

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

JOHN PEREIRA DA SILVA

UTILIZAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA DETERMINAÇÃO DE CONSTANTES
ELÁSTICAS EM TESTEMUNHOS DE SONDAGEM:
CORRELAÇÃO ENTRE AS CONSTANTES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Porto Alegre, 2020

JOHN PEREIRA DA SILVA

Engenheiro de Minas

UTILIZAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA DETERMINAÇÃO DE CONSTANTES
ELÁSTICAS EM TESTEMUNHOS DE SONDAGEM:
CORRELAÇÃO ENTRE AS CONSTANTES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), como 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, 2020

JOHN PEREIRA DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA DETERMINAÇÃO DE CONSTANTES
ELÁSTICAS EM TESTEMUNHOS DE SONDAGEM:
CORRELAÇÃO ENTRE AS CONSTANTES ESTÁTICAS E DINÂMICAS**

A dissertação de mestrado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovada 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 César Zingano

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Paulo Salvadorette (Doutor em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS): _____

Roberto Heemann (Doutor em Engenharia) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS): _____

Jorge Gavronski (Doutor em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS): _____

Dedico a Deus, por me dar uma família eterna

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Dilma Pereira e Adão Julio pelo cuidado e por me suportarem em tudo. Meus irmãos, Marcelo e Julio, pela parceria, carinho e preocupação. Agradeço aos queridos irmãos da Igreja Batista Central de Porto Alegre pelo cuidado e discipulado de mais de dez anos. Agradeço ao Professor André Zingano, pela oportunidade de pesquisa e ensinamentos. À UFRGS, minha *alma mater*. Aos amigos do Laboratório de Mecânica de Rochas da UFRGS e ao CNPQ pela provisão da bolsa de mestrado.

et cognoscetis veritatem et veritas liberabit vos

Yeshua

RESUMO

RESUMO: O presente trabalho se propõe a analisar a correlação entre constantes elásticas estáticas e dinâmicas em arenitos finos assim como testar a validade de equações de regularização preconizadas por outros autores. Foram selecionadas 35 amostras de testemunhos de sondagem de rochas sedimentares de arenitos finos do interior do Rio Grande do Sul. Com o Pundit (*Portable Ultrasonic Nondestructive Index Tester*) PL 200, foram tomadas medidas de velocidade de ondas ultrassônicas P e S de acordo com a norma ASTM D2845 assim como foram realizados ensaios de compressão uniaxial para obtenção do coeficiente de Poisson (ν) (utilizando medições de deformação lateral a partir de *Strain Gauges*) e do Módulo de elasticidade (E) obedecendo a norma ASTM D3148. Também foram realizados (a partir da norma NBR 15845) ensaios para determinação da densidade e porosidade aparente das amostras. Os resultados indicaram uma baixa correlação entre as constantes elásticas estáticas e dinâmica, com a correlação entre o Módulo de Young estático e dinâmico restando $R^2=0,18$ e a correlação entre o Coeficiente de Poisson estático e dinâmico restando $R^2=0,001$. Ainda, a pobre qualidade de leituras manuais de ondas cisalhantes (com a correlação entre a velocidade de onda S e a densidade aparente restando $R^2=0,00006$). Destaca-se também a inefetividade de equações generalistas propostas por BROTONS(2016), CHRISTARAS & MOSSE(1994), FEI(2016), CANADY(2011) e a baixa eficiência das equações propostas por EISSA & KAZI(1988), LACY (1997) e HEERDEN (1987), resultando em um incremento na correlação de um máximo, alcançado pela equação de LACY, de 14,5%.

Palavras-Chave: Constantes elásticas, Ondas ultrassônicas, Pundit, Módulos dinâmicos, Perfilagem

ABSTRACT

The present work proposes to analyze the correlation between static and dynamic elastic constants in fine sandstones as well as to test the validity of regularization equations recommended by other authors. 35 samples of drilling cores from fine sandstone sedimentary rocks from the interior of Rio Grande do Sul were selected. With the Pundit (Portable Ultrasonic Nondestructive Index Tester) PL 200, measurements of the speed of ultrasonic waves P and S were taken according to ASTM D2845 standard as well as uniaxial compression tests were performed to obtain the Poisson's ratio (ν) (using measurements of lateral strain from Strain Gauges) and the modulus of elasticity (E) obeying the ASTM D3148 standard. Tests were also carried out (obeying the NBR 15845 standard) to determine the bulk density and porosity of the samples.

The results indicated a low correlation between the static and dynamic elastic constants, with the correlation between the static and dynamic Young's modulus remaining $R^2 = 0.18$ and the correlation between the static and dynamic Poisson's ratio remaining $R^2 = 0.001$. Still, the poor quality of manual readings of shear waves (with the correlation between the speed of the S wave and the apparent density remaining $R^2 = 0.00006$). Also noteworthy is the ineffectiveness of generalist equations proposed by BROTONS (2016), CHRISTARAS & MOSSE (1994), FEI (2016), CANADY (2011) and the low efficiency of the equations proposed by EISSA & KAZI (1988), LACY (1997) and HEERDEN (1987), resulting in an increase in the correlation of a maximum, reached by the LACY equation, of 14.5%.

Keywords: Elastic Modulus; Ultrasonic Waves; Pundit; Dynamic Elastic Modulus; Well Logging.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Gráfico tensão X deformação nos regimes plástico e elástico.
- Figura 2 Representação esquemática evidenciando a origem do Módulo de Young.
- Figura 3 Deformações longitudinais e transversais sofridas pelo corpo de prova.
- Figura 4 Par de forças cisalhantes “F” causando deformações sem alteração de volume do bloco.
- Figura 5 Figura esquemática de um corpo submetido a tensão cisalhantes.
- Figura 6 Fórmulas de conversão entre as diferentes constantes elásticas para materiais isotrópicos.
- Figura 7 Esquema da curva Tensão x Deformação gerada a partir do ensaio destrutivo utilizando prensa hidráulica
- Figura 8 Sonda de perfilagem munida de dois pares perpendiculares de braços para medida do "caliper" do furo.
- Figura 9 Perfil esquemático de um furo de sondagem ao lado da leitura realizada do mesmo pelo caliper de dois braços.
- Figura 10 Apenas a radiação gama não é desviada por campo magnético.
- Figura 11 Figura esquemática de uma perfilagem de densidade gama gama ELLIS.
- Figura 12 Figura esquemática do *Compton scattering*.
- Figura 13 Uma visão esquemática do efeito da geometria na determinação da densidade pelo uso da atenuação e espalhamento de raios gama.

- Figura 14 Relação entre a intensidade dos raios gama detectados (em numero de contagens por segundo) e a densidade da formação (g/cm^3).
- Figura 15 O princípio da operação de OTV (*Optical Television*).
- Figura 16 Exemplo de sinal acústico mostrando a atenuação da amplitude da onda (e, portanto, sua intensidade) com o tempo.
- Figura 17 Definição de termos utilizados no estudo de ondas sônicas.
- Figura 18 As diferentes frequências utilizadas em medições acústicas e seus equivalentes em comprimento de onda.
- Figura 19 Deformações elásticas e movimentos de partículas associados à propagação de ondas sônicas: a) onda P, b) onda S.
- Figura 20 Efeitos de variações de porosidade no V_p para amostras de doleritos.
- Figura 21 Faixa de variação de velocidade das ondas de compressão (V_P , maior valor) e cisalhante (V_S , menor valor), para diferentes rochas.
- Figura 22 Princípio de funcionamento das medidas de onda P e S com o Pundit.
- Figura 23 Transdutores de onda cisalhante de 250kHz com gel acoplante.
- Figura 24 Esquema de medição dos tempos de chegada de ondas ultrassônicas com o Pundit PL200.
- Figura 25 **(a.** As imagens ilustram ,acima, a configuração de trem de onda obtida pelo fabricante e abaixo, a obtida em ensaios para o presente trabalho. **(b.**Gráfico do osciloscópio mostrando o plano de geração da onda S.
- Figura 26 Gráfico que mostra os valores permitidos do diâmetro e comprimento da amostra e tamanho médio dos grãos versus a razão entre a velocidade de onda P e a frequência de ressonância utilizada no ensaio.

- Figura 27 Expressões próprias de velocidade de onda P (V_p) e S (V_s) para três formatos de espécimes distintos de corpo de prova com suas dimensões limitantes .
- Figura 28 Figura representativa de campanha de sondagem rotativa.
- Figura 29 Caixas de armazenamento de testemunhos.
- Figura 30 Exemplo de testemunho utilizado nos ensaios Uniaxial e Pundit
- Figura 31 Sensores LVDT. À esquerda, sua configuração já montada.
- Figura 32 Foto da prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão uniaxial.
- Figura 33 Pundit PL 200 ao lado dos dois transdutores de onda P .
- Figura 34 Transdutor de ondas cisalhantes Olympus v150.
- Figura 35 Menu de interação mostrando a obtenção dos módulos elásticos a partir de *inputs* de densidade (valor inserido) e das velocidades de onda obtidas pelo próprio equipamento.
- Figura 36 Interface do Pundit PL 200 “configurado” para modo de determinação de módulos elásticos.
- Figura 37 Figura esquemática de um Strain Gauge genérico. Um elemento resistor metálico formatado em *grid*.
- Figura 38 Esquema mostrando a resistência R1 acoplada na amostra e formando um circuito de Ponte de Wheatstone com as outras resistências (R2 a R4 de igual valor (montadas dentro do elemento de leitura).
- Figura 39 Balança Bell MARK 3502.
- Figura 40 Sistema de falhas do Sistema Camaquã.

- Figura 41 Exemplo das pranchetas de campo com a descrição geomecânica de testemunhos.
- Figura 42 Amostra selecionada de entre as caixas de testemunhos de sondagem antes da preparação de amostra propriamente dita.
- Figura 43 Corpo de prova padrão após a preparação
- Figura 44 As manobras de 1 metro são cortadas, para atender a norma de ensaio uniaxial, na serra *Core Trimmer* DS-36 fabricada pela Control e disponível no Laboratório de Mecânica de Rochas da UFRGS.
- Figura 45 Procedimento de calibração do Pundit PI 200.
- Figura 46 Imagem mostrando como se dispõe corpo de prova e transdutores.
- Figura 47 Exemplo de detecção da onda Cisalhante dentro do trem de onda.
- Figura 48 Exemplo de leitura de trem de onda obtido do corrente trabalho.
- Figura 49 Exemplo de peça de testemunho utilizada nos ensaios.
- Figura 50 Ensaio de compressão Uniaxial mostrando os sensores LVDT e os fios ligando os sensores Strain Gauges para leitura da deformação radial da amostra.
- Figura 51 Gráfico de Tensão versus Deformação de uma das amostras. À esquerda do zero da abcissa (indicando aumento da dimensão indicada) temos a deformação lateral e à direita (indicando diminuição da dimensão), em azul, a axial. A deformação indicada é uma proporção da dimensão inicial da peça.
- Figura 52 Metodologias para determinar os valores das constantes elásticas: (a) Módulo tangente; (b) Módulo médio; (c) Módulo Secante.
- Figura 53 *Strain Gauge* acoplado ao corpo de prova.

- Figura 54 Corpo de prova com superfície lateral devidamente polida (primeiramente com lixa grossa e então com lixa "fina") e tratada com os solventes neutralizadores e condicionantes oriundos da fabricante da prensa utilizada no ensaio, como orienta a norma ASTM E1237.
- Figura 55 Aplicação do Strain Gauge à superfície do corpo de prova.
- Figura 56 Esquema mostrando a aplicação do sensor Gauge.
- Figura 57 Elemento de controle e leitura das Pontes de Wheatstone (Control Model 82-P0391).
- Figura 58 Vista em planta do corte perpendicular ao eixo principal de um testemunho de sondagem sob carregamento e deformação radial.
- Figura 59 Amostras submetidas a imersão sob 1/3 da altura em água (a), 2/3 (b) e totalmente submersas (c).
- Figura 60 Imagem representativa da paisagem das amostras submersas.
- Figura 61 Gráfico de correlação entre módulo de Young estático e dinâmico sem correção.
- Figura 62 Correlação entre módulo de young estático (a 25% da carga de ruptura) e dinâmico (sem correção).
- Figura 63 Gráfico de correlação V_p versus Densidade.
- Figura 64 Gráfico de correlação V_s versus Densidade.
- Figura 65 Gráfico de correlação V_p versus Porosidade.
- Figura 66 Gráfico de correlação V_s versus Porosidade.

- Figura 67 Gráfico de correlação entre V_p versus UCS.
- Figura 68 Gráfico de correlação entre V_s versus UCS.
- Figura 69 Gráfico de correlação entre Densidade versus UCS.
- Figura 70 Gráfico de correlação entre Poisson estático e dinâmico.
- Figura 71 Gráfico de correlação entre Poisson estático e dinâmico.
- Figura 72 Gráfico mostrando a deterioração de correlação após aplicação da equação de BROTONS .
- Figura 73 A inserção de outros fatores, no caso a densidade aparente, em KAZI, diferentemente da relação proposta por BROTONS 2014, resultou na melhor correlação apresentada dentre todas as equações de correção estudadas .
- Figura 74 A correlação de 0,2011 alcançada por LACY embora não melhore consideravelmente a qualidade dos dados dinâmicos (que apresentam uma correlação original de 0,1815 com o estático) cumpre seu objetivo embora marginalmente.
- Figura 75 Correlação após ajustes por Heerden.
- Figura 76 Correlação entre dados estáticos e dinâmicos em Itabirito (esquerda) e Hematita (direita) em MORAES, (2016).
- Figura 77 Correlação entre dados estáticos e dinâmicos em calcários de CANNADAY 1964 *apud* MORAES, 2016.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ferramentas de prospecção geofísicas mais utilizadas na indústria do carvão.
Tabela 2	Aplicações do uso do caliper.
Tabela 3	Espessura de meio valor (espessura do material onde a intensidade da radiação é reduzida pela metade) para um feixe estreito de raios gama em diferentes materiais em função da sua energia (todos os valores em mm).
Tabela 4	Relação entre módulos elásticos estáticos e dinâmicos proposta por diferentes autores.
Tabela 5	Especificações técnicas do Pundit PL 200.
Tabela 6	Especificações técnicas dos equipamentos utilizados na sondagem.
Tabela 7	Classificação litológica local na área do depósito dentro do sistema conhecido como Camaquã
Tabela 8	Especificações da serra Core Trimmer DS-36
Tabela 9	Velocidades de onda obtidas com o pundit
Tabela 10	Exemplo de tabela de determinação das propriedades geomecânicas estáticas para cada amostra
Tabela 11	Parâmetros físicos das amostras a partir das medições e ensaio de densidade aparente

SÍMBOLOS E ABREVIações

E	Módulos de elasticidade = Módulo de Young
ν	Coefficiente de Poisson
μ	Módulo de Cisalhamento
σ	Tensão Aplicada Na Rocha
ϵ	Deformação Observada Na Rocha Sob Compressão
μ	Módulo de cisalhamento
τ	Tensão Cisalhante
ASTM	American Society for Testing and Materials
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strength</i>
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
V_p	Velocidade de onda P
V_s	Velocidade de onda S
Ψ	Fluxo de raios gama
N_0	Número fótons gama emitidos pela fonte
N	Número de detecções de fótons gama captados no detector
N_e	Número de elétrons por cm^3
σ_{co}	Seção reta de espalhamento para cada elétron que interage em <i>Compton Scattering</i>
OTV	Optical Televuew
FWS	<i>Full Wave Sonic</i>
T	Período
f	Frequência

t	Tempo de Trânsito
VSP	<i>Vertical Seismic Profile</i>
PUNDIT	<i>Portable Ultrasonic Pulse Velocity Testing</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
LPM	Laboratório de Pesquisa Mineral
UPV	Velocidade De Pulso Ultrassônico
FRP	Frequência De Repetição De Pulso
p ou ρ	Densidade Aparente
η_a	Porosidade aparente
Gauge	<i>Strain gauge</i>
μ_s	<i>Micro-strain</i> ($\mu\text{m}/\text{m}$)
M_{sec}	Massa seca
M_{sat}	Massa saturada
M_{sub}	Massa submersa

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO.....	21
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CONCEITOS DE GEOMECÂNICA E PERFILAGEM.....	23
2.1 Propriedades Mecânicas das Rochas.....	23
2.1.1 Módulo de Young (E).....	24
2.1.2 Coeficiente de Poisson (ν).....	26
2.1.3 Módulo de Cisalhamento (μ).....	27
2.1.4 Ensaios Estáticos Laboratoriais (UCS).....	30
2.2 Métodos Indiretos de Prospecção Geotécnica.....	31
2.2.1 Caliper.....	32
2.2.2 Perfilagem Radiométrica.....	34
2.2.3 Acoustic Televiewer.....	40
2.2.4 Perfilagem Sônica.....	42
2.2.5 Determinação de V_p E V_s em Laboratório Via Pundit.....	50
2.3 Constantes Elásticas de Natureza Estática e Dinâmica.....	57
3.0 MATERIAIS E MÉTODO.....	61
3.1 Materiais.....	62
3.1.1 Testemunhos de Sondagem Diamantada.....	62
3.1.2 Prensa Hidráulica.....	64
3.1.3 Pundit.....	66
3.1.4 Strain Gauges.....	69
3.1.5 Balança.....	71
3.2 Sondagem e Contexto Geológico.....	71
3.3. Descrição dos Furo de Sondagem.....	74
3.4. Amostragem.....	75
3.5. Preparação das Amostras.....	76
3.6. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	78
3.6.1 Pundit (V_p , V_s).....	78
3.6.2 Uniaxial (Módulo De Young e Ucs).....	83
3.6.3 Densidade Aparente.....	92
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96

4.1 Aplicação das Equações de Conversão E_{dyn} para E_{est}	104
5. CONCLUSÃO.....	110
6.0 BIBLIOGRAFIA.....	112
7.0 APÊNDICE.....	119
7.1 Leituras de Ondas Ultrassônicas.....	119
7.2 Compilação de Dados.....	127
7.3 Módulo de Young corrigido.....	129

1.0 INTRODUÇÃO

A caracterização geomecânica de maciços rochosos subentende o uso de métodos de aquisição física de amostras e sua posterior destruição em ensaios onerosos e não redundantes. Uma vez realizado o ensaio destrutivo, é impossível reproduzir as mesmas condições amostrais. Além disso, a aquisição física de corpos de prova requer onerosas campanhas de sondagem rotativa.

Nesse cenário surgem os métodos geofísicos de aquisição. Menos onerosas em termos de custos e tempo, as informações geofísicas podem substituir parte da amostragem de testemunhos em modelagens geotécnicas.

Um método que pode ser profícuo para fins de modelagem geológica de finalidade geotécnica tem sido a análise de ondas sônicas. O tempo com que diferentes tipos de ondas sônicas, com seus diferentes perfis anisotrópicos de passagem, percorrem o meio mineral, é reflexo das constantes elásticas essenciais da rocha, entre elas o Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson, uma importante propriedade que é a medida da deformação lateral de um corpo comprimido por forças na sua maior dimensão.

No intuito de estimar a correlação entre os ensaios destrutivos de modelagem geomecânica (através de testes UCS, sensores LVDT e strain-gauges) e não destrutivos (através de um emissor/leitor de onda sônicas cisalhantes Pundit PL-200) verificamos a aderência do método geofísico àquele já consagrado pela normativa técnica, porém de menor reprodutibilidade. Também foram testadas algumas das equações de correção presentes na literaturas. De fato, os métodos de aquisição indireta precisam ter seus resultados normalizados para se adequarem às especificidades dos ensaios diretos que assistem o comportamento real da rocha sob altos esforços .

Este trabalho, foi dividido em cinco capítulos. No primeiro, é apresentado uma breve introdução sobre o tema abordado neste trabalho, objetivos e organização interna.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica do tema abordado. Trata de assuntos pertinentes aos principais métodos de perfilagem geofísica de campo e em

laboratório, seus princípios de funcionamento, as aplicações e diferenças essenciais entre os métodos diretos e indiretos, especialmente as constantes elásticas obtidas a partir deles que, como veremos, podem apresentar discordâncias irreconciliáveis.

O terceiro capítulo apresenta os métodos utilizados no trabalho pormenorizados, as normas utilizadas para balizar os ensaios assim como possíveis anomalias nos resultados. A tomada das medidas de velocidade de onda e o processo de aquisição da deformação lateral com *strain gauges*, dois dos processos mais importantes do estudo, são tratados aqui. O capítulo vai abordar o contexto geológico que originou as amostras, o processo e os equipamentos de sondagem.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões ensejadas por eles, e no quinto capítulo algumas das conclusões que podem ser retiradas da discussão.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CONCEITOS DE GEOMECÂNICA E PERFILAGEM

2.1 Propriedades Mecânicas das Rochas

Este capítulo apresenta as principais propriedades mecânicas utilizadas na caracterização das rochas em termos de resistência e elasticidade. Tratam-se das propriedades elásticas que definem o comportamento das mesmas quando submetidas a diversas naturezas de esforços.

Quando da criação dos sistemas de classificação dos maciços, lança-se mão a diferentes qualidades observáveis (tais como abertura das descontinuidades, rugosidade e RQD) mas em nenhum descarta-se o uso das propriedades dos materiais que os constituem.

A resposta do maciço diante de uma solicitação depende do comportamento de suas parcelas íntimas de material ao mesmo esforço. É esse comportamento que se busca quantificar quando determinamos os valores das propriedades elásticas dos materiais.

Um corpo submetido a tensão sofre uma mudança de forma, ou seja, deforma-se. Até um certo valor máximo, conhecido como limite elástico de um material, a deformação é diretamente proporcional ao esforço aplicado. Essa deformação elástica é reversível, de forma que a remoção do esforço leva à remoção completa da deformação. Se esse limite é ultrapassado (incrementando a tensão sobre o corpo de prova), a deformação torna-se não linear e parcialmente permanente, o que é conhecido como deformação plástica. Esses são, portanto, os dois estados de tensões a que um material está submetido. Até um certo limite de esforço a rocha comporta-se de maneira elástica (apresentando uma deformação reversível e proporcional à tensão que recebe) e a partir desse limite de tensões as deformações observadas desvencilham-se da proporcionalidade outrora observada e passam a ser parcialmente irreversíveis (como observado na Fig. 1 Gráfico tensão vs deformação nos regimes plástico e elástico).

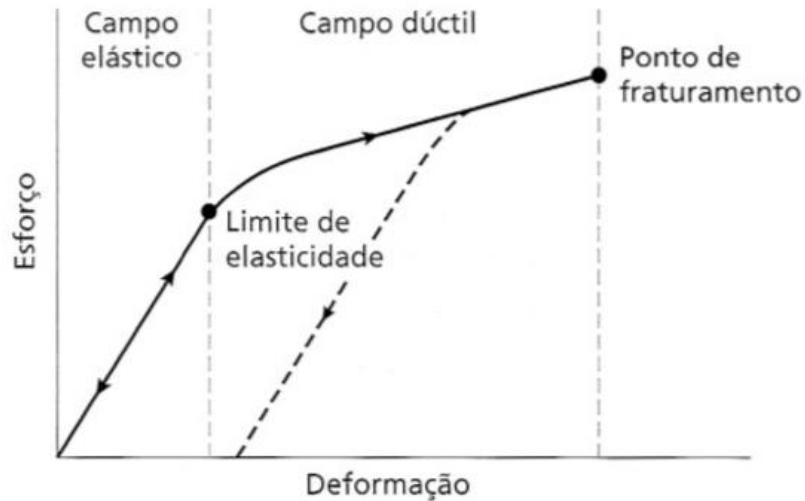


Figura 1 Curva tensão versus deformação observada em materiais isotrópicos.

Para qualquer atividade que envolva esforços elevados sobre materiais diversos, atuar no limite de ruptura do material, na zona plástica do mesmo, é um risco descabido e desnecessário. Por questões de segurança (e também por conveniência dado que modelar o comportamento plástico dos materiais escalona em muito a complexidade do fenômeno) estudaremos nesse trabalho apenas as propriedades elásticas das rochas, ou seja, iremos mensurar apenas propriedades observadas em regimes elásticos de solicitações.

Na natureza, os materiais estão submetidos a diferentes tipos de esforços. Para descrever a resposta da rocha a cada uma delas isoladamente surgem os diferentes módulos elásticos, sendo os principais o módulo de Young (E), o Coeficiente de Poisson (ν) e módulo de Cisalhamento (μ).

2.1.1 Módulo de Young (E)

O módulo de Young, junto com o coeficiente de Poisson, é listado como um dos principais módulos de elasticidade. Trata-se, conforme a lei de Hooke, da constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada na rocha (σ) e a deformação observada (ϵ) paralelamente ao sentido da força.

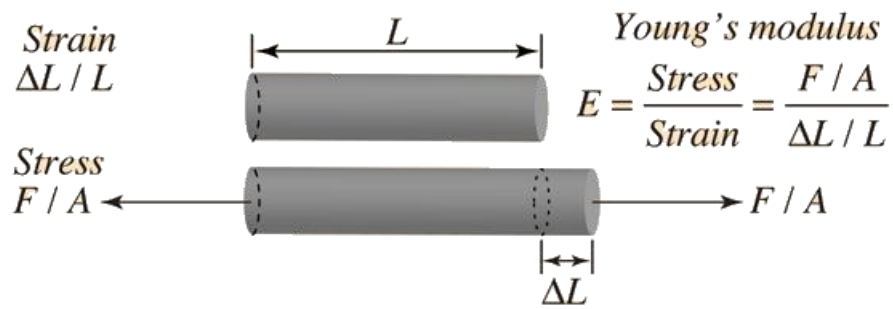


Figura 2 Representação esquemática evidenciando a origem do Módulo de Young (Retirado de hyperphysics.phy-astr.edu. Acesso em 20/12/2018)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Importante observar que essa relação mostrada na equação 1 diz respeito à etapa do acréscimo de forças em que a rocha já teve suas microfissuras devidamente fechadas e, portanto, já responde de forma elástica.

A deformação longitudinal paralela à direção da força aplicada (ε_1) é o objeto de medida do módulo de Young e é aquela de obtenção mais simples, dado que a direção da aplicação da força costuma ser aquela de deformações mais proeminentes e facilmente perceptíveis.

2.1.2 Coeficiente de Poisson (ν)

O Coeficiente de Poisson (ν) surge para caracterizar as deformações perpendiculares (ϵ_2) à direção de aplicação da tensão.

Ele é definido como a razão entre a deformação (ϵ_2) sofrida pelo corpo de prova na direção perpendicular à tensão aplicada e a deformação (ϵ_1) ao longo da direção principal paralela à tensão aplicada.

Se considerarmos que um corpo de prova de diâmetro inicial “D” é exposto a uma tensão σ_1 , é previsível que haja não só uma alteração de seu comprimento inicial “L” como também no seu diâmetro (FEYNMAN *et al.*, 2010). O termo que expressa a proporção elástica (ν) em que o diâmetro (ϵ_2) se altera por unidade da alteração do comprimento (ϵ_1) do corpo pode ser expresso pela equação 2 :

$$\epsilon_2 = -\nu\epsilon_1 \quad (2)$$

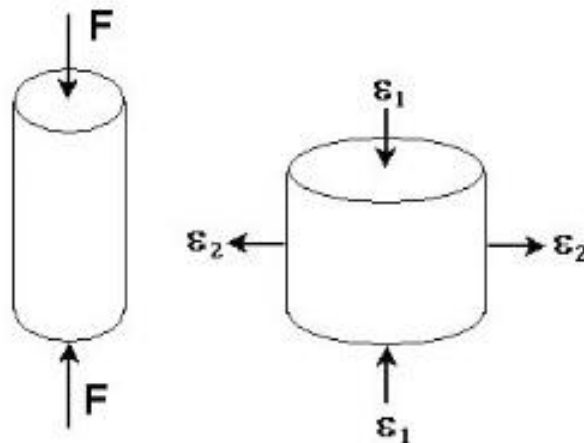


Figura 3 Deformações longitudinais e transversais sofridas pelo corpo de prova

Como o coeficiente de Poisson é uma razão entre grandezas de mesma natureza ele não possui uma unidade específica e costuma variar até o valor de 0,5, a partir do qual o corpo de prova começa a sair do estado elástico de tensões.

2.1.3 Módulo de Cisalhamento (μ)

A deformação de um material pode ocorrer, também, sem mudança de volume, o que caracteriza a deformação por tensões cisalhantes (JAEGER *et al.*, 2007).

A tensão de cisalhamento (τ) é o esforço que age como uma força aplicada paralelamente a uma superfície objetivando o deslizamento relativo de planos paralelos (ou deformações angulares). O módulo de cisalhamento é uma medida da oposição a deformação angular provocada pela tensão cisalhante (SOARES, 1992).

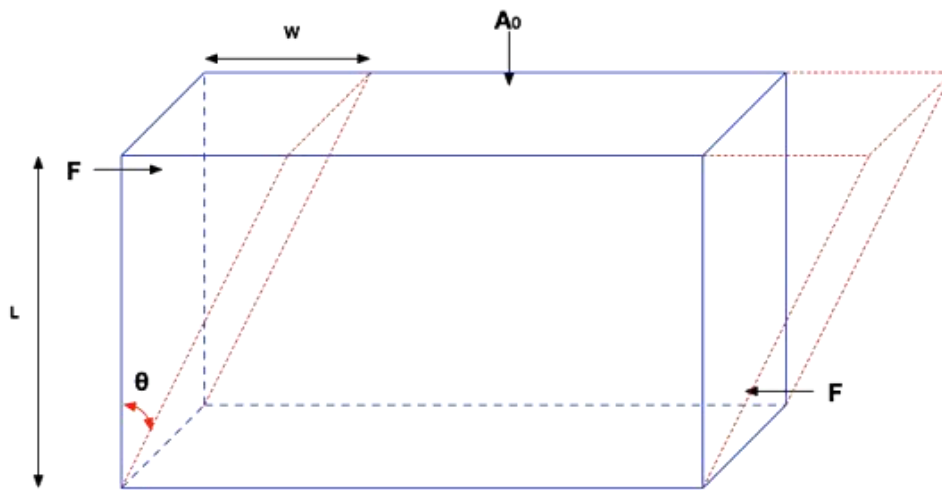


Figura 4 Par de forças cisalhantes "F" causando deformações sem alteração de volume do bloco

$$\mu = \tau/\theta \quad (3)$$

Onde

θ = Deformação angular causada nas superfícies paralelas.

τ = Tensão cisalhante atuante nas superfícies de área A_0 paralelas, superior e inferior.

μ = Módulo de cisalhamento

É sabido que dois pares de forças cisalhantes agindo tangencialmente sobre os lados de um bloco, como o da Figura 4, é equivalente a um par de forças

perpendiculares entre si agindo na direção das diagonais dos blocos, sendo essas forças de tração e compressão respectivamente.

Essa análise das tensões cisalhantes em função das forças e deformações resultantes nas diagonais torna esse módulo passível de correlação com o módulo unidimensional de Young e bidimensional de Poisson, dado que, em uma das diagonais do bloco podemos descrever a deformação em função da deformação da diagonal oposta da face do bloco (SOARES, 1992).

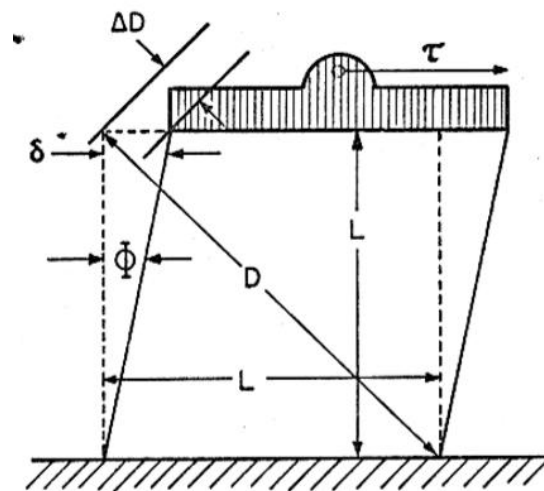


Figura 5 Figura esquemática de um corpo submetido a tensão cisalhantes. Adaptado de FEYNMAN et al 2010. e SOARES 1992

Para uma das diagonais do corpo de prova da figura 5 a deformação relativa se dará pela relação:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{(1+\nu)}{E} \tau \quad (4)$$

E para a deformação total, dado que a mesma deformação ocorre em ambas diagonais, temos que:

$$\theta = \Phi = \frac{2\Delta D}{D} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau \quad (5)$$

Considerando a equação original do módulo de cisalhamento para as devidas substituições:

$$\mu = \tau/\theta \quad (3)$$

Logo, transcrevendo o módulo cisalhante em termos das demais constantes elásticas:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

Materiais isotrópicos têm suas propriedades elásticas determinadas unicamente por qualquer par de seus módulos elásticos. De fato, como estão limitados a apenas três dimensões os materiais têm suas deformações restritas às mesmas três dimensões. Ora, o módulo de Young descreve as alterações paralelas às forças que compõe o campo de forças a que está sujeito o corpo; o coeficiente de Poisson, por sua vez, descreve as deformações perpendiculares às forças principais e, como em um sistema de três equações e três incógnitas, quaisquer deformação (e portanto qualquer módulo de elasticidade que a caracterize) resultante de um campo de forças tridimensional pode ser descrita em função de apenas dois módulos de elasticidade conhecidos, geralmente os dois supracitados pois de mais fácil obtenção.

	(K, E)	(K, λ)	(K, G)	(K, ν)	(E, G)	(E, ν)	(λ, G)	(λ, ν)	(G, ν)	(G, M)
$K =$	K	K	K	K	$\frac{EG}{3(3G-E)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\lambda + \frac{2G}{3}$	$\frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu}$	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$M - \frac{4G}{3}$
$E =$	E	$\frac{9K(K-\lambda)}{3K-\lambda}$	$\frac{9KG}{3K+G}$	$3K(1-2\nu)$	E	E	$\frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G}$	$\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	$2G(1+\nu)$	$\frac{G(3M-4G)}{M-G}$
$\lambda =$	$\frac{3K(3K-E)}{9K-E}$	λ	$K - \frac{2G}{3}$	$\frac{3K\nu}{1+\nu}$	$\frac{G(E-2G)}{3G-E}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	λ	λ	$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	$M - 2G$
$G =$	$\frac{3KE}{9K-E}$	$\frac{3(K-\lambda)}{2}$	G	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	G	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	G	$\frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu}$	G	G
$\nu =$	$\frac{3K-E}{6K}$	$\frac{\lambda}{3K-\lambda}$	$\frac{3K-2G}{2(3K+G)}$	ν	$\frac{E}{2G} - 1$	ν	$\frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$	ν	ν	$\frac{M-2G}{2M-2G}$
$M =$	$\frac{3K(3K+E)}{9K-E}$	$3K - 2\lambda$	$K + \frac{4G}{3}$	$\frac{3K(1-\nu)}{1+\nu}$	$\frac{G(4G-E)}{3G-E}$	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\lambda + 2G$	$\frac{\lambda(1-\nu)}{\nu}$	$\frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}$	M

Figura 6 Fórmulas de conversão entre as diferentes constantes elásticas para materiais isotrópicos. Aqui o módulo de cisalhamento é expresso como "G". (MAVKO et al., 2009)

2.1.4 Ensaios Estáticos Laboratoriais (UCS)

O método laboratorial de determinação de parâmetros geomecânicos mais utilizado é o de prensa hidráulica. Um dispositivo de carregamento que, tendo controlado a taxa de carga e/ou a medida de deformação da peça, leva a amostra, em um crescente constante de carga/deformação, até o rompimento (sendo por isso classificado como um ensaio Destrutivo e também Estático).

