorporado em uma unidade de volume, é possível identificar a localização da mesma (Figura 2.14).

Figura 2.14: Localização da frente de onda em um determinado instante. Onde em a) frente de onda em repouso,  $t_0$ . b) início da movimentação de compressão da frente de onda. c) momento intermediário do movimento de compressão da frente de onda. d) final do movimento de compressão da frente de onda, momento onde acontece a máxima compressão gerada pelo deslocamento da onda compressional.



Fonte: Pereira, 2017.

De acordo com Pereira (2017), a partir da segunda Lei de Newton, onde  $x$  é a localização da unidade de volume de área  $S$  e dimensão  $\Delta_x$  por toda extensão da propagação de onda, no contexto que a unidade de volume esta inserida, temos que:

$$F = \rho S \Delta_x \frac{d^2 u}{dt^2} \quad (2.9)$$

Nesta caso, tomando  $F$  como a oposição das forças atuantes nas superfícies do volume de área em movimento:

$$F(x) - F(x + \Delta x) \quad (2.10)$$

E considerando que:

$$P = F/A \quad (2.11)$$

Temos:



$$P(x) - P(x + \Delta_x) = \rho \Delta_x \frac{d^2 u}{dt^2} \quad (2.12)$$

Passando a pressão para função do módulo de *Young*, para ambas as faces e derivando a equação temos:

$$\frac{E d^2 u}{\rho dx^2} = \frac{d^2 u}{dt^2} \quad (2.13)$$

White (1983), definiu a velocidade da onda de compressão como sendo:

$$Vp^2 = \frac{E}{\rho} \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.14)$$

Considerando que a velocidade como sendo zero (neste caso em particular) podemos definir  $V_p$  e  $V_s$  como:

$$Vp = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.15)$$

$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.16)$$

Com bases nas correlações entre as equações de velocidades de ondas com as constantes elásticas, podemos calcular alguns módulos elásticos, de acordo com a tabela 2.1:

Tabela 2.1: Tabela contendo as fórmulas, para cálculo de alguns módulos elásticos (Módulo de cisalhamento, de massa e Elasticidade e a Razão de *Poisson*).

Propriedade Elástica Dinâmica	$V_p, V_s$ e $\rho$
<b>Módulo Cisalhante - <math>G</math></b>	$\rho \times V_s^2$
<b>Módulo de Massa - <math>K</math></b>	$\rho (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$
<b>Módulo de Elasticidade - <math>E</math></b>	$\frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$
<b>Razão de <i>Poisson</i> - <math>\nu</math></b>	$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$

## 2.9. FATORES QUE INTERFEREM NA VELOCIDADE DA ONDA

Neste ítem, será abordado os efeitos do intemperismo próximo à superfície perante a velocidade das ondas P. Barton (2007) defende a pesquisa relacionada com o intemperismo abre um leque automaticamente de fatores que se apresentam separados por tópicos, mais estritamente aos efeitos da densidade, porosidade, resistência à compressão uniaxial, profundidade e o grau de saturação. Onde os dois últimos tópicos não serão apresentados, já que nessa pesquisa foi inviabilizando as suas análises.

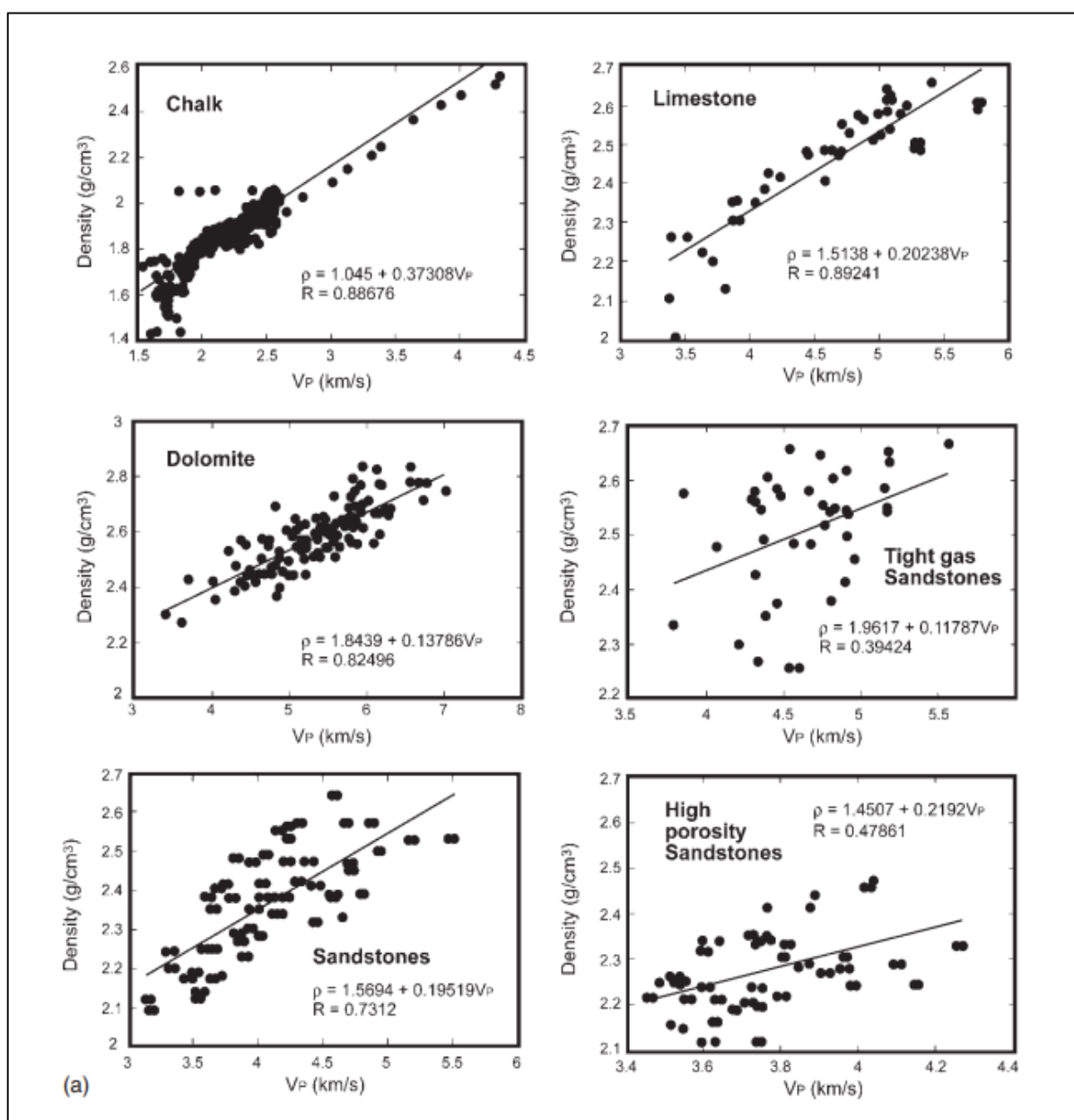
- Densidade e  $V_p$

A velocidade de onda, dentro de um material elástico, depende primordialmente dos módulos elásticos e da densidade do material. Uma rocha apresentará diferentes velocidades, de acordo com a composição mineralógica que o material que a onda esta percorrendo. A definição de densidade esta intimamente ligada a quantidade de massa presente em uma certa quantidade do material. Sendo assim, a velocidade é controlada pela quantidade de espaços vazios contido no material e pelas propriedades elásticas.

Ou seja, uma rocha mais densa, apresentará uma velocidade de propagação mais alta, por outro lado, caso a mesma rocha apresente descontinuidades, a

velocidade de propagação da mesma será ponderada no tempo positivamente e negativamente a depender do ângulo de mergulho e extensão das fraturas (MORRIS, 1964), que a onda demora para ultrapassar a parte cristalina e as discontinuidades presentes. A Figura 2.15, exemplifica o comportamento proporcional da correlação entre  $V_p$  e densidade, ou seja se  $V_p$  aumenta a densidade também aumenta (MAVKO *et al.*, 1998).

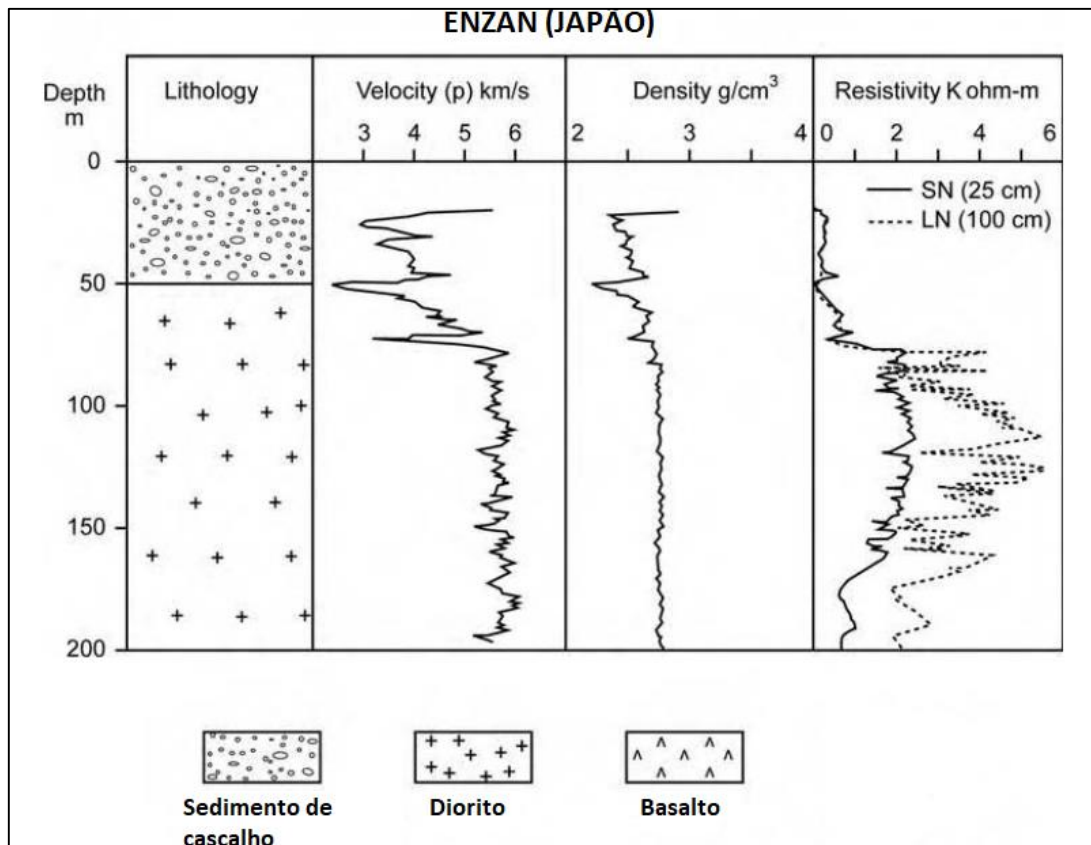
Figura 2.15: A imagem de Mavko *et al.*, (1998) ilustra o comportamento proporcional entre  $V_p$  e a densidade, para diferentes tipos de rocha.



Fonte: Mavko *et al.*, 1998.

Ikeda (1963), realizou estudos com registros sônicos, onde comparou a velocidade de onda com o grau de intemperismo da rocha e com a densidade da mesma. A figura 2.16, apresenta o resultado obtido, onde fica claro a relação crescente entra a densidade e a velocidade da onda.

Figura 2.16: Influência da densidade e do grau de intemperismo sobre a velocidade de onda P.



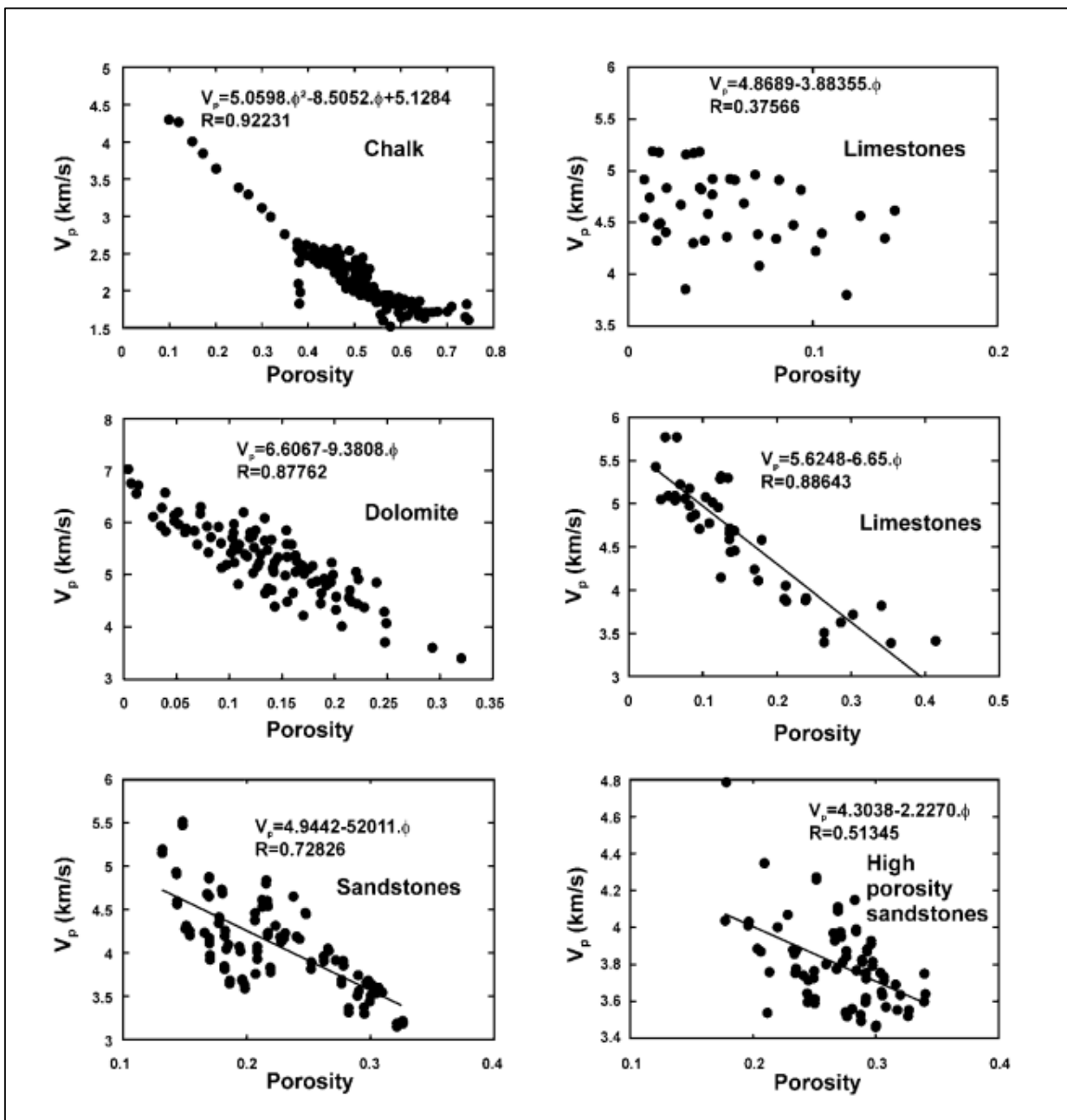
Fonte: Adaptado de Ikeda, 1993.

- Porosidade e  $V_p$

Há uma grande quantidade de dados na literatura sobre efeito da porosidade da matriz da rocha, sob a velocidade da onda P. Esse assunto é muito abordado na investigação de reservatório de petróleo (BARTON, 2007).

Em geral existe uma correlação inversa entre a velocidade de onda P e a porosidade, podendo ocorrer uma sutil dispersão dos dados em rochas causados por grau de cimentação e pelo teor de argila. Mas de acordo com Dvorkin e Nur (1998), o padrão inverso de correlação é usual, A figura 2.17, ilustra bem essa realidade.

Figura 2.17: Gráficos de correlação entre Porosidade e  $V_p$ , em diferentes litologias.



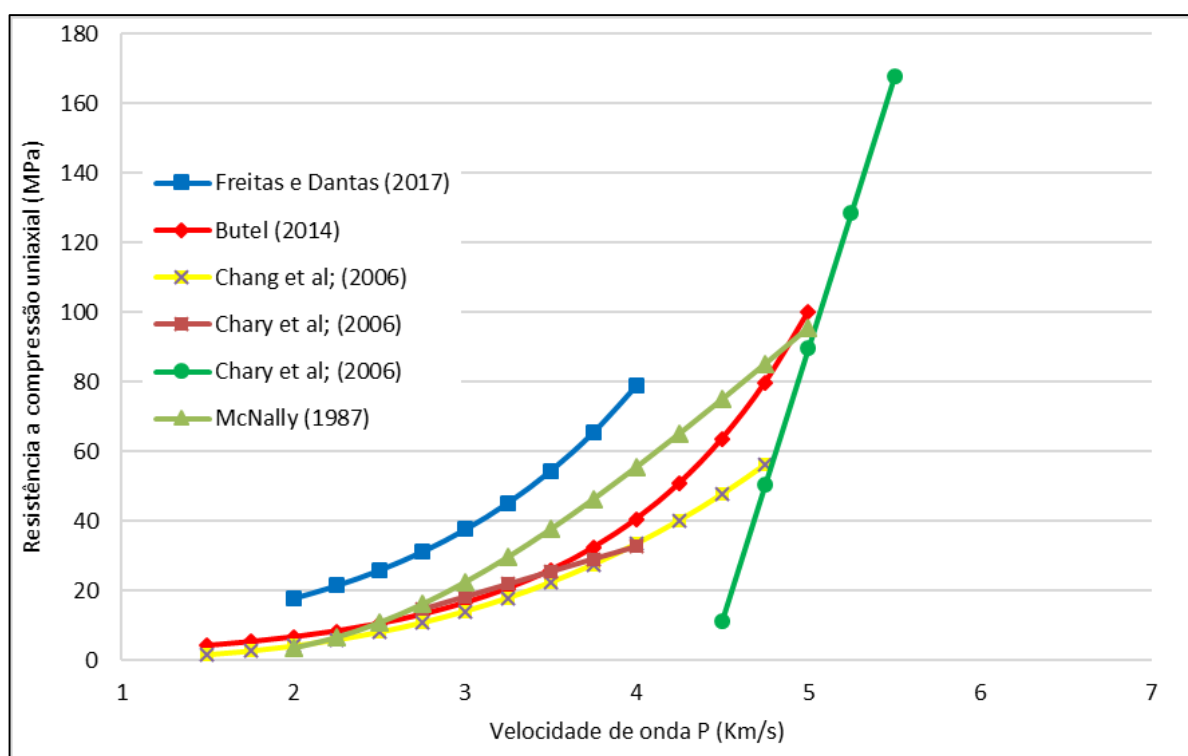
Fonte: Mavko *et al.*, 1998

Wilkins *et al.* (1984), descobriram que a porcentagem de teor de argila em arenitos, tem um efeito muito marcante na velocidade de onda P. Este trabalho mostra a influência adversa do teor de argila na velocidade de onda P. Uma vez que com a diminuição da porosidade secundária (devido a alta concentração de argila) a velocidade de onda P aumenta, devido aos princípios básicos de transmissão de ondas acústicas.