Todo o procedimento é normatizado por normas internacionais como as normas da ASTM (American Society for Testing and Materials) e ISRM (International Society for Rock Mechanics) que exigem sensibilidade mínima nas medições de deformação axial (na direção do eixo em que é aplicada a carga) e lateral.

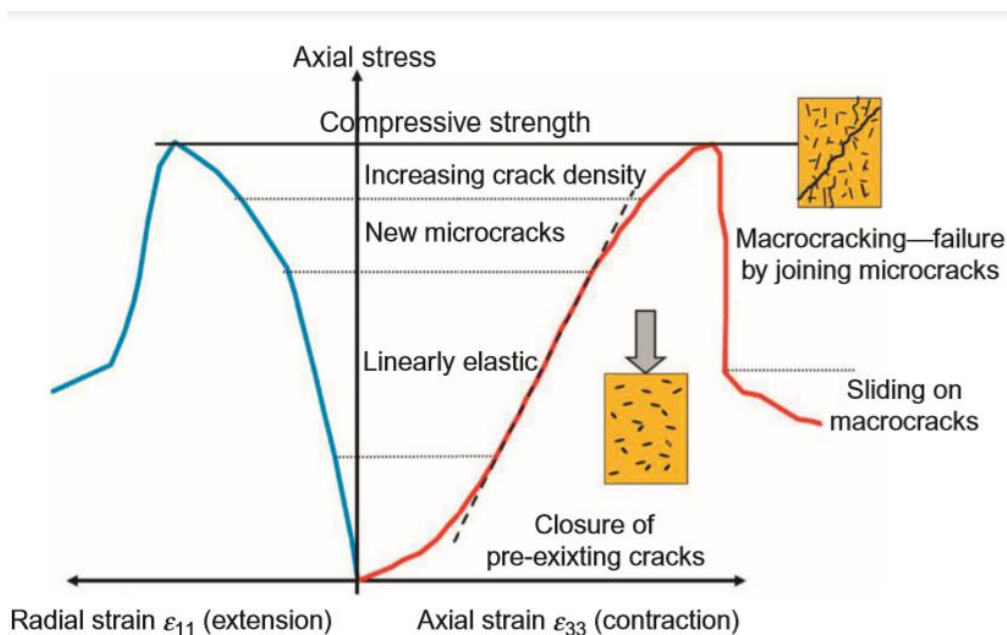


Figura 7 Esquema da curva Tensão x Deformação gerada a partir do ensaio destrutivo utilizando prensa hidráulica. (SCHÖN, 2015)

As mesmas normas também definem tamanho e formato de amostra necessários. Em geral utilizam-se amostras cilíndricas com diâmetro de pelo menos dez vezes o tamanho da maior partícula constitutiva do material e altura de duas a duas vezes e meia o valor do diâmetro.

2.2 Métodos Indiretos de Prospecção Geotécnica

A perfilagem geofísica consiste na leitura contínua de propriedades físicas das rochas das paredes de um furo com um ferramental formado por várias sondas acopladas viajando através dele. Várias propriedades podem ser medidas ao mesmo tempo, bastando acoplar juntas os diferentes tipos de sondas responsáveis por cada propriedade a ser estudada. Decorre daí a conveniência e flexibilidade do método, dado que ele pode ser moldado para as diversas necessidades de informação de indústria como mostrado na tabela 1.

Tabela 1 Ferramentas de prospecção geofísicas mais utilizadas na indústria do carvão (HOFFMAN et al., 1982)

AVAILABLE LOGGING TOOLS		
Nuclear Tools	Electrical Tools	Other Tools
<i>Natural Gamma Ray</i>	<i>Single-Point Resistance</i>	<i>Sonic</i>
<i>Gamma-Gamma Density</i>	<i>Normal Resistivity</i>	<i>Caliper</i>
<i>Neutron-Neutron</i>	<i>Focused Resistivity</i>	<i>Hole Orientation</i>
<i>Neutron-Gamma</i>	<i>Dipmeter</i>	
	<i>Spontaneous-Potential</i>	

Os métodos geofísicos têm aplicação maturada na indústria petrolífera onde se notabilizaram como as principais ferramentas de prospecção de rochas reservatórios com aplicação especial na determinação da porosidade destas. Na exploração mineral e na geomecânica, a utilização de ferramentas geofísicas ainda é incipiente quando comparada à indústria de petróleo. Os principais alvos do uso do método na indústria mineral são a determinação das densidades das rochas ao longo do furo (PEREIRA, 2017) e, na geomecânica, propriedades físicas das rochas que ajudem na caracterização de parâmetros geomecânicos do maciço e sua classificação, entre elas os módulos elásticos e a presença de falhas e discontinuidades.

Dentre as principais ferramentas que tem aplicação direta de perfilagem geofísica na determinação de parâmetros geomecânicos, cita-se as ferramentas de:

Caliper; Gama natural; Gama-gama; *Optical televiewer*; *Acoustic televiewer* e *Full Wave Sonic*.

2.2.1 Caliper

O Caliper é uma ferramenta que mede o diâmetro (e portanto formato) das diferentes seções no decorrer do furo de sondagem. Ele faz isso utilizando-se de “braços” que se estendem a partir do corpo central da sonda. A amplitude dessa extensão é limitada pela parede do furo e então é detectada e convertida em sinais elétricos por um potenciômetro.



Figura 8 Sonda de perfilagem munida de dois pares perpendiculares de braços para medida do "caliper" do furo

O Caliper costuma equipar a grande maioria das sondas utilizadas na indústria. Como qualquer ferramenta colocada em um furo é cercada por lama ou fluido de perfuração, os parâmetros registrados são, na sua maioria, afetados pela lama em função do seu volume, que depende do diâmetro do poço e de suas propriedades. Consequentemente, é importante saber com precisão o diâmetro do poço em cada nível de amostragem.

Existem ferramentas de caliper com diferentes números de braços, sendo a definição dessa configuração dependente da finalidade das medições. As tensões geológicas não se distribuem uniformemente na crosta mas costumam ter uma orientação preferencial. Isso é manifesto no formato levemente ovalado que muitas seções dos furos de sondagem assumem após a perfuração (efeito conhecido como *Breakout*). Nessas seções, uma ferramenta caliper de apenas dois braços se

acomodaria no maior diâmetro e não indicaria as variações inerentes a esse efeito, devido a isso, ferramentas de quatro ou mais braços são requeridas. Com quatro braços pode-se medir variações de diâmetro em duas direções perpendiculares. Essa configuração também permite o cálculo do volume dos diferentes trechos do furo.

Numa configuração mais avançada dessa ferramenta ela pode contar com mais de 30 braços e fornece um perfil detalhado das paredes do furo a ser medido.

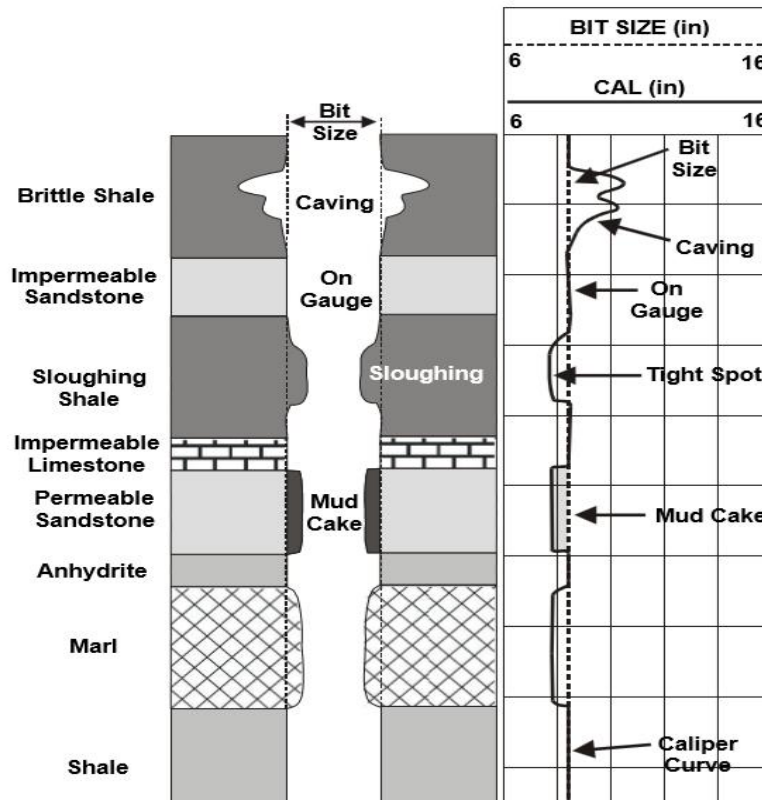


Figura 9 Perfil esquemático de um furo de sondagem ao lado da leitura realizada do mesmo pelo caliper de dois braços (Badawi, 2016)

Tabela 2 Aplicações do uso do caliper (SERRA, 2008)

Applications of the borehole-diameter measurement		
Applications	Quantitative	Qualitative
Petrophysics	Geology Measurement of the borehole diameter in order to correct measurements realized by the other devices. Measurement of the mud-cake	Detection of porous and permeable zones. Detection of zones strengthened for the anchoring of the packer of the formation tester.

	thickness. Determination of the cement volume necessary for the cementation.	
Geology	Measurement of the thickness of the mudcake	Lithology approach. Detection of porous and permeable zones. Detection of strengthened zones. Detection of swelling clays. Detection of the broken or fractured zones.

2.2.2 Perfilagem Radiométrica

O fenômeno da radioatividade, que constitui a base desse método, apesar de existir com diversas matizes, as de melhor aplicação na perfilagem são as que fazem uso da detecção da radiação gama. Isso se deve a diversos fatores sendo o principal pelo alto poder de penetração da radiação gama como também em razão de essa radiação ser pouco susceptível a deflexão, tornando-a facilmente isolada das demais quando emitida.

Tabela 3 Espessura de meio valor (espessura do material onde a intensidade da radiação é reduzida pela metade) para um feixe estreito de raios gama em diferentes materiais em função da sua energia (todos os valores em mm) (SERRA, 2008)

Energy of gamma ray (MeV) → Material (density) ↓	0.1	0.2	0.5	1	2	5
Air (0.0003)	36	44	61	83	121	230
Water (1.0)	42	51	72	98	142	
Vinyl polychloride (1.3)	27			78		
Concrete (2.3)	19.2	26	37	50.4	72	
Limestone (tight) (2.7)	21		46			
Aluminium (2.7)	16	21.4	30.4	42	60	
Iron (7.8)	2.6	6.4	10.6	14.7	20.6	28
Lead (11.3)	0.11	0.65	4.0	8.8	13.6	14.7
Uranium (18.7)	0.029			4.7		
Plutonium 239 (19.8)	0.025			4.2		

As principais fontes de radiação Gama na natureza são isótopos de Potássio, Tório e Urânio, por se tratarem de isótopos com longa vida útil de decaimentos desde o período de formação do planeta.

As principais ferramentas de perfilagem radiométrica fazem uso tanto da leitura da radioatividade natural produzida por elementos instáveis presentes nas formações sedimentares (leituras de gama natural) como também da recuperação de raios gama emitidos pela sonda e que atravessam o maciço interagindo com a matéria rochosa que a envolve até encontrarem o detector embarcado na própria ferramenta (leituras gama-gama).

2.2.2.1 Gama Natural

A radioatividade natural é o decaimento espontâneo dos átomos de certos isótopos em outros elementos isótopos. Os produtos do decaimento podem ser estáveis ou sofrer posterior decaimento até que um isótopo estável seja finalmente criado.

O decaimento radioativo é acompanhado pela emissão de partículas alfa ou beta, raios gama e pela geração de calor. A radiação gama natural é uma forma de radiação espontânea emitida por certos núcleos atômicos instáveis cujas frequências estão, por definição, entre 10¹⁹Hz e 10²¹ Hz. A unidade padrão é API (*American Petroleum Institute*) que representa a medida da radioatividade de uma rocha padrão com quantidades padronizadas de tório, urânio e potássio (RICHA *et al.*, 2007).

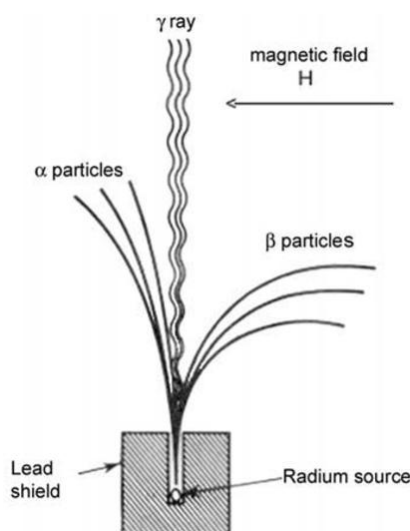


Figura 10 Apenas a radiação gama não é desviada por campo magnético (LAPP & ANDREWS, 1972)

As principais rochas radioativas são as argilas e folhelhos, materiais que "fixam" potássio o tório e o urânio (principais elementos radioativos). Além disso, essas litologias podem conter quantidades significativas de fosfatos ou matéria orgânica, ricos em urânio, e minerais radioativos (SERRA, 2008). Além dessas, outras formações também podem apresentar assinaturas radioativas consideráveis como:

- Xistos betuminosos e aluníticos;
- Determinadas areias arcaicas ou acinzentadas, siltes, arenitos, siltitos ou conglomerados, ricos em minerais como feldspatos, micas ou em minerais contendo urânio ou tório, como zircão, monazita, alanita, esfenol, xenotima ou fosfatos.
- Certos carbonatos, originários de algas que fixaram potássio e urânio, ou são ricas em matéria orgânica, ou em fosfatos.
- Alguns carvões que tenham adsorvido ou acumulado urânio que tenha sido lixiviado de rochas ricas em urânio.
- Rochas ígneas ácidas e acidobásicas como granitos, sienitos e riolitos.

As ferramentas de gama natural atualmente são comuns a todas as sondas geofísicas (PEREIRA, 2017) pois ajudam a compor as medidas de profundidade das outras ferramentas, parâmetro crítico para a integração dos dados de perfilagem. Considerando que as leituras de radiação gama não se alteram entre os intervalos de tempo dos levantamentos, as leituras do gama natural serão as mesmas em suas respectivas profundidades para todas as corridas das diferentes ferramentas (PEREIRA & CARLOS, 2015).

O monitoramento da profundidade é feito costumeiramente pela relação de tração e deformação do cabo que sustenta as sondas. Essa metodologia, no entanto, está sujeita a intempéries do terreno (como estreitamento do furo ou ainda a presença circunstancial de resíduos de perfuração nas paredes, que podem respectivamente aliviar ou incrementar as tensões no cabo) que tornam inconstantes essas medições para as diversas passagens da ferramenta em múltiplas "manobras" de sondagem.

Imprevisibilidades como essas, em um parâmetro chave como a profundidade, pode inviabilizar o auto referenciamento dos diferentes dados de uma expedição de sondagem ao não permitir que as diversas naturezas de coletas sejam comparadas entre si e retro compatibilizadas.

Considerando que a contagem de detecções de gama natural da rocha não muda durante o tempo de aquisição, registra-se as variações na radioatividade em função da profundidade e posteriormente se sobrepõe as contagens com o devido ajuste (PEREIRA, 2017). Cria-se assim uma “impressão digital” (única para cada furo) com a medida em API's de detecções gama natural esperada a cada seção.

2.2.2.2 Gama Gama

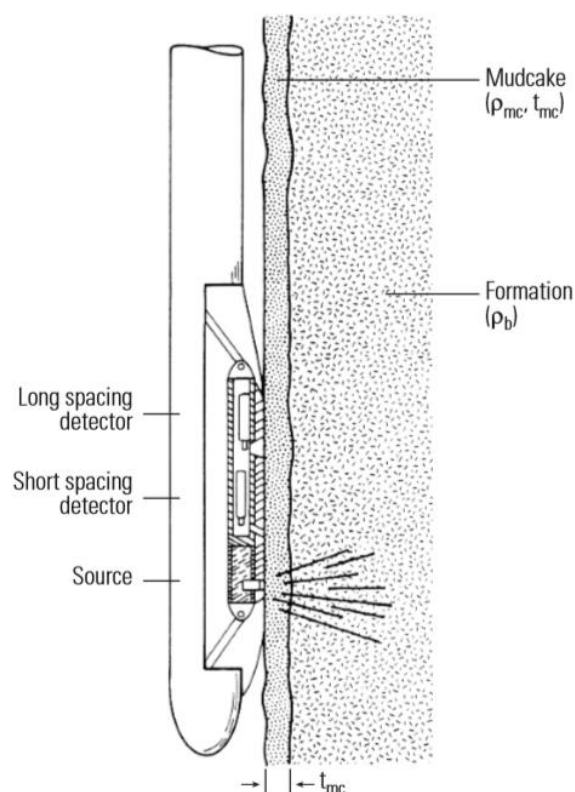


Figura 11 Figura esquemática de uma perfilagem de densidade gama gama (ELLIS, 2007)

A densidade é a principal informação oriunda desse método, sendo ela estimada pela medida da proporção de radiação gama que, uma vez lançada contra a formação de que se quer obter informação, retorna para o detector pelo espalhamento de Compton (KEAREY, 2009). No perfil gama-gama são utilizados raios gama artificiais de uma fonte dos isótopos ^{60}Co (Cobalto 60) ou ^{137}Cs (Césio 137), sendo a escolha entre elas baseada nas características do alvo, bem como nas condições operacionais do poço ou furo de sondagem. Os fótons dos raios gama

lançados da sonda colidem 'elasticamente' com os elétrons do material que constitui a parede do furo, tendo sua energia reduzida (um fenômeno conhecido como *Compton scattering*). O número de colisões depende da abundância de elétrons presentes (ou *elétron density index*), e isso, por sua vez, é uma função da densidade da formação rochosa.

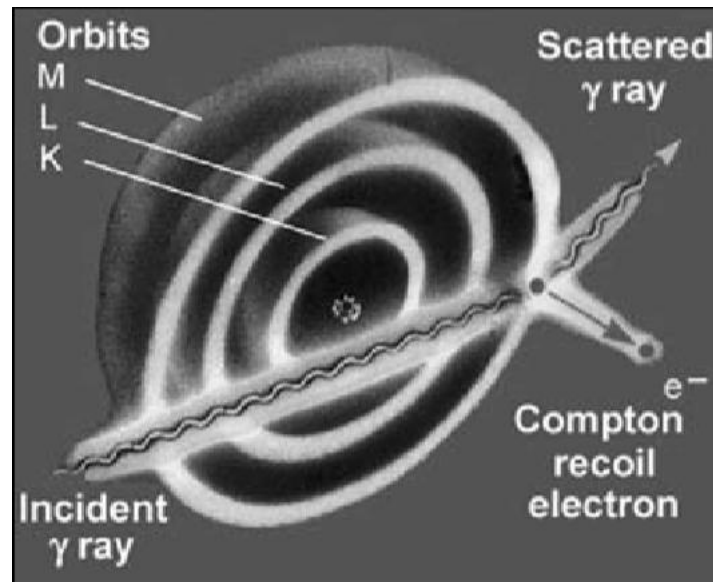


Figura 12 Figura esquemática do Compton scattering (LAPP & ANDREWS, 1972).

Ora, dado um feixe inicial de raios gama Ψ_0 atravessando um anteparo de largura "x", a atenuação desse feixe, ou o fluxo de raios gama que deixará o material após interagir com o mesmo, se dará pela seguinte relação:

$$\Psi = \Psi_0 e^{-n_e \sigma_{Co} x} \quad (7)$$

Onde:

n_e é o número de elétrons por unidade de volume

σ_{Co} é a seção reta de espalhamento para cada elétron que interage em *Compton Scattering*

Ψ é o fluxo de raios gama deixando o material

“X” é a largura do material atravessado pelo feixe de raios gama

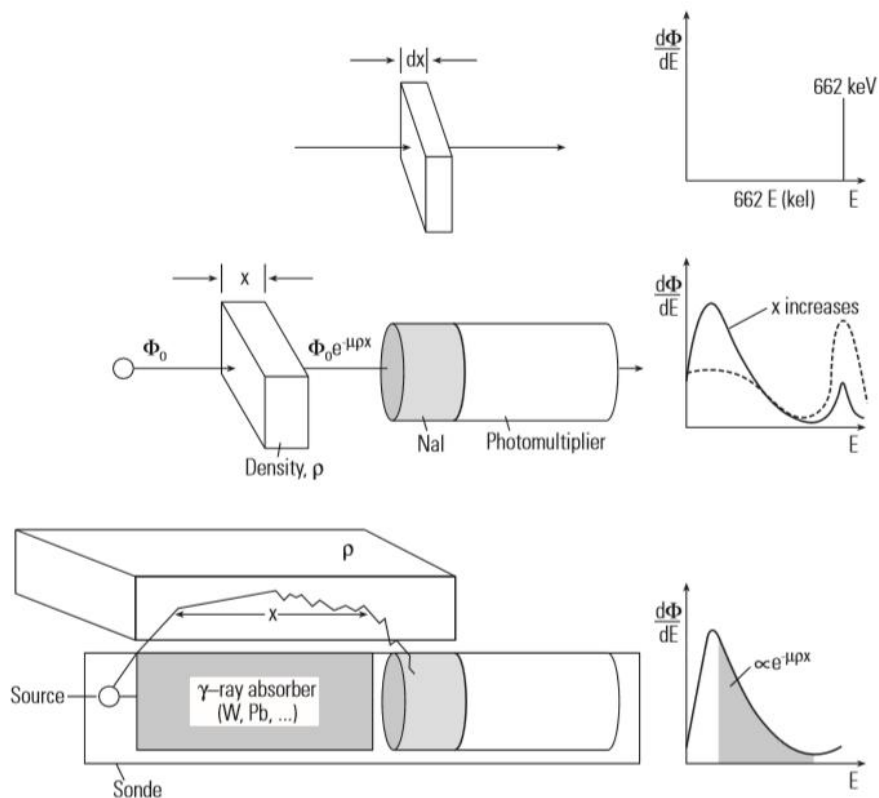


Figura 13 Uma visão esquemática do efeito da geometria na determinação da densidade pelo uso da atenuação e espalhamento de raios gama. No painel superior, o experimento idealizado é mostrado para um pedaço muito fino de material. No segundo painel, a espessura aumentou para que haja considerável dispersão de raios gama. No terceiro painel, é mostrada uma aproximação da situação de registro (ELLIS, 2007).

Pode-se substituir o fluxo de raios gama pela taxa de contagem N no detector (número de fótons coletados no receptor da sonda). De onde vem a seguinte relação:

$$N = N_0 e^{-n_e \sigma_{Co} X} \quad (8)$$

Para:

N_0 = Número fótons gama emitidos pela fonte

N = Número de detecções de fótons gama captados no detector

n_e = Número de elétrons por cm^3

σ_{Co} = é a seção reta de espalhamento para cada elétron que interage em *Compton Scattering*

L = espaçamento entre a fonte e o detector dos fótons

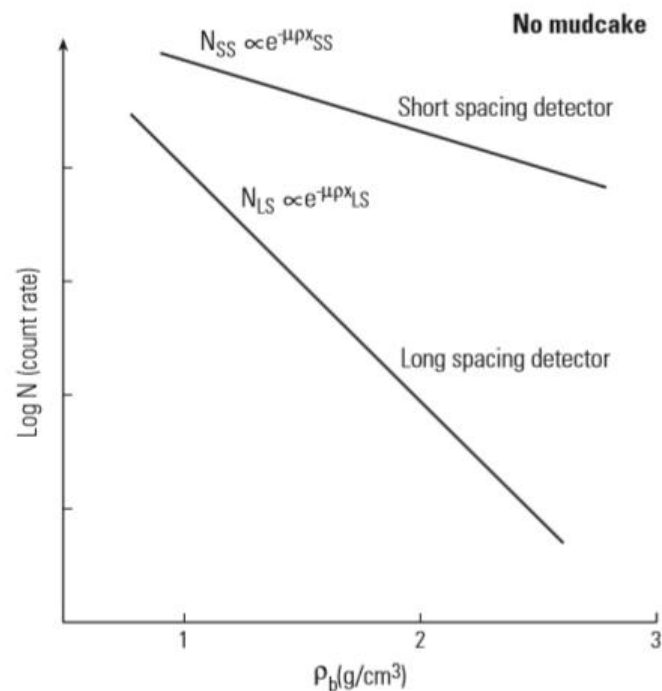


Figura 14 Relação entre a intensidade dos raios gama detectados (em numero de contagens por segundo) e a densidade da formação (g/cm³). Cada reta representa o comportamento de ferramentas com um espaçamento diferente entre emissor e detector (ELLIS, 1987).

2.2.3 Acoustic Televiwer

O *Acoustic Televiwer* é um método de perfilagem que tem como resultado uma imagem em 360° de toda extensão do furo. Trata-se de uma espécie de sonar que, tendo emitido pulsos acústicos de alta frequência (geralmente na casa de *Mega Hertz*) detecta o tempo de chegada da onda refletida nas interfaces de densidades muito contrastantes, tal como a interface entre lama de perfuração e parede do poço. Esse contraste gera diferenças perceptíveis na impedância acústica (produto entre a densidade do meio e a velocidade de propagação da onda acústica) que tem influência direta na intensidade do sinal acústico refletido (expressa no ente do coeficiente de reflexão "r") por essa interface.

$$r = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1) \quad (9)$$

onde

V_1 = velocidade de propagação da onda acústica no meio 1; V_2 = velocidade de propagação da onda acústica no meio 2; ρ_1 = densidade do meio 1; e ρ_2 = densidade do meio 2.

Essa ferramenta geofísica é largamente utilizada na determinação de fraturas e suas propriedades, planos de estratificação, estimativas qualitativas da porosidade e inspecionar falhas no revestimento de poços (TIMUR, 1982).

Para obter essas imagens em 360° o aparelho possui uma fonte central de ondas acústicas e um receptor das mesmas (os transdutores) que giram em alta velocidade dentro da ferramenta. A imagem é então construída a partir das detecções de diferenças nas amplitudes das ondas refletidas pela interface entre o fluido de perfuração e a parede. Outra forma de construir a imagem acústica é fazê-lo a partir dos contrastes no tempo de trânsito detectados a medida que a sonda ganha profundidade (ELLIS, 2007) .

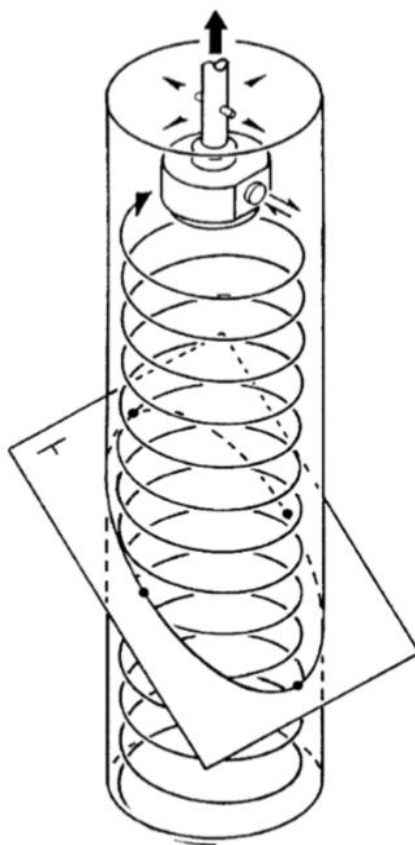


Figura 15 O princípio da operação de OTV. Um transdutor de rotação rápida transmite e recebe pulsos de energia acústica de alta frequência enquanto se move no poço. As descontinuidades que intersectam o poço produzirão um padrão senoidal característico na imagem estendida da parede da perfuração (ELLIS, 2007).

Tanto a emissão do pulso acústico, como a detecção da onda refletida são feitas pelo transdutor piezelétrico, a magnitude da energia de onda é medida em dB (decibéis) e utiliza-se uma razão adimensional entre a amplitude da onda refletida e a amplitude do pulso emitido (TELFORD *et al.*, 1990).

2.2.4 Perfilagem Sônica

A perfilagem *Full Wave Sonic* (FWS) baseia-se na medida indireta de propriedades elásticas do meio através da propagação de ondas acústicas. Dependendo das características físicas do maciço, tais como compacidade, porosidade e grau de fraturamento, as componentes da onda acústica sofrerão perturbações específicas (ELLIS & SINGER, 2007). A maneira como a onda acústica se comporta em

cada domínio do maciço é indicativa das características elásticas deste domínio (TELFORD *et al.*, 1990)

São vários os parâmetros de onda capazes de detecção, elas têm assinaturas muito diversas e seus sinais podem ser desmembrados em diversos entes. Um dos parâmetros das ondas é o período (T) da mesma. Por período compreende-se o intervalo de tempo entre dois picos sucessivos de amplitude na mesma direção. O diagrama teórico “senoidal” de dispersão da onda no meio permite identificar momentos de amplitude de deslocamento máximo das partículas que compõe o meio que está sendo impressionado pela onda. Esses picos não ocorrem ao mesmo tempo e sua sucessão obedece a uma regularidade mensurável.

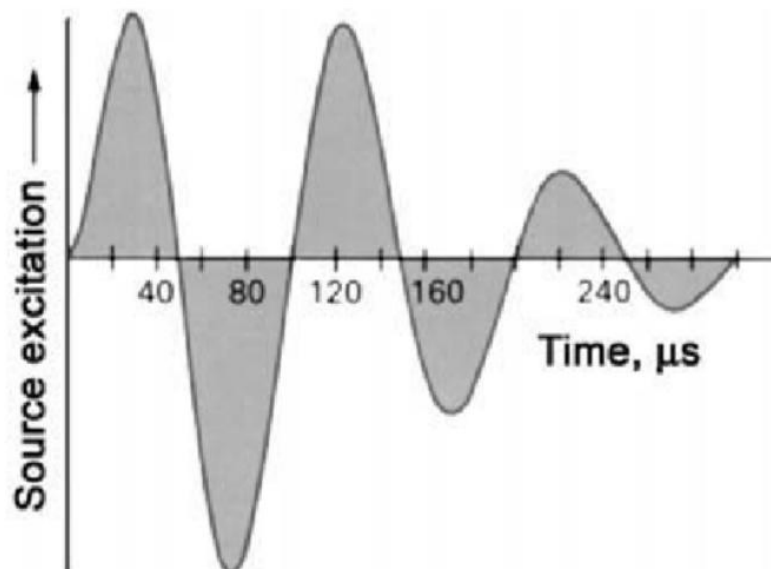


Figura 16 Exemplo de sinal acústico mostrando a atenuação da amplitude da onda (e, portanto, sua intensidade) com o tempo

A frequência (f) de uma onda, por sua vez, guarda relação com o período, sendo definida como o número de ciclos completos (sendo um ciclo o movimento repetitivo das partículas) em 1 (um) segundo. Quanto menor o tempo em que esses ciclos ocorrem maior sua frequência no tempo, razão pela qual temos a relação inversa entre frequência e tempo exposta na equação 10:

$$f = 1/T \quad (10)$$

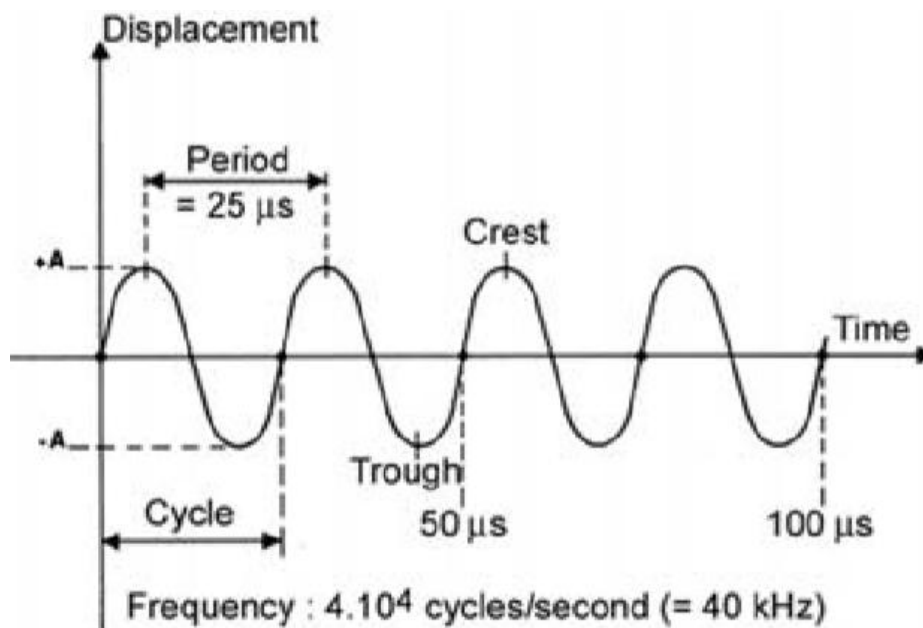


Figura 17 Definição de termos utilizados no estudo de ondas sônicas.

À distância (em metros) percorrida pela frente de onda em um ciclo completo dá-se o nome de comprimento de onda.

Ainda em termos de parâmetros de onda alterados em função da interação desta com o maciço rochoso, o principal entre eles é o tempo de trânsito (t) dos diferentes tipos de onda (em especial as ondas Compressionais, Cisalhantes e Stoneley).

Há ainda, na aplicação da leitura de assinaturas acústicas do meio, o estudo e medida da amplitude e atenuação da intensidade das ondas em receptores diversos; a gravação da forma de onda cheia (*full waveform*) em diferentes receptores e, por último, a técnica conhecida como VSP (*Vertical Seismic Profile*) e suas variações, que

consistem na leitura, por receptor do tempo de trânsito no interior de um furo de sondagem, de ondas emitidas por uma fonte na superfície.

As fontes de ondas sônicas consistem predominantemente de transdutores baseados no comportamento magnetostrictivo de alguns materiais que mudam de forma quando impressionados pela variação do campo magnético. Essa mudança de forma gera um pulso de pressão necessária para formação da onda mecânica. O controle da frequência e energia da onda é extremamente importante para a determinação das propriedades de rocha a partir desse método.