- Resistência à compressão e  $V_p$

A determinação da resistência da rocha (UCS), utilizando métodos indiretos, no caso a velocidade da onda P, requer um pouco de criteriosidade. Uma vez que a porosidade, densidade, tamanho dos grãos, composição mineralógica e presença de descontinuidades também influenciam na determinação da velocidade da onda P (BARTON, 2007). A velocidade de propagação de onda é dependente das propriedades elásticas do material. Quanto maior for a resistência mecânica, maior será a coesão e maior será a velocidade de propagação (Figura 2.18).

Figura 2.18: Correlações obtidas para arenitos de diferentes autores e localidades.



Fonte: Freitas et al., 2017.

Butel (2014) e McNally (1987), utilizaram uma correlação na forma exponencial, Chary *et al.*, (2006) trabalha com dois conjuntos de dados separados, os quais se ajustam melhor em uma correlação linear. Muitos autores trabalharam com a determinação da relação entre  $V_p$  e UCS, a Tabela 2.1 apresenta algumas equações que foram desenvolvidos por diferentes autores.

Mas Sharma & Sing (2008), afirmam que as variações entre resultados pode estar relacionado com mudanças na característica da geologia local, por isso,

sugerem que seja comparadas amostras e velocidades da onda P que estejam atribuídos ao mesmo contexto geológico.

Tabela 2.2. Equações de correlação entre  $V_p$  e UCS, de diferentes autores.

Referência	Correlação empírica
Freyburg (1972)	$UCS = 35V_p - 31,5$
Militzer (1973)	$UCS = (7682/\Delta t)^{1.82}/145$
Ohomi (1981)	$UCS = k \rho V_p^2 + 31.18$
McNally (1987)	$UCS = 8,27 \exp(-0,036\Delta t)$
Goktan (1988)	$UCS = 36V_p - 31,2$
Moos et al., (1999)	$UCS = 1.745 \times 10^{-9} \times \rho V_p^2 - 21$
Tugrul e Zarif (1999)	$UCS = 35,54V_p - 55$
Kahraman (2001)	$UCS = 9.95V_p^{1.21}$
Horsrud (2001)	$UCS = 0.77(304.8/\Delta t)^{2.93}$
Yasar e Erdogan (2004)	$UCS = (V_p - 2,0195)/0,032$
Entwisle et al; (2005)	$UCS = 0.783 e^{0.882V_p}$
Entwisle et al; (2005)	$UCS = 0.292 V_p^{4.79}$
Unpublished: Chang et al., (2006)	$UCS = 1.4138 \times 10^7 (\Delta t^{-3})$
Chary et al; (2006)	$UCS = 156,4V_p - 692.41$
Chary et al; (2006)	$UCS = 14,4V_p - 24.856$
Mark et al., (2007)	$UCS = 22,25x \exp (-0,054\Delta t)$
Sharma e Singh (2008)	$UCS = 64,2 V_p - 117.99$
Yagiz (2011)	$UCS = 49.4 V_p - 167$
Yagiz (2011)	$UCS = 0.258 V_p^{3.543}$
Kurtulus et al; (2011)	$UCS = 67,5V_p - 245.13$
Kurtulus et al; (2011)	$UCS = 18,8V_p - 71.04$
Jabbar et al, (2011)	$UCS = 5363,64V_p$
Hakan e Derya (2012)	$UCS = 14 \ln (V_p/n) - 96$
Hakan e Derya (2012)	$UCS = 15 \ln (V_p/n) - 73$
Hakan e Derya (2012)	$UCS = 0.0009 (V_p/n) + 38$
Azimian (2013)	$UCS = 0,026V_p - 20,207$
Sheraz, (2014)	$UCS = 218.8V_p - 1413$
Butel et al; (2014)	$UCS = 1,11e^{0,9V_p}$
Freitas e Dantas (2017)	$UCS = 4,0966e^{0,7394x}$

Fonte: Freitas *et al.*, 2017.

### 3. MATERIAS E MÉTODOS

A pesquisa deste trabalho foi realizada nos seguintes estágios (Tabela 3.1):

- Estágio 1 - Sondagem diamantada: Esta etapa foi realizada por uma empresa de sondagem contratada. Nesta campanha de sondagem foram perfurados os furos: SI-06, SI-08, SI-09, SI-10, SI-13 e SI-15;
- Estágio 2 - Descrição dos furos de sondagem: foi realizada no primeiro instante a descrição litológica completa dos furos de sondagem. Após a descrição foram determinados intervalos de interesse, para serem analisados e ensaiados;
- Estágio 3 – Perfilagem Sônicas: Foram perfilados os furos acima descritos, com objetivo de criar curvas de calibração para o equipamento no ambiente geológico em que os furos estão inseridos;
- Estágio 4 – Amostragem: Nesta etapa, foram coletadas amostras pertencentes aos intervalos de interesse para a realização desta pesquisa;
- Estágio 5 – Preparação das amostras: As amostras foram catalogadas, registrando o nome da amostra, peso total, comprimento e diâmetro da mesma;
- Estágio 6 – Realização do ensaio: os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas da Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foram realizados os ensaios: *pundit*, compressão uniaxial e propriedades físicas;
- Estágio 7 – Tratamento dos dados: Por último os dados foram tratados e correlacionados, a fim de gerar curvas de correlação e calibração, para determinação de UCS com dados da velocidade de onda P.



Tabela 3.1: Tabela com organograma da Metodologia utilizada neste trabalho.

<b>Sondagem diamantada recuperada</b>
<b>Descrição dos furos de sondagem</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descrição litológica</li> <li>• Identificação dos intervalos de interesse</li> </ul>
<b>Perfilagem Sônica</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avaliação da qualidade dos dados adquiridos</li> <li>• Tratamento dos dados</li> <li>• Aquisição do perfil da velocidade da onda P</li> </ul>
<b>Amostragem</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção e separação das amostras, do intervalo de interesse</li> </ul>
<b>Preparação das amostras</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corte</li> <li>• Catalogação das amostras. Nome, peso, altura e diâmetro</li> </ul>
<b>Realização dos ensaios</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pundit</li> <li>• Compressão Uniaxial (UCS)</li> <li>• Propriedade físicas</li> </ul>
<b>Tratamento dos dados</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificação/validação da qualidade do banco de dados</li> <li>• Determinação dos índices de correlação/curvas de calibração</li> </ul>
<b>Determinação das propriedades a partir desta metodologia</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinação do UCS a partir dos dados do Pundit</li> <li>• Determinação do UCS a partir dos dados da Perfilagem</li> <li>• Determinação de <math>V_p</math> Sônico a partir dos dados do Pundit</li> <li>• Determinação de <math>V_p</math> Pundit a partir dos dados da Perfilagem</li> </ul>

Fonte: Autoria própria.

### 3.1. MATERIAIS

O Laboratório de Mecânica de Rochas em parceria com o Laboratório de Pesquisa Mineral (LPM), do departamento de Engenharia de Minas da UFRGS, realizaram a perfilagem e os ensaios pertinentes a esta pesquisa.

Para a execução da perfilagem foi utilizado somente o perfilador sônico *Slim-Hole Full Waveform Triple Sonic*. Já para os ensaios de compressão uniaxial foi utilizado a prensa hidráulica *Control Advanced 9* e para a determinação da velocidade da onda P, em laboratório, foi utilizado o *Pundit PL 200* Proceq.

#### 3.1.1. Perfilador sônico

A ferramenta utilizada, foi o perfilador sônico *Slim-Hole Full Waveform Triple Sonic*, fabricada pela *Robertson Geollogging Ltd*. O perfilador montado com os centralizadores e com as chaves para montagem é apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Perfilador sônico *Slim-Hole Full Waveform Triple Sonic*. Utilizado nesta pesquisa.



Fonte: Silva, 2012.

O manual do usuário apresenta algumas possíveis aplicações desta ferramenta, dentre as possibilidades de utilização: Identificação da litologia, correlacionar a velocidade de onda sísmica, estimar a porosidade, estimar a resistência da rocha e determinar a presença de descontinuidades. As suas especificações técnicas estão dispostas na Tabela 3.2.

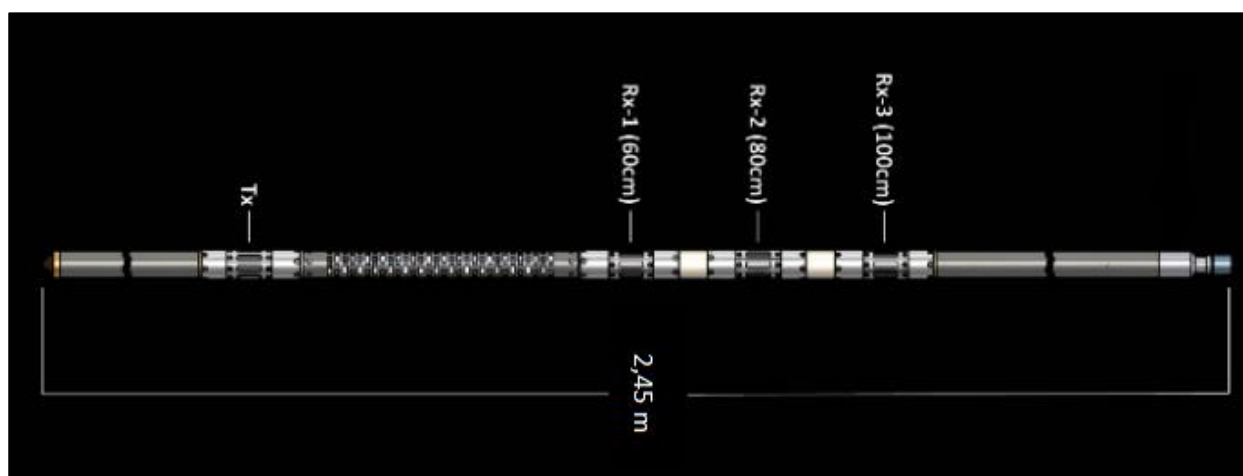
Tabela 3.2: Especificações técnicas do perfilador sônico.

Comprimento	2,45 m
Diâmetro	45 mm
Peso	15 Kg
Temperatura de trabalho	0° a 100°C
Pressão máxima	3000 PSI
Fonte de potência	60 – 100 V DC, 100 mA
Diâmetro limite dos poços	60 – 300 mm
Velocidade típica de trabalho	3 m/min

Fonte: Autoria própria.

O perfilador sônico, apresenta uma fonte emissora, que é composto por um transdutor eletroacústico (Tx), o qual gera pulsos acústicos, quando estimulado por impulsos elétricos adequados. O transdutor, quando estimulado eletricamente, gera e emite pulsos acústicos com uma frequência de 23 kHz (ultrassom). Esta ferramenta também é composta por três receptores (Rx1, Rx2, Rx3) ultrassônicos, os quais identificam e captam os pulsos acústicos gerados pela fonte emissora (Figura 3.3).

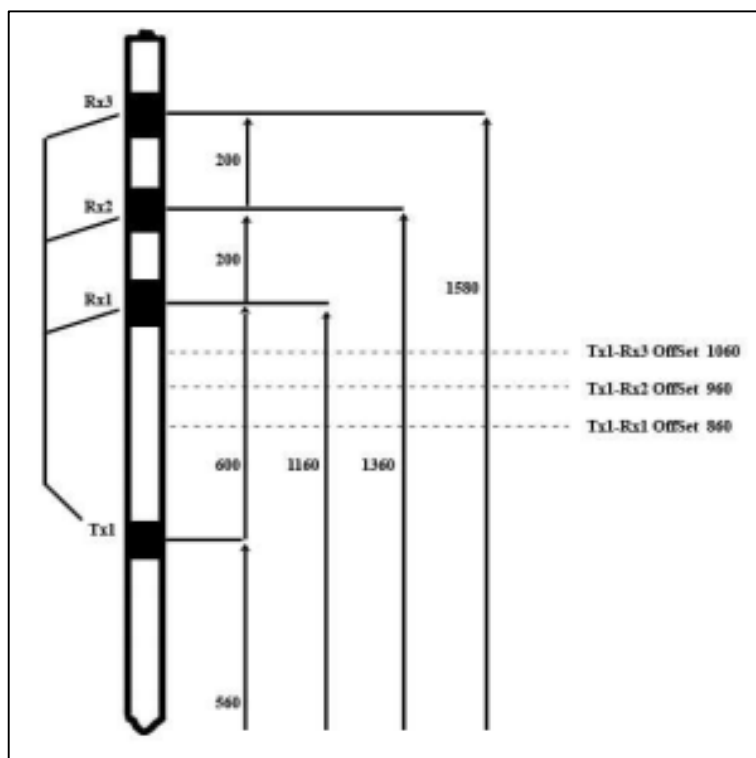
Figura 3.2: Imagem esquemática da posição dos conjuntos do transdutor (Tx) e dos receptores (Rx1, Rx2, Rx3).



Fonte: Adaptado Robertson Geologging, (2007).

A Figura 3.3, apresenta um esquema do caminho de trânsito do pulso acústico emitido pelo transdutor, esse pulso, irradia pelo fluido presente no poço, até atingir a parede do furo, sofrendo processo de reflexão e/ou refração. As ondas refletidas atingem os receptores, onde são captadas e registradas, primeiro pelo Tx1, em seguida pelo Tx2 e por último pelo Tx3. O perfil resultante desta perfilagem é o *Full Wave Sônic (FWS)*, onde são registrados a amplitude da onda acústica e suas respectivas velocidades nos diferentes sensores (Figura 3.3).

Figura 3.3: Figura esquemática da propagação da onda acústica emitida pelo transdutor (Tx) e as chegadas de ondas nos respectivos receptores (Tx1, Tx2, Tx3).



Fonte: Robertson Geologging, (2007).

### 3.1.2. Prensa hidráulica:

A prensa hidráulica utilizada para a realização dos ensaios de compressão uniaxial foi a *Advanced 9*, fabricada pela empresa *Control*. Esse equipamento é dividido em três setores. O primeiro é a prensa hidráulica, onde está presente: braço móvel, que imprime a pressão sobre a amostra e os medidores de deslocamento, conhecido como "LVDT" (*Linear variable differential transformer*). O segundo é a o comando central da prensa, apresenta a bomba hidráulica responsável pelo

movimento do braço da prensa. Além de ser responsável pela comunicação entre o computador e a prensa. Sendo assim possível ligar e desligar a prensa, determinar a relação de pressão/segundo do movimento do braço da prensa. A última parte que compõe a sonda é o computador, que é responsável pela emissão dos comandos da prensa, recebimento e armazenamento dos dados além de enviar comandos para a central da prensa. O computador está ligado a uma central que transforma os dados recebidos pelo LVDT em formato de tabela, os quais podem ser armazenados no computador (Figura 3.4).

Figura 3.4 Foto da prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão uniaxial. a) componente do braço da prensa; b) componente do comando da prensa e c) computador.

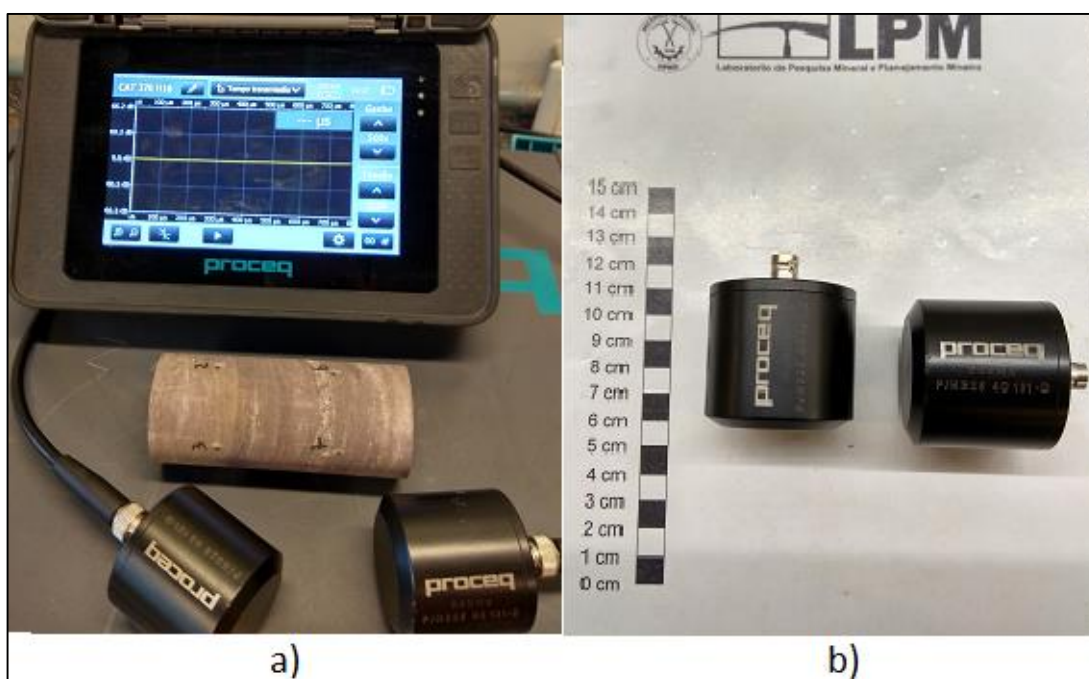


Fonte: Autoria própria.

### 3.1.3. **Pundit Proceq**

O *Pundit* PL 200 da marca *Proceq* (Figura 3.5(a)), foi o equipamento utilizado para determinar a velocidade de onda P ( $V_p$ ) em laboratório. Este apresenta uma parte computacional, aonde são gerados impulsos elétricos que dão origem aos pulsos acústicos, nos transdutores e analisadas as chegadas das ondas emitidas, além de conter um *display* para navegação, análise e interpretação dos ensaios realizados. Contém dois transdutores de 54 kHz (Figura 3.5 (b)), onde um é responsável pela emissão dos pulsos ultrassônicos e o outro é responsável pela detecção do mesmo. A Tabela 3.2, apresenta as especificações técnicas mais importantes desse equipamento.