Os receptores também são cristais cerâmicos ou piezoelétricos ou hidrofones. Eles são semelhantes aos transdutores emissores. Em um transdutor magnetostrictivo, qualquer energia acústica gera distorções de volume. Essas distorções de volume fazem variar o campo magnético que envolve o material transdutor. Esse campo magnético variável produz uma tensão nos terminais da bobina, que é representativa do sinal acústico (SERRA, 2008).

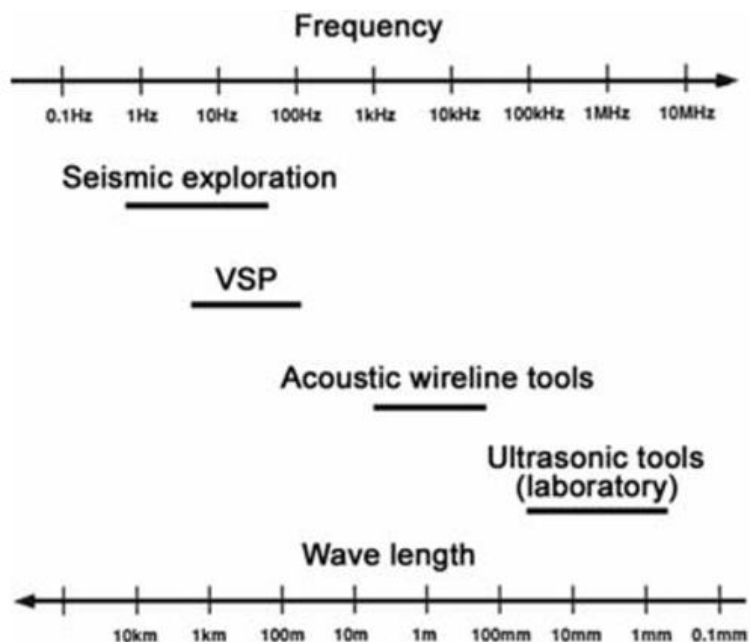


Figura 18 As diferentes frequências utilizadas em medições acústicas e seus equivalentes em comprimento de onda.(SERRA, 2008).

Uma vez geradas, as ondas mecânicas propagam-se na rocha em um “efeito dominó” transportando a energia do evento que as gerou. Um único evento gerado

pela fonte produz diversas naturezas de ondas que se diferenciam pela forma como imprimem movimento sobre as partículas do meio. As principais, para fins geomecânicos, são as Ondas Compressionais e as Cisalhantes.

As ondas Compressionais, como o nome sugere, propagam-se no meio comprimindo suas partículas em um movimento de “vai-e-vem” na direção do avanço da onda, portanto, longitudinalmente. Por diversos fatores as ondas Compressionais costumam ser as primeiras a desembarcarem no receptor (têm a maior velocidade de propagação dentre todas), razão pela qual são também conhecidas como ondas primárias ou *P-waves*. Importante salientar que as ondas compressionais são as únicas que conseguem se propagar em meios líquidos.

As ondas Cisalhantes serão aquelas que propagam-se através do meio impressionando as partículas através das vibrações perpendiculares à direção do seu avanço. Geralmente desembarcam logo após a chegada da onda P sendo por isso denominadas ondas secundárias ou onda S (BEDFORD & DRUMHELLER, 1994).

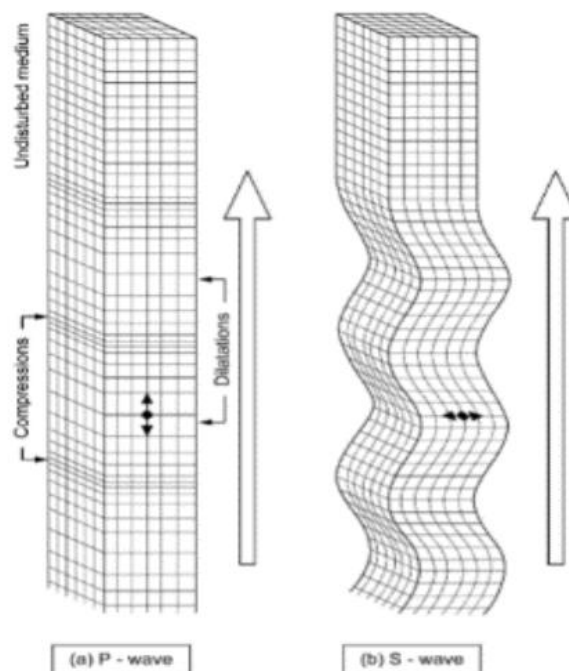


Figura 19 Deformações elásticas e movimentos de partículas associados à propagação de ondas sísmicas: a) onda P, b) onda S (Baseado em BOTT, 1982).

Geralmente assume-se que as deformações associadas à passagem de uma onda sísmica sejam de magnitude minúscula e, exceto nas vizinhanças da fonte, geralmente são consideradas elásticas (BARTON, 2007). Com base nessa premissa, as

velocidades de propagação das ondas sísmicas (V) são determinadas pelos módulos elásticos apropriados e pelas densidades aparente dos materiais atravessados (aqui expresso por “ γ ”).

A forma geral das equações clássicas que ligam essas três quantidades é $V = \sqrt{E/\gamma}$. Nessa equação o módulo de elasticidade axial (módulo de Young E) assumirá correlação direta com a velocidade de propagação das ondas Compressionais (V_p). A velocidade das ondas Cisalhantes, por sua vez, assume correlação direta com o módulo de cisalhamento (μ) através da mesma expressão base: $V_s = \sqrt{\mu/\gamma}$.

Uma vez determinadas as correlações fundamentais entre o comportamento elástico expressos nas constantes de elasticidade e o comportamento de propagação dos dois principais tipos de onda no meio, é possível inferir todo o comportamento mecânico elástico expressos pelas demais constantes elásticas como função tão somente dos tempos de trânsito das ondas P e S. Ora, em um meio tridimensional, o comportamento da deformação gerada pelo trem de onda em um terceiro eixo (representando aqui qualquer constante elástica terceira) pode ser caracterizado pela comportamento da deformação dos dois primeiros eixos gerados pelas ondas P e S. Com base nessa premissa, é possível escrever, por exemplo, o coeficiente de Poisson (ν) como função das velocidades de onda P e S (WHITE, 1983).

$$\nu = \frac{(V_p^2) - (2V_s^2)}{2((V_p^2) - (V_s^2))} \quad (11)$$

2.2.4.1 Fatores que Interferem na Velocidade da Onda

Como produto direto da interação onda-meio, a velocidade que os diferentes tipos de onda exibem ao percorrer o sólido é indicio de uma série de fatores inerentes à qualidade da rocha. Um dos principais fatores é a presença de descontinuidades, sejam na forma de microfissuras ou mesmo a porosidade natural apresentada pela rocha (BUDIANSKY, 1976 ; WYERING, 2014; LOCKNER, 1977). Em geral, mantendo-se

constantes todas as demais variáveis, quanto maior a intensidade de porosidade total (aberta ou fechada) menor a velocidade das ondas sônicas naquele meio.

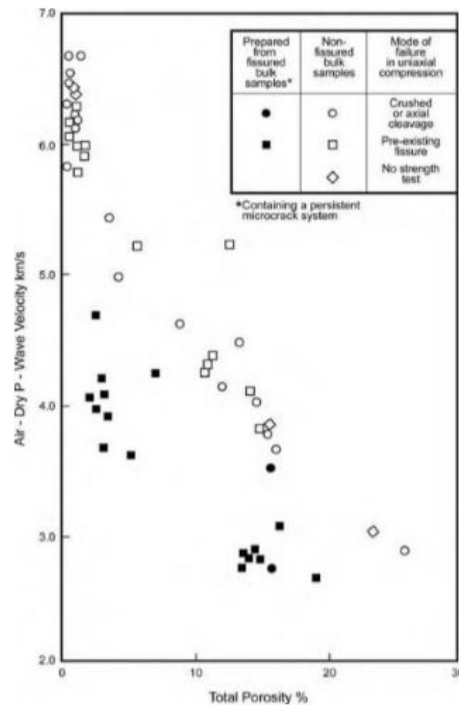


Figura 20 Efeitos de variações de porosidade no V_p para amostras de doleritos (KELSALL et al., 1986.)

Ensaios têm mostrado também que, para rochas com porosidades preenchidas por água, um aumento da concentração de sais na mesma gera o decréscimo da velocidade da onda (SERRA, 2008).

Para porosidades preenchidas por material gasoso as velocidades de onda compressoriais são ainda menores. Na verdade, o comportamento de ondas cisalhantes é completamente diferente daquele observado nas ondas compressoriais pois é sabido que os fluidos não transmitem a energia contida nesse tipo de onda (SCHÖN et al., 2015).

A velocidade da onda no meio também é intrinsecamente dependente da natureza litológica da rocha. As rochas são veículos para toda variedade de substâncias minerais que carregam uma assinatura sônica tão diversa quanto. Ainda, como vimos

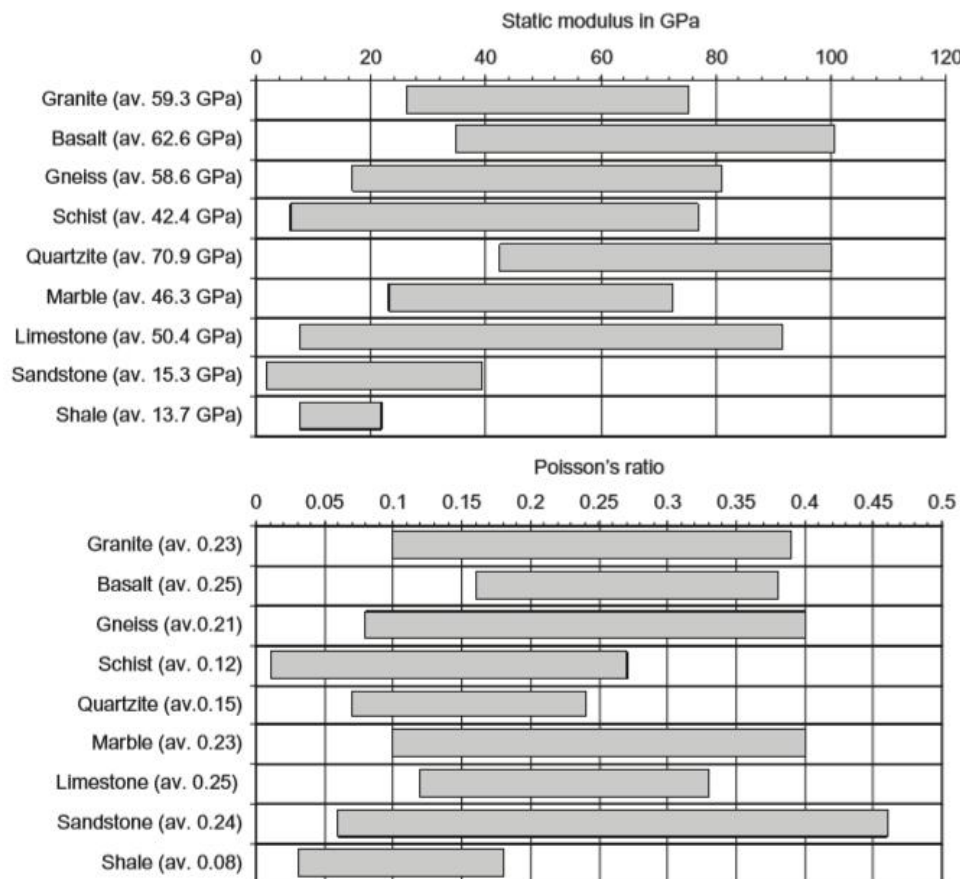


Figura 21 Faixa de variação de velocidade das ondas de compressão (VP, maior valor) e cisalhante (VS, menor valor), para diferentes rochas (SCHÖN et al., 2015)

outrora, diferentes rochas com diferentes densidades e propriedades elásticas podem facilitar ou atrasar a propagação do trem de onda. Naturalmente, quanto mais intensamente fraturado, menor a sensibilidade do maciço à passagem da onda sônica assim como tendencialmente menor a resistência à compressão uniaxial, menores os módulos de elasticidade (E) e cisalhamento (μ). As rochas sedimentares porosas, por exemplo, mostram uma grande faixa de variação das velocidades, grandes velocidades estão associadas a rochas densas e baixas velocidades a rochas mais porosas. Nesses litotipos, além da matriz mineral, o grau de consolidação, cimentação da matriz, teor de argila, forma e conteúdo dos poros têm impacto relevante na velocidade de propagação das ondas (MORAES, 2018).

2.2.5 Determinação de V_p E V_s em Laboratório Via Pundit

Em contraste aos métodos de aquisição de constantes elásticas a partir de ensaios laboratoriais destrutivos, surge o método laboratorial não-destrutivo de aquisição de velocidade de onda sônica a partir das mesmas amostras que outrora seriam utilizadas nos ensaio destrutivos.

As velocidades de propagação das ondas, portanto, podem ser mensuradas em campo (maciço rochoso) ou em laboratório com amostras cilíndricas de rocha. A Norma D2845 (ASTM, 2008) - *Test Method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock* - descreve os equipamentos e procedimentos para medições laboratoriais das velocidades de pulso das ondas de compressão e de cisalhamento na rocha e a determinação de constantes elásticas ultrassônicas de uma rocha (MORAES, 2018).

O desencadeamento desse método consiste basicamente no lançamento de um pulso ultrassônico através da amostra. O receptor transforma a onda elástica em sinal elétrico. Um osciloscópio torna a “visualização” do sinal recebido possível e assim o tempo de trânsito pode ser determinado ou manualmente, a partir da visualização gráfica do trem de onda completo, ou automaticamente a partir de ferramentas computacionais que hoje permitem a identificação até de ondas de difícil detecção como o são as ondas cisalhantes (ondas S) (CORBETT *et al.*, 2016).

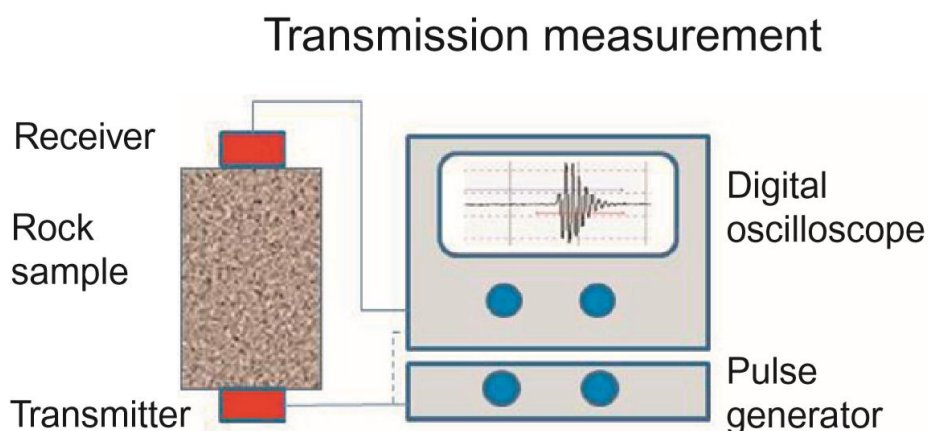


Figura 22 Princípio de funcionamento das medidas de onda P e S com o Pundit. (ZHANG, 2017)

O equipamento utilizado como gerador/leitor dos pulsos nos ensaios do presente trabalho foi o Pundit (*Portable Ultrasonic Pulse Velocity Testing*) PL200 da Proceq. Os transdutores utilizados foram os *Shear Waves Transducers* de 250kHz de frequência da fabricante Olympus.



Figura 23 Transdutores de onda cisalhante de 250kHz com gel acoplante



Figura 24 Medição dos tempo de chegada das ondas ultrassônicas com o Pundit PL200

Um dos principais problemas a ser superado trata da dificuldade de identificação do momento de chegada da onda S dentro do trem de onda mostrado pelo osciloscópio.

Como anteriormente abordado, dentre as diversas naturezas de onda que compõe o trem de onda, aquela compressional (que desloca a partículas do meio longitudinalmente à direção de avanço) sempre chegará primeiro no transdutor receptor. Em um segundo momento tende a chegarem as ondas cisalhantes, ou “S”. Existem exceções em que outros tipos de onda chegam antes, como as ondas stoneley. Essa característica, entre outras, torna particularmente difícil a precisa detecção do momento da chegada dessa onda.

Para tentar superar essa dificuldade é altamente aconselhável a utilização do transdutor de onda S. Ele será responsável por enviar um sinal de onda predominantemente cisalhante e, com auxílio de gel acoplante de alta viscosidade, tornará a recuperação de onda S predominante sobre o sinal de onda P, de muito mais fácil detecção.

Mesmo com esses cuidados, a recuperação do tempo de chegada do sinal de onda S ainda é desafiadora quando exigida a partir da observação do trem de onda no osciloscópio, apesar de já existirem opções no mercado que tornam a tarefa automática e, alegadamente, muito mais precisa (CORBETT *et al.*, 2016).

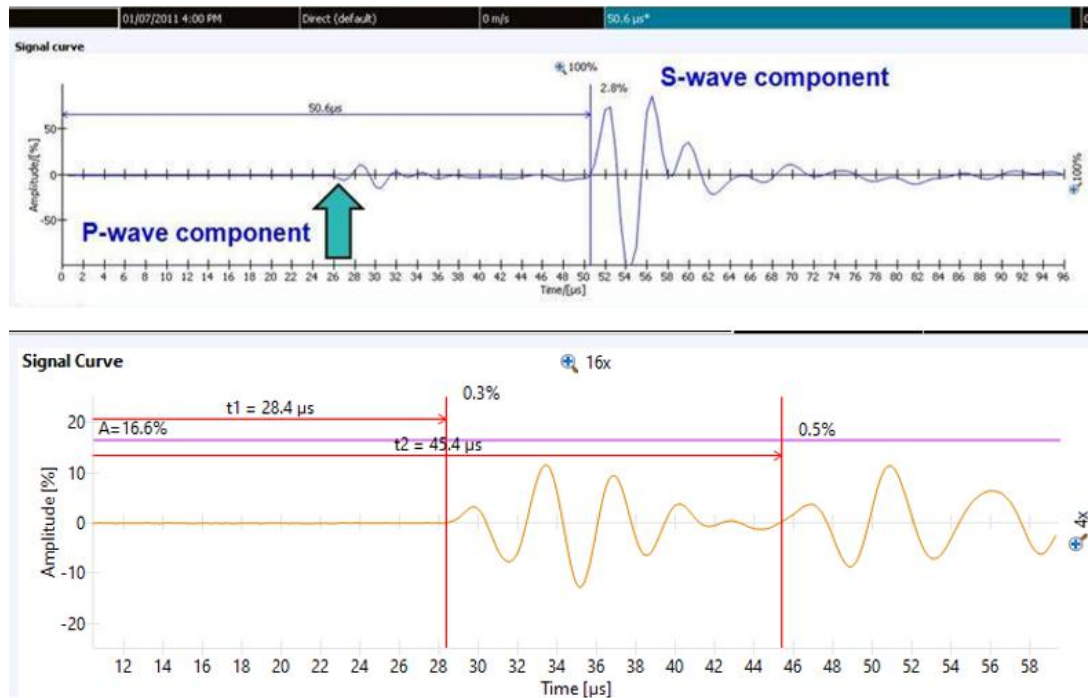


Figura 25 (a. As imagens ilustram ,acima, a configuração de trem de onda obtida pelo fabricante e abaixo, a obtida em ensaios para o presente trabalho, onde a chegada da onda S é sublinhada na alcinha de t2.

De acordo com CORBETT *et al.* (2016), a forma correta de acoplamento deve ser obedecida para se obter a melhor leitura (aqui leia-se o sinal de onda S mais limpo no gráfico de trem de onda no osciloscópio). Os transdutores de onda cisalhante geram-na sobre dois planos, um de maior e outro de menor amplitude no desembarque. O de maior deve estar alinhado ao plano do transdutor de recepção para que a máxima amplitude de onda cisalhante seja detectada, como esquematizado na figura 25 (b).

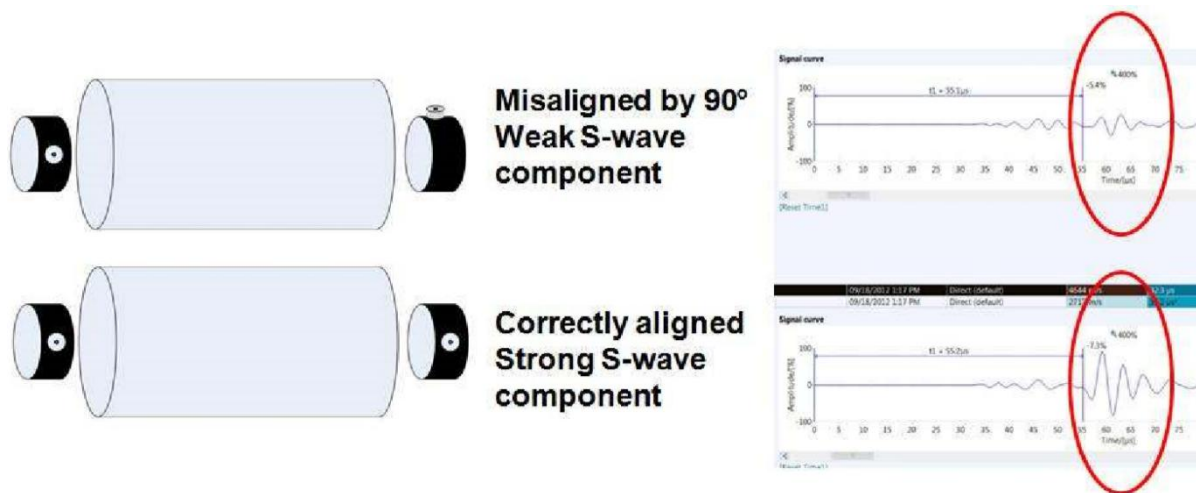


Figura 25 (b). Gráfico de onda no osciloscópio mostrando o plano de geração e leitura do sinal de onda S e sua assinatura no trem de onda (CORBETT et al., 2016).

Outra observação diz respeito ao tamanho das amostras permitidas no ensaio laboratorial de onda sônica. Ensaios estáticos com prensa são estreitamente regulados por normas que exigem tamanhos máximos e mínimos de amostras e condições de paralelismo entre faces do cilindro de rocha, bem como as proporções “áureas” exigindo comprimento máximo de amostra de até 2,5 vezes o diâmetro. O ensaio com o pundit também obedece normativas da ASTM que, no documento de designação ASTM D 2845 vai vincular o tamanho da amostra não apenas ao tamanho médio dos grãos mas também à frequência de ressonância e velocidade de onda P no material (um dado *a posteriori*).

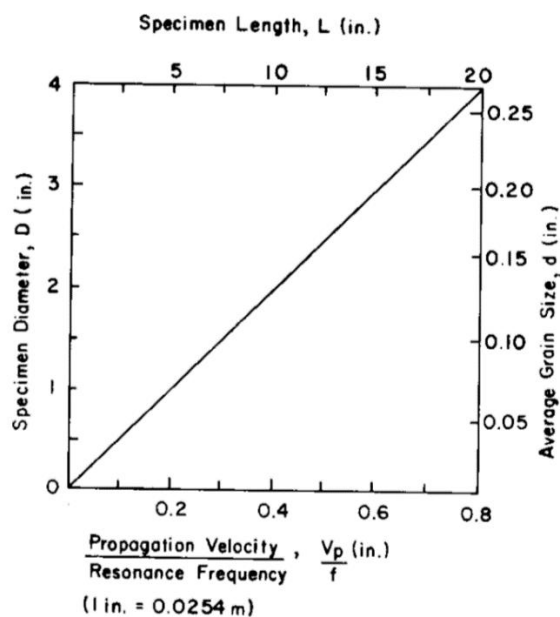
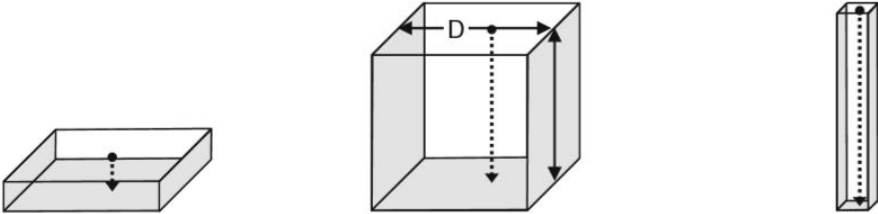


Figura 26 Gráfico que mostra os valores permitidos do diâmetro e comprimento da amostra e tamanho médio dos grãos versus a razão entre a velocidade de onda P e a frequência de ressonância utilizada no ensaio (ASTM D2845)

Isso vem a se tornar um empecilho uma vez que, de acordo com essa norma, o diâmetro de testemunho de sondagem mais comumente disponível para ensaios de compressão uniaxial, que é de 50mm, exigiria que os corpos de prova tivessem suas velocidades sônicas medidas em amostras de pelo menos 25 cm apesar de a norma para os ensaios uniaxiais estipularem um teto de 12,5 cm para esse diâmetro de amostra. Além disso, a determinação da velocidade média de onda P no meio deveria ser previamente tomada para, só então, ser estipulada a proporção das medidas das amostras.

A sugestão de norma de AYDIN (2014) vem sugerir, para fins de predição das constantes elásticas, uma simplificação dessas exigências baseado em boas correlações encontradas mesmo em amostras que obedeciam apenas às proporções exigidas para o ensaio de Compressão uniaxial. Para Aydin, a amostra cilíndrica de comprimento de até duas vezes e meia o diâmetro, utilizada nos ensaios estáticos de UCS, corresponde ao formato de barra esbelta cujas dimensões são prescritas em seu trabalho de acordo como na Figura 26.



SLAB	BLOCK	BAR
$L/D \leq 0.1$	$L/D \approx 1$	$L/D \geq 10$
$\lambda \leq 0.1 D$	$\lambda \leq 0.1 D$	$\lambda \geq 5 D$
$L \geq 10 d_g$		
$V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1}{(1 + \nu_d)(1 - \nu_d)}}$	$V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{(1 - \nu_d)}{(1 - 2\nu_d)(1 + \nu_d)}}$	$V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}$
$V_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu_d)}}$		
$\nu_d = 1 - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2}$	$\nu_d = \frac{V_s^2 - 0.5 V_p^2}{V_s^2 - V_p^2}$	$\nu_d = 0.5 \frac{V_p^2}{V_s^2} - 1$

Figura 27 Expressões próprias de velocidade de onda P (V_p) e S (V_s) para três formatos de espécimes distintos de corpo de prova com suas dimensões limitantes (AYDIN, 2014).

Para Aydin, no entanto, ressalvas devem ser consideradas. Tomando como referência o corpo de prova em cubo (*block*), mantendo-se o mesmo material e distância de percurso, percebe-se um decaimento de velocidade de onda P nas amostras em formato de barra e “laje” (*slab*) na proporção da razão de Poisson do material, de modo que as magnitudes $VP_{\text{bloco}} > VP_{\text{laje}} > VP_{\text{barra}}$ são verdadeiras.

2.2.5.2 Relações Matemáticas Relacionadas com V_p e V_s

Diversos parâmetros geomecânicos podem ser inferidos a partir da determinação da velocidade de onda P e S. Os principais são os parâmetros elásticos dinâmicos da rocha como também sua densidade.

Conforme a norma ASTM D2845, utilizada inclusive pelo fabricante do Pundit PI200 (Proceq), o coeficiente de Poisson(ν) dinâmico se dá pela relação:

$$\nu = \frac{(V_p^2) - (2V_s^2)}{2((V_p^2) - (V_s^2))} \quad (11)$$

Ainda conforme essa norma o módulo de elasticidade (E) depende, não apenas dos valores de velocidade de onda mas, também, da densidade aparente (em Kg/m^3) na expressão dada pela relação abaixo:

$$E = \frac{[\rho V_s^2(3V_p^2 - 4V_s^2)]}{V_p^2 - V_s^2} \quad (12)$$

Nela, ρ corresponde ao valor da densidade, V_s à velocidade de onda cisalhante e V_p à velocidade de onda compressional.

2.3 Constantes Elásticas de Natureza Estática e Dinâmica

Como vimos, a aferição do comportamento dos materiais evoluiu e hoje pode-se lançar mão não apenas de testes destrutivos de amostras (onde a tensão aplicada encontra limite no rompimento do material) mas também de ensaios não-destrutivos indiretos, especialmente aqueles que se valem da resposta do material à passagem de onda mecânica sônica.

A obtenção de ambas guardam as mesmas alcunhas de aplicação mas percebeu-se que o comportamento das tendências em ambos os testes é diferente. Na prática, já está bem documentado que os módulos de deformação estáticos (obtidos a partir de ensaios destrutivos) podem ser significativamente menores que os módulos elásticos dinâmicos (BARTON, 2007). De fato, enquanto em ensaios destrutivos a amostra é levada a diferentes estados de carregamento sucessivos e crescentes de forma gradual (que geram assim diferentes estados de equilíbrio quase estáticos), nos ensaios indiretos de leitura de ondas sônicas a rocha é submetida a uma solitação mecânica de energia ínfima e pontual no tempo, que é a solitação da frente de onda percorrendo o corpo da amostra em pulsos.

Também, nos ensaios destrutivos, ocorrem não apenas eventos de deformação elástica puros mas, concomitantemente, ocorrem eventos de microfratura e microdeformação plásticos que afetam o resultado, enquanto nos módulos elásticos dinâmicos, a partir da leitura de onda sônica, esses eventos não ocorrem e portanto não afetam o resultado .

Uma outra explicação para as diferenças entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas é quanto à sensibilidade a presença de microfissuras. Os ensaios estáticos diretos são mais sensíveis a alterações de descontinuidades sejam elas poros, microfissuras e fraturas em diferentes orientações espaciais (SCHÖN, 2015).

Para uma mesma natureza litológica, as medidas dinâmicas de constantes elásticas podem resultar até dez vezes maiores do que aquelas obtidas por ensaio destrutivos (MAHMOUD *et al.*, 2019). Essa diferença entre os métodos de leitura do comportamento deformacional, apesar de não deslegitimar os resultados do método indireto como dado de predição, nos leva a concluir que esse dado bruto não pode substituir aqueles gerados por ensaios diretos sem que antes sejam estabelecidas correlações sólidas entre as duas.

Diversos autores (BROTONS, 2016; EISSA & KAZI, 1988; CHRISTARAS *et al.*, 1994) têm se debruçado na tarefa de estabelecer equações universais de correlação entre os resultados de testes estáticos e dinâmicos. Os resultados têm mostrado, no entanto, que o valor do módulo estático não pode ser correlacionado utilizando-se uma única

equação para todos os diferentes tipos de rocha. Isso é o esperado, tendo em vista a grande variedade de propriedades de rocha (tais como de composição mineralógica, distribuição e tipo de porosidade e matrizes de rocha) encontradas na natureza.

Apesar disso, alguns autores têm tentado contornar essa dificuldade com a determinação de equações direcionadas a litologias pré-selecionadas ou intervalos de módulos elásticos (E) como mostrado na tabela 4.

Tabela 4 Relação entre módulos elásticos estáticos e dinâmicos proposta por diferentes autores . Aqui ρ_{bulk} corresponde a densidade aparente (BROTTONS, 2016).

Relationship	R^2	E_{dyn} (GPa)	Rock type
$E_{st} = 1.26E_{dyn} - 29.5$	0.82	40–120	Igneous–metamorphic
$E_{st} = aE_{dyn}^b$ $a[0.097 - 0.152]$ $b[1.485 - 1.388]$	–	20–135	Sandstone–granite
$E_{st} = 0.74E_{dyn} - 0.82$	0.70	5–130	All types
$\log_{10}E_{st} = 0.771\log_{10}(\rho_{bulk}E_{dyn}) + 0.02$	0.92	5–130	All types
$E_{st} = 1.05E_{dyn} - 3.16$	0.99	25–110	All types
$E_{st} = 0.018E_{dyn}^2 + 0.422E_{dyn}$	–	–	Sedimentary
$E_{st} = 1.153E_{dyn} - 15.2$	–	–	$E_{st} > 15\text{GPa}$
$E_{st} = 0.076V_p^{3.23}$	–	–	Shale
$E_{st} = \frac{E_{dyn}}{3.8\alpha_s^{-0.68}}$	–	5–50	Limestone–marble
$E_{st} = 0.867E_{dyn} - 2.085$	0.96	5–30	Calcarenite
$\log_{10}E_{st} = 1.281\log_{10}(\rho_{bulk}E_{dyn}) - 4.71$	0.97	5–30	Calcarenite
$E_{st} = 0.014E_{dyn}^{1.96}$	0.87	13–74	Limestone
$E_{st} = 0.169V_p^{3.324}$	0.90	13–74	Limestone

Um ente matemático que tem sido frequentemente utilizado nesse campo é a razão entre o módulo dinâmico e estático, grandeza conhecida como “ k ”. Um comportamento geral, observado a partir do estudo das diferentes equações listadas na tabela 4, é que rochas com módulos elástico maiores tendem a apresentar o coeficiente “ k ” próximo de um. Essa constatação está em linha com a tese de que um dos maiores responsáveis pela incongruência entre módulos elásticos e dinâmicos é a presença de descontinuidades e microfissuras, uma vez que é largamente sabido que são elas uma das grandes responsáveis também pela “personalidade” de maior ou menor rigidez dos diferentes tipos de rocha.

Uma outra variável capaz de aproximar as leituras de constante elástica em ensaios destrutivos e não destrutivos é a pressão de confinamento em que o ensaio é realizado. De acordo com ASEF & NAJIBI (2013) a relação que rege esse comportamento seria dada pela equação 13.

$$\frac{E_{dyn}}{E_{st}} = aP^b \quad (13)$$

Aqui, “P” é a pressão de confinamento e os valores de *a* e *b* são coeficiente que dependem de modelagem para aderir a cada tipo de formação.

No presente trabalho, serão utilizadas equações outrora desenvolvidas em litologias sedimentares como arenitos (como o são as equações desenvolvidas por FEI (2016)) e/ou de aplicação genérica para todos os tipos de rochas (como aquela desenvolvida por EISSA & KAZI (1988)). A equação de BROTONS (2016), que leva em consideração o valor de densidade aparente também será testada aqui.