Figura 3.5: *Pundit* e transdutores utilizados nos ensaios de determinação de  $V_p$ .



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.3: Especificações técnicas do *Pundit* PL-200.

Resolução	0,1 $\mu$ (<793 $\mu$ s), 1 $\mu$ s (>793)
Voltagem do pulso UPV	100 Vpp – 450 Vpp
Ganho do receptor	1 x 10000 x (0 – 80Db)
Sensibilidade do sensor	10 $\mu$ V
Impedância do receptor	7 K $\Omega$
Peso	1525 g
Dimensões	250 x 162 x 62 mm
Temperatura de funcionamento	0 a 40°C
Modelo	PL-200

Fonte: Autoria própria.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado transdutores originais de fábrica, os quais são constituídos por elementos piezoelétricos os quais são fabricados de

cerâmica e titanato de zircônio. Os transdutores trabalham na frequência de 54 kHz, com movimento de *Thickness-expander*, que são capazes de gerar somente onda do tipo compressional. Esse transdutor é utilizado somente com o objetivo de medir o tempo de trânsito da onda compressional. O Anexo B, apresenta todas as medições obtidas neste trabalho através do *Pundit*.

### 3.2. SONDAGEM DIAMANTADA

Esta etapa do trabalho, não foi realizada durante a realização deste trabalho além de ter sido desenvolvido por uma empresa especializada de sondagem diamantada testemunhada. Mas julgamos importante comentar sobre esta etapa, uma vez que é responsável pela obtenção das amostras descritas e ensaiadas. Sendo, portanto a origem dos corpos de prova de todo o trabalho. A Figura 3.6, ilustra uma caixa de testemunhos de sondagem. Com diâmetro NX, que apresenta aproximadamente as medidas de diâmetro externo de 75,60 mm e diâmetro interno de 54,70 mm.

Figura 3.6: Imagem representativa de caixa de testemunhos de sondagem.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3. DESCRIÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM

Esta etapa também não foi realizada durante a confecção deste trabalho, mas a importância desse passo é notável. Nesta etapa, a rocha é descrita, como máximo de riqueza de detalhes englobando a litologia, mineralogia, descrição da granulometria, textura, grau de intemperismo, levantamento e descrição das descontinuidades.

O primeiro passo é o registro fotográfico das caixas de testemunho de sondagem. Em seguida é realizada a descrição litológica, onde os testemunhos são separados por litologia. Sendo caracterizada também a mineralogia presente em todas as litologias, granulometria dos grãos e textura dos grãos constituintes da rocha. E por último é realizada a descrição geotécnica dos testemunhos, onde os mesmos são separados por zona de características estruturais semelhantes, o que pode ser definido pelo grau de fraturamento, grau de intemperismo e/ou grau de resistência da rocha. A identificação e caracterização das descontinuidades presentes é de suma importância, para estimativa da qualidade do maciço e em seguida orientar melhor a amostragem.

### 3.4. PERFILAGEM SÔNICA

A perfilagem sônica, também foi uma etapa, a qual não foi realizada durante a execução deste trabalho. O banco de dados foi doado pela empresa Copelmi. Mas, mais uma vez, para um bom entendimento do mesmo, reiteramos a importância da explicação e detalhamento desta atividade.

É importante salientar, que as imagens utilizadas nessa descrição das atividades não são referentes ao trabalho de perfilagem o qual temos os dados, mas é interessante, mostrarmos as mesmas, pois ilustram o procedimento operacional da perfilagem.

Este trabalho contou com a perfilagem de seis furos de sondagem (SI-06, SI-08, SI-09, SI-10, SI-13 e SI-15), os quais foram executados com diâmetro NX



(diâmetro externo do furo: 75,60 mm, diâmetro do testemunho de sondagem aproximadamente: 54,70 mm). Todos os furos apresentam aproximadamente o mesmo comprimento com cerca de 50 m de profundidade de todos os furos de sondagem estavam revestidos com material metálico, que são claramente identificados através dos perfis de velocidade sônica, a Imagem 3.9 ilustra muito bem essa situação. Uma vez que até os 10 m, o comportamento do perfil de velocidade é bem uniforme, sem grandes ressaltos e determinando uma velocidade de aproximadamente 5500 m/s, a qual é característica de materiais metálicos.

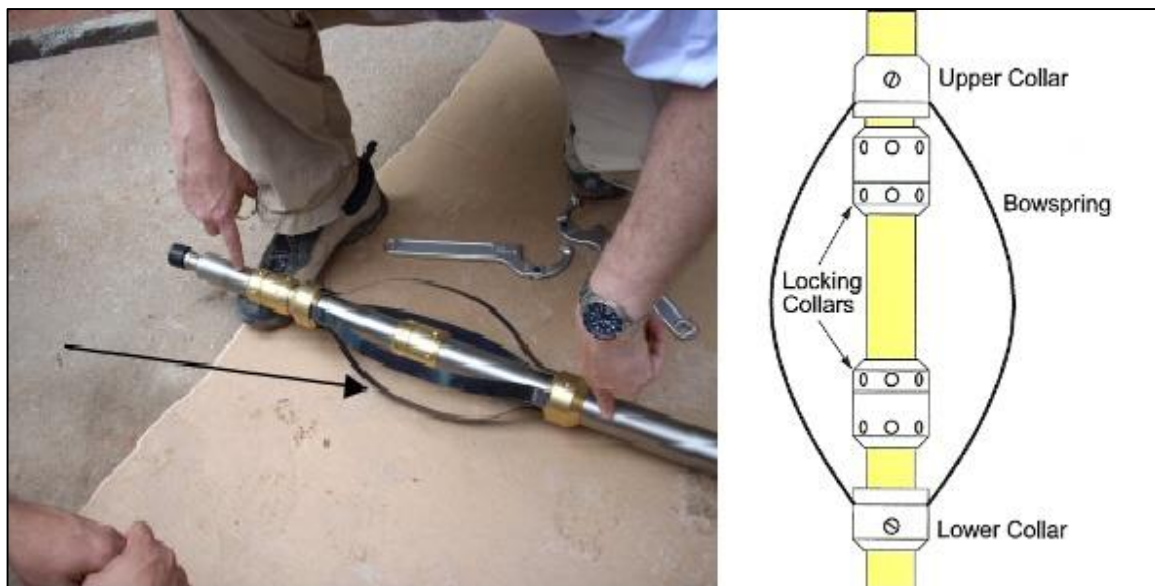
#### 3.4.1. Montagem do equipamento de perfilagem

Inicia-se a perfilagem com a preparação dos equipamentos: montagem do *MicroLogger*, do perfilador sônico e do tripé de sustentação. O *MicroLogger*, é responsável pela interação computador/perfilador enviando comando e recebendo os dados de aquisição do perfilador.

Para o sucesso da perfilagem sônica, é imprescindível a utilização do centralizador, é um instrumento, que tem a função de posicionar o perfilador no centro exato do furo a ser perfilado (Figura 3.7). Esse detalhe é importante para uma boa aquisição dos dados, sem distorção ou descontinuidades dos perfis de velocidade.

É importante realizar o teste do equipamento, para detectar possíveis falhas no processo de aquisição de dados. Os erros mais comuns são o alinhamento da ferramenta com a cota da “boca” do furo, o que acarreta a uma medida errônea da profundidade real do furo, e respostas de leituras não compatíveis com o litologia presente. Esse problema pode ser detectado com a resposta dos sinais ao revestimento, uma vez que os metais têm uma velocidade de onda bem definida.

Figura 3.7: Detalhe da imagem do centralizador instalado no perfilador e uma imagem esquemática da instalação do centralizador.

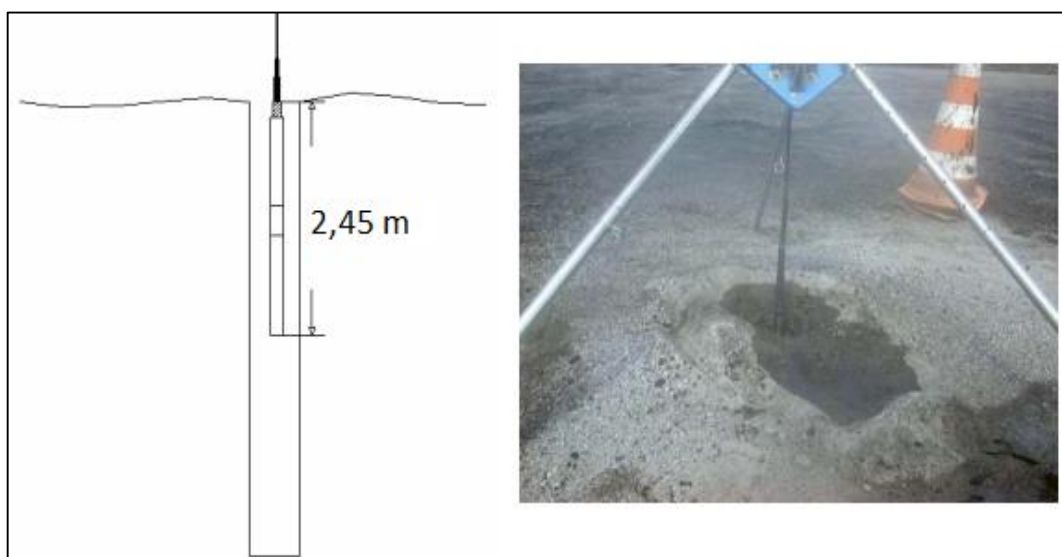


Fonte: Adaptado de Silva, 2012.

### 3.4.2. Nivelamento da posição do perfilador

Em seguida é necessário posicionar a ferramenta no ponto zero do perfilador, pois o mesmo sempre tem que estar nivelado com a “boca” do furo no início da perfilagem (Figura 3.8). Esta etapa é de fundamental importância, para que o levantamento tenha os dados de profundidade condizentes com a realidade dos furos. Mantendo a profundidade real do furo.

Figura 3.8: Nivelamento da ferramenta na posição zero com a cota do furo (sonda sônica).



Fonte: Adaptado de Silva, 2012.

### 3.4.3. Montagem do *MicroLogger*

O *MicroLogger* é a parte da ferramenta responsável pela interface entre o computador e todo o resto da ferramenta, além de gerenciar todo o sistema do perfilador. No anexo A contém todo o manual de montagem do perfilador. Esse manual foi confeccionado por Silva (2012), para o ferramental do Laboratório de Petrofísica e Perfuração Jadir da Conceição da Silva (LPP) do Instituto de Geociências da UFRJ (IGEO/UFRJ).

### 3.4.4. Execução da perfuração

Após a zeragem da instrumentação, a ferramenta é posicionada no final do furo, pois a perfuração foi realizada de baixo para cima, essa técnica é conhecida como uplog. O perfilador realiza mediadas de centímetro a centímetro, mas é importante ressaltar o limite mínimo vertical de detecção, que no caso específico para esta ferramenta é de 0,20 m. Esse intervalo é devido ao distanciamento entre os detectores. A velocidade de subida a que foi executado a perfuração foi de 3 m/min, sendo que o mesmo capta sinais de centímetro a centímetro. O que sugere que a cada minuto o perfilador faz 300 leituras equivalentes aos 3,00 cm, que a ferramenta subiu neste minuto.

Todos os furos de sondagem perfurados, são revestidos por um tudo de material metálico, até aproximadamente 10 m de profundidade. A resposta do revestimento ao método utilizado é muito bem marcada, na Figura 3.9 é notável um comportamento estável da velocidade até os 10 m iniciais. Isso devido a uma resposta característica dos metais, os quais tem uma velocidade bem definida de aproximadamente 5500 m/s.

- Cálculo de  $V_p$

Para a obtenção de  $V_p$ , se faz necessário a utilização do *software WellCad4.0*. Uma vez que o cálculo foi realizado com base na diferença tempo de trânsito da onda acústica entre os receptores Rx2 e Rx1. Para realização deste cálculo foram necessários seguir os seguintes passos:

- 1º. Abrir as velocidades dos três receptores no *software* (Figura 3.9);

2º. Após a organização dos perfis das velocidades é necessário criar um perfil *Log* de fórmula, em que foi dado o seguinte comando: *Edit*→*New Log* → *Formula Log*. Nesta etapa é necessário inserir uma fórmula, que será responsável, pela determinação do *Log* de  $V_p$  (Imagem: 3.10):

$$V_p = \frac{(1000000 * 0,2)}{\{(TIME\ TX1 - RX2) - (TIME\ TX1 - RX1)\}}$$

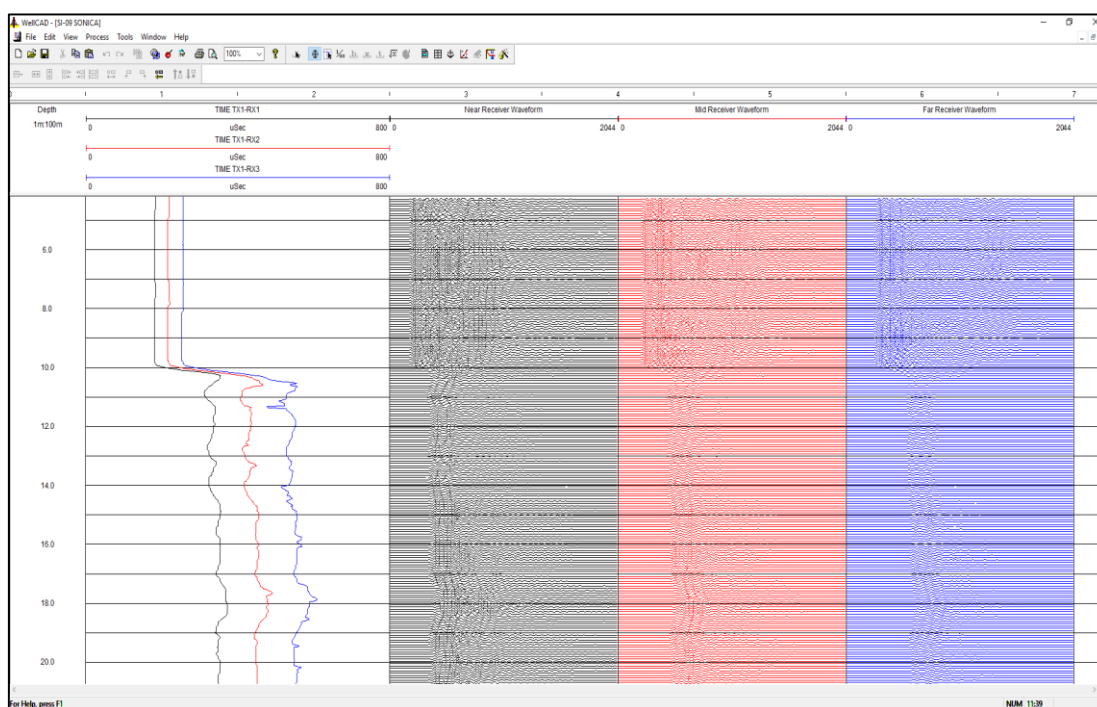
Onde:

(TIME TX1 –RX2): é o tempo de trânsito da onda P até o receptor Rx2;

(TIME TX1-RX1): é o tempo de trânsito da onda P até o receptor Rx1.

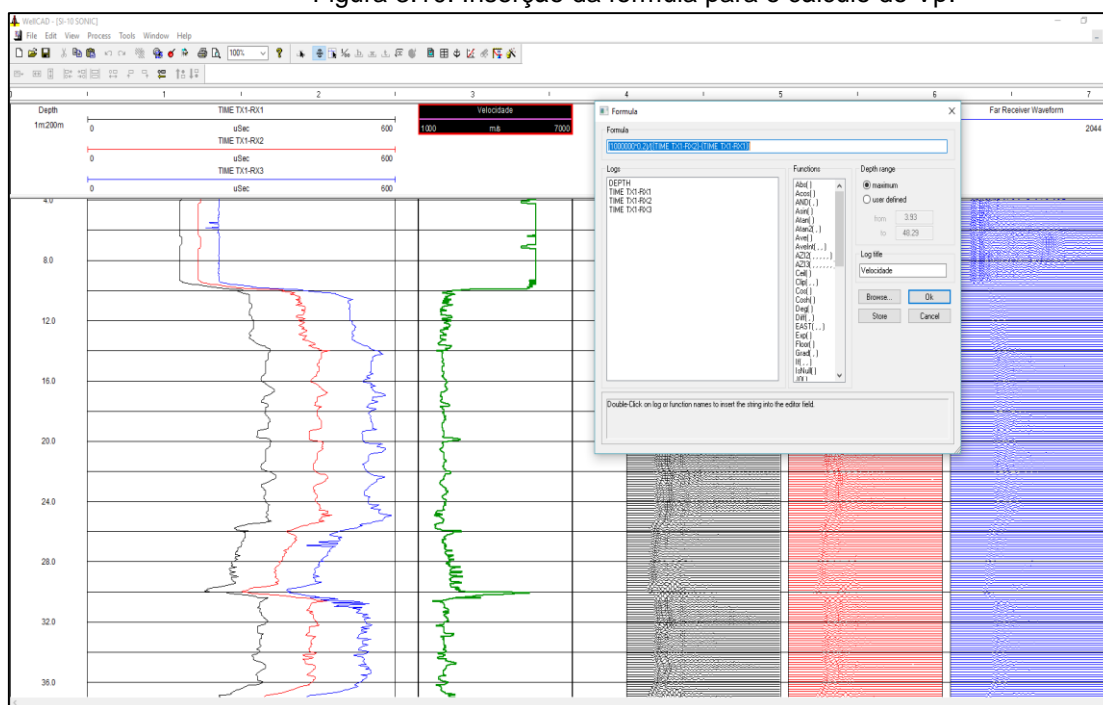
3º. Após a criação do *Log* de velocidade  $V_p$ , faz-se necessário a determinação de uma planilha com as velocidades determinadas e suas respectivas profundidades. Que é gerada automaticamente pelo *WellCad 4.0*, fazendo o seguinte comando: *Editor*, clicando com o botão direito do mouse no cabeçalho do *Log* de velocidade criado. A Figura 3.11 é um exemplo de planilha gerada pelo *WellCad*.

Figura 3.9: Imagem do *WellCad 4.0*, identificando o esquema organizacional dos perfis de velocidade.