3.0 MATERIAIS E MÉTODO

A pesquisa deste trabalho foi realizada obedecendo os estágios:

Estágio 1 - Sondagem diamantada: Esta etapa foi realizada por uma empresa de sondagem contratada para uma campanha de sondagem geotécnica. O projeto de prospecção de chumbo, zinco e cobre envolveu uma ampla malha de perfuração e análises de testemunhos pelo laboratório de Mecânica de Rochas do LPM-UFRGS;

Estágio 2 - Descrição dos furos de sondagem: É realizada, em um primeiro momento, a descrição litológica completa dos furos de sondagem como levantamento de propriedades visíveis do testemunho como RQD e rugosidade de fraturas naturais ;

Estágio 3 – Amostragem: Nesta etapa foram coletadas, de entre as caixas de testemunho, amostras de granulometria fina e baixa incidência de fraturas e descontinuidades aparentes;

Estágio 4 – Preparação das amostras: As amostras foram então preparadas conforme determinação das normas para ensaio laboratoriais de Compressão Uniaxial e também Velocidade de Ondas Sônicas. Foram catalogadas e tomadas medidas de peso total, densidade, comprimento e diâmetro;

Estágio 5– Realização dos ensaios: Eles foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas da Faculdade de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foram realizados os seguintes ensaios:

- Pundit (Determinação do tempo de trânsito das ondas P e S),
- Compressão uniaxial (UCS, com medidas de deformação axial com LVDT's e lateral com *Strain Gauge*);
- Propriedades físicas (densidade e porosidade aparentes)

Estágio 6 – Tratamento dos dados: Por último os dados foram tratados e correlacionados, a fim de gerar curvas de correlação e calibração, para determinação da curva de correlação dos valores UCS com a velocidade de onda P; Determinação das constantes elásticas dinâmicas; Determinação das correlações entre os dados

dinâmicos corrigidos (BROTONS *et al.*, 2016) e os estáticos; correlação das propriedades físicas e velocidade de onda.

3.1 Materiais

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas que integra o Laboratório de Pesquisa Mineral (LPM) do departamento de Engenharia de Minas da UFRGS. As amostras foram concedidas pela Votorantim metais a partir de furos de sondagem diamantada elaborados na região da cidade Caçapava no Rio grande do Sul. Para os ensaios de compressão uniaxial foi utilizado a prensa hidráulica *Control Advanced 9* e seus elementos sensores o LVDT e também *Strain Gauges*. Para a determinação das velocidades de onda P e S, em laboratório, foi utilizado o Pundit PL 200 Proceq com seus transdutores de onda cisalhante de 250kHz da *Olympus*.

Ainda foram utilizadas ferramentas para determinação das propriedades físicas das amostras (densidade e porosidade aparentes), tais como balança, estufa e demais utensílios de laboratório .

3.1.1 Testemunhos de Sondagem Diamantada

A sondagem com recuperação de amostras, conhecida também como sondagem rotativa diamantada, é um procedimento dispendioso em termos de tempo e recursos. É, porém, a única alternativa se quisermos obter informações diretas de grandes profundidades da subsuperfície.

Alternativas que contornem a exigência desse procedimento para análises geomecânicas têm sido estudadas. No bojo desses estudos vem o presente trabalho inclusive.



Figura 28 Figura representativa de campanha de sondagem rotativa

De fato, embora caro (estimativas apontam o custo de até \$250 USD por metro de sondagem em ambiente urbano), é a mais confiável informação geológica que se pode obter, motivo pelo qual lançamos mão no estudo dos testemunhos obtidos e que nos servirão de baliza na calibração das informações obtidas em redundância pelos dois métodos.



Figura 29 Caixas de armazenamento de testemunhos

O trabalho de obtenção de dados de onda sônica a partir dos testemunhos, para calibração dos procedimentos de perfilagem geofísica, esbarram em um

problema geométrico. Para as medições ultrassônicas realizadas na rocha a ASTM D2845 recomenda uma dimensão lateral mínima de 5 vezes o comprimento de onda. Também recomenda o uso de um comprimento de onda de pelo menos 3 vezes o tamanho médio de grão. Uma amostra de diâmetro NX (um dos diâmetros de testemunhos mais comuns) tem um diâmetro de 54,7 mm. Uma frequência de transdutor de 250 kHz ou 500 kHz seria recomendada para este tamanho de amostra, com base na presente recomendação (dependendo da velocidade de pulso dos tipos de rocha a serem testados). O tamanho máximo de grão seria de 5 mm ou 2,33 mm, respectivamente (PROCEQ, 2015).

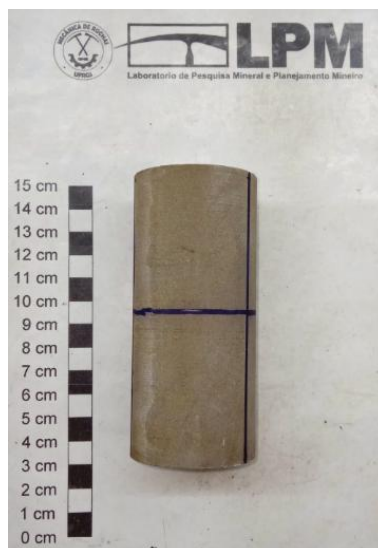


Figura 30 Exemplo de testemunho Utilizado nos ensaios Uniaxial e Pundit

Para o presente trabalho foram preparadas 35 amostras retiradas de testemunhos de sondagem de diâmetro NQ de aproximadamente 47 mm e granulometria, selecionada a olho nu, predominantemente fina.

3.1.2 Prensa Hidráulica

A prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão uniaxial foi a *Control Advanced 9*. Essa ferramenta conta com a prensa hidráulica propriamente dita, com seu braço móvel que imprime esforço sobre a amostra. A resposta do corpo de prova

ao esforço do braço móvel é medida por um “LVDT” (*Linear variable diferencial transformer*) disposto junto a amostra medindo sua deformação.



Figura 31 Sensores LVDT. À esquerda, sua configuração já montada.

Compõe a prensa sua bomba hidráulica e comando central, responsável pelo movimento do seu braço móvel bem como pela integração dos sistemas de comando e leitura (DANTAS, 2018). Ela é responsável por receber e executar os comandos de ligar/desligar e imprimir a taxa de escalonamento do esforço/tempo desejável do braço móvel sobre a amostra.

Todo sistema é coordenado pelo computador que o compõe. Ele é responsável por dar os *inputs* aos demais elementos e também por receber, através de um dispositivo multicanal, os dados do LVDT e *Strain Gauges* como as taxas de tensão aplicada integrando-os e armazenando-os em uma tabela de *Excel*.

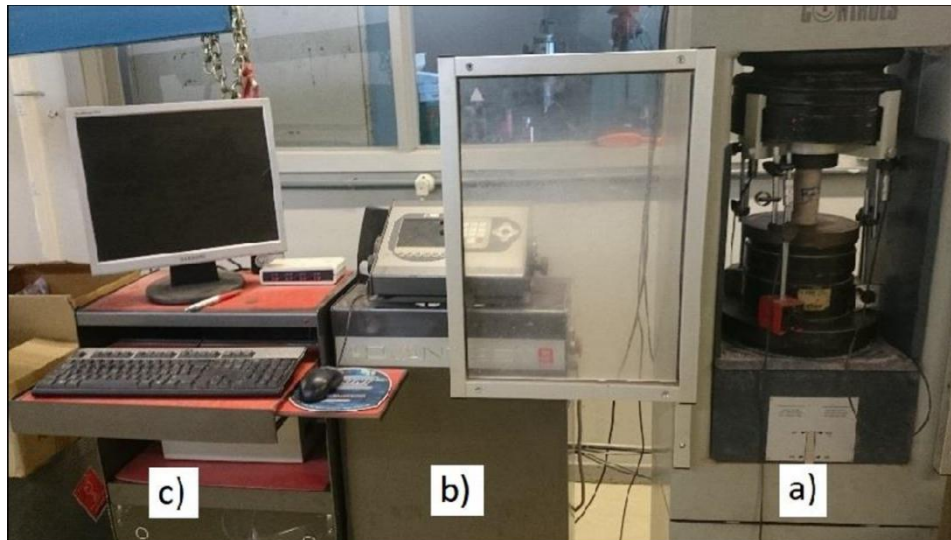


Figura 32 Foto da prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão uniaxial. a) componente do braço da prensa; b) componente do comando da prensa e c) computador (DANTAS, 2018)

3.1.3 Pundit



Figura 33 Pundit PL 200 ao lado dos dois transdutores de onda P (PROCEQ, 2015)

A ferramenta portátil de leitura da assinatura de velocidades sônica das amostras é o Pundit PL 200 da Proceq. O Pundit PL-200 é um instrumento de teste de velocidade de pulso ultrassônico (UPV) usado para examinar a qualidade de concretos, rocha e cerâmicas. Com ele determinamos o tempo de trânsito de ondas P e S nos corpos de prova dentre outras interações possíveis.

Ele é munido de dois transdutores (emissor e receptor de ondas ultrassônicas) de 250 kHz. A interface é *touchscreen* e seu ferramental de funções baliza-se por

padrões e normas como a EN12504-4 (Europeia), ASTM C 597-02 (Norte Americana), BS 1881 (do Reino Unido), ISO1920-7:2004 (Internacional), IS13311 (Indiana) e CECS21 (Chinesa) (dados da PROCEQ, 2015).

Os transdutores de onda Cisalhantes (Olympus, modelo V150-VR), além da frequência de trabalho padrão de 250kHz também exigem padrões de amostra mínimos de funcionamento. O máximo tamanho de partícula da amostra não pode extrapolar 5mm assim como a dimensão lateral do corpo de prova não deve ser menor que a largura do transdutor que é de 41mm.



Figura 34 Transdutor de ondas cisalhantes Olympus v150. Conforme fabricante, transdutores de onda cisalhantes não devem operar em tensões de mais de 100 Volts sob o risco de as ondas cisalhantes ganharem caráter compressional com o incremento de intensidade do sinal.

O Pundit pl-200 seria, portanto, uma ferramenta poderosa e capaz, inclusive, de prover as correlações entre velocidades de ondas para estimar módulos de elasticidade dinâmicos dos corpos de prova.

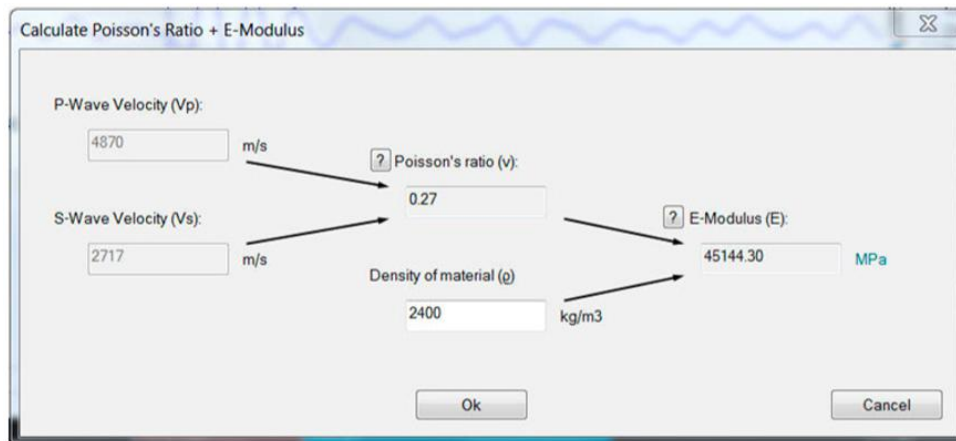


Figura 35 Menu de interação mostrando a obtenção dos módulos elásticos a partir de inputs de densidade (valor inserido) e das velocidades de onda obtidas pelo próprio equipamento.

Tabela 5 Especificações técnicas do Pundit PL 200. Adaptado de (PROCEQ, 2015)

Faixa	0,1 – 7930 μs
Resolução	0,1 μs (< 793 μs), 1 μs (> 793 μs)
Display	Display colorido de 7", com 800x480 pixels
Voltagem do pulso UPV	100 Vpp – 450 Vpp
Voltagem do pulso UPE	100 Vpp - 400 Vpp
Ganho do receptor	1x – 10.000x (0 – 80dB) [11 passos]
Sensibilidade do receptor	10 μV
Impedância de entrada do receptor	7 k Ω
Faixa do pulso de eco	0,1 – 1200 μs

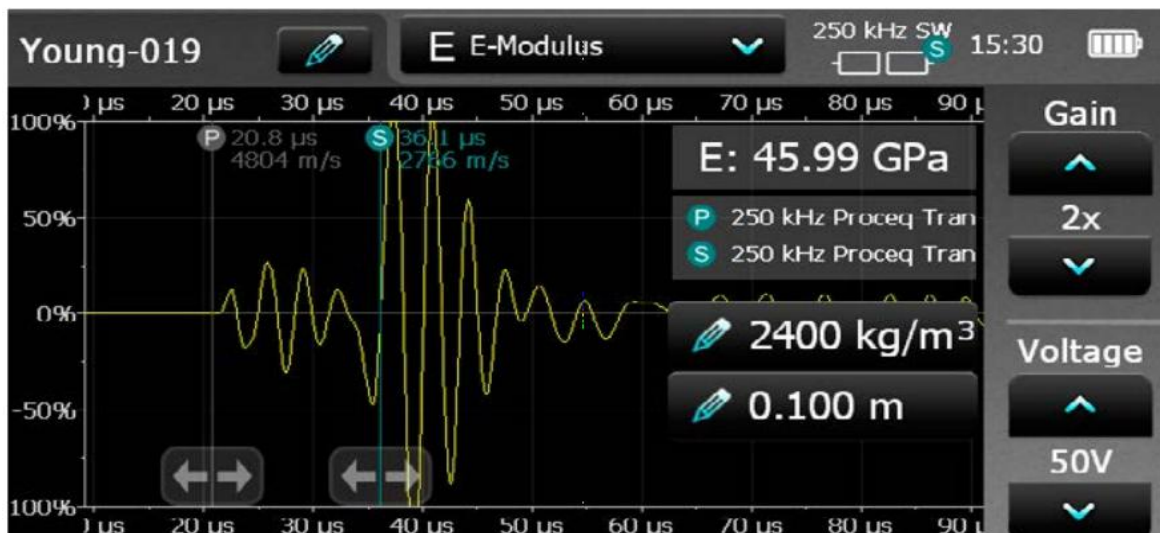


Figura 36 Interface do Pundit PL 200 "setado" em modo de determinação de módulos elásticos (PROCEQ, 2015).

3.1.4 Strain Gauges

Os *Strain Gauges* são elementos sensores compostos por uma pequena resistência padrão (de 120 ohm nesse estudo) sensível a microdeformações que a alteram.

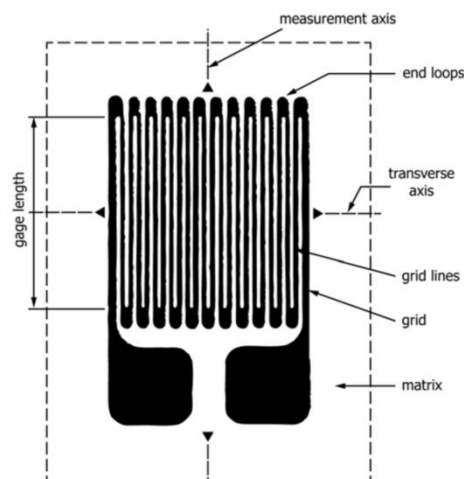


Figura 37 Figura esquemática de um *Strain Gauge* genérico. Um elemento resistor metálico formatado em grid. A dimensão de maior comprimento deve estar paralela à direção de medida da deformação (ASTM E251)

A proporcionalidade da deformação com as leituras do sensor se dá por conta do modo como a resistência acoplada à amostra está ligada ao elemento de leitura, formando uma Ponte de Wheatstone.

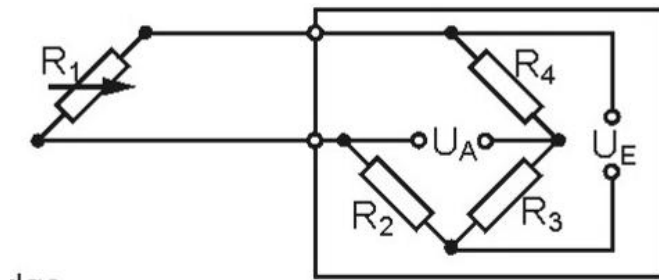


Figura 38 Esquema mostrando a resistência R_1 acoplada na amostra e formando um circuito de Ponte de Wheatstone com as outras resistências (R_2 a R_4 de igual valor (montadas dentro do elemento de leitura)). A variação da razão entre as tensões "diagonais" (" U_a " e " U_e ") são proporcionais à deformação sofrida pelo corpo de prova.

Em geral, o valor de deformação medido não é o absoluto mas sempre em "Strain" (micrômetro por metro ($\mu\text{m}/\text{m}$)), uma taxa de deformação. De fato, como o resistor não é acoplado em toda a extensão do corpo de prova (nesse caso, não é preciso um *strain gauge* "abraçando" todo o comprimento da circunferência do testemunho de sondagem) a leitura dada é uma proporção entre a deformação a que o *strain* foi exposto e seu comprimento (ASTM E251).

$$\varepsilon = \frac{L-L_i}{L_i} \quad (14)$$

Aqui é expressa a deformação (ε) lida, onde " L_i " corresponde ao comprimento inicial da estrutura (*test structure length*) antes do carregamento. Já " L " corresponde a final.

3.1.5 Balança

A balança utilizada é da marca *Bel Engineering*, modelo MARK M 3502. Ela possui uma precisão 0,01 g.

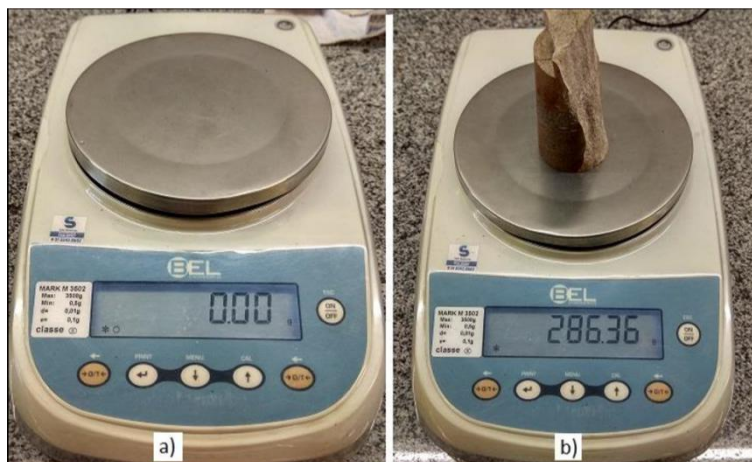


Figura 39 Balança Bell MARK 3502

3.2 Sondagem e Contexto Geológico

A sondagem consiste em um conjunto de operações destinadas à obtenção de testemunhos de rochas em subsolo. Esses dados contribuem para definição de tipos litológicos, estilos estruturais, controle da mineralização, análises químicas e definição de teores entre outras informações de vital importância para geração de um banco de dados consistente, no qual se baseia o cálculo de recursos e reservas do projeto assim como a qualidade geomecânica dos maciços de interesse.

A área que proveu os testemunhos é aquela situada no interior do município de Caçapava do Sul no Rio Grande do Sul, na localidade denominada Vila Minas do Camaquã, localizada a 59 km a Sul da sede urbana do município.

As especificações técnicas das sondas utilizadas para obtenção dos testemunhos analisados se encontram na tabela 6.

Tabela 6 Especificações técnicas dos equipamentos utilizados na sondagem.

Descrição do Equipamentos de Sondagem	
Sonda	Marca Maquesonda, modelo MAC1200, torre e guincho Wireline, capacidade de perfuração de 1.200 m (NQ)
Barrilete e Hasteamento	Diâmetro NQ
Bomba d'água	Modelo JP150, equipada com motor Agrale M93;

A geologia local da zona de extração dos corpos de prova é composta principalmente por rochas sedimentares dos Grupos Santa Bárbara e Guaritas, sendo encontrada também uma pequena ocorrência de rochas vulcânicas básicas da Formação Rodeio Velho. As unidades encontradas referentes ao Grupo Santa Bárbara são a Formação Rincão dos Mouras e a Formação Seival, sendo a Formação Rincão composta por conglomerados com intercalações de arenito e a Formação Seival composta por arenitos finos, ambas com mergulhos variando de 20° a 35°. O Grupo Guaritas é representado por conglomerados e arenitos friáveis com mergulhos inferiores a 5° e uma porção da Formação Rodeio Velho é encontrada representada por rochas vulcânicas básicas (gabros).

Tabela 7 Classificação litológica local na área do depósito dentro do sistema conhecido como Camaquã (VOTORANTIM, 2016).

Unidade Litoestratigráfica	Litotipo	Ambiente	Denominação Local
Aluvião	Aluvião	-	Aluviões e depósitos de rejeito
Formação Rodeio Velho	Vulcânicas básicas	Rocha Vulcânicas	-
Grupo Guaritas	-	Conglomerados e arenitos friáveis com mergulho inferior a 5°	Conglomerados continentais
	Formação João Dias	Arenito médio a fino	Arenitos litorâneos
		Conglomerados	Conglomerados de leques aluviais
	Formação Rincão dos Mouras	Arenito médio a fino	-
Grupo Santa Bárbara		Conglomerados com intercalações de arenito	-
	Formação Seival	Arenito fino a muito fino	Arenitos litorâneos
	Formação Passo da Capela	Siltitos	Turbiditos de leques submarinos

No empilhamento estratigráfico padrão, obtidos através das sondagens, observa-se, do topo para a base, conglomerados, arenitos e meta-ritmitos. Estas litologias, apesar de compostas predominantemente por rochas sedimentares, apresentam seus poros com alto índice de cimentação, o que confere ao maciço uma

baixa capacidade de transmissividade de águas subterrâneas, estando o fluxo hidrogeológico associado predominantemente à presença de falhas e fraturas geológicas (VOTORANTIM, 2016).

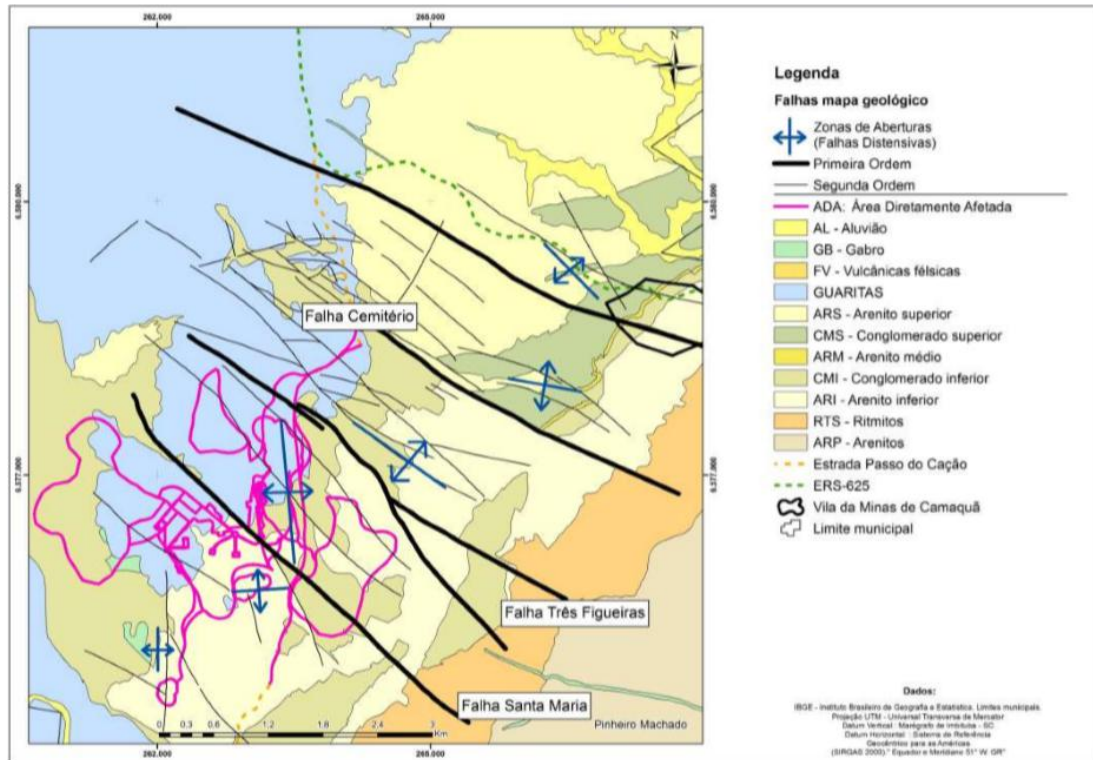


Figura 40 Sistema de falhas do Sistema Camaquã. Na figura, podemos observar que as áreas amostradas (dentro da ADA em púrpura) situam-se entre sistemas de falhas de primeira ordem Santa Maria e Três Figueiras.

Na figura 40 são representados os sistemas de falhas do Sistema Camaquã em planta. Observa-se as grandes falhas de 1ª ordem (direcionais com reativação normal), que geraram estruturas distensivas de 2ª ordem, onde o sistema mineralizante preferencialmente se hospeda (VOTORANTIM, 2016).

Para a dissertação foram confeccionados 35 corpos de prova de arenitos com granulometria fina e grãos bem selecionados. Os testemunhos foram obtidos por sondagem rotativa diamantada com diâmetro NQ (aproximadamente 47 mm).

3.3. Descrição dos Furo de Sondagem

Nesta etapa, os furos de sondagem são descritos com o máximo de detalhes visíveis da litologia, da mineralogia, a granulometria, a textura, o grau de intemperismo como também o levantamento do número e qualidade das descontinuidades (DANTAS, 2018).

O primeiro passo desse procedimento é o registro fotográfico das caixas de testemunho de sondagem. Em seguida é realizado a descrição litológica, onde os testemunhos são separados por litologia. Sendo caracterizada também a mineralogia presente em todas as litologias, granulometria e textura dos grãos constituintes da rocha. Por último é realizada a descrição geotécnica dos testemunhos, onde os mesmos são separados em zonas de características estruturais semelhantes, o que pode ser definido pelo grau de fraturamento, grau de intemperismo e/ou grau de resistência da rocha (DANTAS, 2018).

Caixa - 4-14

Empresaria: _____ Projeto: _____
 Alvo: _____ Orientação Furo: _____
 Furo: 2-57 Inclinção: _____
 Data da Furção: _____ Resp. Furção: _____
 Data da Descrição: 10/05/2013 Resp. Descrição: C. B. A.
 Profundidade Final: _____ Diâmetro: _____

Dia	Para	Reche	Recuperação Total (m)	RGO (m)	Grau alteração	Nº. Fratura (m)	Num. família	Tipo	Quantidade	Descontinuidades			UCS (MPa)	Observações
										Profund (m)	MC	R3		
2	0,00	2,20	Areia	0,50	0,12	W5	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2,20	3,40	Areia	0,55	0	W5	-	-	-	-	-	-	-	Grão gran. médio
5	3,40	3,40	Areia	0,45	0	W4	-	-	-	-	-	-	-	Grão gran. médio
5	3,40	6,50	Areia	0,40	0,10	W3	-	-	-	-	-	-	-	Grão gran. médio
2	6,50	9,40	Areia	3,05	2,52	W3	14	-	-	12	-	-	-	0/14
3	9,40	10,90	Areia	3,40	2,67	W3	10	-	-	7	-	-	-	0/10
4	10,90	13,60	Areia	3,05	2,70	W3	16	-	-	5	-	-	-	0/16
5	13,60	16,50	Areia	2,85	2,0	W3	17	-	-	2	-	-	-	0/17
6	16,50	19,40	Areia	2,90	2,00	W3	13	-	-	2	-	-	-	0/13
7	19,40	21,30	Areia	2,30	2,09	W3	20	-	-	2	-	-	-	0/20
8	21,30	25,80	Areia	2,80	2,15	W3	10	-	-	2	-	-	-	0/10
9	25,80	28,70	Areia	2,85	2,30	W3	9	-	-	2	-	-	-	0/9
10	28,70	31,60	Areia	2,90	2,65	W3	11	-	-	3	-	-	-	0/11
11	31,60	33,50	Areia	2,30	2,82	W3	5	-	-	7	-	-	-	0/5
12	33,50	36,40	Areia	2,30	2,80	W3	9	-	-	5	-	-	-	0/9
13	36,40	38,35	Areia	2,55	2,30	W2	7	-	-	4	-	-	-	0/7
14	38,35	42,45	Areia	3,05	2,00	W3	6	-	-	4	-	-	-	0/6
15	42,45	45,50	Areia	3,00	2,83	W3	12	-	-	13	-	-	-	0/12
16	45,50	48,40	Areia	2,90	2,24	W3	8	-	-	10	-	-	-	0/8
17	48,40	51,30	Areia	2,90	2,20	W2	5	-	-	8	-	-	-	0/5
18	51,30	54,20	Areia	2,30	2,57	W2	7	-	-	12	-	-	-	0/7

Figura 41 Exemplo das pranchetas de campo com a descrição geomecânica de testemunhos.

3.4. Amostragem

A seleção de amostras se deu por critérios relativamente subjetivos, por identificação visual de propriedades físicas dos testemunhos de sondagem. Foram escolhidas amostras de entre furos diversos. Todas de trechos de arenitos finos médios com o mínimo de descontinuidades e microfissuras, embora algumas ainda tenham restado microfissurados.

As profundidades também foram diversas, com amostras retiradas de trechos de profundidades sempre maiores que cem metros. Do total de amostras, treze vieram de trechos de profundidade maiores que duzentos metros.

Os principais critérios de seleção foram basicamente textura e descontinuidade. De fato, como mostrado por BROTONS (2016) ambas são propriedades determinantes na condição de maior ou menor velocidade de onda e propriedades mecânicas de maciço.

Para este trabalho, foram preparadas 35 amostras de arenito finos. Os corpos de provas são oriundos de sondagem testemunhada de diâmetro NQ, que gera testemunhos com aproximadamente 47 mm de diâmetro.

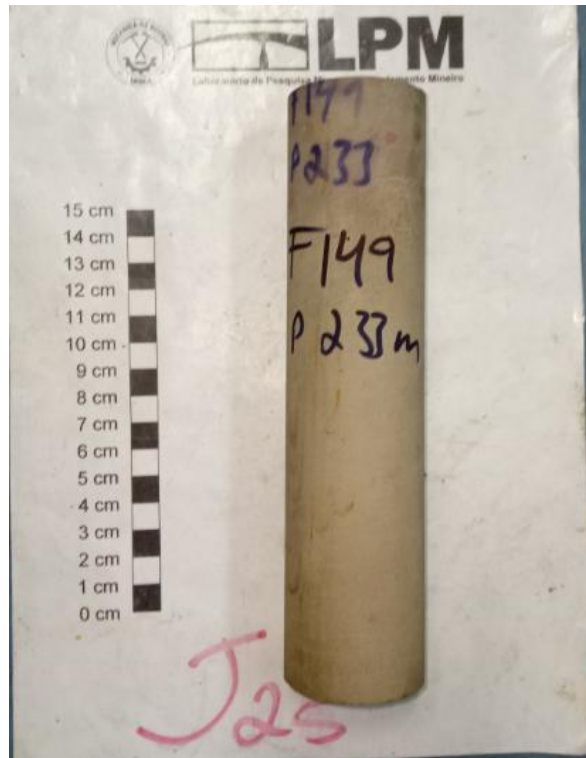


Figura 42 Amostra selecionada de entre as caixas de testemunhos de sondagem antes da preparação de amostra propriamente dita.

3.5. Preparação das Amostras

Após descrição e amostragem os testemunhos foram serrados a um comprimento determinado pela norma ASTM D4543-01 (*Standart Practice for Preparing Rock Core Specimes and Determining Shape Tolerances*) para posteriores ensaios de compressão uniaxial, radial e leituras com Pundit PL200 dentre outros.

A norma supracitada estabelece uma relação ótima entre altura e diâmetro do corpo de prova para ensaio uniaxial. Ela estipula que amostras de comprimento duas vezes e meia maior que o diâmetro preserva o balanço de tensões internas não incorrendo em flambagem quando submetidas aos ensaios de compressão uniaxial por exemplo. Estabelece também que as superfícies das extremidades devem ser paralelas e não devem se afastar desse paralelismo mais do que $0,25^\circ$ a partir do eixo que as intersecta perpendicularmente (DANTAS, 2018).

Como dito antes, ensaios de compressão uniaxial em amostras de comprimento de proporções maiores que duas vezes e meia o diâmetro são inviabilizados pela norma ASTM D4543. No entanto a norma ASTM D2845 prevê proporções diferentes. Para ela, um diâmetro de testemunho comum de 47mm exigiria corpos de prova de pelo menos 25cm de comprimento. Ora, a tomada de velocidade de onda dos testemunhos de 25 cm e seu posterior recorte em amostras de 11,5cm para ensaio uniaxial geraria mais um fator de incerteza indesejável, uma vez que tanto os métodos estáticos e dinâmicos são bastante sensíveis a microfissuramento e descontinuidade da amostra. As leituras, estáticas e dinâmicas, devem ser tomadas a partir de um mesmo corpo amostral uno. Por esse motivo buscou-se na literatura elementos que embasasse a leitura de onda sônica em amostras de proporções diferentes da ASTM D 2845.

No método sugerido à ISRM por AYDIN (*Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity*) vemos que, para o propósito específico de obtenção das constantes elásticas utilizando altas frequências, pode-se utilizar os corpos de prova, como neste trabalho, menores que 25 cm de comprimento.

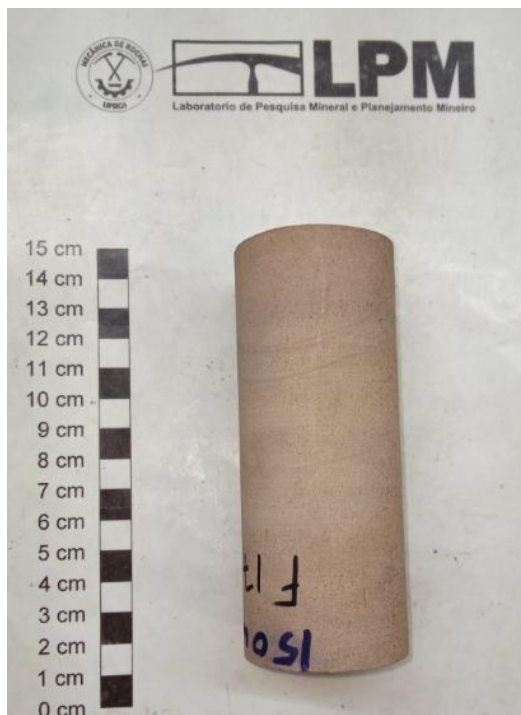


Figura 43 Corpo de prova padrão após a preparação



Figura 44 As manobras de 1 metro são cortadas, para atender a norma de ensaio uniaxial, na serra Core Trimmer DS-36 fabricada pela Control e disponível no Laboratório de Mecânica de Rochas da UFRGS.

Tabela 8 Especificações da serra Core Trimmer DS-36 (DANTAS, 2018)

Voltagem	110 W
Velocidade de corte	3000 r.p.m.
Dimensões	732 x 1050 x 590 mm
Peso	100 Kg

3.6. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

3.6.1 Pundit (V_p , V_s)

Os ensaios com leitura de velocidade de trânsito de onda sônica com pundit é uma das etapas mais sensíveis deste trabalho. A obtenção do trem de onda foi regida pela normativa estabelecida em ASTM D2845-08 e também pela sugestão de norma de AYDIN (2014).