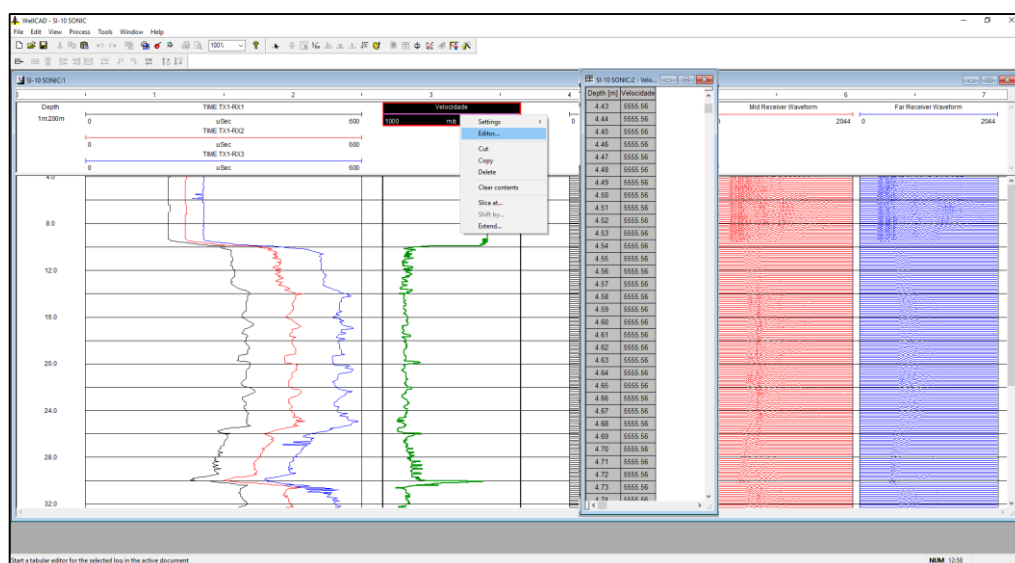
Fonte: Autoria própria.

Figura 3.10: Inserção da fórmula para o cálculo do Vp.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.11: Comando Editor para gerar a planilha com as velocidades Vp e suas respectivas profundidades



Fonte: Autoria própria.

### 3.5. AMOSTRAGEM

Amostragem se resume como sendo uma sequência de operações, que tem por objetivo retirar uma parte representativa, ou amostra, de um dado universo. Mas

a mesma tem não pode apresentar mudanças significativas em suas propriedades e deve manter a representatividade do universo em que ela está contida (CHIEREGATI, 2014).

Essa etapa além de gerar boas amostras as mesmas também têm que serem representativos do maciço rochoso em análise. Por isso a escolha dos intervalos a serem amostrados é um passo que requer muita cautela e é de suma importância para o sucesso da pesquisa. De preferência as amostras a serem analisadas tem que conter um menor número de descontinuidades perceptíveis a olho nu, para que os ensaio não se adulterem com essas zonas de fraqueza (VILLACUESTA, 2014).

Para este trabalho, foram preparadas 46 amostras com litologia variadas entre arenito e siltitos. Os copos de provas são oriundos de sondagem testemunhada de diâmetro NX, a qual gera testemunho com aproximadamente 53,50 mm de diâmetro.

### 3.6. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após o processo de amostragem os testemunhos de sondagem, foram serrados para gerar amostras de comprimento determinado pela norma técnica ASTM D 4543-01 (*Standart Practice for Preparing Rock Core Specimes and Determining Simensionalans Shape Tolerances*), a qual aborda as práticas padrões para a preparação de corpos de prova rochosos e determinas algumas tolerâncias. Esta norma estabelece uma relação ótima entre altura e o diâmetro do corpo de prova, que é 2,5 para corpos cilíndricos. Estabelece também que as superfícies das extremidades não devem se afastar perpendicularmente mais do que 0,25°.

As amostras foram cortadas na serra *Core Trimmer*, modelo DS-36, da fabricante *Controll* (Figura 3.7). As especificações técnicas da serra são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Especificações técnicas da serra Core Trimmer DS-36.

Voltagem	110 W
Velocidade de corte	3000r.p.m.
Dimensão	730 x 1050 x 590 mm

Peso	100 kg
------	--------

Fonte: Autoria própria.

### 3.7. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas, do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para a confecção deste trabalho foram necessários a realização de três ensaios: determinação da velocidade ultrassônica da onda P ( $V_p$ ) em laboratório, através do *Pundit*, compressão uniaxial e determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água.

#### 3.7.1. Determinação de $V_p$ em laboratório

Este ensaio, foi baseado na norma internacional ASTM D 2845 (*Standart test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock*). As constantes elásticas da rocha são determinadas por meio do tempo de trânsito das ondas através de um corpo de prova e a densidade do material. Utilizou-se o *Pundit PL-200 Proceq*. As definições do equipamento são descritas no item 3.1.3 *Pundit Proceq*.

A realização deste ensaio segue uma ordem lógica de tarefas, as quais são listadas a seguir:

- 1º. Determinação do comprimento das amostras;
- 2º. Utilização do gel acoplante, para facilitar o acoplamento entre transdutor e amostra facilitando a passagem dos pulsos ultrassônicos produzidos;
- 3º. Zerar o equipamento (transdutores), diminuindo possíveis erros de leitura (Figura 3.12);
- 4º. Realização da medida e aquisição do tempo de trânsito da onda (Figura 3.13);
- 5º. Por último é a transformação do tempo de trânsito da onda para velocidade  $V_p$  em m/s. a qual é realizada na própria tabela *Excel*, referente ao ensaio.

A determinação da velocidade média do ensaio é calculada simplesmente pela fórmula a seguir:

$$V_p(\text{média}) = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (3.1)$$

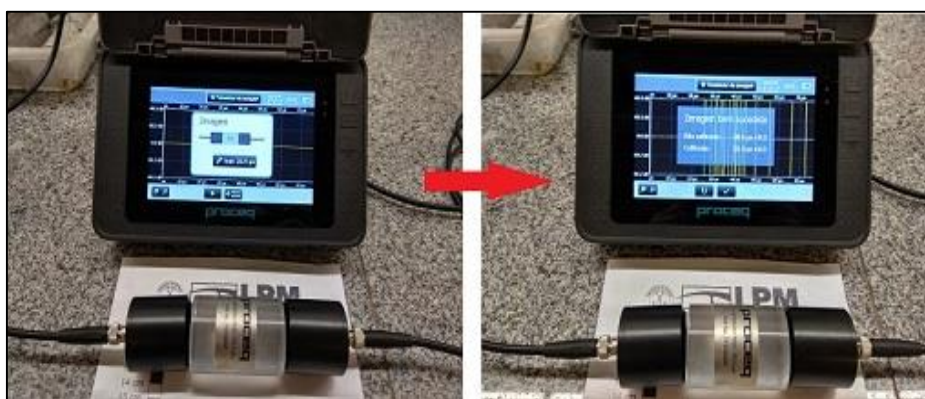
Onde:

$\Delta d$ : tamanho do corpo de prova (cm);

$\Delta t$ : tempo de transição do pulso no corpo de prova ( $\mu$ );

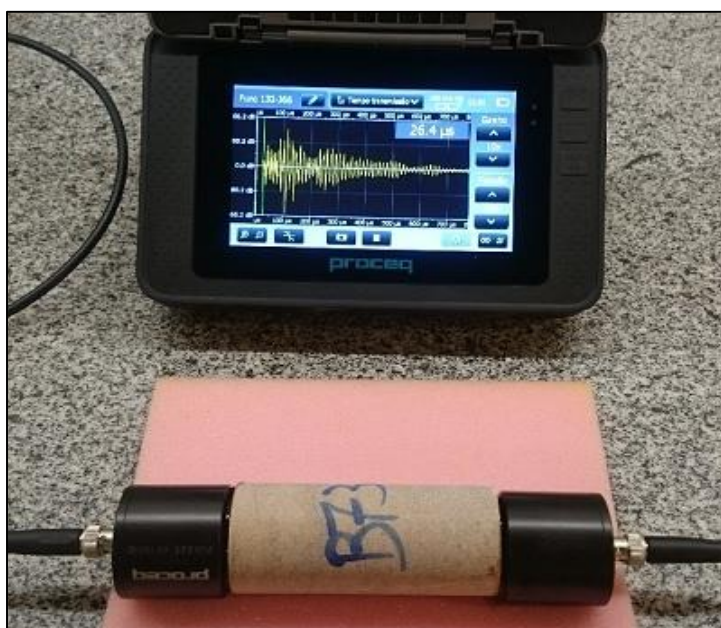
$V_p$ : dado em m/s.

Figura 3.12: Etapa de zeragem do equipamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.13: Leitura completa do tempo de trânsito da onda.



Fonte: Autoria própria.



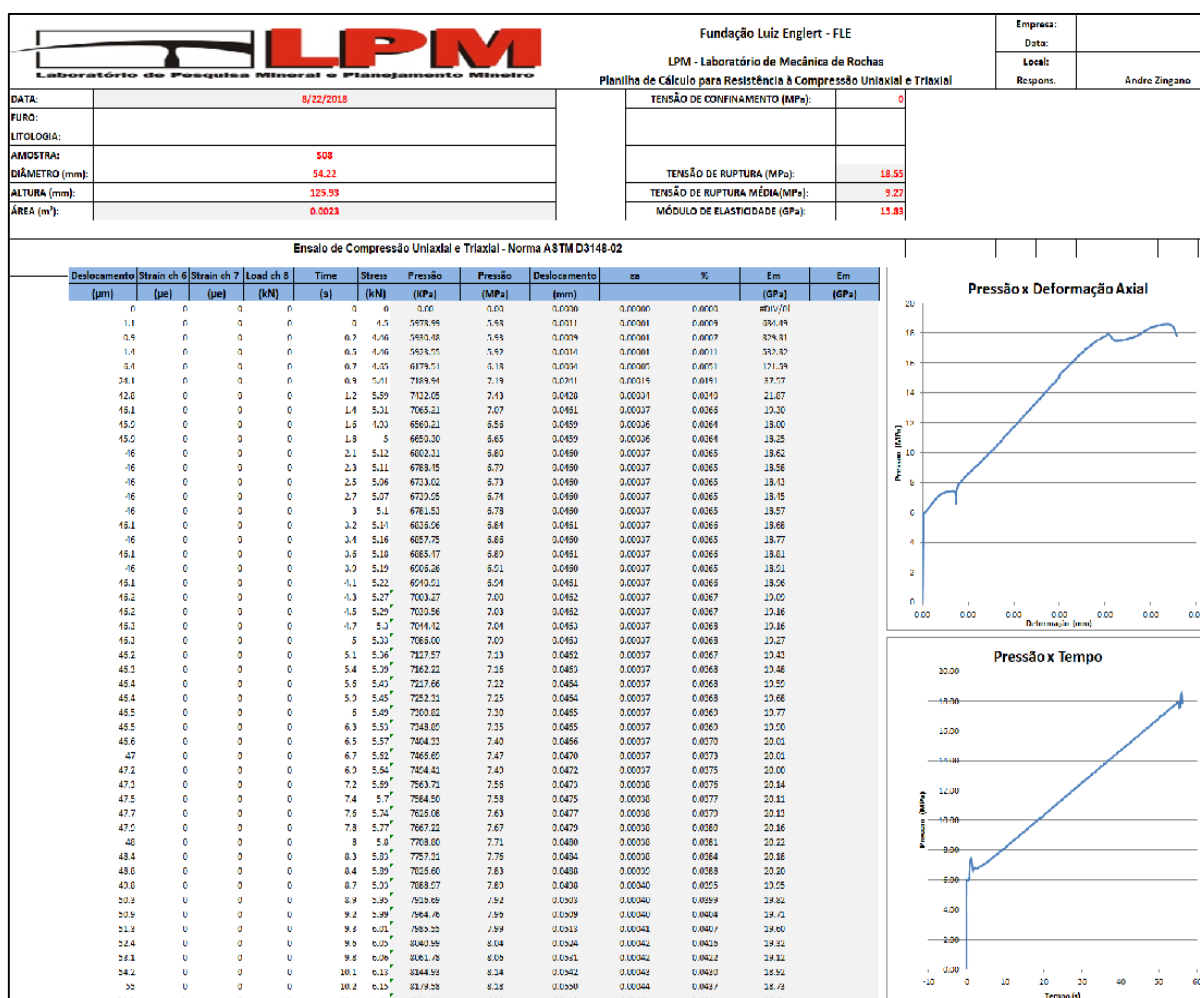
### 3.7.2. Determinação do UCS

O ensaio de compressão uniaxial, foi realizado utilizando de parâmetros a norma ASTM D 2938 (Standart Practice for Preparing Rock Core Specimes and Determining Dimensional and Shape Tolerances), que define padrões para a realização do ensaio. Outra norma utilizada foi a ASTM D 4543-01, a qual se refere a preparação das amostras.

Foram preparadas um total de 46 amostras, mas 4 amostras se quebraram ou não deram resultados plausíveis. As mesmas após serem medidas e pesadas foram encaminhadas para o teste de compressão uniaxial. As mesmas são dispostas na prensa *Advanced 9*, (Figura 3.4) o ensaio foi realizado com uma taxa de carregamento de 500 kN/s,

Os resultados são registrados em uma planilha geral. Depois cada ensaio é tratado separadamente, nessa planilha são realizados cálculos que geram os seguintes resultados: (MPa) e módulo de *Young* (Gpa), a Figura 3.14, exemplifica o exemplo dessa planilha de cálculos.

Figura 3.14: Tabela dos resultados do ensaio de compressão uniaxial.



Fonte: Autoria própria.

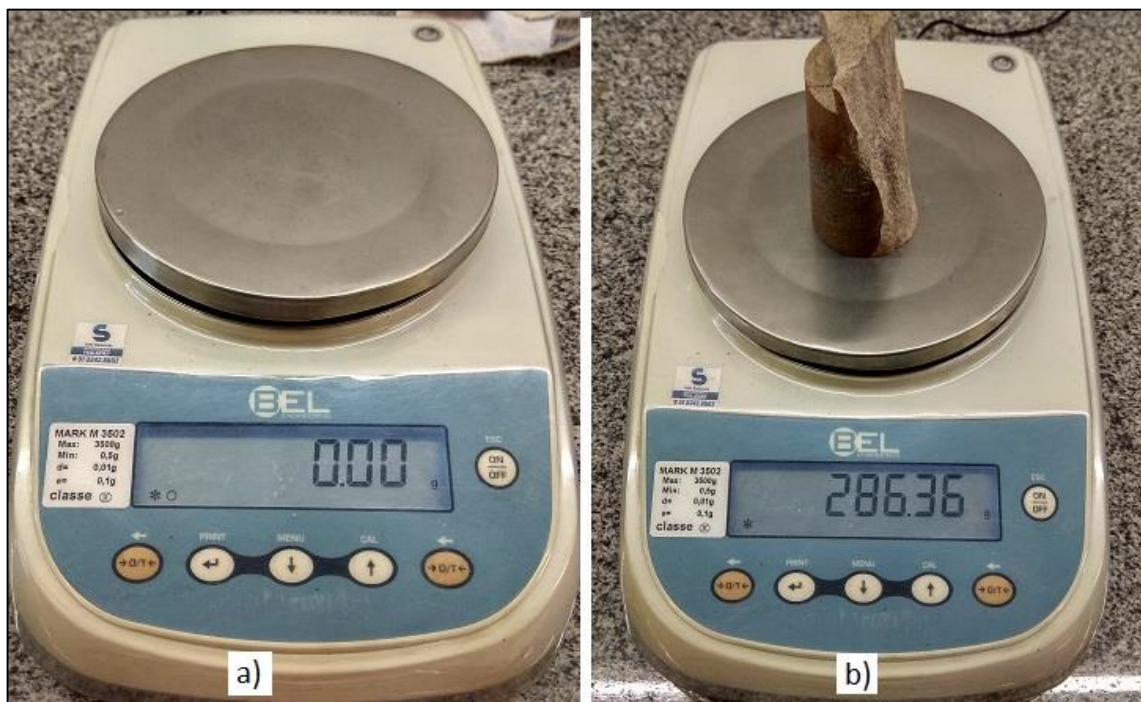
### 3.7.3. Determinação das propriedades físicas

Este ensaio é baseado na norma técnica brasileira ABNT NBR 15845:2010 (Método de ensaio – Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água aparente). O objetivo deste é a determinação da densidade e porosidade das amostras estudadas. Não foi possível aplicar esta metodologia em todas amostras, uma vez que, este método apresenta um passo em que as amostras ficam imersas em água, e algumas amostras se degradaram com o contato com a água.

O ensaio consiste na pesagem do corpo de prova em diferentes estágios. A balança utilizada é da marca *Bel Engineering*, modelo MARK M 3502 (Figura 3.15 (a)). Esta balança apresenta uma precisão 0,01 g. A primeira pesagem foi realizada com a amostra seca. Esse procedimento é realizado mantendo o corpo de prova na estufa à uma temperatura de  $70 \pm 5$  °C até a massa ficar constante (Figura 3.15(b)). Após a

secagem a massa da amostra seca é anotada. Para pesar as amostras, a balança tem que apresentar uma precisão de 0,01 g (Figura 3.15).

Figura 3.15: Balança MARK M 3502, utilizada para a determinação das massas das amostras, durante a execução do ensaio de propriedade físicas.



Fonte: Autoria própria.

Após a determinação da massa seca, é necessário a definição da massa da amostra submersa e saturada. De acordo com a norma ABNT NBR 15845: 2010, o processo da saturação das amostras foi realizado de acordo com os seguintes passos: as amostras foram armazenadas em um recipiente, foi adicionado água até completar 1/3 da altura das mesmas, esse estágio durou aproximadamente 4 h. Após esse tempo se adicionou mais água até atingir a altura de 2/3 das amostras por mais 4 horas. No último estágio se completou a submersão dos corpos de prova, e permaneceram submersos por mais 40 h (Figura 3.16). Após esse processo são determinadas as massas das amostras submersas e saturadas.

Figura 3.16: Imagem do processo de saturação das amostras. A) as amostras estão com 1/3 submersas em água, em b) as amostras estão com 2/3 submersas em água e na c) as amostras estão totalmente submersas.



Fonte: Autoria própria.

A pesagem da massa submersa é realizada, pesando as amostras na condição submersa, onde o peso adicional do utensílio que foi utilizado para realizar essa pesagem é desprezado pela função “tara” da balança. Já a massa saturada é determinada após a retirada das amostras da água, retirando o excesso de água das amostras e pesando normalmente na balança (Figura 3.18 (b)). Todos os resultados foram transferidos para a planilha de tratamento onde a densidade aparente é calculada pela fórmula (3.2) e a porosidade pela fórmula (3.3):

Figura 3.17: Foto representativa da pesagem das amostras submersas.



Fonte: Autoria própria.