O procedimento básico é em primeiro lugar, calibrar o equipamento para então, após inserir as melhores configurações de leitura do equipamento, conseguir uma boa acoplagem dos transdutores na amostra.

O procedimento de calibração é feito com uma amostra padrão de dimensões e velocidade de onda compressional conhecidos, chamada “bloco de calibração”. O tempo que a onda compressional leva para atravessar essa amostra é de 25,4 μ s. O primeiro desembarque de onda compressional é detectado automaticamente pelo pundit reservando para o operador a única tarefa de garantir o bom acoplamento durante o procedimento e esperar alerta de calibragem alcançada.

Algumas das predefinições de leitura inseridas no equipamento são aquelas avalizadas pelo fabricante do pundit e dos transdutores. Dada a versatilidade do pundit, que pode trabalhar também em ambientes externos e com pouco controle (como também com grandes blocos de rocha e blocos de concreto), existe a necessidade de configurar o equipamento para o ambiente e tipo de amostra. O range de medição por exemplo (intervalo de tempo mostrado em um display do equipamento) foi configurado para a “faixa curta”, aquela indicada para percursos de onda na rocha de até 3 metros.

A frequência de repetição de pulso (FRP) é a quantidade de pulsos de trem de onda reverberados por segundo na rocha (não se confunde com a frequência do pulso, esta é aquela gerada pelo transdutor). Para amostras pequenas, como as analisadas aqui, aconselha-se adotar as menores frequências de pulso possível, neste caso 5kHz. Isso se dá porque os transdutores têm um longo tempo de reverberação. Quando são excitados pelo transmissor o tempo de reverberação pode exceder o intervalo de pulso quando a FRP está definida para valores altos, ou seja, o pulso anterior pode ainda estar vibrando no transdutor quando o próximo pulso chega. Esse efeito pode causar erros ao testar amostras de curta extensão do percurso com baixo amortecimento interno (PROCEQ, 2015).

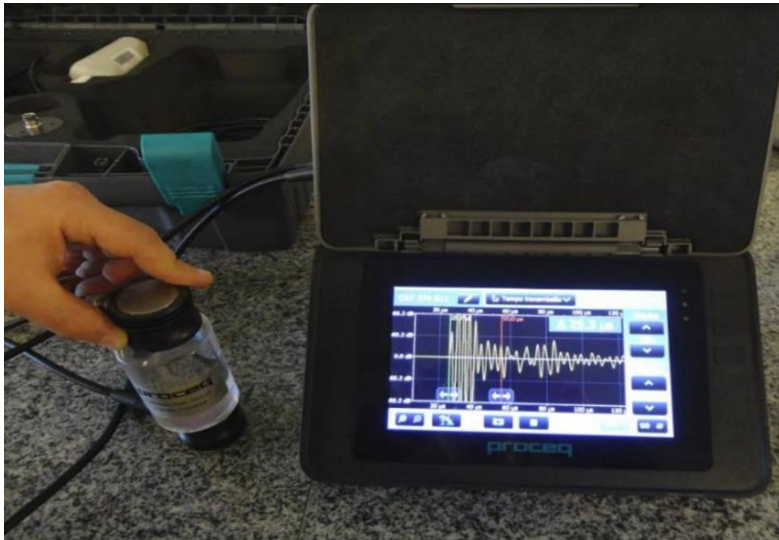


Figura 45 Procedimento de calibração do Pundit PI 200. O bloco de calibragem é um polímero transparente. Todo o procedimento é automático e semi-instantâneo.

A acoplagem dos transdutores a amostra dá-se então com a ajuda do gel de alta viscosidade provido pela fabricante. Trata-se de um elemento de transição que, ao servir de meio de transmissão, minimiza a perda de sinal no *gap* de ar entre a face do transdutor e a face das bases do corpo de prova.

Uma das propriedades essenciais das ondas cisalhantes é que elas não são transmitidas por meio líquido. Uma camada bastante fina de um gel acoplante de alta viscosidade deve então ser utilizado na acoplagem. Para garantir a existência desse *layer* de contato, a medida deve ser tomada aplicando uma pressão manual dos transdutores contra a peça. Tipicamente, conforme a camada de gel acoplante se torna mais e mais delgada (por ser um gel a base de água a água tende a evaporar) a amplitude do eco do trem de onda recuperado aumenta conforme vão sendo feitas medidas no tempo.



Figura 46 Imagem mostrando como se dispõe corpo de prova e transdutores. A coincidência de posição dos cabos é importante para que o transdutor receptor capte a amplitude de onda cisalhante em "vista geral".

Foram tomadas 453 medidas de trem de onda, numa média de 13 medidas por amostra. O grande desafio desse procedimento é, tendo alcançado a acoplagem ideal, conseguir leituras inequívocas do instante de desembarque da onda cisalhante no transdutor de recepção. Enquanto o desembarque da onda compressional é tomado automaticamente pelo pundit a onda cisalhante exige uma certa dose de subjetividade que, embora não inviabilize, compromete a total objetividade da técnica (CORBETT *et al.*, 2016).

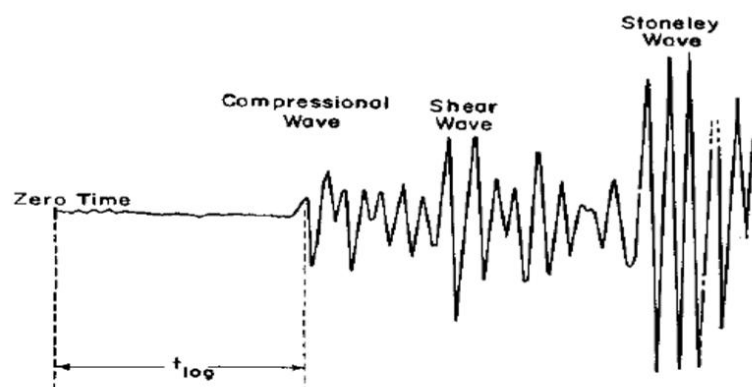


Figura 47 Exemplo de detecção da onda Cisalhante dentro do trem de onda. O eixo horizontal, embora não evidente, é o eixo do tempo e mostra a seqüência mais comum do percurso dos diferentes tipos de onda (BASSIOUNI, 1994).

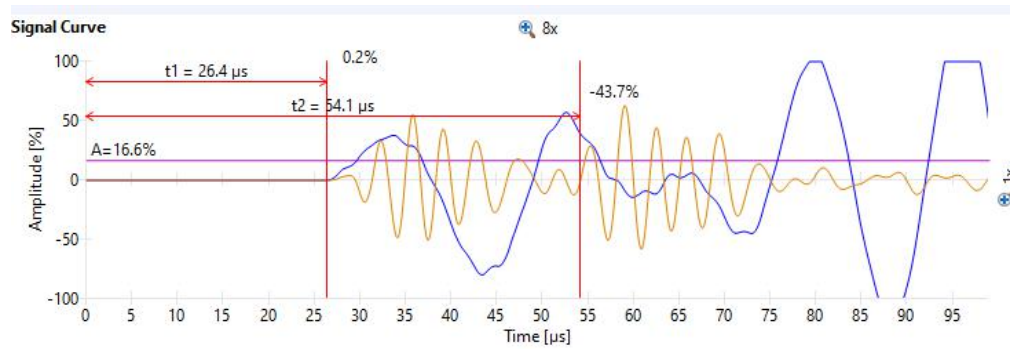


Figura 48 Exemplo de leitura de trem de onda obtido do corrente trabalho. As ondas compressionais do transdutor de onda cisalhante (em amarelo) e do transdutor compressional (em azul) têm o mesmo tempo de desembarque (t_1) apesar das diferentes frequências dos transdutores.

Tabela 9 Velocidades de onda obtidas com o pundit

Amostra	Vp (m/s)	Vs (m/s)	K (Vp/Vs)
J1	3887	2428	1.60
J2	3733	1892	1.97
J3	3840	2265	1.70
J4	3790	2293	1.65
J5	4065	2022	2.01
J6	4040	2553	1.58
J7	3875	2342	1.65
J8	4274	2375	1.80
J9	4080	2429	1.68
J10	4248	2354	1.80
J11	4075	2225	1.83
J12	4046	2483	1.63
J13	4070	2566	1.59
J14	3908	2489	1.57
J15	3849	1914	2.01
J16	3627	2254	1.61
J17	3825	2147	1.78
J18	3858	2356	1.64
J19	4790	2143	2.24
J20	3640	2380	1.53
J21	3603	2361	1.53
J22	3780	2340	1.62
J23	3633	2329	1.56
J24	4135	2495	1.66
J25	3778	2409	1.57
J26	4195	2523	1.66
J27	4074	2451	1.66
J28	4005	2438	1.64
J29	4178	2500	1.67
J30	4084	2308	1.77
J31	3814	2308	1.65
J32	3753	2417	1.55
J33	3789	2287	1.66
J34	4231	2512	1.68
J35	3373	2181	1.55

3.6.2 Uniaxial (Módulo De Young e Ucs)

Após a realização das medidas de tempo de trânsito das ondas P e S procede-se a realização dos ensaios destrutivos de determinação da resistência uniaxial da amostra, o ensaio de compressão uniaxial. Existem normas internacionais de procedimento que balizam a realização deste, entre as principais está a norma ASTM D 2938 (*Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens*) e a ASTM D 4543. Os ensaios de determinação do UCS deste trabalho seguirão estas normas.



Figura 49 Exemplo de peça de testemunho utilizada nos ensaios.

O experimento é realizado na prensa hidráulica *Advanced 9* da *Control* outrora mencionada, ela é capaz de imprimir um incremento de 500 kN por segundo na amostra. Como critério de controle do ensaio utilizamos esse incremento constante de 500kN por segundo e não a deformação, como também é possível conforme norma.

As variáveis resultantes do experimento são a Resistência à Compressão Uniaxial (em Mega Pascals (MPa)) e também o módulo de Young (em GPa). O módulo

de Young é possível aqui devido ao monitoramento dos sensores “LVDT” (*Linear variable differential transformer*) sensíveis às mudanças de comprimento axial das amostras durante o ensaio.



Figura 50 Ensaio de compressão Uniaxial mostrando os sensores LVDT e os fios ligando os sensores Strain Gauges para leitura da deformação radial da amostra.

Tendo obtido os valores de deformação gradual da peça e máxima tensão pré-ruptura, pode-se visualizar o comportamento da amostra a cada momento do carregamento através do gráfico de tensão versus deformação.

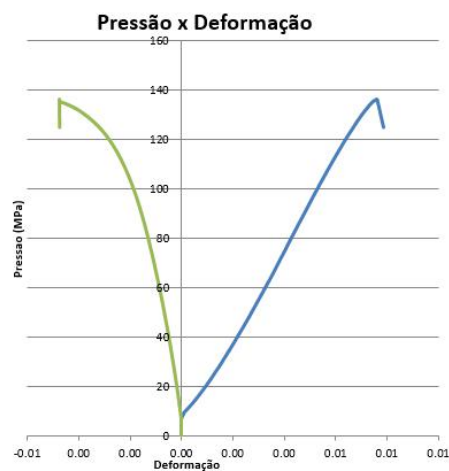


Figura 51 Gráfico de Tensão versus Deformação de uma das amostras. À esquerda do zero da abcissa (indicando aumento da dimensão indicada) temos a deformação lateral e à direita (indicando diminuição da dimensão), em azul, a axial. A deformação indicada é uma proporção da dimensão inicial da peça.

Conforme a norma, ASTM 3148 (*Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression*) as constantes elásticas, como o nome diz, devem representar o comportamento da fase elástica da rocha sendo esmagada, isto é, a fase do ensaio em que a deformação da rocha é linearmente proporcional à tensão aplicada. A norma sugere três possibilidades para isolar essa etapa do comportamento da rocha no gráfico tensão/deformação, por isso diz-se método gráfico.

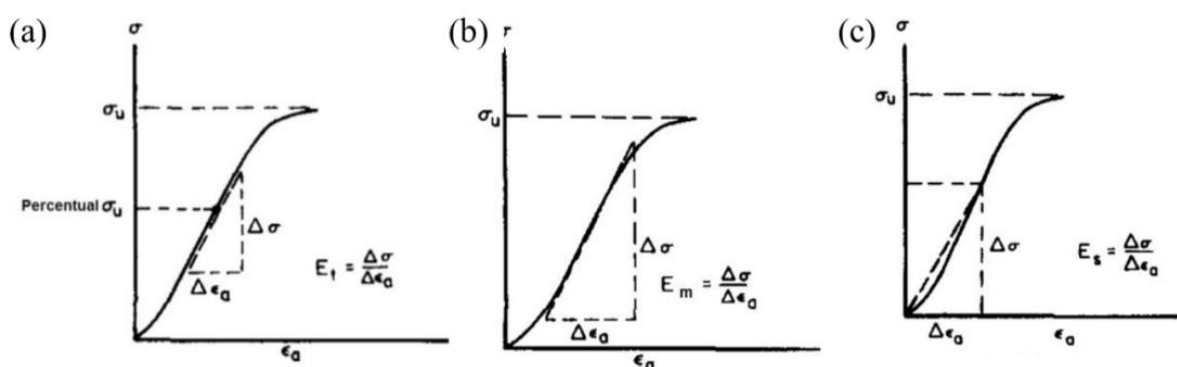


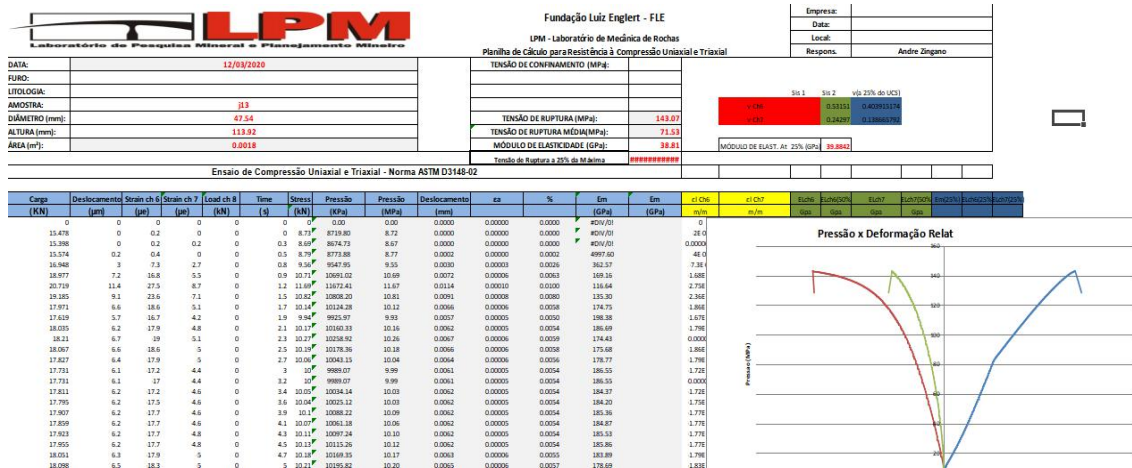
Figura 52 Metodologias para determinar os valores das constantes elásticas: (a) Módulo tangente; (b) Módulo médio; (c) Módulo Secante (ASTM 3148)

Neste trabalho, utilizamos o módulo tangente em 50% da tensão de pico. Ou seja, o comportamento da rocha no ponto em que a tensão alcançou a metade da tensão com que ela rompeu. Nesse ponto a rocha apresenta um gráfico retilíneo e pode ser considerada em estado de deformação elástica.

De acordo com AL-SHAYEA (2004) a razão entre as constantes elásticas estáticas e dinâmicas tendem a 1 (um) quando se utiliza o módulo tangente mais próximo do início da curva de carregamento do ensaio de ruptura uniaxial. Por isso tomamos também o módulo elástico tangente a 25% da tensão de ruptura.

As constantes elásticas estáticas foram então calculadas a partir desse princípio metodológico.

Tabela 10 Exemplo de tabela de determinação das propriedades geomecânicas estáticas para cada amostra



Durante a análise dos resultados percebeu-se uma inconsistência nos últimos seis resultados dos ensaios. Valores muito baixos de módulo elástico associados a também baixos valores de coeficientes de Poisson (quando são propriedades inversamente proporcionais (BARTON, 2007)) e em trechos de furos que em outras amostras não apresentaram o mesmo comportamento constituem um indício de vício nos ensaios dessas peças, que se deram conjuntamente. Por essa razão foram excluídos dos gráficos de correlação embora estejam listados de forma transparente nas tabelas de resultados apêndices deste trabalho (ver seção apêndice).

3.6.2.1 Deslocamento Radial (Razão de Poisson com Strain Gauges)

O monitoramento do deslocamento radial da peça é necessário para o cálculo do coeficiente de Poisson, a medida da deformação lateral relativa à vertical. Foram utilizados dois strain gauges diametralmente opostos acoplados a cada corpo de prova na linha da metade da altura, no sentido perpendicular à da aplicação da tensão.

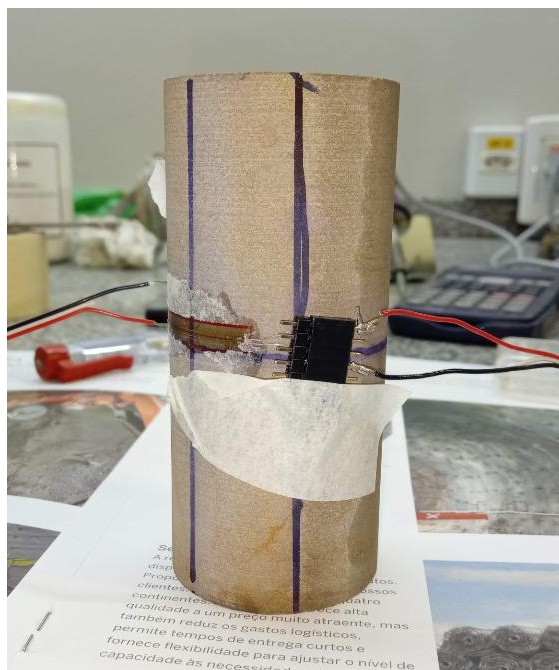


Figura 53 Strain Gauge acoplado ao corpo de prova.

Antes da aplicação dos gauges, e como versa a norma ASTM E1237 (*Standard Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages*), a superfície de aplicação passou por um processo de preparação. Estes cuidados envolvem o polimento suave das faces de contato bem como a aplicação de solventes que retiram excessos de impurezas e particulados que podem afetar em muito o resultado das leituras. O procedimento utilizado na instalação dos *Strain Gauges* pode ter efeitos significativos sobre a performance desses sensores.

O tratamento químico envolve, de início, a aplicação de um condicionador, geralmente uma solução diluída de ácido fosfórico que atua como ataque químico potencializando a limpeza. Após, com a secagem, o processo continua com a aplicação de um neutralizador para alcançar um Ph neutro aconselhável para a colagem posterior.

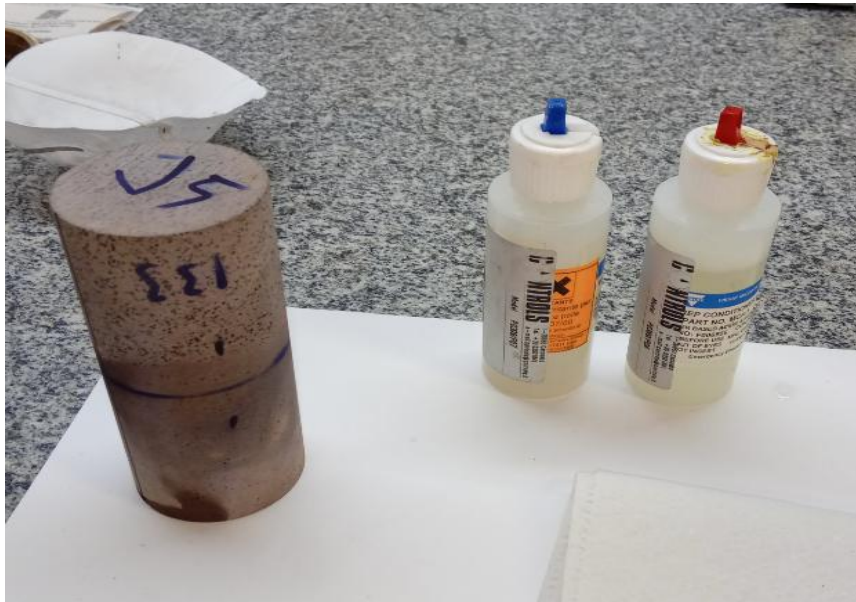


Figura 54 Corpo de prova com superfície lateral devidamente polida (primeiramente com lixa grossa e então com lixa "fina") e tratada com os solventes neutralizadores e condicionantes oriundos da fabricante da prensa utilizada no ensaio, como orienta a norma ASTM E1237.

Uma vez polidas e tratadas quimicamente as superfícies, sobre elas são instalados os sensores. O adesivo utilizado foi um de base acrílica (loctite). Foi checada a validade e efetividade da mesma assim como o tempo de cura de 24 horas, superior ao necessário. Para melhorar a aderência da cola e o correto posicionamento do *strain gauge*, foi aplicada uma leve pressão uniformemente sobre a superfície do sensor no momento da acoplagem. Todo cuidado foi tomado para assegurar que não houvesse nenhum contato manual com a superfície da amostra e do *Gauge* após o tratamento químico.



Figura 55 Aplicação do Strain Gauge à superfície do corpo de prova. Detalhe do auxílio da pinça e espátula para garantir a manutenção de superfície do strain livre de impureza.

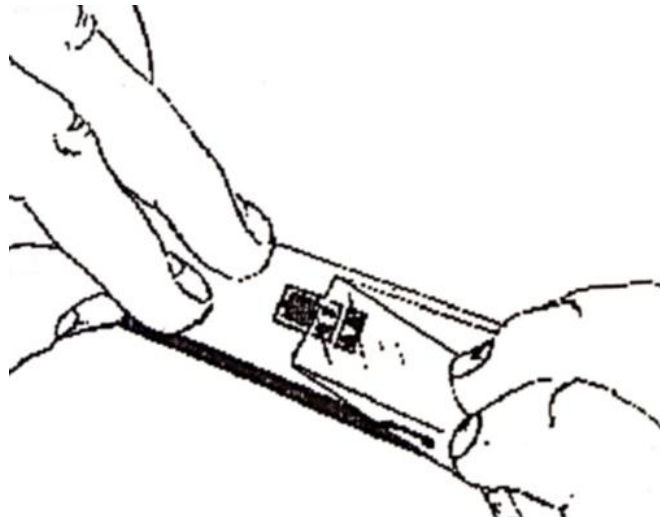


Figura 56 Esquema mostrando a aplicação do sensor Gauge. Aplica-se a cola sobre a amostra e, fazendo o sensor descansar sobre fita plástica, é feita a adesão com aplicação de leve pressão uniformemente no adesivo que será retirado após a cura da cola.

As terminações dos *strain gauges* foram ligadas aos demais elementos da Ponte de Wheatstone em uma configuração de $\frac{1}{4}$ de ponte contidos no elemento de leitura e controle do sistema de *Gauges* da fabricante CONTROL, o que permitiu leituras individuais dos sensores.

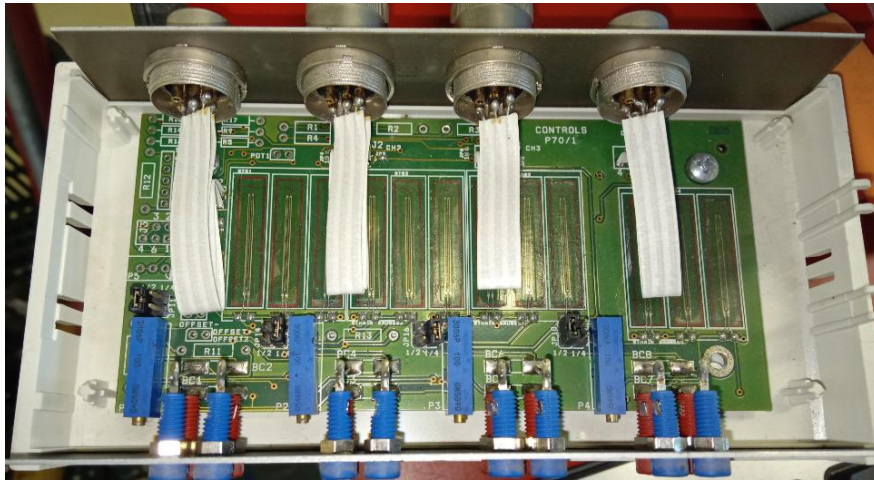


Figura 57 Elemento de controle e leitura das Pontes de Wheatstone (Control Model 82-P0391). Cada canal possui 3 resistências (cada uma de 120ohm) que farão ligação em paralelo com o Sensor sobre a amostra.

Os *Strain Gauges* utilizados possuíam resistência de 120 ohm (como os demais da ponte de Wheatstone) e Fator Gauge de 2,12.

A deformação lateral (*lateral strain*) proposta pela ASTM D3148 (norma que baliza a determinação das constantes elásticas em ensaios uniaxiais) é dada abaixo:

$$\epsilon = \frac{\Delta D}{D} \quad (15)$$

Onde ϵ é a proporção da deformação lateral; D e ΔD o diâmetro e sua variação.

Ainda de acordo com a ASTM 3148 o coeficiente de Poisson é a taxa variação do diâmetro da amostra sobre a deformação linear do eixo principal. Uma vez que o *Gauge* é acoplado à superfície da amostra, medirá a taxa de deformação do comprimento do arco lateral do testemunho cilíndrico e não a variação absoluta do diâmetro do mesmo.

Analisando o perfil geométrico do testemunho, vemos que ao se dilatar, ele passa a uma condição de concentricidade dos dois estados, anterior e posterior ao carregamento, com o diâmetro posterior ($2r_2$) levemente maior que o anterior ($2r_1$). O *strain gauge*, naturalmente, também se deforma linearmente até um comprimento S_2 não havendo, porém, deformação no ângulo do fuso (θ).

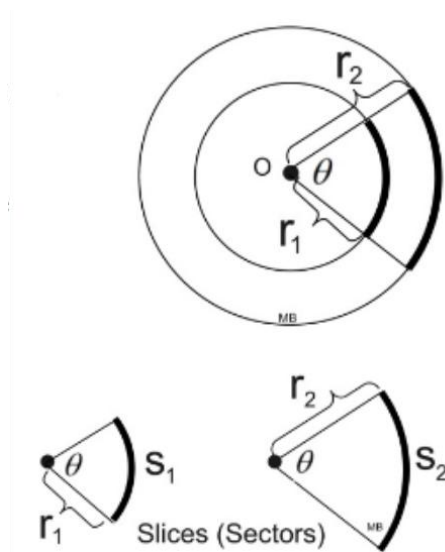


Figura 58 Vista em planta do corte perpendicular ao eixo principal de um testemunho de sondagem sob carregamento e deformação radial. Detalhe mostra a dilatação do comprimento do strain gauge de S_1 para S_2

Nessas condições, é geometricamente válida a relação:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{2r_2}{2r_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (16)$$

A leitura do extensômetro Gauge é uma taxa de deformação a partir da sua geometria original, o que torna a sua leitura igual a $\frac{S_2}{S_1}$. Quando zeramos o valor da deformação inicial do *strain* (quando não há carregamento mas apenas a adesão à forma do corpo de prova) tornamos $D_2 = \Delta D$.

Essas propriedades geométricas inerentes ao ensaio condicionam uma leitura direta do valor de deformação, que é dado em μs (*micro strain*) que, convertido em metros equivale a dizer:

$$1 \mu s = 1 \frac{\mu m}{m}$$

3.6.3 Densidade Aparente (ρ)

Neste ensaio nos baseamos na norma técnica brasileira ABNT NBR 15845 (Método de ensaio – Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água aparente) cujo objetivo é determinar a densidade e porosidade das amostras estudadas.

Em resumo, o ensaio consiste em se obter o peso das amostras em diferentes condições de saturação de água (totalmente seco e totalmente saturado) e também obter seu peso submerso totalmente em água.

Para se alcançar a condição de amostra totalmente saturada de água a norma orienta manter o corpo de prova por 4 horas em uma bandeja de material não oxidável cheia de água até $1/3$ da altura. Após esse período, mais $1/3$ da altura da bandeja é submersa alcançando $2/3$ de submersão das amostras por mais 4 horas. Ao final dessas 8 horas as amostras são totalmente submersas em água por pelo menos mais 40 horas.



Figura 59 Amostras submetidas a imersão sob $1/3$ da altura em água (a), $2/3$ (b) e totalmente submersas (c)

Tendo encerrados as 48 horas de saturação gradual, as amostras, agora totalmente úmidas, são submetidas a pesagem (para obtenção da massa saturada) em balança de resolução menor ou igual a 0,01 gramas.

A obtenção da massa submersa das amostras requer um aparato que permita extrair apenas o peso da amostra quando essa encontra-se totalmente submersa em água. O peso adicional do utensílio que foi utilizado para realizar essa pesagem é desprezado pela função “tara” da balança.



Figura 60 Figura representativa da pesagem das amostras submersas.

Uma vez pesadas, as amostras passarão pelo processo de dessaturação de onde obteremos o valor de massa seca das mesmas.

Aqui, as amostras serão mantidas em estufa ventilada à temperatura de 70°C (com tolerância de mais ou menos 5°C) até que seja atingida massa constante, ou seja, até que nenhuma quantidade significativa de água ainda estivesse alojada nas porosidades da rocha.

Nessa etapa as amostras foram mantidas por dois dias completos dentro da estufa para garantir sua secagem. Depois desse período foi feita novamente a pesagem na mesma balança já utilizada nas outras etapas, obtém-se daí a massa seca da amostra.

Todos os resultados das pesagens e diferentes condições foram reunidas nas equações seguintes:

$$\rho a = \left(\frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \right) * 1000 \quad (17)$$

$$\eta a = \left(\frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \right) * 1000 \quad (18)$$

Onde:

ρa : Densidade aparente (Kg/m³);

ηa : Porosidade aparente (%);

M_{sec} : Massa seca;

M_{sat} : Massa saturada;

M_{sub} : Massa submersa.

Tabela 11 Parâmetros físicos das amostras a partir das medições e ensaio de densidade aparente

Amostra	Diâmetro(mm)	Comprimento(mm)	Densidade Aparente (Kg/m ³)	Porosidade Aparente (%)
J1	47.6	109.88	2387.38	9.675
J2	47.65	108.6	2340.96	10.987
J3	47.58	106.35	2363.99	10.733
J4	47.55	110.95	2471.41	7.891
J5	47.48	109.37	2518.60	7.479
J6	47.48	112.32	2369.03	11.513
J7	47.45	99.75	2471.16	8.304
J8	47.47	99.72	2523.38	6.984
J9	47.43	102.10	2457.40	8.591
J10	47.43	109.38	2522.77	6.444
J11	47.42	103.51	2527.92	7.208
J12	47.42	109.92	2483.54	7.724
J13	47.54	113.92	2439.01	8.604
J14	47.50	111.31	2420.90	8.853
J15	47.50	102.30	2398.88	9.867
J16	47.50	103.40	2409.10	9.948
J17	47.53	102.42	2418.64	9.045
J18	47.50	97.60	2380.79	10.373
J19	47.43	102.38	2538.08	5.608
J20	47.40	99.04	2347.65	12.049
J21	47.38	98.13	2349.07	11.497
J22	47.38	109.81	2427.41	9.144
J23	47.45	109.38	2361.37	10.917
J24	47.40	109.6	2440.27	8.691
J25	47.33	113.20	2384.02	10.178
J26	47.40	111.94	2455.50	8.190
J27	47.44	112.37	2462.42	7.467
J28	47.43	112.17	2422.53	8.006
J29	47.39	118	2412.63	8.653
J30	47.15	111.06	2307.05	11.589
J31	46.90	111.27	2252.83	13.338
J32	46.90	113.40	2259.68	12.729
J33	46.89	108.15	2231.58	13.434
J34	46.94	109.94	2441.35	7.244
J35	47.54	115.38	2427.14	8.354

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados dos ensaios foi possível verificar a correlação entre os parâmetros elásticos geomecânicos obtidos a partir dos ensaios estáticos e dinâmicos. Como já dito anteriormente, a discrepância entre os valores destes ensaios já é esperada, por questões já abordadas, o que tem ensejado a criação de modelos que contemplem os ensaios indiretos convertendo suas leituras dinâmicas naquelas mais largamente utilizadas na classificação de maciços.

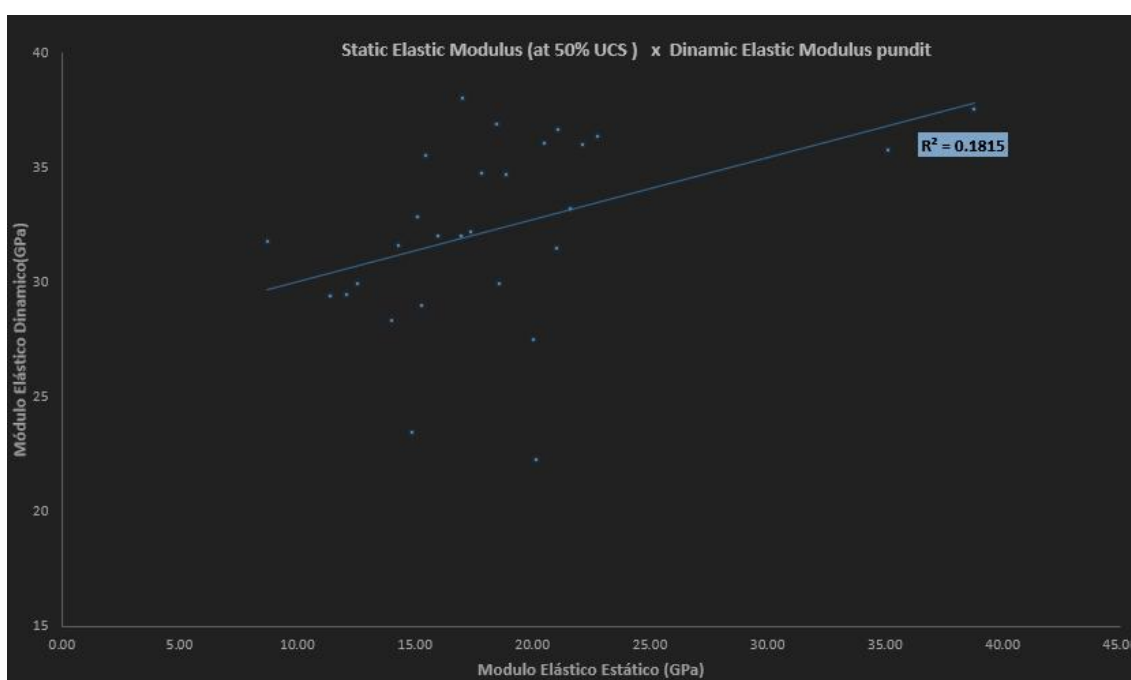


Figura 61 Gráfico de correlação entre módulo de Young estático e dinâmico sem correção

Também foi levantada a correlação entre o módulo dinâmico e o estático calculado a partir do estágio inicial do ensaio (com um teto a 25% da carga máxima de rompimento da amostra). Embora exista na literatura trabalhos indicando um aumento da correlação quando considerada essa faixa de dados do ensaio estático (AL SHAYEA, 2004), isso não foi verificado aqui, com o coeficiente de determinação R^2 chegando mesmo a ser deteriorado.