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{(M_{sat} - M_{sub})} * 1000 \quad (3.2)$$

$$\eta_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} * 1000 \quad (3.3)$$

Onde:

$\rho_a$ : Densidade aparente (Kg/m<sup>3</sup>);

$\eta_a$ : Porosidade aparente (%);

$M_{sec}$ : Massa seca;

$M_{sat}$ : Massa saturada;

$M_{sub}$ : Massa submersa.

### 3.8. TRATAMENTO DOS DADOS

Esta etapa do trabalho, julgamos como a mais importante da pesquisa. Uma vez que é nela que se faz possível a determinação de metodologia para interpretação

dos dados, verificação de possibilidades de correlação e também gerar resultados de propriedades da rocha através de determinação indiretas.

### 3.8.1. Correlação $V_p$ \_Sônico x $V_p$ \_Pundit

A correlação entre velocidades de ondas sônicas, determinadas através de ensaio distintos, foi o primeiro desafio encontrado. Uma vez que as dimensões das amostras utilizados nos ensaios distintos eram diferentes, ou seja, temos corpos amostrais de tamanhos diferentes.

A perfilagem sônica, apresenta uma resolução vertical mínima de 0,20 m, isso significa que camadas menores do que 0,20 m não são detectados pelo método. A partir desse limite, tomamos como premissa, este comprimento como o tamanho padrão das amostras, neste trabalho, para a realização das análises. No entanto para a determinação da velocidade sônica em laboratório, de acordo com as normas do ensaio, as dimensões das amostras devem respeitar a relação mínima de 2,0 e a máxima de 2,5 entre o comprimento e a diâmetro do corpo da amostra. Como as amostras são oriundas de sondagem testemunhada, não é possível diminuir ou aumentar o seu diâmetro, que é aproximadamente de 54,00 mm. Define-se um limite do comprimento, que de acordo com a relação máxima 2,5, a amostra poderá ter um comprimento máximo de aproximadamente 135,00 mm, lembrando que algumas amostras apresentam um comprimento menor do que citado, mas sempre respeitando a relação mínima entre comprimento e diâmetro.

A partir dessa inconsistência no banco de dados, decidiu-se fazer comparações entre tentativas de adequação do tamanho do corpo amostral. As tentativas serão discutidas a seguir:

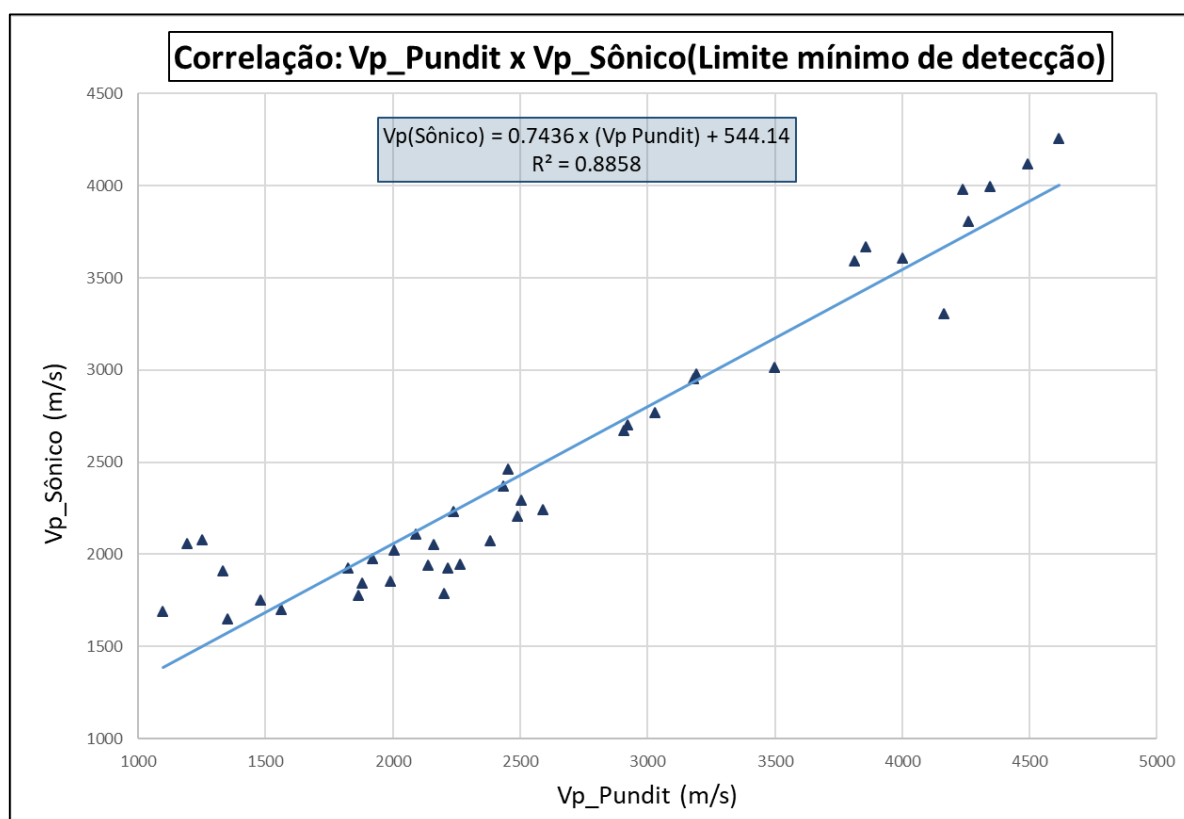
- Limite mínimo da resolução vertical:

O intervalo amostral avaliado nesta tentativa, se limita ao tamanho mínimo da resolução vertical do perfilador que é de 0,20 m. Esse intervalo é comparado com amostras que tiveram a  $V_p$  estabelecida em laboratório. Esta metodologia foi a que apresentou o melhor coeficiente de correlação de Pearson, sendo dede  $R^2 = 0,8858$  (Figura 3.18). E por esse motivo foi a escolhida e utilizada neste trabalho.

Este consiste em comprar a média dos resultados de  $V_p$ \_Sônico do intervalo de 0,20 m (limite mínimo de detecção do perfilador), com a profundidade referente a

cada amostra, a qual teve  $V_p$  determinado em laboratório, foi retirada. Ou seja, uma amostra com comprimento de 0,13 m foi retirada a uma profundidade de 18,00 m. O intervalo amostral da mesma será de 18,00 até 18,13 m. Para a perfilagem sônica o intervalo amostral proposto é de 0,20 m, de modo que a amostragem esteja inserida no intervalo 18,00 até 18,20 m.

Figura 3.18: Gráfico com correlação entre  $V_p$ \_Pundit x  $V_p$ \_Sônico. Com o intervalo amostral referente ao limite mínimo de detecção do perfilador.



Fonte: Autoria própria.

- Intervalo de Resultados Constantes:

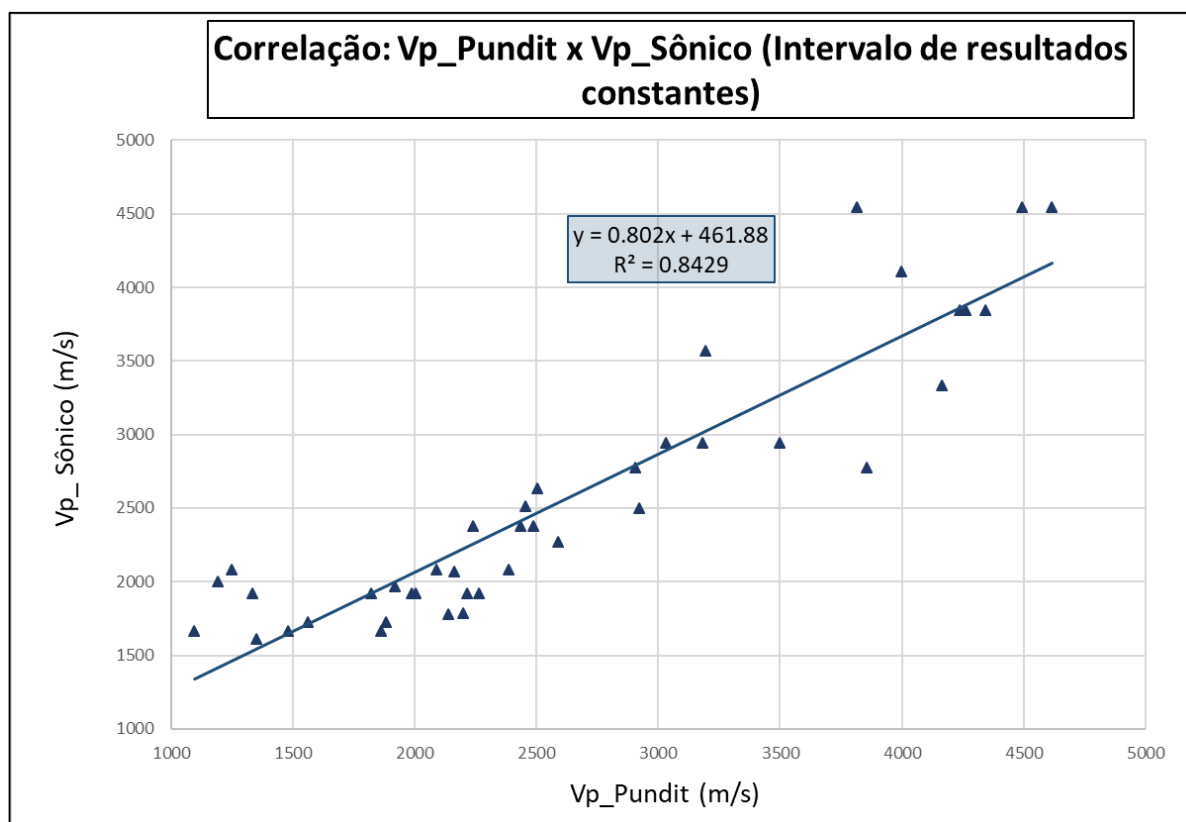
Apesar do conceito básico desta metodologia não ser válida, uma vez que considera o intervalo amostral do perfilador sônico menor do que o limite mínimo de detecção da ferramenta. O mesmo foi levado em conta como uma simples oportunidade de comparação de resultados. O qual gerou um índice de correlação menor do que a metodologia do limite mínimo de amostragem.

O conceito utilizado neste método, se baseia na individualização de intervalos que apresentam o mesmo resultado, dentro do limite do tamanho da amostra a ser

ensaiada em laboratório. Portanto, como o perfilador gera resultados de centímetro a centímetro, individualiza-se um intervalo que apresente resultados iguais, não levando em consideração o comprimento do intervalo identificado. O que não respeita a condição do limite de detecção.

Esta metodologia apresentou um coeficiente de correlação de Pearson de  $R^2 = 0,8429$ , apesar de ser um ótimo resultado, não pode ser utilizado por não respeitar o limite de detecção vertical do perfilador sônico (Figura 3.19).

Figura 3.19: Gráfico com correlação entre  $V_p$ \_Pundit x  $V_p$ \_Sônico. Com o intervalo amostral referente ao intervalo de resultados constantes.



Fonte: Autoria própria.

- Tamanho das amostras:

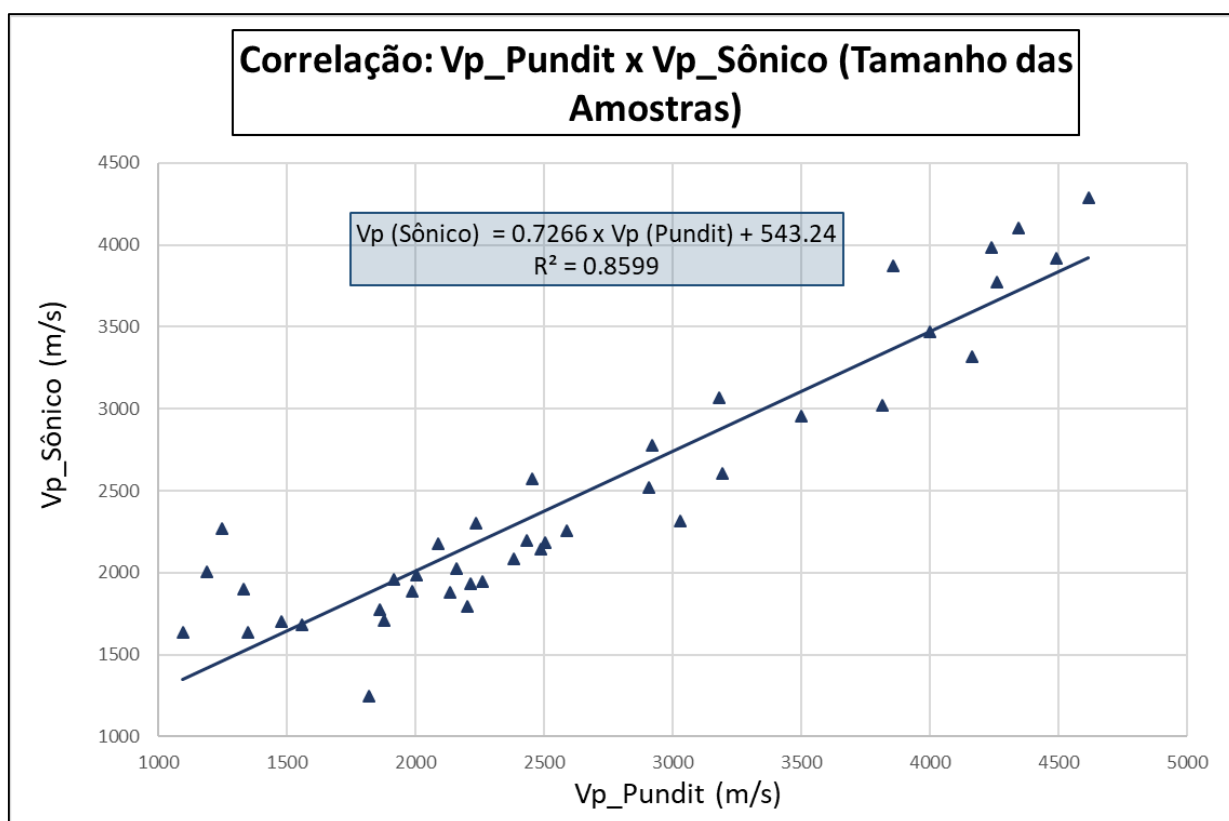
Esta metodologia também vai contra ao limite mínimo de detecção do perfilador. Mas apresenta um resultado satisfatório, o qual justifica discutir sobre o mesmo. Apesar de não ser recomendado a sua utilização, por não respeitar um limite



mínimo da ferramenta utilizada. O coeficiente de correlação encontrado foi de  $R^2 = 0,8599$  (Figura 3.20).

Nesta metodologia o intervalo amostral da perfilagem foi determinada pelo tamanho da amostra, oriunda da sondagem diamantada. Ou seja, se uma amostra apresenta 0,12 m de comprimento e está localizada a 29,00 m de profundidade, o intervalo amostral utilizado foi de 0,12 m, sendo os intervalos amostrais sempre os mesmo do tamanho da amostra do testemunho de sondagem.

Figura 3.20: Gráfico com correlação entre Vp\_Pundit x Vp\_Sônico. Com o intervalo amostral referente ao tamanho das amostras da sondagem.



Fonte: Autoria própria.

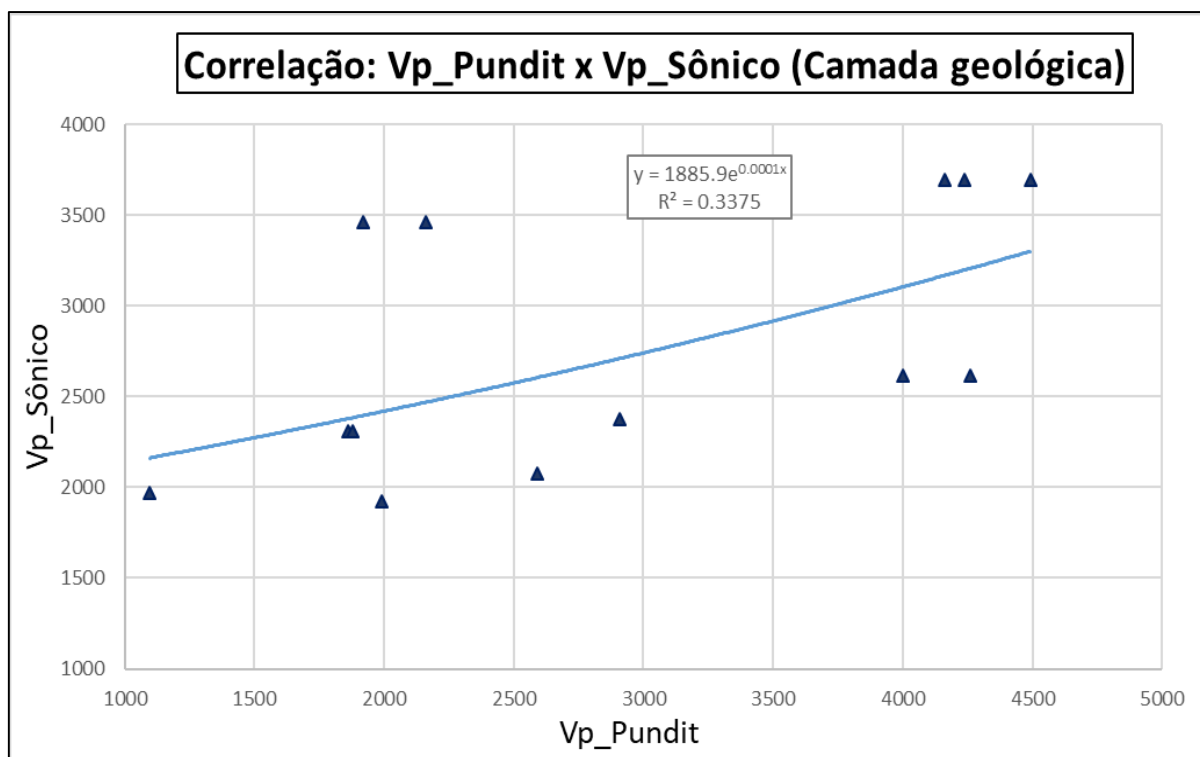
- Tamanho da camada litológica

Apesar do coeficiente de correlação de Pearson obtido nesta metodologia ter sido muito baixo, não se descarta-o inicialmente. Uma vez que o número de amostras para a confecção do mesmo ser muito pequena. Sendo sugerido em trabalhos futuros o teste desta ideia com um número considerável de amostras.