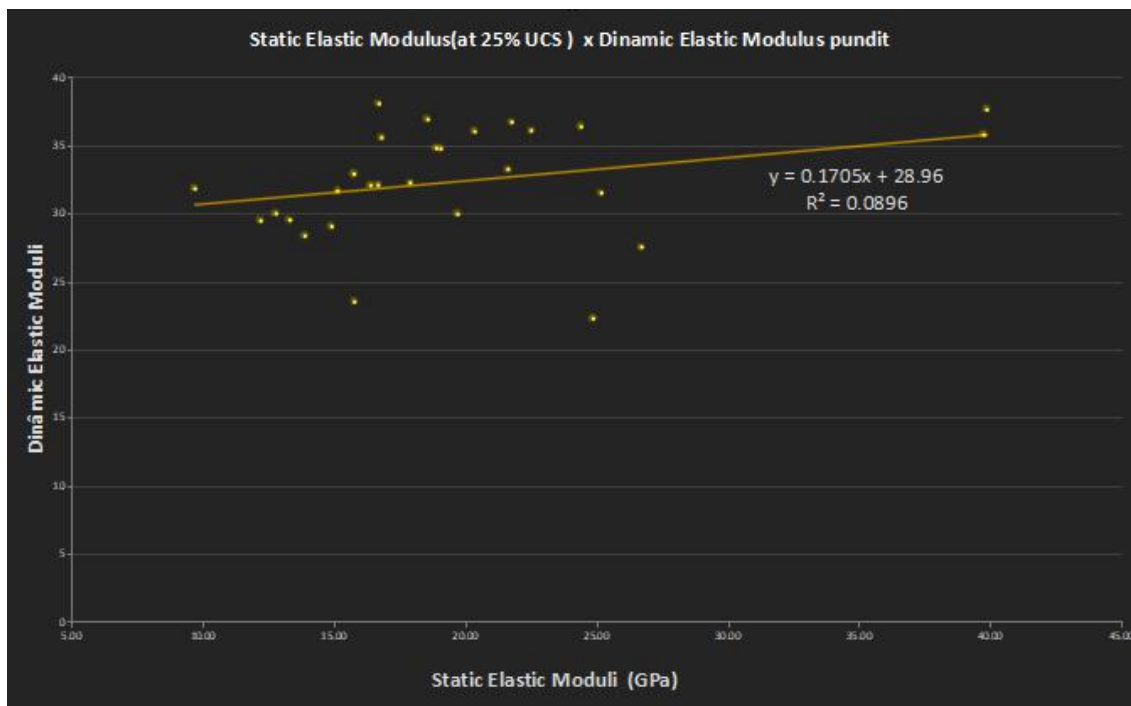


Figura 62 Correlação entre módulo de young estático (a 25% da carga de ruptura) e dinâmico (sem correção).

Outro comportamento bem caracterizado na literatura (LAMA & VUTUKURI, 1978) e observado nos resultados é a tendência de o módulo elástico dinâmico superestimar a qualidade da amostra. Em geral o módulo dinâmico se mostra maior que o obtido do ensaio destrutivo em proporções que podem mesmo chegar a dez vezes maiores (MAHMOUD *et al.*, 2019).

A correlação entre as velocidades de onda e as propriedades físicas de densidade e porosidade também foi tomada, tendo resultado também em valores relativamente baixos, o que é especialmente válido, neste caso, para as medidas de V_s .

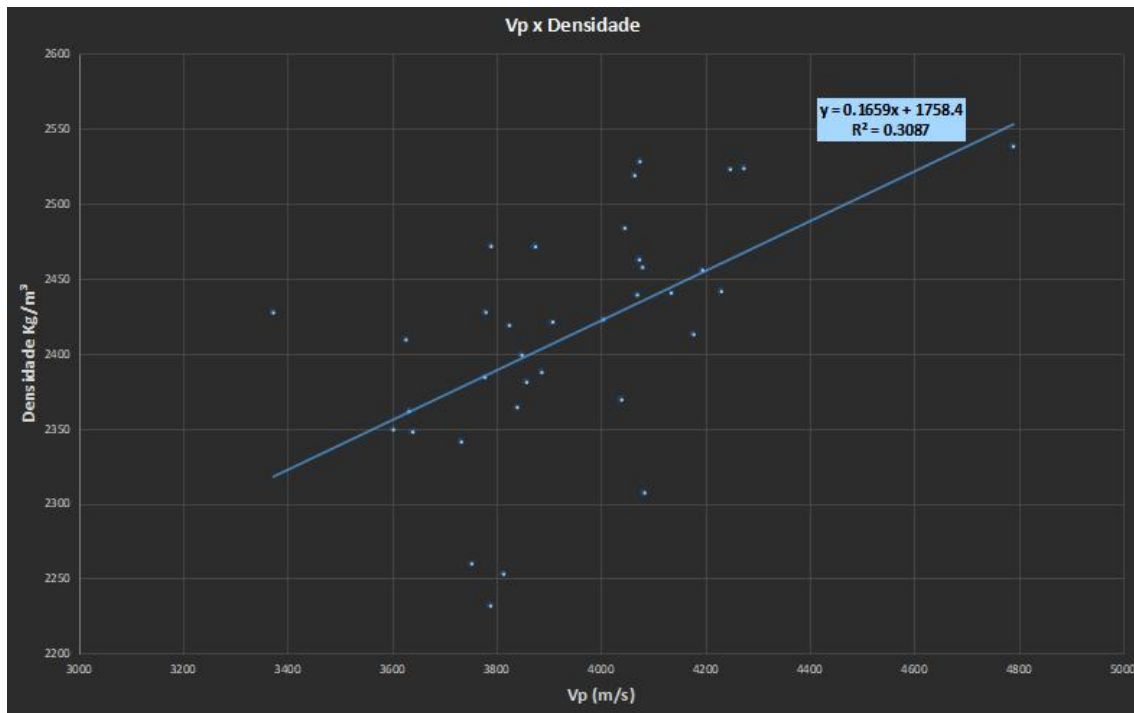


Figura 63 Gráfico de correlação Vp vs Densidade

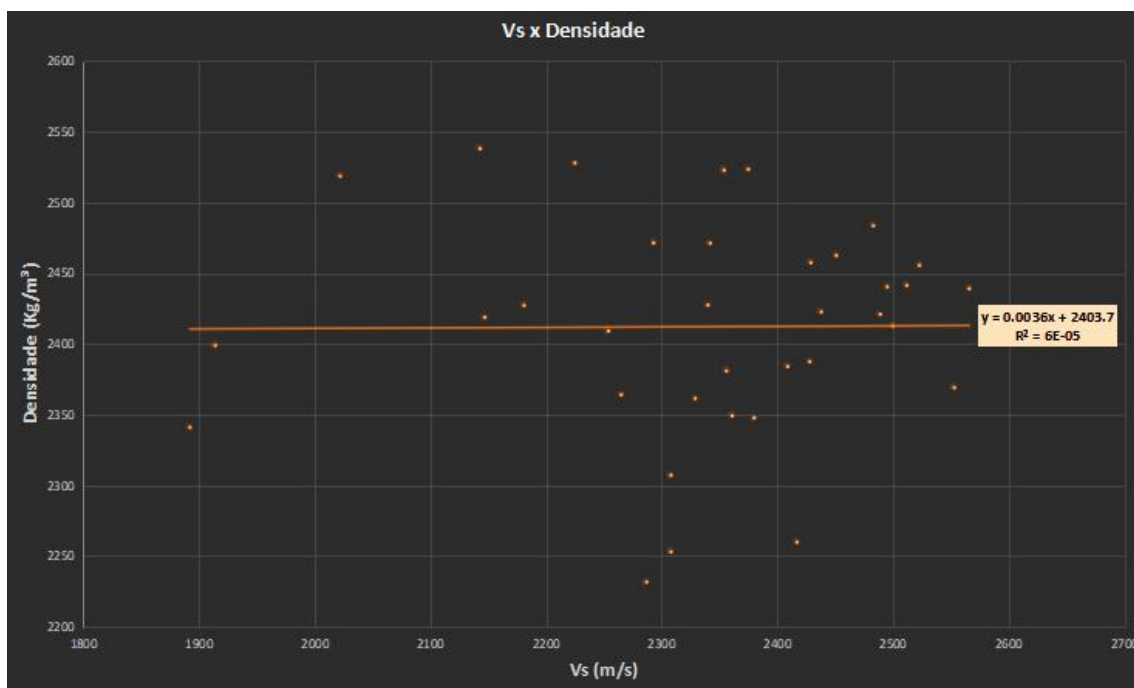


Figura 64 Gráfico de correlação Vs versus Densidade

Os valores para a porosidade evidenciam escassez de espaços vazios intersticiais. Essa propriedade apresentou relativa correlação com as velocidades de

onda compressional embora isso não seja verdade para ondas cisalhantes, que como veremos, guardariam maior dependência dessa variável.

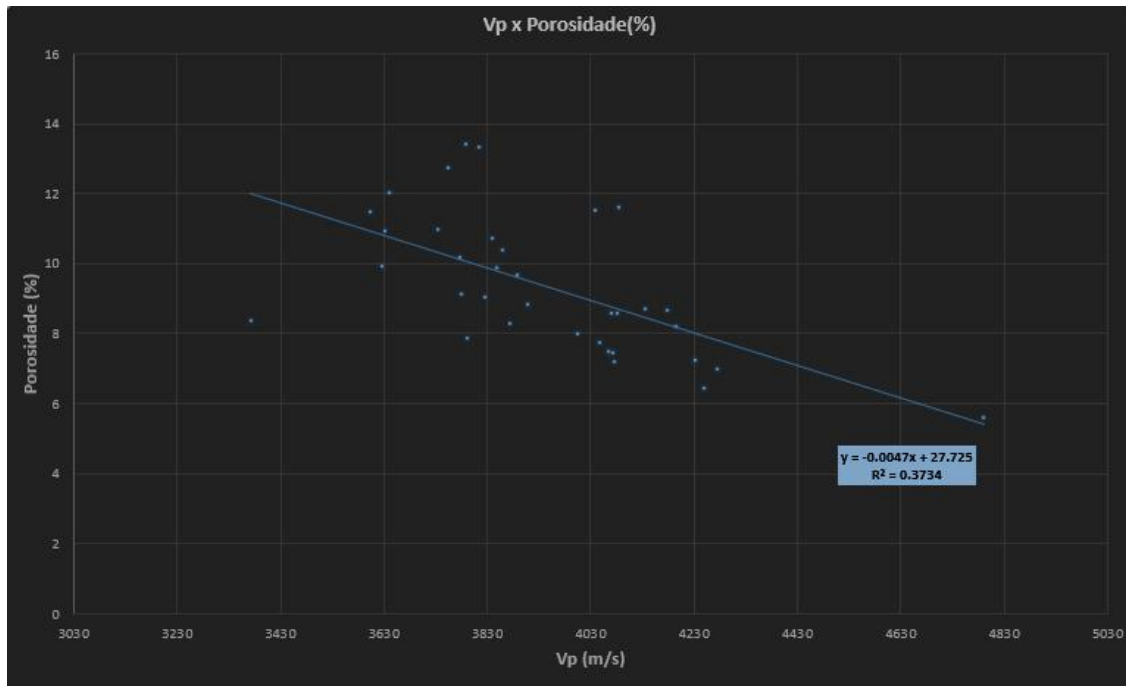


Figura 65 Gráfico de correlação Vp vs Porosidade

Apesar da relativa adesão dos valores de porosidade aos de velocidade de onda compressional, a mesma não é verificada quando se considera as ondas cisalhantes. É praticamente inexistente qualquer correlação entre esses entes, o que pode levantar questões a respeito da validade da determinação do ponto de desembarque da onda cisalhante pelo método de detecção manual preconizado pelo fabricante do equipamento. Em termos gerais a velocidade da onda cisalhante é fortemente sensível a existência de espaços vazios preenchidos ou não por líquidos, uma vez que essa natureza de onda não se propaga em meio líquido ou gasoso. Isso dito, sua completa insensibilidade a essas propriedades físicas pode lançar dúvida a respeito da qualidade de leitura e método proposto pelo fabricante.

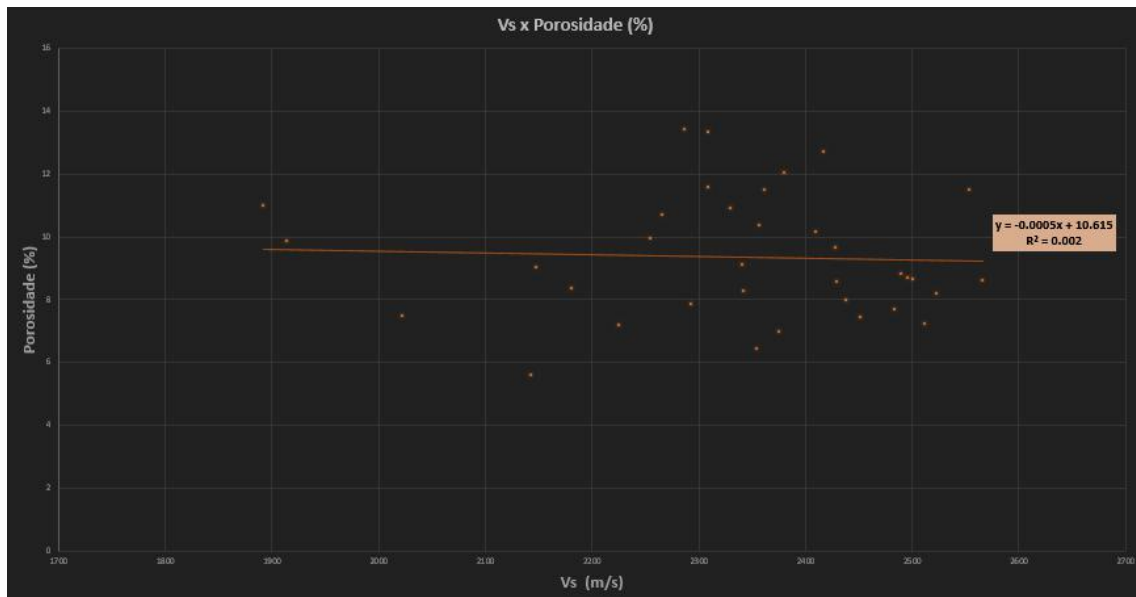


Figura 66 Gráfico de correlação V_s versus Porosidade

Em 2016, David Corbett (membro da equipe de desenvolvimento da PROCEQ) já alertava a respeito da baixa reprodutibilidade alcançada pelo seu equipamento, o que ensejou a criação de tecnologias menos dependentes do acoplamento dos transdutores à amostra e também capazes de leituras automáticas do ponto de desembarque de ondas cisalhantes.

Já em termos de tensão uniaxial máxima de ruptura (UCS), a correlação com as velocidades de onda compressional cisalhante já se mostra relativamente melhor apesar de ainda baixa.

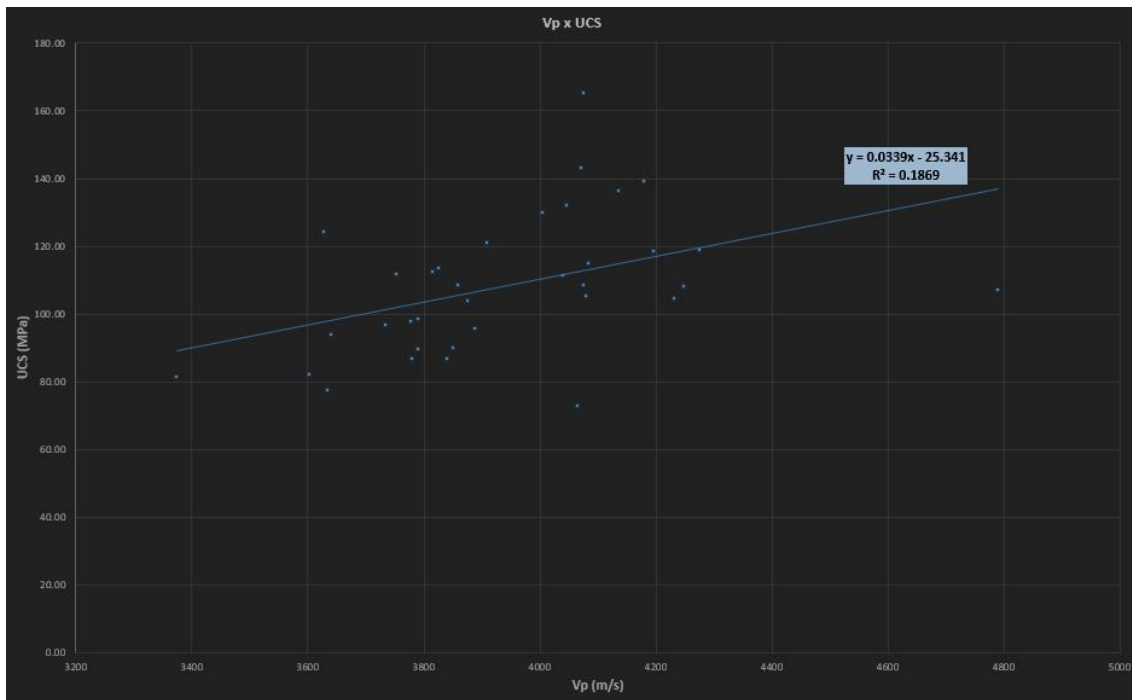


Figura 67 Gráfico de correlação entre Vp vs UCS

Para esses parâmetros, a correlação com a velocidade de onda cisalhante restou maior que a própria correlação com a compressional.

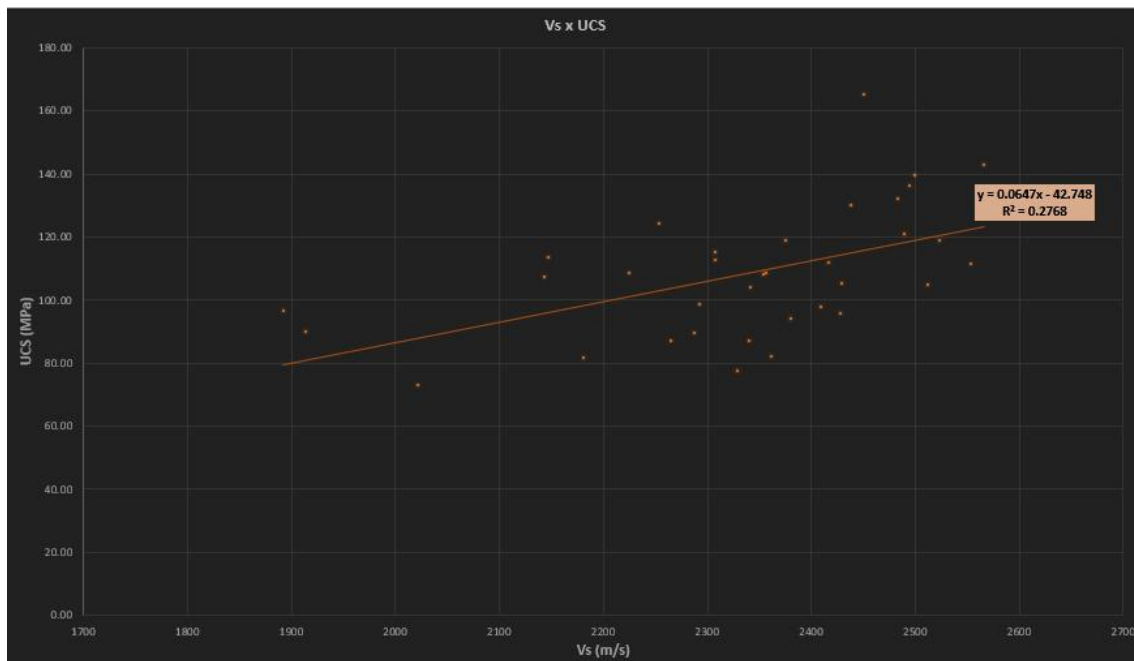


Figura 68 Gráfico de correlação entre Vs versus UCS

Também correlacionamos o valor do UCS das amostras ao respectivo valor de densidade, onde também foi verificada a baixa correlação. Disto pode-se deduzir que não está mas talvez outras propriedades não lineares tenham controlado os resultados de resistência uniaxial e por consequência as respostas de constantes elásticas obtidas. Essas propriedades físicas podem ser descontinuidades e microfissuras (BROTTONS, 2016), comuns em materiais já bastante manuseados e mantidos em condições suscetíveis a deterioração intempérica como observado nas amostras estudadas aqui.

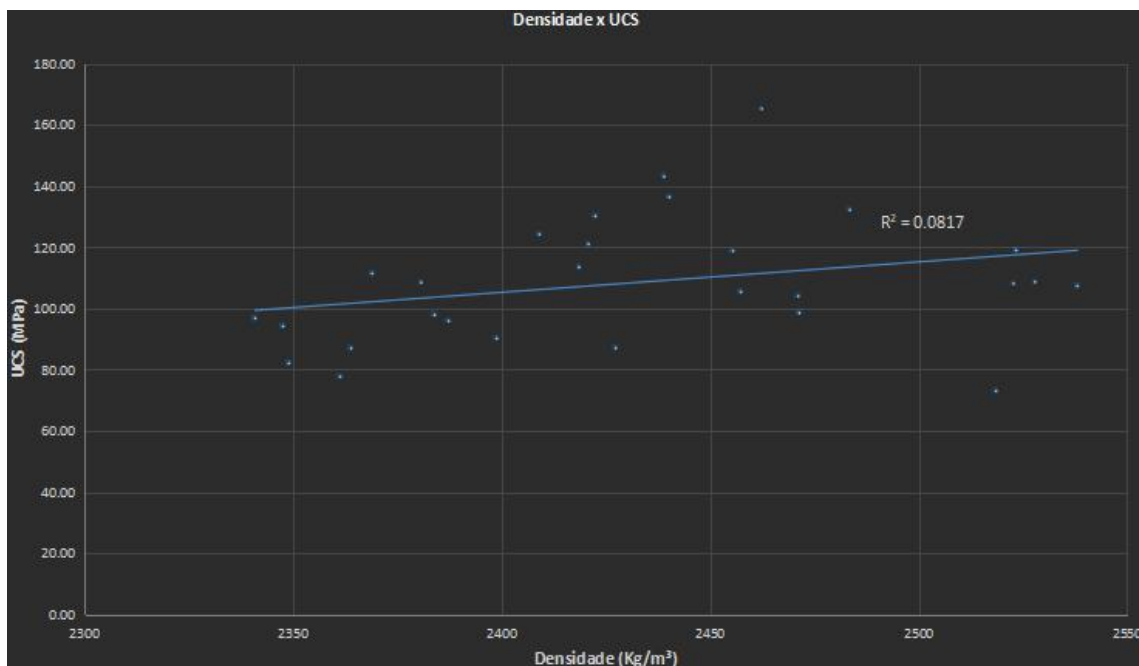


Figura 69 Gráfico de correlação entre Densidade vs UCS

Outra aferição importante foi o comportamento das deformações laterais e sua flutuação com as demais qualidades das amostras tanto físicas como geomecânicas. Como esperado, a correlação entre as propriedades estáticas e as dinâmicas restou baixa.

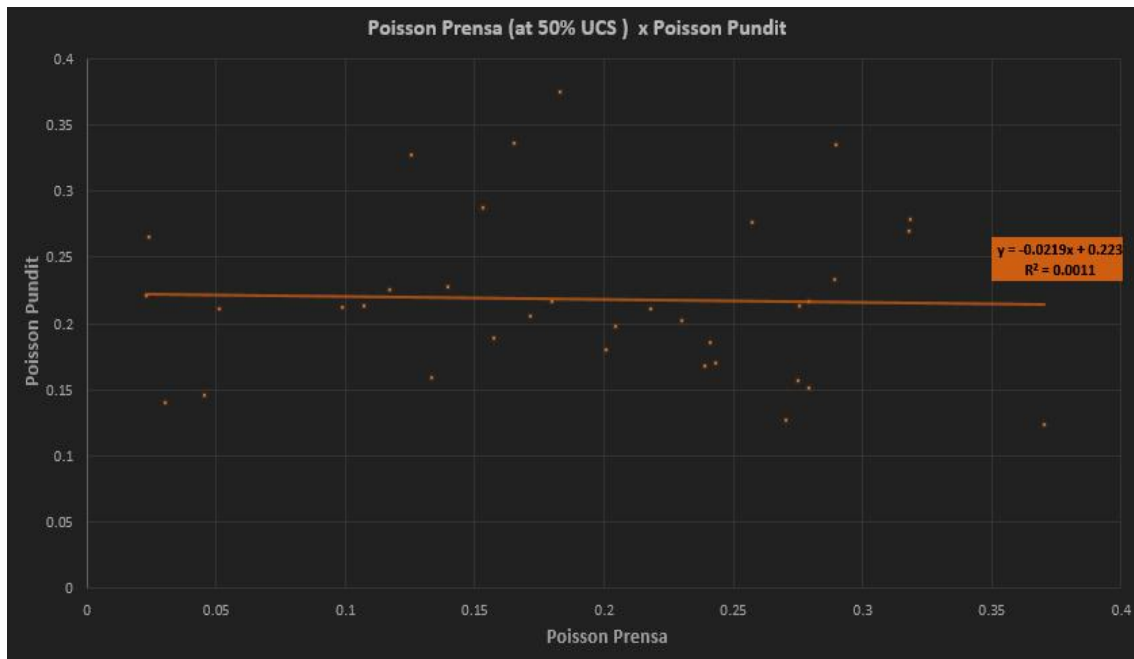


Figura 70 Gráfico de correlação entre Poisson estático e dinâmico

Utilizando para o cálculo das correlações parâmetros estáticos recolhidos na etapa inicial do ensaio destrutivo (utilizando então a inclinação da reta tangente ao ponto a 25% do carregamento máximo na curva de tensão versus deformação lateral) temos também o mesmo comportamento pouco aderente entre as propriedades estáticas e dinâmicas.

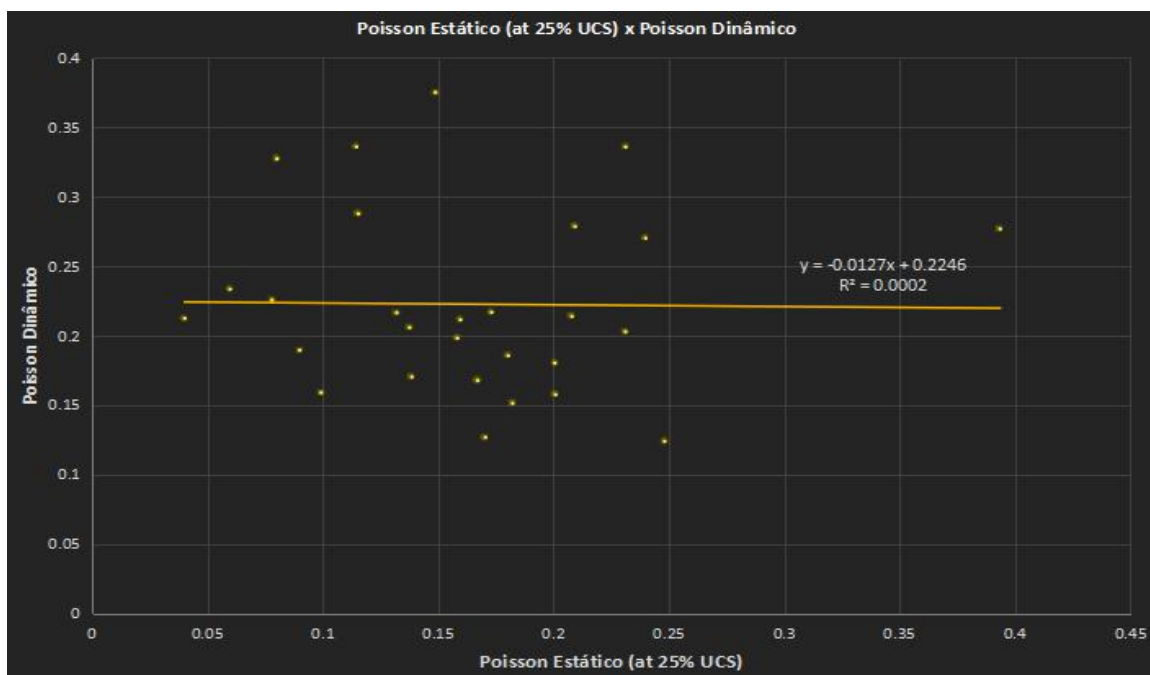


Figura 71 Gráfico de correlação entre Poisson estático e dinâmico

4.1 Aplicação das Equações de Conversão E_{dyn} para E_{est}

Apesar dos resultados anteriores contarem com correlações bastante baixas, é necessária ainda a criação e/ou aplicação de equações que possam normalizar as duas naturezas de dados e minimizar os efeitos que as diferentes dinâmicas dos diferentes ensaios produzem (SCHÖN, 2015).

Foram aplicadas para a normalização dos dados, equações generalistas (modeladas para aplicações em litologias específicas) e, também, algumas de aplicação universal na tentativa de melhorar a baixa correlação encontrada. Apesar disso, apenas três daquelas lograram melhorar o índice R^2 com as demais acabando por deteriora-la.

A primeira equação utilizada foi a relação universal mostrada na equação 19 proposta por BROTONS (2016) a partir da análise de 57 amostras de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas (onde a correlação alcançou patamares maiores que 0,90). Aqui a densidade aparente (ρ_{bulk}) também entra como variável além do módulo dinâmico (E_{dyn}). Em uma situação onde os módulos elásticos são obtidos de *log* de perfilagem de poço, esse dado poderia vir de sonda de perfilagem “*Density Log*”.

$$E_{\text{st}} = 11.531 \rho_{\text{bulk}}^{-0.457} E_{\text{dyn}}^{1.251} \quad (19)$$

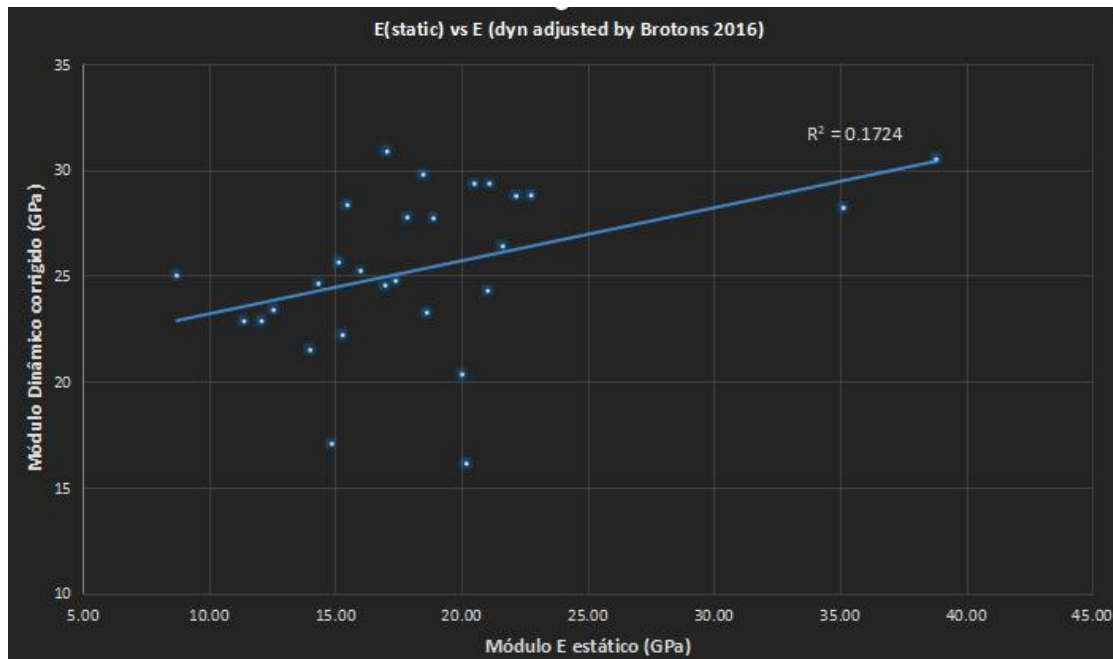


Figura 72 Mostrando a deterioração de correlação após aplicação da equação de Brotons

A equação 20, proposta por EISSA & KAZI (1988), também reclama aplicação universal. Desenvolvida em 1988, resultou da análise de 76 ensaios de diferentes fontes e logrou êxito ao considerar a densidade aparente da amostra na estimativa de módulo estático.

$$\log_{10} E_{\text{static}} = 0.02 + 0.77 \log_{10}(\gamma E_{\text{dynamic}}) \quad (20)$$

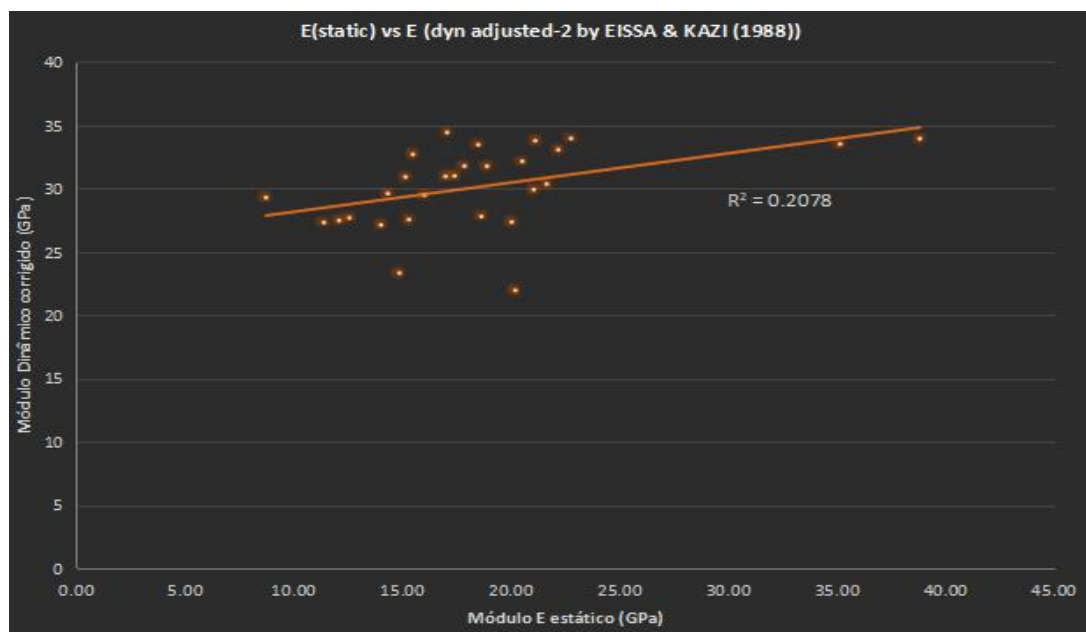


Figura 73 A inserção de outros fatores, no caso a densidade aparente, em KAZI 1988, diferentemente da relação proposta por BROTONS 2014, resultou na melhor correlação apresentada dentre todas as equações de correção estudadas.