O método se dá na comparação da média de Vp obtido dentro de uma camada geológica na qual a amostra está inserida, com o resultado obtido no levantamento de

Vp em laboratório. Essa ideia surgiu com a premissa que uma camada continua da mesma litologia poderia apresentar um Vp constante dentro da mesma camada. O resultado obtido, apresenta um coeficiente de correlação muito baixo. Que interpretamos como a não existência de correlação entre eles (Figura 3.21).

Figura 3.21: Gráfico com correlação entre Vp\_Pundit x Vp\_Sônico com o intervalo amostral referente ao tamanho da espessura da camada geológica.



Fonte: Autoria própria.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de correlação obtidos neste trabalho foram baseados nas velocidades sônicas (determinadas através da perfilagem sônica e através do *Pundit*) com o UCS (determinada a partir de ensaios de compressão uniaxial). Estão apresentados nos subitens abaixo. Todas as amostras são provenientes de testemunhos de sondagem, oriundos de um mesmo contexto geológico.

Em todas as análises são abordadas correlações de Vp calculados de dois métodos diferentes, o método de perfilagem sônica e a utilização do *Pundit*.

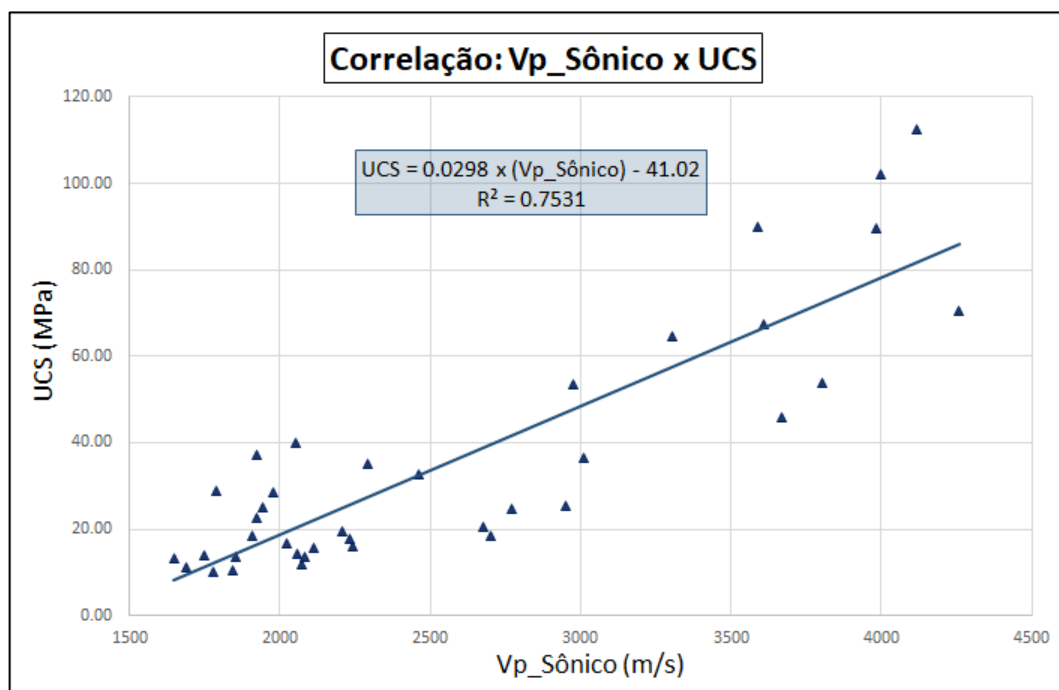
#### 4.1. CORRELAÇÕES $V_P$ X UCS

Os resultados obtidos com essa correlação são resultados os quais superam as expectativas da literatura. Onde os índices de correlação tanto para o Sônico quanto do *Pundit* estão acima do nível mínimo aceitável na literatura, que é  $R^2 = 0,70$ .

##### - $V_p$ \_Sônico x UCS

A Figura 4.1, consiste no gráfico que correlaciona somente  $V_p$ \_Sônico com o UCS, não leva em conta a distinção litológica. O mesmo apresentou  $R^2 = 0,7531$ , sendo este o maior índice de correlação determinado entre as metodologias utilizadas.

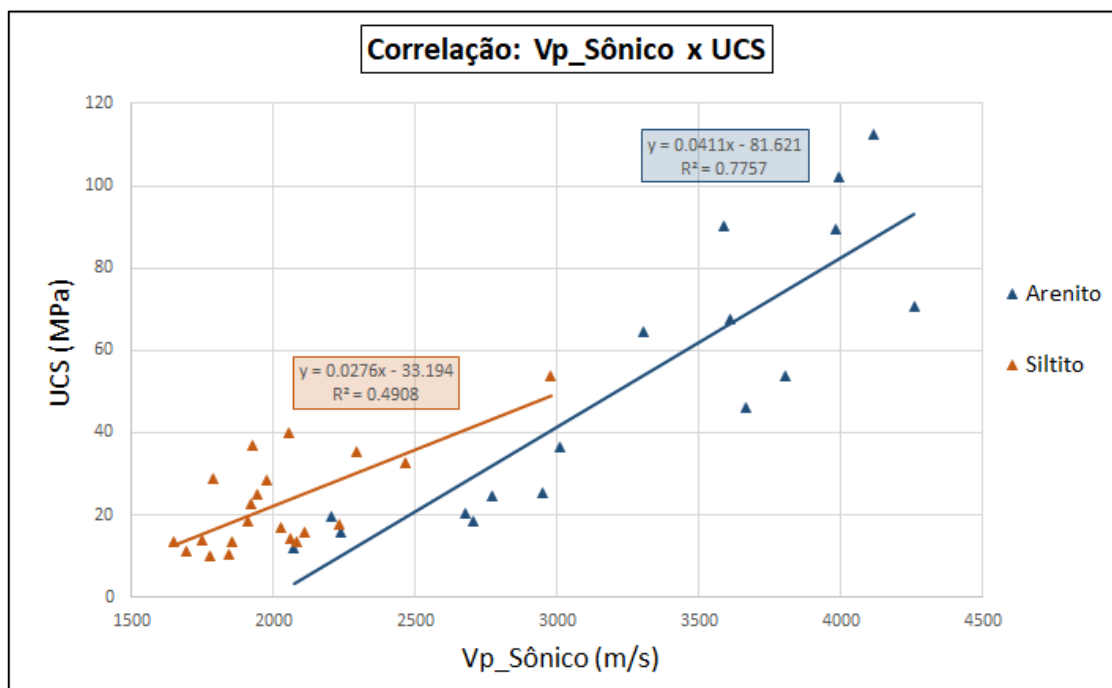
Figura 4.1: Gráfico de correlação geral entre  $V_p$ \_Sônico x UCS, não individualiza as litologias presentes.



Fonte: Autoria própria.

Já a Figura 4.2, apresenta o gráfico o qual correlaciona  $V_p$ \_Sônico x UCS, mas faz distinção entre as litologias presentes. Neste contexto os índices de correlação, apresentam uma diferença, considerável, mas já esperada. As amostras foram classificadas de acordo com a litologias, separadas em arenitos e siltitos. O resultado para o arenito apresentou um  $R^2 = 0,7757$ , enquanto que para o siltito apresentou um  $R^2 = 0,4908$ . Essa diferença apresentada para o siltito é justificado pela alta concentração de argila, uma vez que a argila dificulta a passagem da onda P. Resultando em uma velocidade sônica menor.

Figura 4.2: : Gráfico de correlação entre Vp\_Sônico x UCS, individualizando as litologias presentes.



Fonte: Autoria própria.

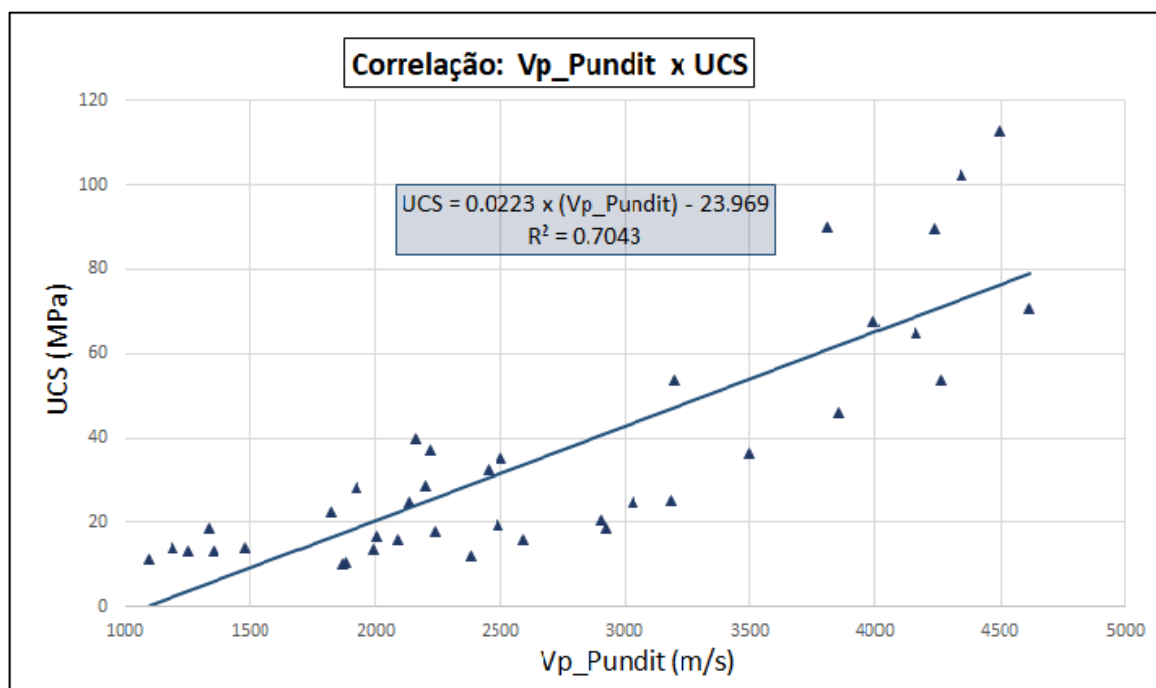
Por esse motivo, aconselha-se a utilização da curva de calibração entre Vp\_Sônico x UCS geral, a qual não diferencia as litologias presentes na região. Sendo intrínseco o erro referente ao siltito. Portanto para determinação de UCS a partir de perfilagem sônica, para o mesmo contexto geológico da Mina de Seival, aconselha a utilização da seguinte formula:

$$UCS = 0,0298 * (V_p\_S\grave{o}nico) - 41,02 \quad (4.1)$$

- Vp\_Pundit x UCS

Neste item, também foi determinada a correlação geral entre Vp\_Pundit x UCS. Apesar do índice de correlação encontrado neste ser um pouco baixo que da correlação anterior, também é considerado um resultado plausível, pois também está acima do limite mínimo executado atualmente, essa correlação apresenta um  $R^2 = 0,7043$ .

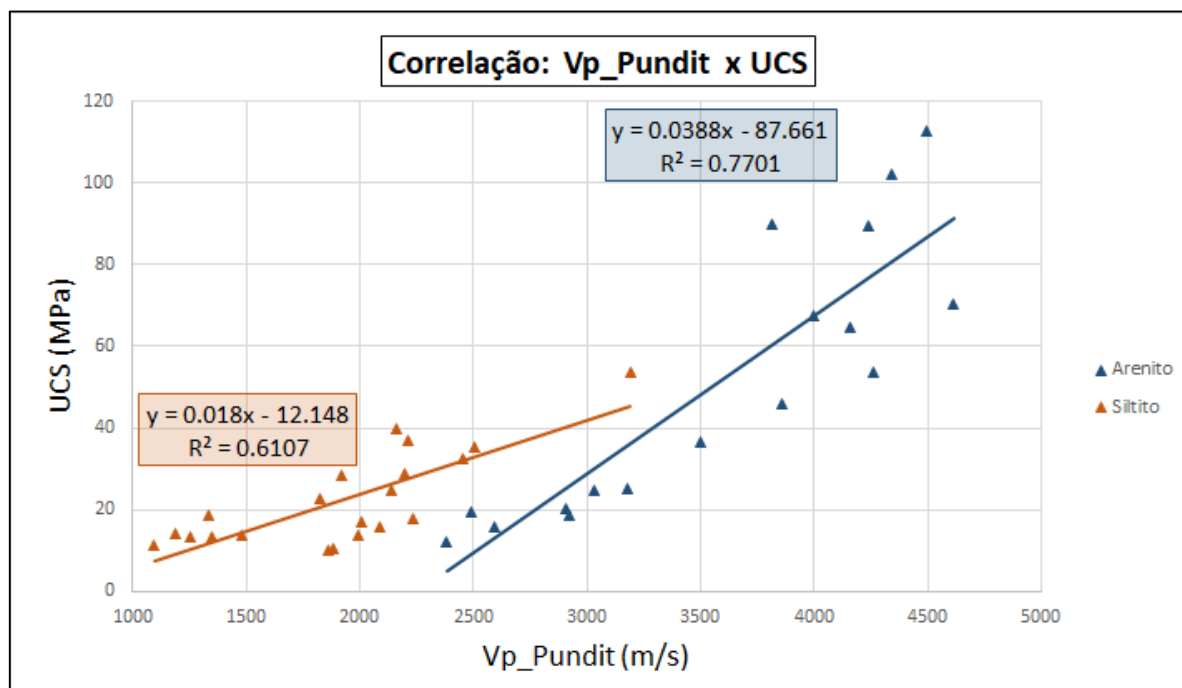
Figura 4.3: : Gráfico de correlação geral entre Vp\_Pundit x UCS, não individualiza as litologias presentes.



Fonte: Autoria própria.

Após o cálculo do índice de correlação geral, as amostras foram separadas por litologia como no item anterior. Este resultado, mostrou-se um pouco menos sensível a presença de argila. Mas ainda não atingindo o coeficiente de correlação utilizado atualmente. As amostras de arenito apresentaram um  $R^2 = 0,7701$ , enquanto que as amostras de siltito exibiram um  $R^2 = 0,6107$  (Figura 4.4).

Figura 4.4: Gráfico de correlação entre Vp\_Pundit x UCS, individualizando as litologias presentes.



Fonte: Autoria própria.

Novamente, deparou-se com a interferência no cálculo de Vp, nas amostras de siltito. Conforme sugestões em literaturas distintas, opta-se pela utilização da equação (Equação 4.2) de correlação entre Vp\_Pundit x UCS a determinada na correlação geral, já que o  $R^2$  é satisfatório, em relação aos índices sugeridos.

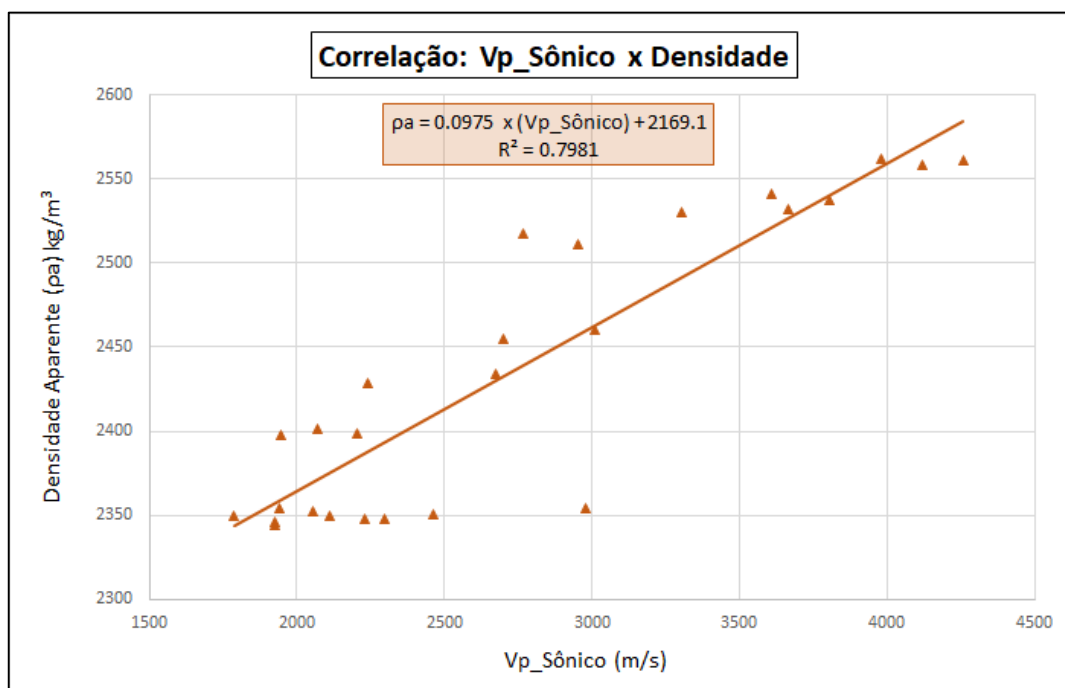
$$UCS = 0,0223 * (V_p\_Pundit) - 23,969 \quad (4.2)$$

#### 4.2. CORRELAÇÕES V<sub>P</sub> X DENSIDADE

##### - V<sub>p</sub>\_Sônico x Densidade

A relação determinada entre V<sub>p</sub>\_Sônico com a densidade neste trabalho, é condizente com as litologias que abordam o assunto, apresentando um  $R^2=0,7981$ . Essa relação é crescente, ou seja, a densidade aumenta quando aumenta a velocidade de onda, de acordo com a Figura 4.5, percebemos essa correspondência.

Figura 4.5: Gráfico de correlação entre Vp\_Sônico x Densidade, não individualiza as litologias presentes.



Fonte: Autoria própria.