A equação desenvolvida a partir de 600 leituras de ondas ultrassônicas por LACY em 1997, especificamente para rochas sedimentares (onde foi alcançado uma correlação de 0,75 em arenitos) também conseguiu melhorar a aderência entre as constantes elásticas, embora não de forma drástica, sem, no entanto, lançar mão de outras variáveis senão os módulos dinâmicos. De fato, conta apenas com índices que moderam a leitura dinâmica como visto na equação 21.

$$E_{st} = 0.018E_{dyn}^2 + 0.422E_{dyn} \quad (21)$$

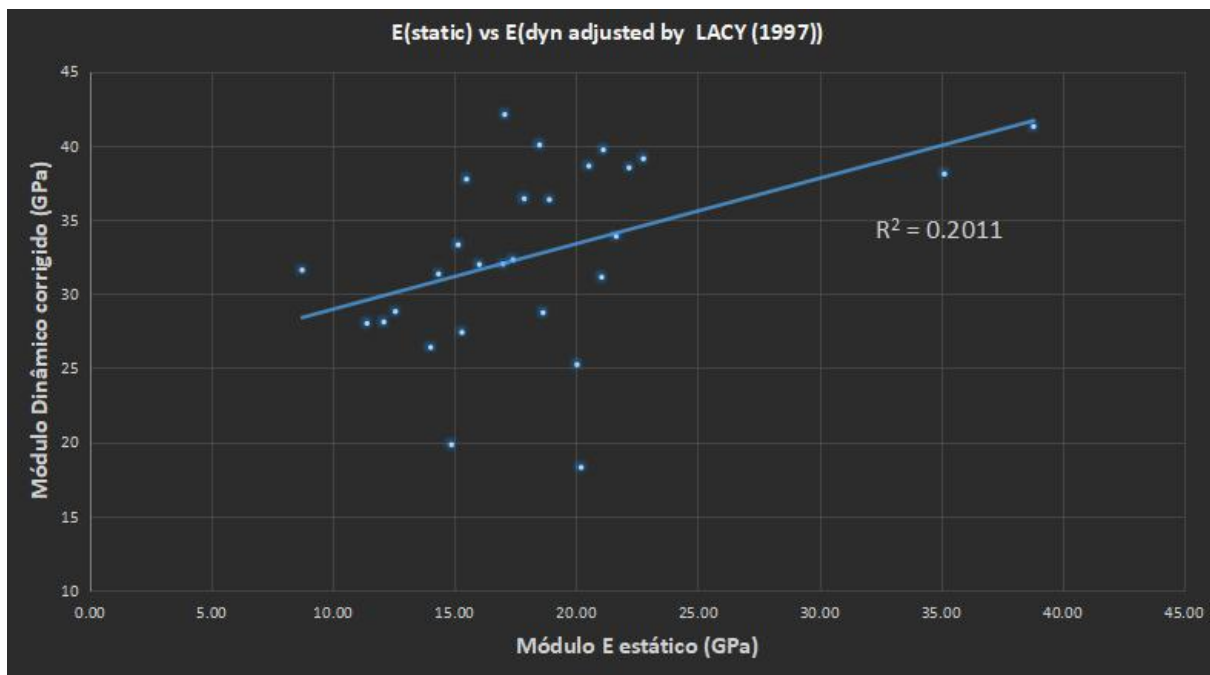


Figura 74 A correlação de 0,2011 alcançada por LACY embora não melhore consideravelmente a qualidade dos dados dinâmicos (que apresentam uma correlação original de 0,1815 com o estático) cumpre seu objetivo embora marginalmente.

Passando para a equação de correção proposta por HEERDEN em 1987, temos outra equação modelada especialmente para arenitos e granitos. Uma especificidade do método de ensaio é que ambas as medidas, estáticas e dinâmicas, nesse estudo, foram tomadas simultaneamente através de um dispositivo que aprisiona os transdutores entre os braços hidráulicos que comprimem a amostra. Por conta disso, os valores de velocidade de onda são alterados à medida que o carregamento

umenta em razão da diminuição do comprimento da amostra e também da alteração de propriedades físicas e alterações na dinâmica de microfissuras da amostra. Os coeficientes “a” e “b” da equação são função da etapa de carregamento onde as leituras são tomadas.

$$E_{st} = a E_{dyn}^b \quad \begin{array}{l} a [0.097 - 0.152] \\ b [1.485 - 1.388] \end{array} \quad (22)$$

Equação 12, de HEERDEN. Os coeficientes "a" e "b" considerados aqui foram os maiores disponíveis (0,152 - 1,388). Essa escolha corresponde ao momento de leitura de maior carregamento sobre a amostra e também correspondeu ao melhor desempenho dessa equação em termos de correlação alcançada.

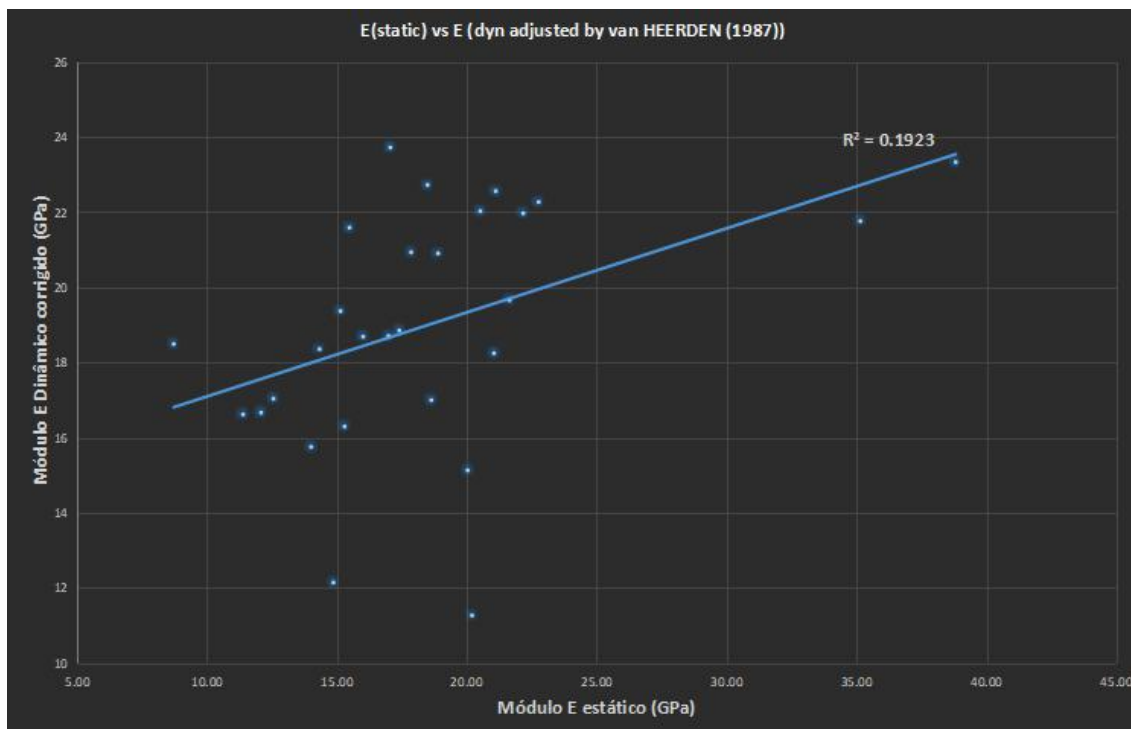


Figura 75 Correlação após ajustes por HEERDEN

Diversas outras equações universais e também específicas para arenitos foram testadas sem sucesso, mantendo ou até degradando a correlação original. Entre elas as equações de FEI *et al.*(2016), de NUR & WANG (1999), CHRISTARAS *et al.*(1994) , uma segunda equação de EISSA & KAZI (1988) e CANADY (2011). Algumas das razões para isso foram sugeridas neste capítulo mas talvez caibam outros, a sombra da literatura já disponível sobre o método de aquisição ultrassônico de laboratório. A possibilidade de

o formato da amostra ter controlado esse efeito pode ser elencado aqui embora seja sabido que diversos dos trabalhos que modelaram as equações utilizadas tenham seus ensaios estáticos e dinâmicos realizados com a mesma geometria de amostra controlando correlações muito mais satisfatórias. As equações utilizada por AYDIN (2014) (uma sugestão de norma para realização de ensaios dinâmicos de módulos elásticos e que prevê ensaios com o perfil de amostra utilizado no presente trabalho) também foram aplicadas e retornaram resultados também pobres.

Diferentes modelos de regressão foram testados como o exponencial, logarítmico e o polinomial. Todos retornaram baixa correlação. De fato, uma baixíssima correlação entre os dados estáticos e dinâmicos têm sido encontrado para litologias díspares em outros trabalhos, dentre eles a correlação de $R^2=0,178$ em hematitas e $R^2= 0,014$ em itabiritos encontradas em MORAES (2016) e também a correlação de $R^2=0,0455$ encontrada em calcários por CANNADAY (1964).

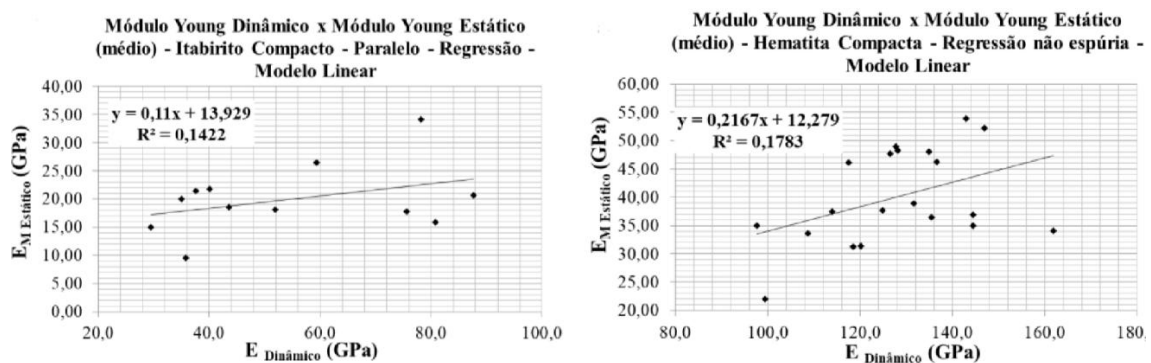


Figura 76 Correlação entre dados estáticos e dinâmicos em Itabirito (esquerda) e Hematita (direita) em MORAES (2016).

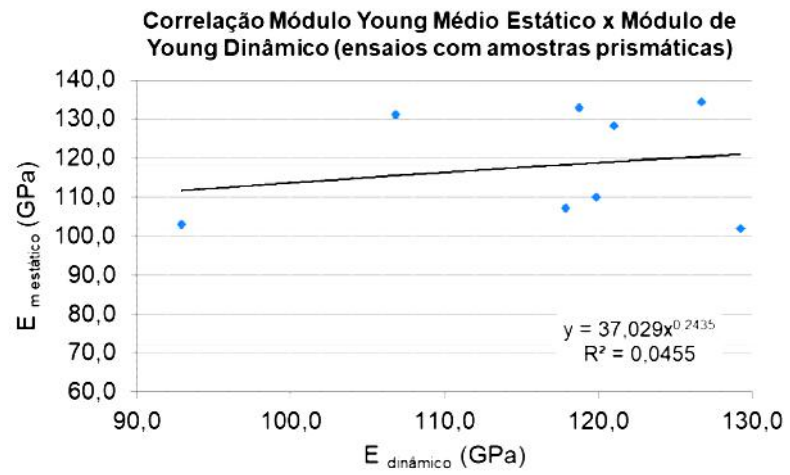


Figura 77 Correlação entre dados estáticos e dinâmicos em calcários de CANNADAY (1964) apud MORAES (2016).

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHO

Os resultados, portanto e em resumo, apontam ausência de correlação entre os coeficientes de Poisson estático e dinâmico. Também apontam ausência de correlação da velocidade de onda cisalhante com os parâmetros de densidade e porosidade. As constantes elásticas estáticas não convergiram com as dinâmicas quando tomadas no ponto da curva de carregamento a 25% da tensão de ruptura. A tensão de ruptura tomada do ensaio uniaxial (UCS) apresentou correlação baixa com a velocidade de onda P ($R^2=0,187$) e S ($R^2=0,277$).

Algumas das relações generalistas citadas na literatura também retornaram baixo incremento da correlação quando não a erodiram. Em destaque ficam as equações de EISSA & KAZI (1988) e a de LACY (1997) capazes dos maiores incrementos.

Estes resultados evidenciam, primeiramente, a dificuldade de obter medidas acuradas das velocidades de onda cisalhantes manualmente. Avanços nesse aspecto têm sido implementados, como a identificação automatizada do momento de desembarque da onda S (COBERTT, 2016), assim como já ocorre com a detecção do momento de desembarque da onda P.

Também fica evidente a dificuldade de conciliação entre as constantes obtidas por vias diretas e indiretas. Equações generalistas e mesmo aquelas modeladas a partir de litologias semelhantes acabaram surtindo efeito contrário ao proposto, desassociando as medições indiretas das diretas. Em alguma medida, a necessidade por modelos particulares a cada levantamento acaba sobressaindo, enquanto sistemas confiáveis de classificação de maciços, apoiados nas constantes elásticas dinâmicas, não ganham maturidade.

As restrições acerca do *shape* das amostras e da aplicabilidade do pundit, apesar de não serem reforçadas aqui, também não podem ser menosprezadas dada a variedade de acidentes de microfratura e a sensibilidade do método a elas. Como mostrado em BARTON (2007), mesmo ensaios estáticos de laboratório podem encerrar superestimativas acerca da resistência do maciço. Os métodos de

determinação estáticos *in-situ* podem superar esse desvio previsível e os métodos de perfilagem de poço surgem como alternativa mais rentável a eles.

Sugestão para trabalhos futuros

Algumas propostas de trabalhos futuros podem ser elencados a partir dos desafios encontrados neste.

Uma primeira proposta de trabalho, a ser realizado como um passo consequente desta dissertação, seria a análise das correlações de constantes estáticas e as constantes dinâmicas obtidas pela nova geração de equipamentos de obtenção de leituras de onda cisalhantes, capazes de leituras automatizadas e muito mais acertadas do tempo de trânsito da onda "S". Destaque-se o transdutor de ondas S da Proceq, o "*E-modulus Pundit Dry-Point Shear Wave Transducer*".

Ainda nessa linha (de melhora da qualidade das leituras de velocidade das ondas sônicas), existe a possibilidade de reanálise dos gráficos de trem de onda deste trabalho (presentes na seção de apêndices) e reavaliação do ponto de chegada da ondas "P" e "S".

A geração de dados de correlação entre resultados oriundos de métodos geofísicos de campo (em especial o *Well Logging*) e constantes estáticas advindas de medições *in situ* também pode criar observações fecundas das assinaturas geofísicas frente ao comportamento geomecânico da rocha em seu contexto original.

Por fim, é levantada a sugestão de reproduzir os métodos presentes neste trabalho, contando agora com instrumentação mais robusta em termos de manuseabilidade; contando também com um número maior de ensaios e amostras de diferentes litologias, além de maior refinamento estatístico, necessário a essa natureza mais abrangente de estudo.

6.0 BIBLIOGRAFIA

AL-SHAYEA, Naser A. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock. **Engineering Geology**, v. 74, n. 1–2, p. 139–156, 2004.

ASEF, Mohammad Reza; NAJIBI, Ali Reza. The effect of confining pressure on elastic wave velocities and dynamic to static Young's modulus ratio. **GEOPHYSICS**, v. 78, n. 3, p. D135–D142, 2013.

AYDIN, Adnan. Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 47, n. 1, p. 255–259, 2014.

BADAWI, MM. **Principles of Well Logging and Formation evaluation**, Faculty of Science, Alexandria University. Egypt 2016. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/MahmoudMBadawy1/principles-of-well-logging-and-formation-evaluation-mmbadawy>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

BARTON, Nick. **Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy**. London ; New York: Taylor & Francis, 2007. (Balkema-proceedings and monographs in engineering, water and earth sciences).

BASSIOUNI, Zaki. **Theory, measurement, and interpretation of well logs**. Richardson, TX: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1994. (SPE textbook series, vol. 4).

BEDFORD, A.; DRUMHELLER, D. S. **Introduction to elastic wave propagation**. Chichester [England] ; New York: Wiley, 1994.

BOTT, Martin Harold Phillips. **The interior of the earth, Its Structure Constitution and Evolution**. New York: Elsevier, 1982.

BROTOS, V.; TOMÁS, R.; IVORRA, S.; *et al.* Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. **Materials and Structures**, v. 49, n. 8, p. 3021–3037, 2016.

BUDIANSKY, Bernard; O'CONNELL, Richard J. Elastic moduli of a cracked solid. **International Journal of Solids and Structures**, v. 12, n. 2, p. 81–97, 1976.

CANADY, Wyatt Jackson. A Method for Full-Range Young's Modulus Correction. *In: North American Unconventional Gas Conference and Exhibition*. The Woodlands, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2011. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/143604-MS>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

CANNADAY, Francis X. **Modulus of Elasticity of a Rock Determined by Four Different Methods**. [Washington, D.C.]: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1964.

CHRISTARAS, B.; AUGER, F.; MOSSE, E. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. **Materials and Structures**, v. 27, n. 4, p. 222–228, 1994.

CORBETT, David M. and Ringstrasse. Advances in ultrasonic testing-Research into the application of dry point contact transducers . *In: 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)*. Munich, Germany. 2016 Disponível em <<https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we4a4.pdf> >Acesso em 27 Fev 2020

DANTAS, J. M. (2018) **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. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da UFRGS, 2018. 112f

D18 COMMITTEE. **Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances.** [s.l.]: ASTM International, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D4543-01>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

D18 COMMITTEE. **Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.** [s.l.]: ASTM International, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2845-08>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

D18 COMMITTEE. **Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.** [s.l.]: ASTM International, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2938-95R02>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

D18 COMMITTEE. **Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression.** [s.l.]: ASTM International, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D3148-02>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

EISSA, E.A.; KAZI, A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 25, n. 6, p. 479–482, 1988.

ELLIS, Darwin V. **Well logging for earth scientists.** 2nd ed. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2007.

ELLIS, D. V. **Nuclear Logging Techniques.** In: Bradley H (editor) *Petroleum Production Handbook*. SPE, Dallas, 1987.

E28 COMMITTEE. **Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages.** [s.l.]: ASTM International, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E251-92R14>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

E28 COMMITTEE. **Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages**. [s.l.]: ASTM International, [s.d.]. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E1237-93R14>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

FEI, W.; HUIYUAN, B.; JUN, Y.; YONGHAO, Z. Correlation of Dynamic and Static Elastic Parameters of Rock. **Electron. J. Geotech. Eng.**, v 21, p. 1551–1560, 2016

FEYNMAN, Richard P; LEIGHTON, Robert B; SANDS, Matthew L. **The Feynman lectures on physics. Volume II, Volume II**. [s.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <<http://site.ebrary.com/id/10753917>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

HEERDEN, W.L. General relations between static and dynamic moduli of rocks. **Int. J. Rock Mech. Min Sci. & Geomech. Abstr.** Vol 24. n.6. p. 381-385, 1987.

HOFFMAN, G. L; JORDAN, G. R; WALLIS, G. R; *et al.* **Geophysical borehole logging handbook for coal exploration**. Edmonton: Coal Mining Research Centre, 1982.

JAEGER, C. **Rock Mechanics and Engineering**. 1. ed. [s.l.]: Cambridge University Press, 1979. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511735349/type/book>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KELSALL, Peter C.; WATTERS, Robert J.; FRANZONE, Joseph G. Engineering Characterization Of Fissured, Weathered Dolerite And Vesicular Basalt. *In*: **ARMA-86-0077**. ARMA: American Rock Mechanics Association, 1986, p. 8.

LACY, Lewis L. Dynamic Rock Mechanics Testing for Optimized Fracture Designs. *In*: **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. San Antonio, Texas: Society of

Petroleum Engineers, 1997. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/38716-MS>>. Acesso em: 3 mar. 2020.

LAMA, R. D.; VUTUKURI, V. S. **Handbook on mechanical properties of rocks: testing techniques and results. 2: ...** 1. print. Clausthal: Trans Tech Publications, 1978. (Vol. 3, No. 1).

LAPP, Ralph Eugene; ANDREWS, Howard Lucius. **Nuclear radiation physics.** 4th ed. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1972.

LOCKNER, D. A.; WALSH, J. B.; BYERLEE, J. D. Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, n. 33, p. 5374–5378, 1977.

MAHMOUD, Ahmed Abdulhamid; ELKATATNY, Salaheldin; ALI, Abdulwahab; *et al.* Estimation of Static Young's Modulus for Sandstone Formation Using Artificial Neural Networks. **Energies**, v. 12, n. 11, p. 2125, 2019.

MAVKO, Gary; MUKERJI, Tapan; DVORKIN, Jack. **The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media.** 2nd ed. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2009.

MORAES ,V. (2018) **Proposta de metodologia de correlação entre módulos de elasticidade estático e dinâmico para litologias típicas do quadrilátero ferrífero de minas gerais.** Ouro Preto. Dissertação de Mestrado, Programa De Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP , Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da UFOP, 2018. 226f

NUR, Amos; WANG, Zhijing (Orgs.). **Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks.** Tulsa, Okla: Society of Exploration Geophysicists, 1989. (Geophysics reprint series, no. 10, <no. 19 >).

PEREIRA, W. R.; Carlos, D; U. **Method and System for Quality Control in Gammagamma Data during Mineral Exploration**. Patente n° US2015/0316678 A1. United States Patent and Trading Office (USPTO), 2015.

PEREIRA,W.(2017) **Perfilagem geofísica aplicada à determinação de parâmetros geomecânicos em maciços rochosos**.Ouro Preto.Dissertação de Mestrado, Programa De Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP , Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da UFOP, 2017. 214f

PROCEQ SA. **Pundit: Instruções De Operação**.PROCEQ, Schwerzenbach 2015 .Disponível em: <https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%202_Operating%20Instructions_Portuguese.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2020.

ROCHA, L., AZEVEDO, C. **Projetos de poços de petróleo: geopressões e assentamento de colunas de revestimentos**, Rio de Janeiro: Interciências: Petrobras, 2007.

SCHÖN, Jürgen H.; DASGUPTA, A. **Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics**. 2nd. ed. Amsterdam: Elsevier, 2015. (Developments in petroleum science, Volume 65).

SERRA, Oberto. **Well logging handbook**. Paris: Ed. Technip, 2008.

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**. 2. ed. [s.l.]: Cambridge University Press, 1990. Disponível em:

<<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781139167932/type/book>>.

Acesso em: 13 mar. 2020.

TIMUR, Aytakin. Open Hole Well Logging. *In: International Petroleum Exhibition and Technical Symposium*. Beijing, China: Society of Petroleum Engineers, 1982. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/10037-MS>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

WHITE, J. E. **Underground sound: application of seismic waves**. Amsterdam ; New York: Elsevier, 1983. (Methods in geochemistry and geophysics, 18).

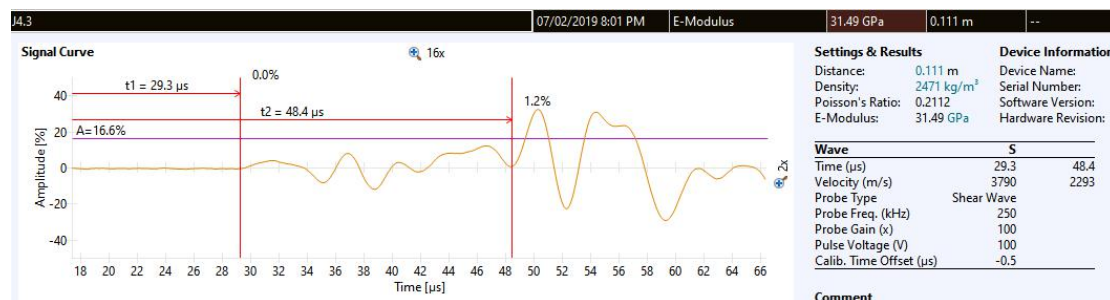
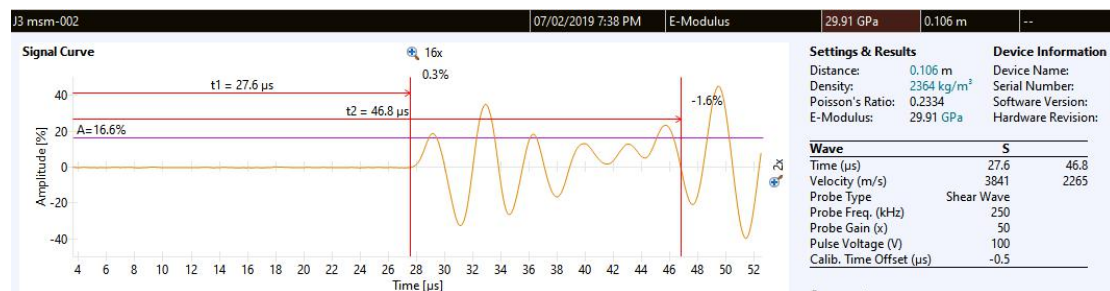
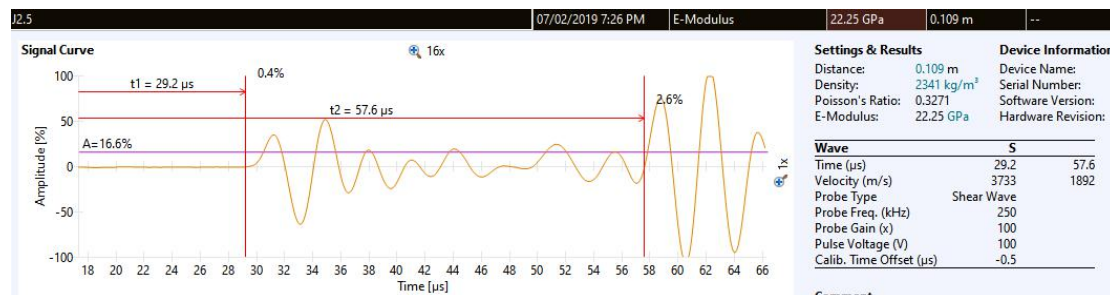
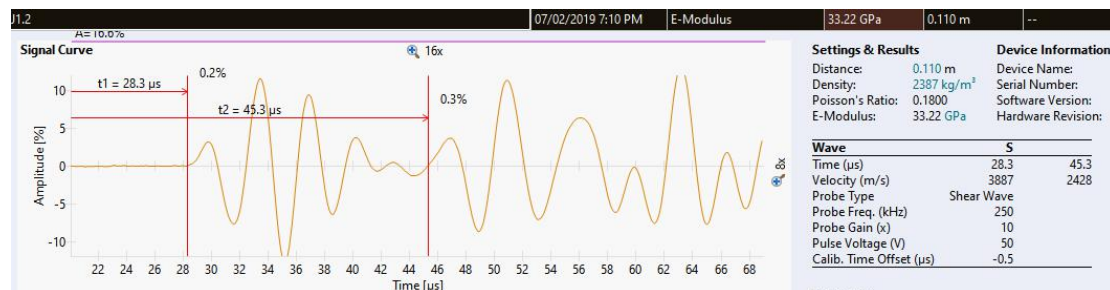
WYERING, L.D.; VILLENEUVE, M.C.; WALLIS, I.C.; *et al.* Mechanical and physical properties of hydrothermally altered rocks, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 288, p. 76–93, 2014.

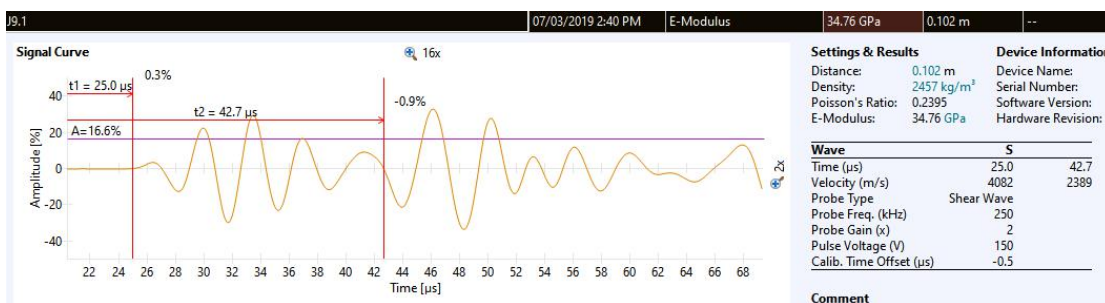
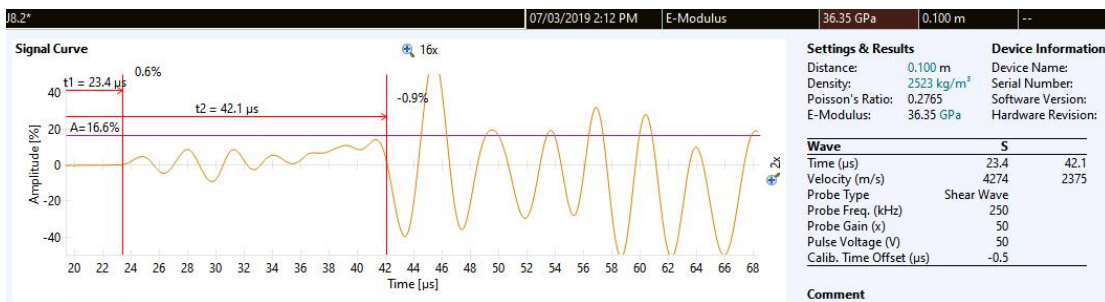
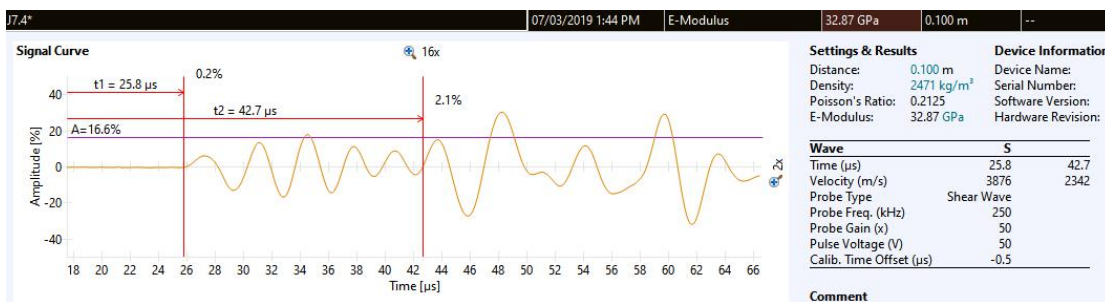
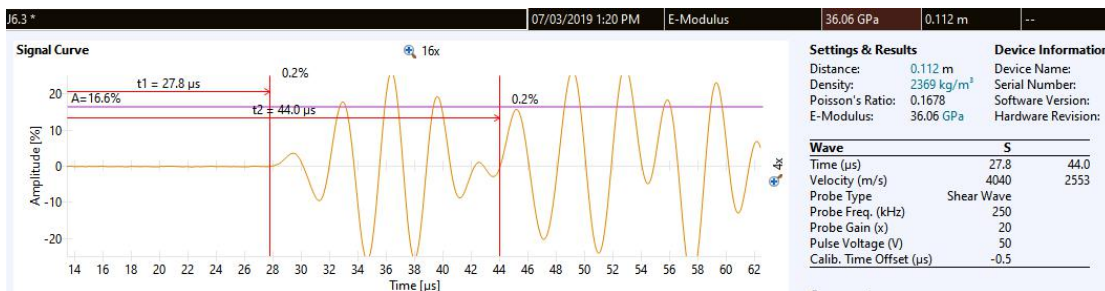
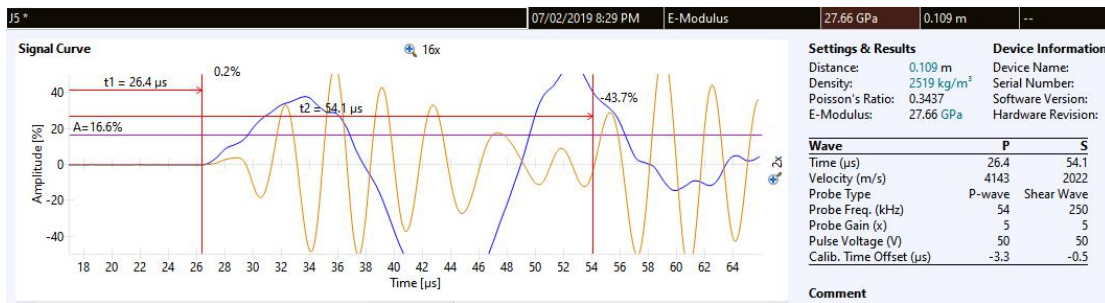
VOTORANTIM/GEOPROSPEC. **EIA - Estudo de Impacto Ambiental do Projeto Cacapava do Sul**. Vol 2. GeoProspec Estratégia Ambiental.2016.Disponível em <<https://www.yumpu.com/pt/document/read/58209307/eia-projeto-cacapava-do-sul-vol-1-contextualizacao>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

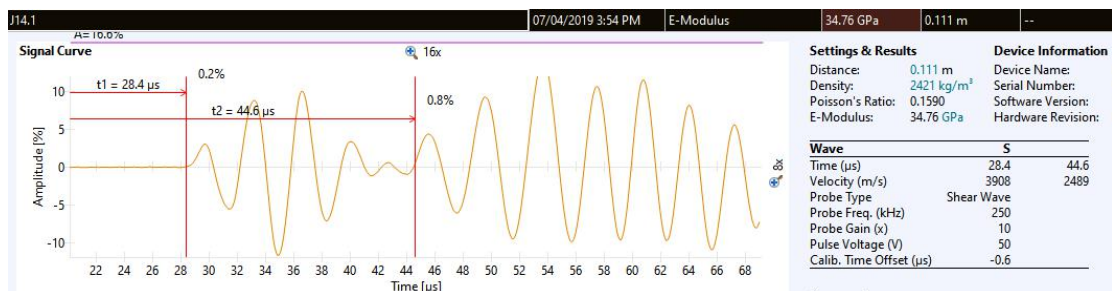
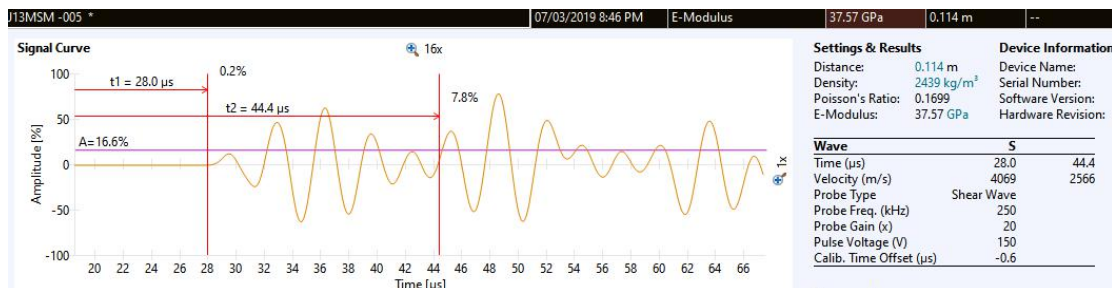
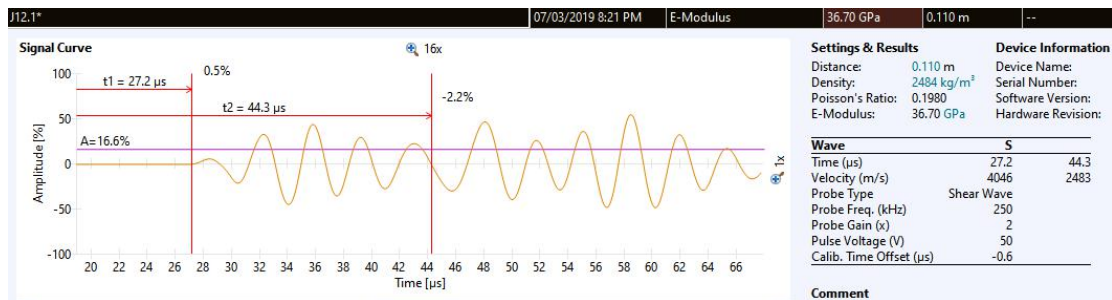
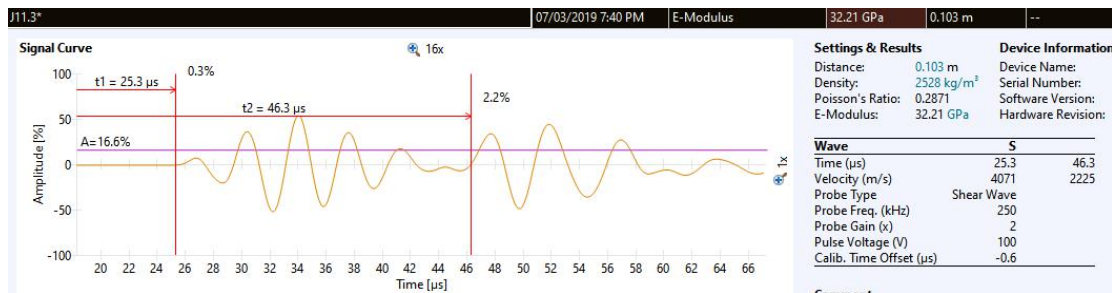
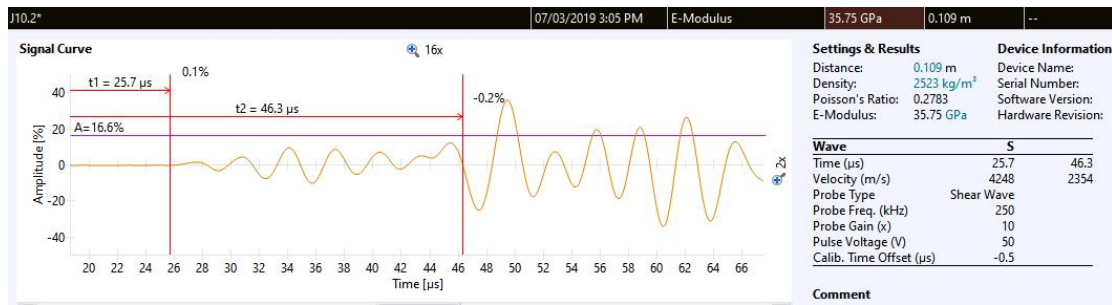
ZHANG, Lianyang. **Engineering properties of rocks**. Second edition. Kidlington, Oxford ; Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2017.

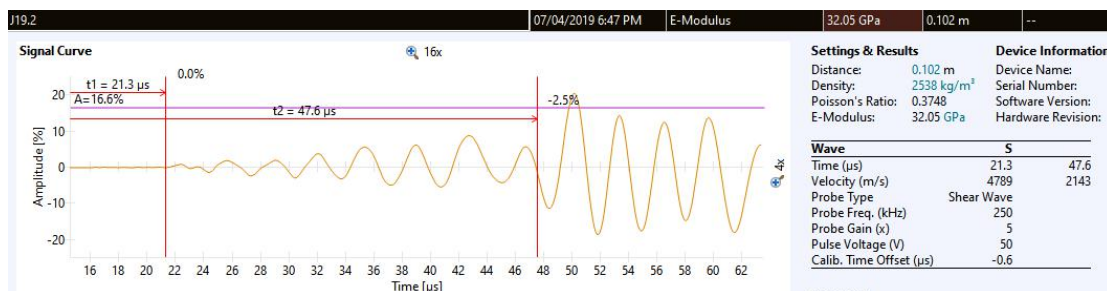
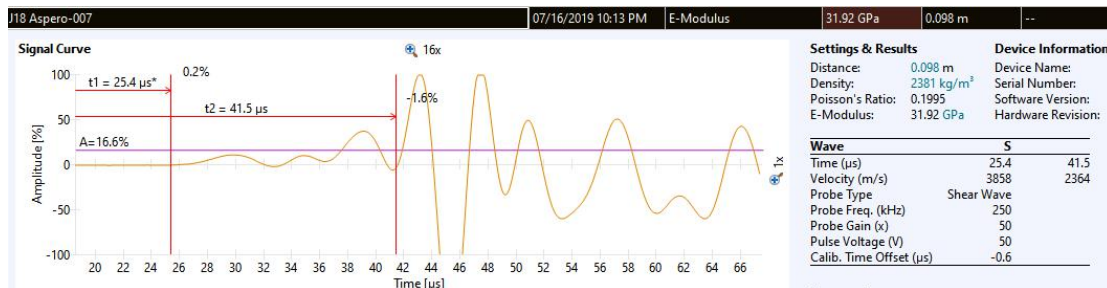
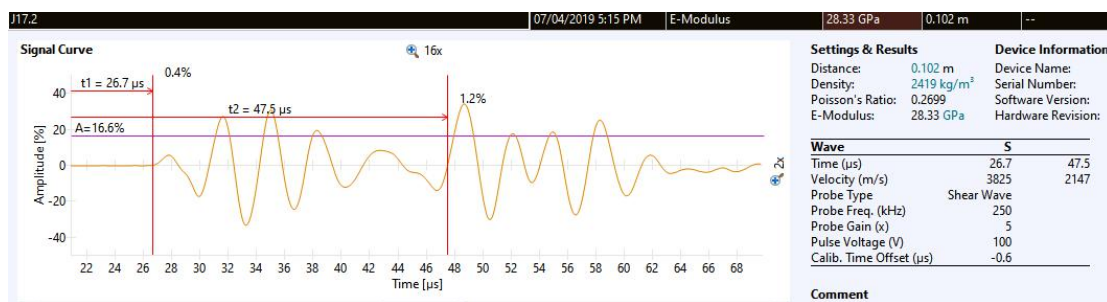
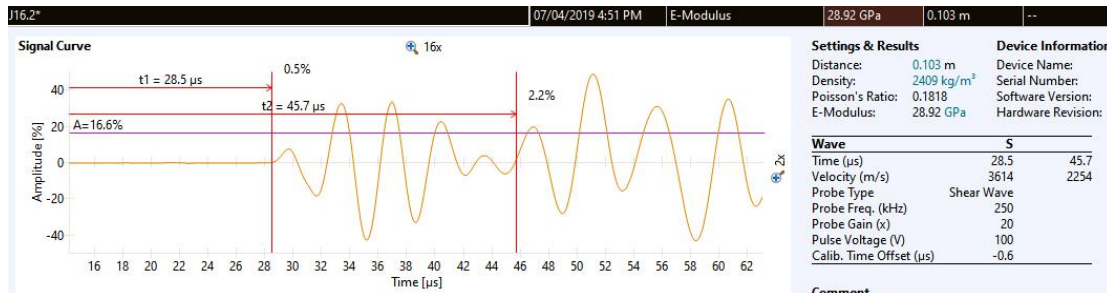
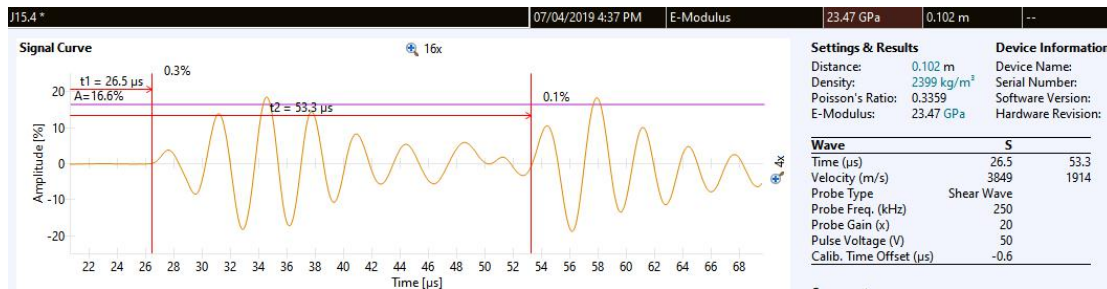
7.0 APÊNDICE

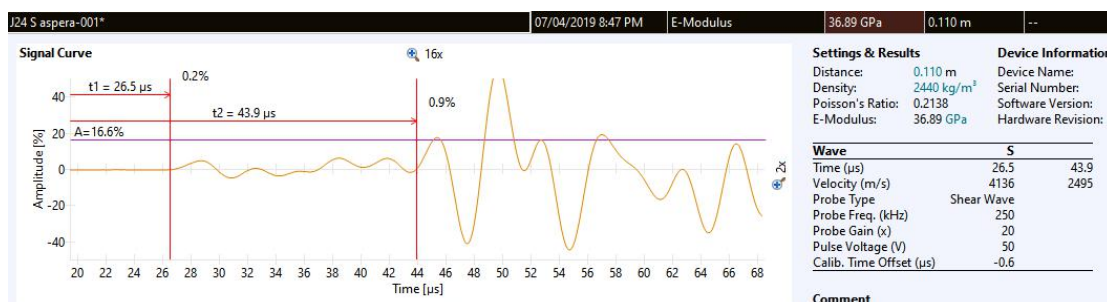
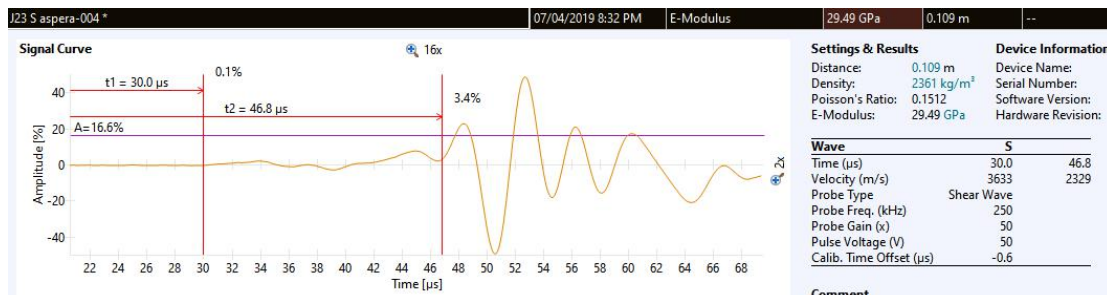
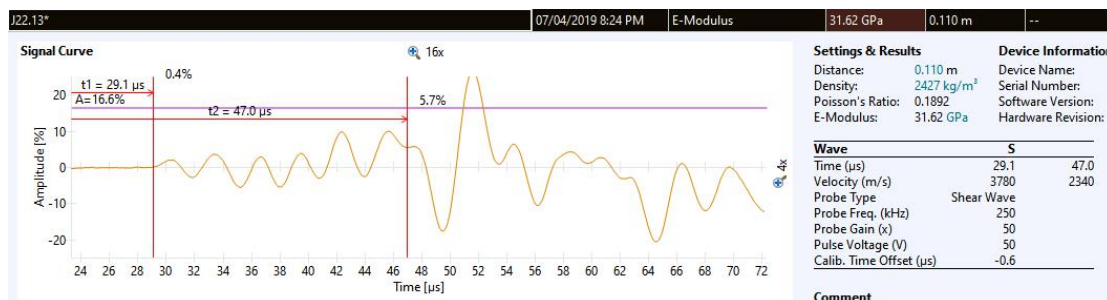
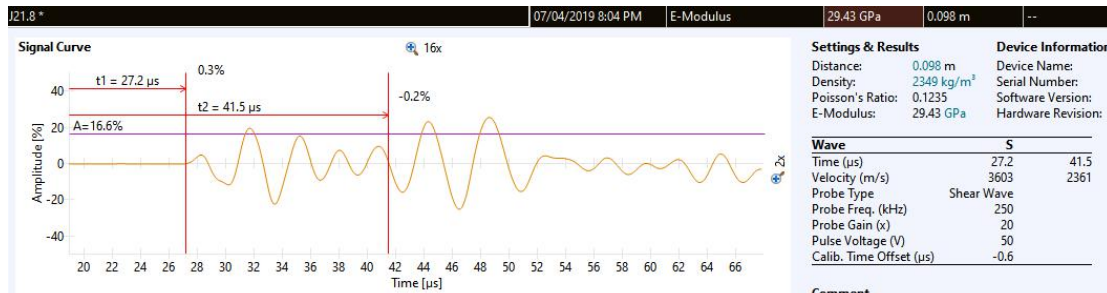
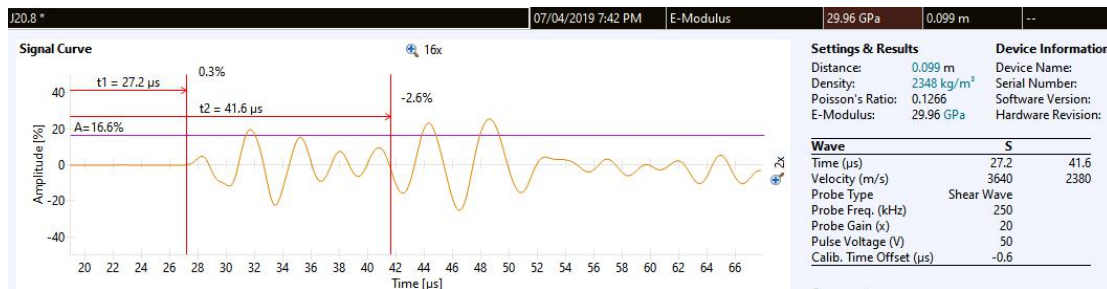
7.1 Leituras de Ondas Ultrassônicas

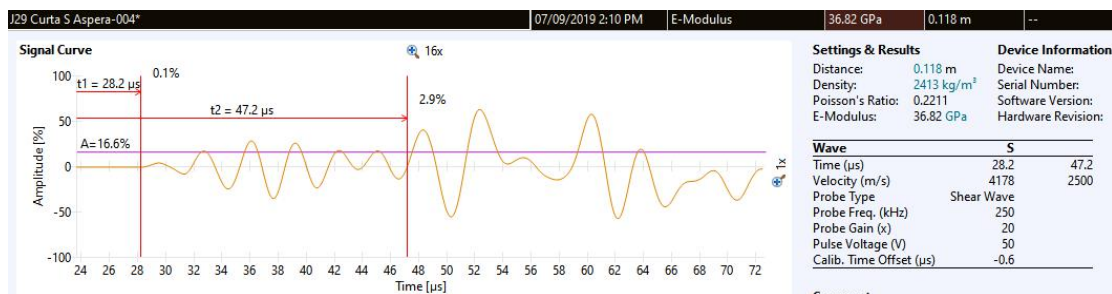
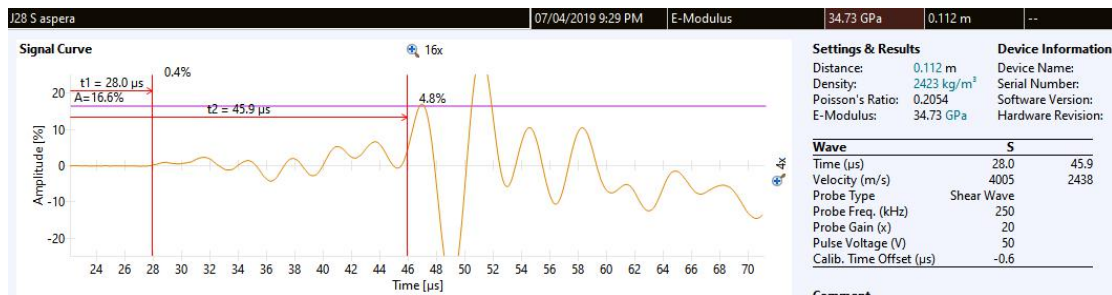
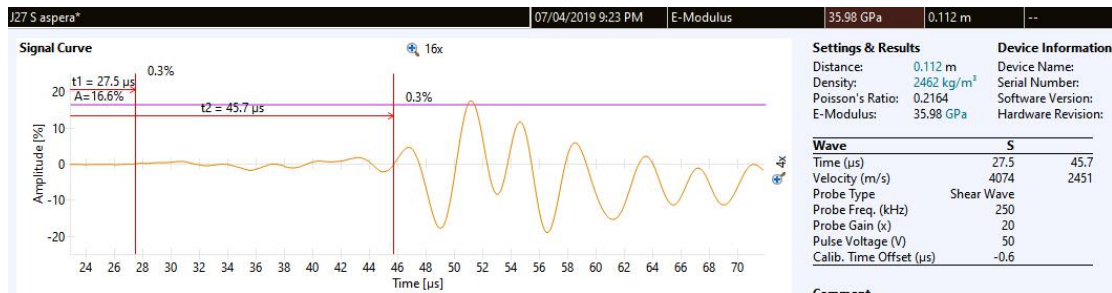
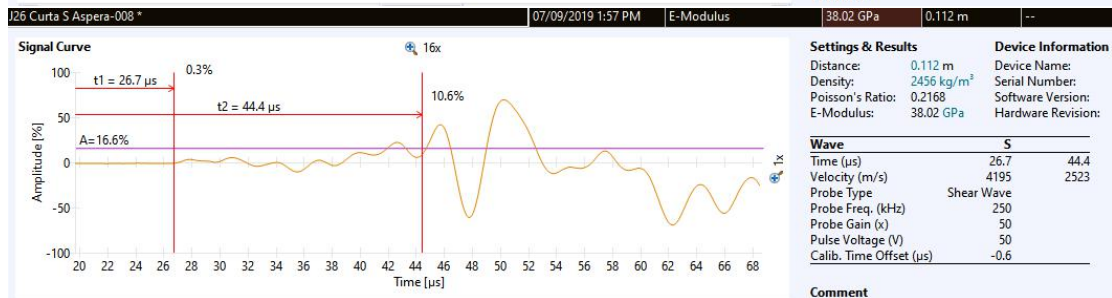
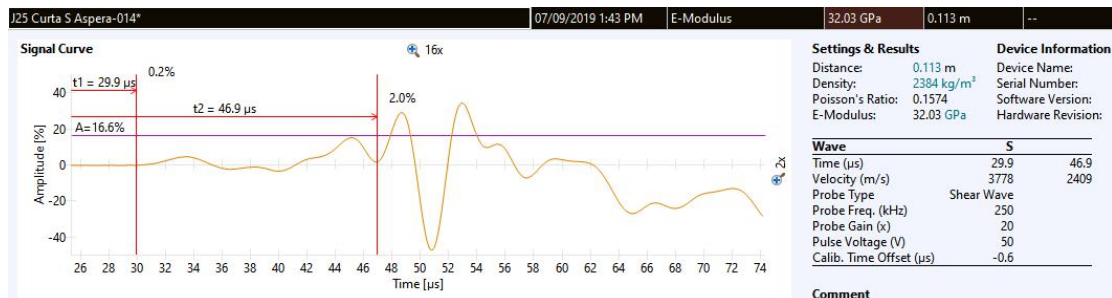


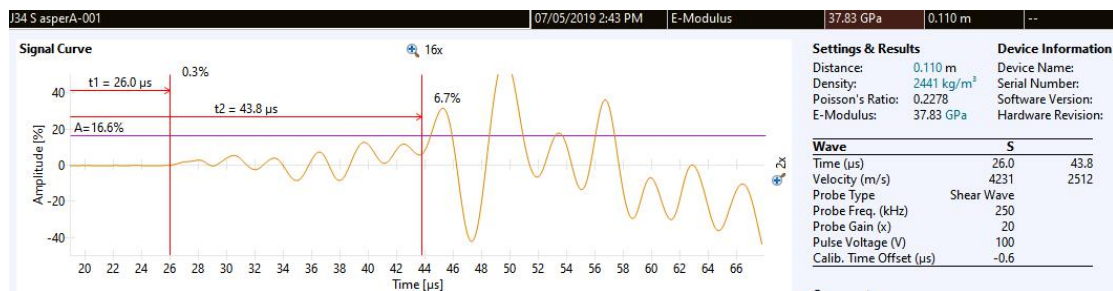
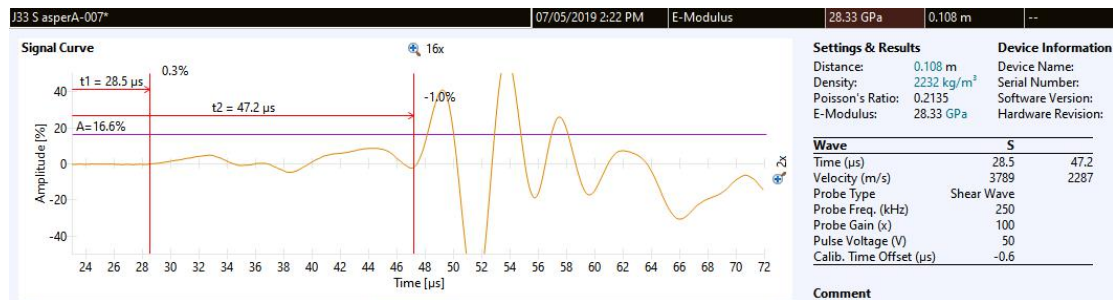
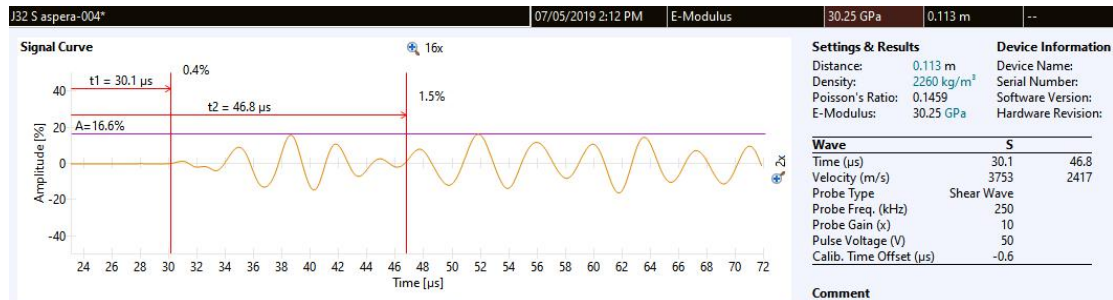
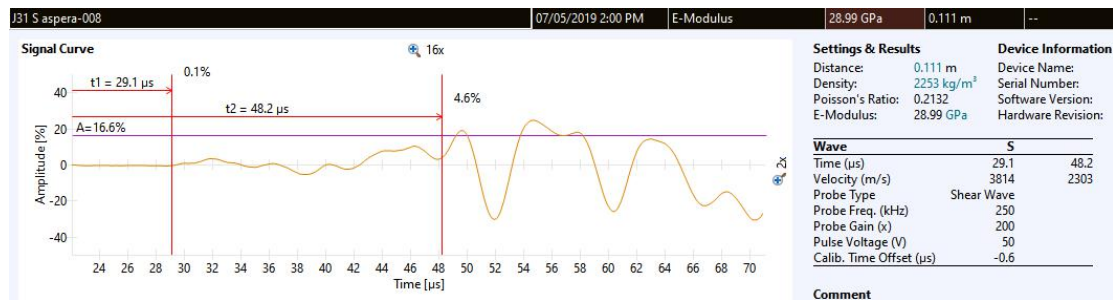
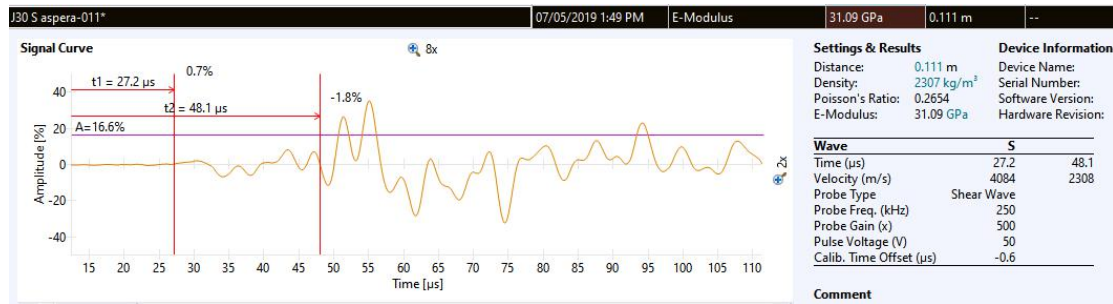


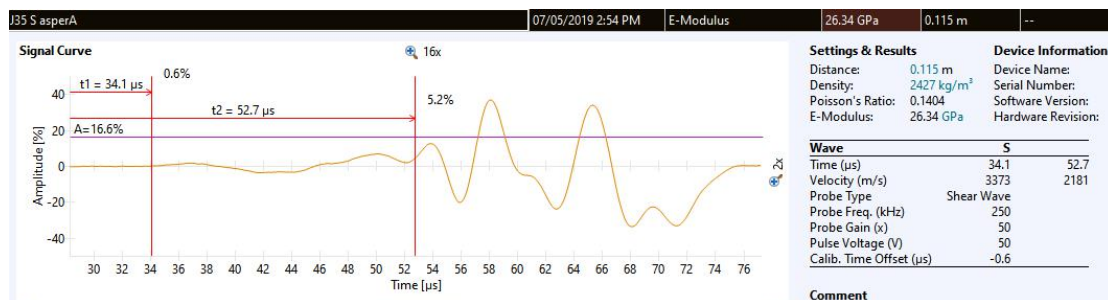












7.2 Compilado de Dados

Amostra	Módulo de Young E(GPa)		Coeficiente de Poisson (ν)		Velocidade de Onda (m/s)		Propriedades Físicas		UCS (MPa)
	Estático	Dinâmico	Estático	Dinâmico	Compressional(P)	Cisalhante(S)	Densidade (Kg/m ³)	Porosidade(%)	
J1	21.64	33.22	0.20	0.18	3887	2428	2387.38	9.67	95.86
J2	20.20	22.24	0.13	0.33	3733	1892	2340.96	10.99	96.74
J3	18.63	29.91	0.29	0.23	3840	2265	2363.99	10.73	86.97
J4	21.04	31.48	0.22	0.21	3790	2293	2471.41	7.89	98.47
J5	20.03	27.51	0.29	0.34	4065	2022	2518.60	7.48	72.97
J6	20.52	36.06	0.24	0.17	4040	2553	2369.03	11.51	111.41
J7	15.14	32.86	0.10	0.21	3875	2342	2471.16	8.30	103.94
J8	22.76	36.34	0.26	0.28	4274	2375	2523.38	6.98	118.97
J9	15.48	35.54	0.12	0.23	4080	2429	2457.40	8.59	105.35
J10	35.14	35.74	0.32	0.28	4248	2354	2522.77	6.44	108.08
J11	17.40	32.23	0.15	0.29	4075	2225	2527.92	7.21	108.62
J12	21.11	36.68	0.20	0.20	4046	2483	2483.54	7.72	132.23
J13	38.81	37.58	0.24	0.17	4070	2566	2439.01	8.60	143.07
J14	17.86	34.76	0.13	0.16	3908	2489	2420.90	8.85	120.99

J15	14.87	23.48	0.17	0.34	3849	1914	2398.88	9.87	90.16
J16	15.30	29.02	0.24	0.19	3627	2254	2409.10	9.95	124.16
J17	14.01	28.32	0.32	0.27	3825	2147	2418.64	9.05	113.48
J18	8.72	31.79	0.23	0.20	3858	2356	2380.79	10.37	108.46
J19	16.98	32.05	0.18	0.37	4790	2143	2538.08	5.61	107.30
J20	12.56	29.96	0.27	0.13	3640	2380	2347.65	12.05	94.15
J21	11.39	29.43	0.37	0.12	3603	2361	2349.07	11.50	82.03
J22	14.33	31.62	0.16	0.19	3780	2340	2427.41	9.14	87.02
J23	12.08	29.49	0.28	0.15	3633	2329	2361.37	10.92	77.62
J24	18.49	36.88	0.28	0.21	4135	2495	2440.27	8.69	136.35
J25	16.01	32.03	0.28	0.16	3778	2409	2384.02	10.18	97.82
J26	17.06	38.03	0.28	0.22	4195	2523	2455.50	8.19	118.76
J27	22.17	35.99	0.18	0.22	4074	2451	2462.42	7.47	165.25
J28	18.89	34.72	0.17	0.21	4005	2438	2422.53	8.01	130.15
J29	9.49	36.83	0.02	0.22	4178	2500	2412.63	8.65	139.39
J30	7.72	31.10	0.02	0.27	4084	2308	2307.05	11.59	115.19
J31	8.86	29.07	0.05	0.21	3814	2308	2252.83	13.34	112.66
J32	8.78	30.25	0.05	0.15	3753	2417	2259.68	12.73	111.97
J33	7.79	28.33	0.11	0.21	3789	2287	2231.58	13.43	89.71
J34	8.69	37.83	0.14	0.23	4231	2512	2441.35	7.24	104.69
J35	8.74	26.34	0.03	0.14	3373	2181	2427.14	8.35	81.56
Médias	16.534	32.134	0.191	0.219	3941.286	2336.257			108.330

7.3 Módulo de Young corrigido

Amostra	Módulo de Young E(GPa)		Módulo de Young dinâmico corrigido (GPa)							
	Estático	Dinâmico	FEI	CANADY	NUR & WANG	EISSA & KAZI	LACY	BROTONS	HEERDEN	CHRISTARAS
J1	21.64	33.22	15.24	31.24	23.10	30.37	33.88	26.39	19.66	31.72
J2	20.20	22.24	9.05	18.45	10.45	21.97	18.29	16.12	11.27	20.20
J3	18.63	29.91	13.38	27.28	19.29	27.80	28.73	23.25	17.00	28.25
J4	21.04	31.48	14.26	29.15	21.10	29.93	31.12	24.28	18.24	29.89
J5	20.03	27.51	12.02	24.45	16.51	27.37	25.23	20.34	15.13	25.72
J6	20.52	36.06	16.84	34.70	26.37	32.16	38.62	29.34	22.03	34.70
J7	15.14	32.86	15.04	30.81	22.69	30.93	33.31	25.63	19.36	31.35
J8	22.76	36.34	17.00	35.05	26.70	33.97	39.11	28.79	22.27	35.00
J9	15.48	35.54	16.55	34.06	25.77	32.71	37.73	28.33	21.59	34.15
J10	35.14	35.74	16.67	34.32	26.01	33.53	38.08	28.20	21.76	34.37
J11	17.40	32.23	14.68	30.05	21.96	31.01	32.30	24.75	18.85	30.68
J12	21.11	36.68	17.20	35.47	27.10	33.80	39.70	29.34	22.56	35.36
J13	38.81	37.58	17.70	36.58	28.13	33.95	41.29	30.50	23.33	36.30
J14	17.86	34.76	16.11	33.11	24.88	31.79	36.41	27.75	20.93	33.34
J15	14.87	23.48	9.75	19.84	11.87	23.33	19.83	17.06	12.14	21.49

J16	15.30	29.02	12.87	26.22	18.26	27.56	27.40	22.19	16.29	27.31
J17	14.01	28.32	12.48	25.40		27.13	26.39	21.48	15.75	26.57
J18	8.72	31.79	14.43	29.51		29.30	31.60	25.00	18.49	30.22
J19	16.98	32.05	14.58	29.83	21.76	30.97	32.02	24.54	18.70	30.49
J20	12.56	29.96	13.41	27.34		27.69	28.81	23.37	17.04	28.30
J21	11.39	29.43	13.10	26.71		27.32	28.01	22.85	16.62	27.74
J22	14.33	31.62	14.34	29.31		29.61	31.33	24.62	18.35	30.04
J23	12.08	29.49	13.14	26.78		27.48	28.10	22.85	16.66	27.80
J24	18.49	36.88	17.30	35.71	27.32	33.47	40.04	29.77	22.72	35.56
J25	16.01	32.03	14.57	29.80	21.73	29.50	31.98	25.22	18.68	30.47
J26	17.06	38.03	17.96	37.14	28.65	34.45	42.09	30.86	23.72	36.78
J27	22.17	35.99	16.80	34.61	26.29	33.08	38.50	28.76	21.97	34.63
J28	18.89	34.72	16.09	33.06	24.83	31.78	36.35	27.70	20.90	33.30
J29	9.49	36.83	17.28	35.65		33.15	39.95	29.88	22.68	35.51
J30	7.72	31.10	14.05	28.70		28.12	30.54	24.68	17.94	29.50
J31	8.86	29.07	12.90	26.28		26.21	27.48	22.93	16.33	27.36
J32	8.78	30.25	13.57	27.68		27.09	29.23	24.07	17.26	28.60
J33	7.79	28.33	12.48	25.41		25.50	26.40	22.30	15.76	26.58
J34	8.69	37.83	17.84	36.89		34.15	41.72	30.73	23.54	36.56
J35	8.74	26.34	11.36	23.10		25.73	23.60	19.59	14.25	24.50

Média	16.53	32.13	14.63	29.99	22.76	29.83	32.43	25.24	18.85	30.58
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------