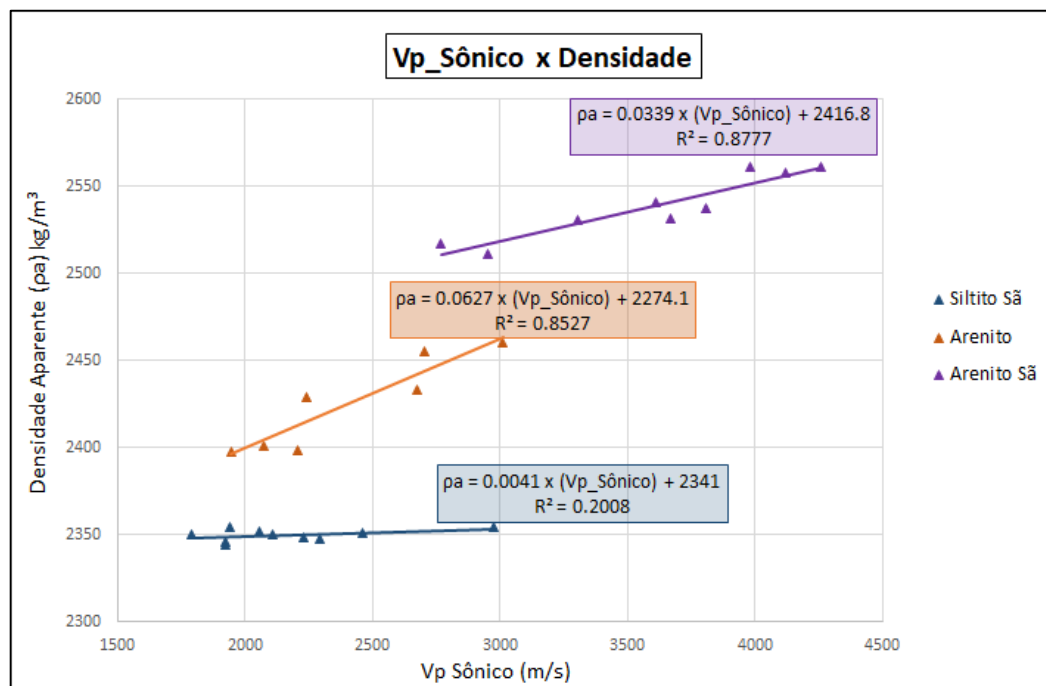
Faz-se necessária a distinção entre litologia e até mesmo no grau de intemperismo das amostras. Uma vez que o mesmo tem ligação direta com a densidade e a velocidade de onda sônica. A Figura 4.6, ilustra essa situação, pois separamos as mesmas amostras em litologias e percebe-se a distinção entre as mesmas, dividiu-se as amostras em arenito, siltito e siltito sã, essa separação está bem nítida no gráfico.

Analisando os resultados do  $R^2$  separadamente, percebemos uma grande diferença entre os resultados das litologias arenito e siltitos, onde o resultado do arenito sã é  $R^2 = 0,8777$ , arenito  $R^2 = 0,8527$ , enquanto que do siltito é  $R^2 = 0,2008$ . Onde o resultado do siltito é muito abaixo do esperado, mais uma vez essa questão pode ser explicada pela presença de argila. Mas estatisticamente podemos observar que o espalhamento do resultado do mesmo é pequeno, o que proporciona um menor índice de correlação.

Mais uma vez aconselhamos a utilização da equação geral, a qual contempla todas as litologias (Equação 4.3).

$$\rho_a = 0,0975 * (V_p\_S\grave{o}nico) + 2169,1 \quad (4.3)$$

Figura 4.6: Gráfico de correlação entre Vp\_Sônico x Densidade, individualizando as litologias presentes.



Fonte: autoria própria

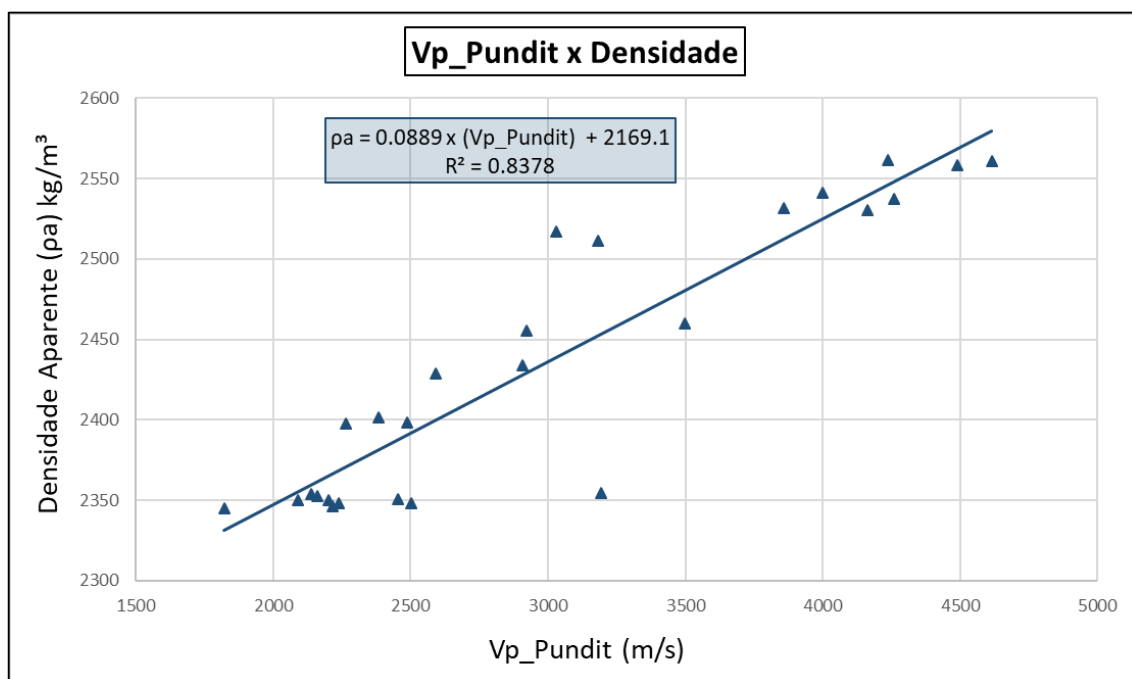
#### - Vp\_Pundit x Densidade

As respostas da correlação entre Vp\_Pundit e a densidade, também foram muito parecidas com a resposta da correlação anterior. Essa semelhança entre as repostas, dá subsídio para a confiabilidade dos resultados. A Figura 4.7, apresenta o gráfico de correlação Vp\_Pundit x Densidade.

O Figura 4.8, ilustra a distribuição das amostras, de acordo com a litologia e o grau de intemperismo. Mais uma vez essa diferenciação fica muito destacada. Essa duplicidade dos resultados reforça a ideia da relação que existe entre os constituintes mineralógicos (litologia) e o grau de intemperismo com a velocidade de onda sônica.

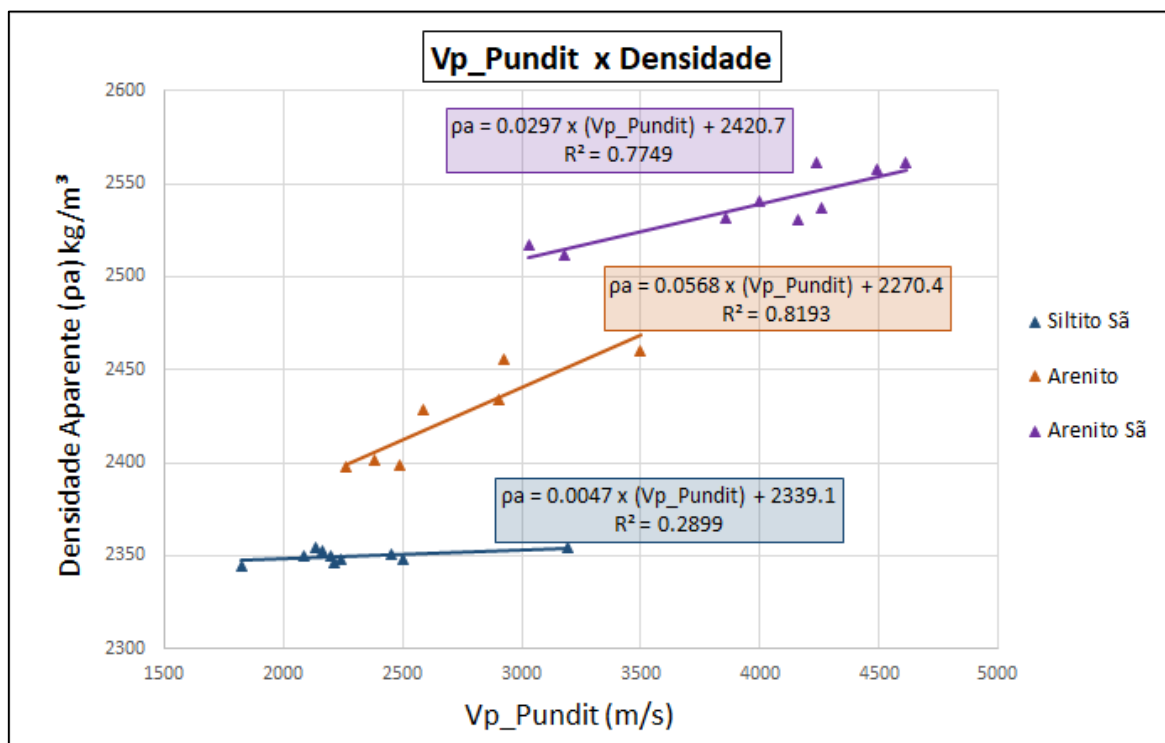


Figura 4.7: Gráfico de correlação geral entre Vp\_Pundit x Densidade, não individualizando as litologias presentes.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.8: Gráfico de correlação entre Vp\_Pundit x Densidade, individualizando as litologias presentes.



Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados da Figura 4,8, observa que os valores  $R^2$  apresenta grande diferença entre os resultados das litologias arenito e siltitos, onde o resultado do arenito são  $R^2= 0,7749$ , arenito  $R^2= 0,8193$ , enquanto que do siltito é  $R^2=0,2899$ . Onde, mais uma vez resultado do siltito é muito abaixo do esperado, podendo ser explicada pela presença de argila.

Mais uma vez aconselhamos a utilização da equação geral, a qual contempla todas as litologias (Equação 4.4).

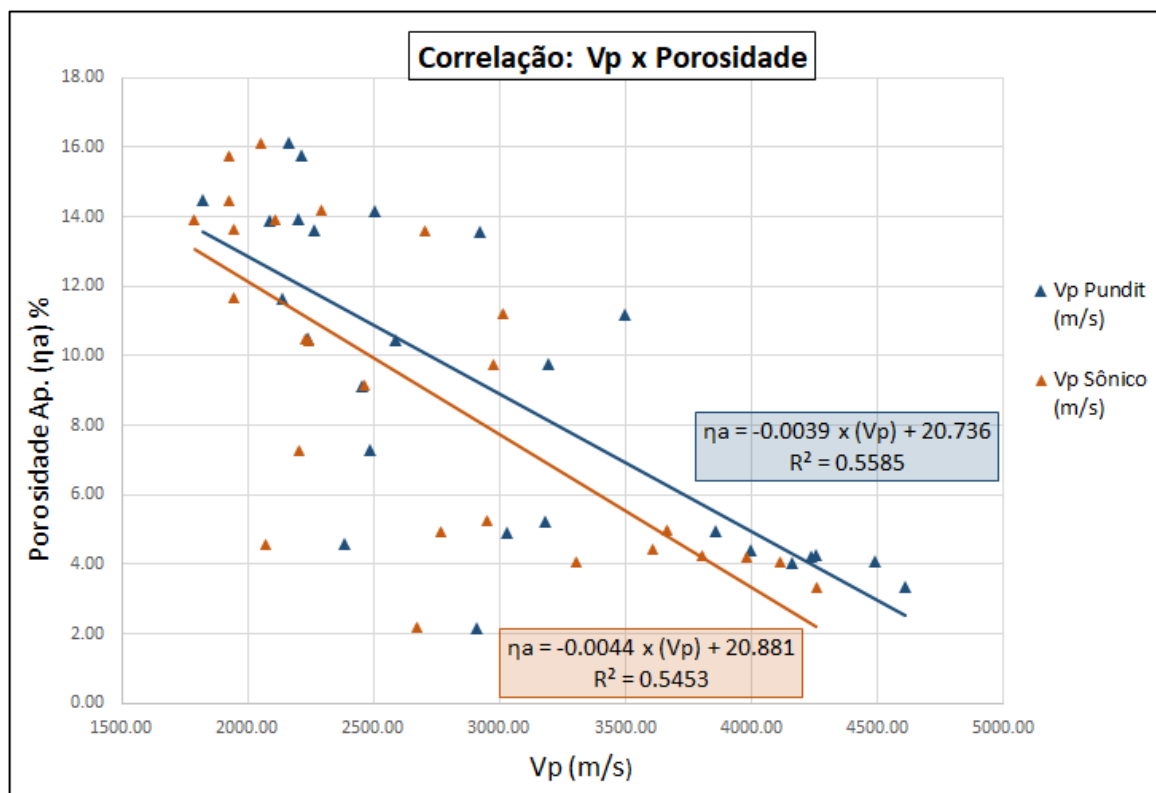
$$\rho a = 0,0889 * (V_p\_Pundit) + 2169,1 \quad (4.4)$$

#### 4.3. CORRELAÇÕES $V_P$ X POROSIDADE

Os resultados alcançados para a correlação entre velocidade de onda P e porosidade, justifica bem a litologia, apresentando um comportamento inversamente proporcional. Mas não foi obtido, em nenhum dos métodos, um grau de correlação acima de  $R^2 = 0,70$ . Apesar de que na bibliografia, para correlações com bibliografia, não consta um valor mínimo tabelado. As assertivas em relação a esse assunto são mais voltadas para o comportamento do gráfico que apresenta uma tendência decrescente, e os resultados são inversamente proporcional.

A Figura 4.9, contém um gráfico, onde está presente a curva de correlação para os dados de  $V_p\_Sônico$  e  $V_p\_Pundit$ . Os resultados são similares, apresentando somente uma variação no índice de correlação. Onde o índice de correlação entre  $V_p\_Sônico$  x Porosidade é  $R^2= 0,5453$  e o do  $V_p\_Pundit$  x Porosidade é  $R^2= 0,5585$ .

Figura 4.9: Gráfico de correlação entre Vp x Porosidade, não individualizando as litologias.



Fonte: Autoria própria.

## 5. CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTURO

### 5.1. CONCLUSÃO

Esta pesquisa, nos propiciou a confirmar da utilização de métodos indiretos para (perfilagem geofísica) para determinar parâmetros físicos do maciço rochoso, como UCS, densidade e porosidade. Através de curvas de calibração e da utilização de formulas cálculos de parâmetros.

Destacamos aqui a determinação de duas formulas para a determinação da resistência do maciço a compressão, a partir da velocidade da onda P, através de dois métodos. Que são a perfilagem sônica (Equação 4.1), onde essa correlação alcançou um  $R^2 = 0,7531$ . E a determinação de  $V_p$  em laboratório através do Pundit (Equação 4.2), apresentou um  $R^2 = 0,7043$ .

A correlação para determinação da densidade também gerou índices de correlação notórios e fórmulas para a determinações das mesmas. A correlação entre  $V_p$ \_Sônico x Densidade, apresenta um  $R^2= 0,7981$  e gerou como resultado a Equação 4.3. Enquanto que a correlação entre  $V_p$ \_Pundit x Densidade exibe um  $R^2= 0,8378$  e a Equação 4.4, para determinação do mesmo.

Ressaltamos também a capacidade de determinar parâmetros do maciço através do comportamento dos tempos de trânsito da onda P. Onde maciços mais densos, mais competentes e menos porosos, apresentam um tempo de onda de trânsito da onda P menor, portanto apresentam um  $V_p$  alto. Enquanto que maciços menos densos, menos competentes, menos porosos e também com que são mais intemperizadas, apresentam um  $V_p$  menor.

Já os resultados dos índices de correlação obtidos para a determinação da porosidade não alcançaram índices de confiabilidade estabelecido pela bibliografia. Onde as correlações apresentam os seguintes resultados:  $V_p$ \_Sônico x Porosidade, apresenta  $R^2= 0,5453$ , já  $V_p$ \_Pundit x Porosidade, exibe  $R^2= 0,5585$ .

## 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar outro tipo de ensaio para a determinação da densidade das amostras, uma vez que algumas amostras se desfizeram em contato com a água.

Realizar juntamente com a perfilagem sônica a perfilagem OPTV, para verificar possíveis inconsistências nos banco de dados.

Testar mais grupos de amostras para determinar as características reais e com uma maior confiabilidade.

## 6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4543**: Standart Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimes. Pensilvânia, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2845**: Standart Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. Pensilvânia, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2938**: Standart Practice for Preparing Rock Core Specimes and Determining Dimensional and Shape Tolerances. Pensilvânia, 2002.
- AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. **Introdução à Mecânica das Rochas**. Ed. UFV, 2006. 361 p
- BARBOSA, K. J. **Avaliação geotécnica de lavra subterrânea do corpo serrotinho da mina Cuiabá através de modelagem numérica tridimensional**. 2011. 201 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.
- BARTON, N. **Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy**. Londres: Taylor & Francis/ Balkema. 2007. 729 p.
- BASSIONI, Z. **Theory, measurement, and Interpretation of Well Logs**. 4nd. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1994. 372 p.
- BASTOS, P. K. X. Módulo de deformação de argamassas – conceito e métodos de determinação. In: Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, 5., 2003, São Paulo. **Anais SBTA** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 27–40.
- BEDFORD, A.; DRUMHELLER, D. S. Elastic wave propagation. **John Wiley g Sons**, p. 151-165, 1994.
- BIENIAWSKI, Z.T. **Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling**. No Monograph. Boston: Balkema Publishers, 1984. 272 f.
- BUNGEY, J. H. **The Testing of Concrete in Structures**. 2 ed. London: Surrey University Press, 1989. 228 f.
- BUSTAMANTE, S. G. H. **Previsão de Medições Geofísicas: Pseudo-Poços**. 2012. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BUTEL N, HOSSACK A, KIZIL MS. Prediction of in situ rock strength using sonic velocity. In: COAL OPERATORS CONFERENCE, 14, 2014, Wollongong. **Proceedings of the 2014 Coal Operators' Conference**. Wollongong: Australian Coal Operators Conference, 2014. p 89-102.

CARRASQUILLA, Carmen et al. Stabilizing structure-switching signaling and tamers by entrapment in sol-gel derived materials for solid-phase assays. **Journal of the American Chemical Society**, v. 134, n. 26, p. 10998-11005, 2012.

CHARY, K.B. *et al.* Evaluation of engineering properties of rock using Ultrasonic Pulse Velocity and Uniaxial Compressive Strength. In: NATIONAL SEMINAR ON NON-DESTRUCTIVE EVALUATION. **Proceedings National Seminar on Non-Destructive Evaluation**. Hyderabad: Citeseer, 2006. p.379-385.

CHIEREGATI, A. C. **Amostragem na indústria mineral**. Apostila do curso PMI – 5030 – Amostragem na indústria mineral – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014

CHUNG, H. W.; LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. **Concrete Internations**, Farmington Hills, v. 5, n. 10, p. 42-49, October 1983.

CRAIN, E. R. **Crain's Petrophysical Handbook**. E.R. (Ross) Crain, P.Eng. 2015.

CRAIN, E. R.; CLADWELL, C. I. **The Evolution of Log Analysis Methods**. Offshore Resources. v. 2 n. 2, 1984, p. 26. 30 f

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Informativo técnico – científico: Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. Ribeirão Preto, ATCP, 2010. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/propriedades-materiais/modulos-elasticos/definicoes.html>>. Acesso em: 25 julho 2018.

DARLING, T. **Well Logging and Formation Evaluation**. Elsevier, Burlington, 2005.

BLOCH, MAURO; DILLON, L. D.; SOARES, J. A. Obtenção Simultânea de Parâmetros Elásticos Dinâmicos e Estáticos. In: 3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 1993.

DOBEREINER, L., CAMARGO, F. P., JÁCOMO, A. A. C. Caracterização geomecânica do maciço rochoso de fundação da UHE Cachoeira Porteira. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, São Paulo, v. 1, n.1, Edição Especial, p 17-7, nov. 2011. Disponível em: < <http://www.abge.org.br/site/wp-content/uploads/2017/10/RevistaABGE-Lorenz.pdf> >. Acesso em: 19 junho 2018;

Dvorkin, J. & Nur, A. 1998. Short Note: time-average equation revisited. *Geophysics*, 63: 460–464.

EDLMANN K., SOMERVILLE J. M., SMART B. G. D., HAMILTON S. A., CRAWFORD B. R. **Predicting Rock Mechanical Properties from Wireline Porosities**. In:

SPE/LSRM ROCK MECHANICS IN PETROLEUM ENGINEERING, 8, Trondheim: Society of Petroleum Engineers, 1998. P. 8–10.

ELLIS, D.V.; SINGER, J.M. **Well logging for earth scientists**. Nova Zelândia: Springer Science Business Media B.V.n. ° 2. 2007. 692 f.

EVANGELISTA, A. C. J., **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaio não destrutivos**. 2002. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

FONSECA, L. **Avaliação de métodos de perfilagem geofísica na pesquisa de minério de ferro – Estudo de caso: Definição de contatos litológicos na mina de Capanema, MG**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) - Programa de Pós-graduação em Geotecnia, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.

FREITAS, N. B. A., DANTAS, J. G. M., ZINGANO, A. C. Equação de correlação com ênfase na litologia para estimativa de resistência à compressão uniaxial através do uso do Pundit. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 18., 2017, São Paulo. **Anais do Congresso Anual da ABM**. São Paulo: ABM, 2017. P 399-410.

GOKCEOGLU C., ZORLU K., **A fuzzy model to predict the unconfined compressive strength and modulus of elasticity of a problematic rock**. Eng. App ArtifIntell 17:61–72. 2004;

HOEK, E. & BROWN, E. T., 1980. **Underground excavations in rock**. Institute of Mining and Metallurgy, Londres, 527 f.

HOEK, E., KAISER, P.K., BAWDEN, W.F., 1995. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 215.

HOFFMAN, Georgia L. Et al. **Geophysical borehole logging handbook for coal exploration**. Coal Mining Research Centre, 1982.

Ikeda, R. 1993. In situ stress heterogeneity and crack density distribution. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 30(7): 1013–1018. (34th US Symp. on Rock Mechanics, Madison, WI.).

Inoue M, Ohomi M. Relation between Uniaxial Compressive Strength and Elastic Wave Velocity of soft rock. **Proceedings of the International Symposium on Weak Rock**, Tokyo, 1981; 9–13.

**ISRM. Basic Geotechnical Description of Rock Masses**. In: Int. J. Rock Mech. Min. Sei & Geomech. Abstr. v. 18, pp. 85-110. Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. 1981.

JAEGER, J.C.; COOK, N.G.W.; ZIMMERMAN, R. **Fundamentals of Rock Mechanics**. 4ª Ed. Wiley-Blackwell, 488 p. New Jersey, 2007.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I., 2002. **Geofísica de Exploração**. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 438p.

KILIÇ, Ö. The influence of High temperatures on limestone P-Wave velocity and Schmidt Hammer Strength. **Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. Editora Elsevier, vol. 43, 980-986 p. 2006.

KINSLER, L. and FREY, A. **Fundamentals of Acoustics**. Wiley & Sons. New York, 1961.

KOMAR, C.A. **Hardness, tensile Strength, and Impact toughness of Reservoir Sandstone at Extreme Temperatures**. Bureau of Mines Report of Investigation. Universidade tecnológica da Califórnia. Unites States Department of the Interior. 1971. 8 p.

KUDO, E. K.; MARTINS NETO, M. L. Estudo dos métodos de determinação do módulo de deformação estático e dinâmico. In: SIMPÓSIO 35 BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília. **Anais do Congresso Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Brasília: ANTAC, 2001. p. 345–354.

LING, M. T.; WU, J. T. Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1763–1769. 2002.

LIU, O. Y. 1984. Stoneley wave-derived  $\Delta t$  shear log. In: **SPWLA twenty-fifth annual logging symposium transactions**, 1984.

LUNKES, M.K. **O carvão das camadas superiores e inferiores da jazida da Candiota – RS: uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica**. 2010. 83 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IGEO), Porto Alegre; 2010.

MALHOTRA, Naresh K. Et al. International services marketing: a comparative evaluation of the dimensions of service quality between developed and developing countries. **International Marketing Review**, v. 11, n. 2, p. 5-15, 1994.

Mavko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J. 1998. **The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis** in Porous Media, Cambridge University Press.

McNally, GH. **Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs**. *Geoexploration*. 1987; 24, 381–395.

Moos D, Zoback MD, Bailey L. Feasibility Study of the Stability of Openhole Multilaterals, Cook Inlet, Alaska. 999 **SPE Mid-Continent Operations Symposium** held in Oklahoma City, Oklahoma, 28–31 March 1999, SPE 52186.

MORRIS, R.L.; GRINE, D.R.; ARKFELD, T.E. Using Compressional and Shear Acoustic Amplitudes for the location of fractures. **Journal of Petroleum Technology**, Society of Petroleum Engineers. vol. 6. n. °6. 623- 632 p.1964.



NEVILLE, Adam M.; BROOKS, Jeffrey John. **Concrete technology: Theory and Practice**. Ed. 1. Harlow: Pearson Education 1987.

OFWONA, C. **Introduction to Geophysical Well Logging and Flow Testing**. GDC. Kenya, 2011.

OLIVEIRA, A. M. S., BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo: **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia** (ABGE, 1998), p. 39-55, 1998;

OYLER, Karl D.; COUGHLIN, Frederick J.; BERNHARD, Stefan. Controlling the Helicity of 2, 2 - Bipyridyl Ruthenium (II) and Zinc (II) Hemicage Complexes. **Journal of the American Chemical Society**, v. 129, n. 1, p. 210-217, 2007.

PALMSTROM, A. **OnClassification Systems**. Workshop on Reliability of Classification Systems. *In*: International Conference GeoEng2000, Melbourne, 2000.

PEREIRA, W. R. (2017). **Perfilagem geofísica aplicada a determinação de parâmetros geomecânicos em maciços rochosos**. 2017. 187 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-graduação em Geotecnia, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

PEREIRA, W.R.; CARLOS, D.U.; BRAGA, M.A.S. **Method and System for Density Correction for Geophysical Well Logging Inside Drilling Rods**. Patente n° US2015/0316679 A1. United States Patent and Trading Office (USPTO), 2015b.

PEREIRA, W.R.; CARLOS, D.U.; BRAGA, M.A.S.; GALBIATTI, H.F. **Method and System for Evaluation of gamma-gamma Well Logging Data in Mineral Exploration**. Patente n° US2015/0316681 A1. United States Patent and Trading Office (USPTO), 2015a.

POPOVICS, S., ROSE, J. L.; POPOVICS, J. S. The behaviour of ultrasonic pulses in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 259– 270, 1990.

PROCEQ, **Operating Instructions**. Printed in Swiss, 2015, 28 f.

RAO, M.S.; BHASKAR, G.U.; KAREKAL, S. Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Coal Measures of Pranhita-Godavari Valley, India Using Sonic Logs. Austrália, **2015 Coal Operators' Conference**. University of Wollongong, p. 36-47. Redange, 2007. 10 p.

ROBERTSON GEOLOGGING, **Digital geologging systems and services**. Deganwy, 2007, 12 f

SCHNEIDER, R.L. *et. Al.*, **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**, Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, 1974, v.1, p. 41-65;

SERRA, O. **Well Logging Handbook**. Paris: Editora TECHNIP/ Well Seismic Techniques. *In*: **Jounal-Acoustic Logging: Sonic Transit time measurements. Sonic Amplitude and attenuation measurements**.2008. 433-500 p.

Sharma MSR, O'regan M, Baxter CDP, Moran K, Vaziri H, Narayanasamy R. Empirical relationship between strength and geophysical properties for weakly cemented formations. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. 2010; 72, 134–142.

Sharma P.K. and T.N. Singh. A correlation between P-Wave velocity, impact strength index, slake durability and Uniaxial Compressive Strength. **Bull Eng. Environ**. 2008; 67: 17-22.

SILVA, E. A., **Estudo do desempenho do perfilador sônico em poços delgados: UFRJ-1-RJ e ITAB-1-RJ**. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Geologia), Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, G.A.F. **Correlações dinâmico- estáticas de resistência de arenitos do reservatório de Chicontepec- México**. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

SMIL, V. **Oil: A Beginner's Guide**. One World. Oxford, 2011.

SOARES, J.A.; (1992). **Um estudo da estabilidade mecânica de poços a partir de perfis geofísicos em formação pouco consolidadas**. Belém. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 1992. 114 f.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press. New York, 1990.

TITTMAN, J. **Geophysical Well Logging**: Excerpted from Methods of Experimental Physics, Vol.24: Geophysics. Florida: Academic Press/ Harcourt Brace Jovanovich, 1986. 175 p.

Vernik L, Bruno M, Bovberg C. Empirical relations between compressive strength and porosity of siliciclastic rocks. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech**. Abstr. 1993; 30, 677-680.

VILLAESCUSA, E. **Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping**. In: Rock Mass Characterization. Nova York, Boca Raton e Londres: CRC Press, 2014. 113- 190 p

VOIGT, T.; SUN, Z.; SHAH, S. P. Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 307–316, 2006

WHITE, J. E. **Underground Sound: Application of Seismic Waves**. Elsevier, Amsterdam, 1983.

WILKENS R.; SIMMONS, G.; CARUSO, L. The ratio  $V_p/V_s$  as a discriminant of composition for siliceous limestones. **Geophysics**, Massachusetts v. 49, n. 11, p. 1850-1860, Nov1984.

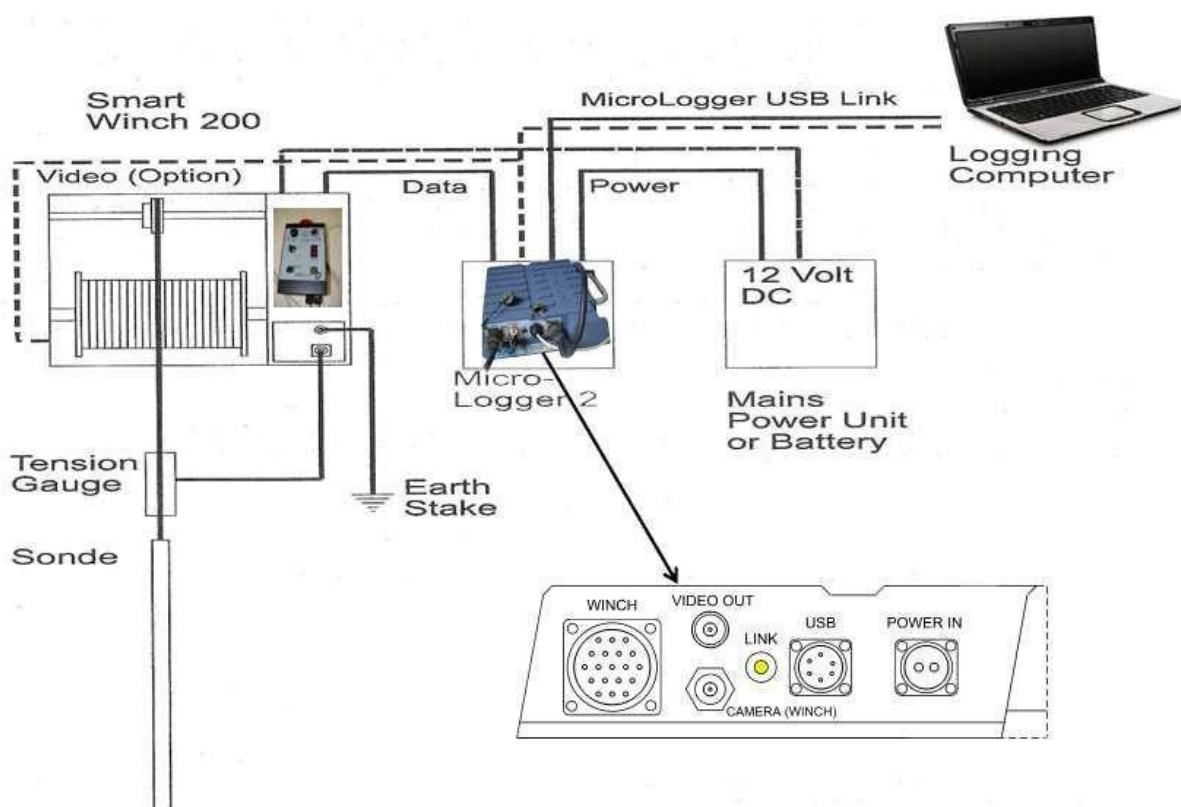
## ANEXO A

## MANUAL DE UTILIZAÇÃO E MONTAGEM DAS FERRAMENTAS DE PERFILAGEM PERTENCENTES AO LPP/IGEO/UFRJ, (SILVA, 2012).

Este manual tem como objetivo facilitar a utilização das ferramentas de perfilagem utilizadas neste trabalho. No texto são utilizadas ilustrações de todos os cabos e conexões do sistema de perfilagem para auxiliar na montagem.

O sistema de perfilagem é composto: por um guincho, controlador do guincho, computador e as sondas. Todo o equipamento é conectado ao computador através da interface chamada MicroLogger, conforme o esquema da Figura A-1.

No texto a seguir os nomes dos equipamentos estão traduzidos e suas funções são explicadas.



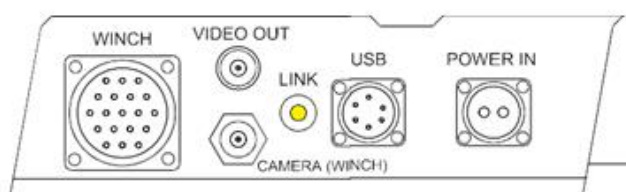
**Figura A-1**-Esquema das conexões do equipamento de perfilagem. Fonte: ROBERTSON GEOLOGGING LTD. 1999. *Documentation Set. Operating and technical manual.*

Cada cabo possui um número diferente de pinos nos seus conectores o que impossibilita erros durante a montagem.

O MicroLogger (sem tradução) serve para gerenciar todo o sistema (Figura A-2). Os detalhes dos conectores estão na Figura A-3. O conector denominado WINCH (guincho) é usada para conectar o guincho através do cabo mostrado na Figura A-4 e com a sequência de montagem nas Figuras de A-5 a A-9.



**FiguraA-2** - *MicroLogger* e suas conexões



**Figura A-3** - Detalhe das conexões do *MicroLogger*.



**Figura A-4** – Cabo para conexão do guincho ao *MicroLogger*.



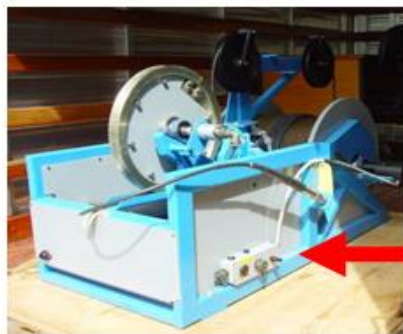
**Figura A-5** – Conector que vai ao *MicroLogger*.



**Figura A-6** – Conector que vai ao cabo que liga ao guincho.



**Figura A-7** – Conector que faz a ligação com o guincho.



**Figura A-8** – Foto do guincho mostrando as conexões que estão indicadas pela seta Vermelha.



**Figura A-9** – Detalhe das conexões do guincho.

Para a conexão ao computador é utilizado o cabo com o conector do tipo USB. Para funcionamento do Micrologger pode ser utilizada a bateria do caminhão (ou uma bateria adicional) que fornece energia elétrica (12 volts) que é ligada pelo cabo de alimentação mostrado nas Figuras A-10 e A-11 onde os conectores do tipo Garra vão à bateria e a outra ponta do cabo liga ao Micrologger no conector de entrada identificado como POWER IN, deve-se prestar atenção à polaridade da bateria, o polo positivo está indicado em vermelho como mostrado nas Figuras A-12 e A-13. O conector chamado de VIDEO OUT é utilizado em sondas que possuem um dispositivo de vídeo.



**Figura A-10** – Cabo de alimentação do MicroLogger.



**Figura A-11** – Conectores do cabo de alimentação do MicroLogger.



**Figura A-12** – Bateria do Caminhão utilizada como alimentação do MicroLogger.



**Figura A-13** – Detalhe da bateria do Caminhão utilizada como alimentação do MicroLogger.

O Controlador do guincho, que é mostrado na Figura A-14, serve para movimentar o cabo onde são conectadas as ferramentas de perfilagem que descem no poço. Um detalhe dos conectores é mostrado na Figura A-15. A conexão do controlador no guincho fica na parte dianteira, os detalhes estão nas Figuras A-16 a A-17. Para o fornecimento de energia elétrica para o guincho e o computador deve-se utilizar um gerador trifásico que é mostrado na Figura A-18.



**Figura A-14** – Controlador do Guincho.



**Figura A-15** – Conectores do controlador do Guincho. Conector a direita liga ao guincho e o conector a esquerda é ligado ao gerador de energia.



**Figura A-16** – Frente do guincho com o conector do controlador



**Figura A-17** – Detalhe da frente do guincho com o cabo do controlador conectado.



**FiguraA-18** – Foto|mostrando o Gerador trifásico

SILVA, E. A., **Estudo do desempenho do perfilador sônico em poços delgados: UFRJ-1-RJ e ITAB-1-RJ**. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Geologia), Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

## ANEXO B

Neste anexo, está contido os perfis, resultantes da determinação da velocidade de  $V_P$ , através do *Pundit*. Esses perfis são gerado pela aparelho e após a sua aquisição os mesmos são transferidos para um computador, através de um *software*, específico.

