

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola

Vinícius Augusto de Almeida Pereira

**AVALIAÇÃO DA ANISOTROPIA ELÁSTICA DE ROCHAS POR MEIO DA
CARACTERIZAÇÃO POR ULTRASSOM**

Campinas

2019



Vinícius Augusto de Almeida Pereira

AVALIAÇÃO DA ANISOTROPIA ELÁSTICA DE ROCHAS POR MEIO DA CARACTERIZAÇÃO POR ULTRASSOM

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para obtenção do
título de Engenheiro Agrícola à Faculdade
de Engenharia Agrícola da Universidade
Estadual de Campinas.

Orientadora: Profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso

Campinas

2019

2

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P414a Pereira, Vinícius Augusto de Almeida, 1992-
Avaliação da anisotropia elástica de rochas por meio da caracterização por ultrassom / Vinícius Augusto de Almeida Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Cinthya Bertoldo Pedroso.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. módulo de elasticidade. I. Pedroso, Cinthya Bertoldo, 1982-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Evaluation of elastic of rock anisotropy by ultrasound characterization

Palavras-chave em inglês:

modulus of elasticity

Titulação: Engenheiro Agrícola

Banca examinadora:

Raquel Gonçalves

David de Carvalho

Data de entrega do trabalho definitivo: 13-12-2019

Avaliação da anisotropia elástica de rochas por meio da caracterização por ultrassom

Vinícius Augusto de Almeida Pereira

BANCA EXAMINADORA

.....

Orientadora. Profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso

.....

Profa. Dra. Raquel Gonçalves

.....

Prof. Dr. David de Carvalho

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de conclusão de curso ao meu irmão Rafael Augusto de Almeida Pereira, ao meus pais Regina Aparecida de Almeida e Paulo Roberto Pereira e ao meu tio Amilton de Almeida Junior, por toda torcida e apoio prestados durante minha formação acadêmica.

A Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI – UNICAMP), a minha orientadora Profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso, aos meus colegas de curso Euriana Maria Guimarães, João Marcos Quental e Rafaela Marina Leite, e os diretores da FEAGRI, Prof. Dr. Angel Potin Garcia e Prof. Dr. Rafael Augustus De Oliveira.

A todos que utilizarem esta obra como fonte de estudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Jesus Cristo por me fortalecer durante toda a trajetória acadêmica.

Aos funcionários dos laboratórios de Pós-Colheita, Protótipos e de Ensaios não Destrutivos da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP por toda atenção e ensino.

Agradeço a todos os professores Drs. da FEAGRI, aos meus colegas e a minha orientadora Prof.^a Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso pelo ensino e incentivo a pesquisa.

Agradeço aos meus parentes e amigos, especialmente a minha mãe Regina Aparecida de Almeida e meu irmão Rafael Augusto de Almeida Pereira pelo apoio emocional e financeiro prestados durante toda a minha vida.

Um agradecimento especial ao meu orientador de IC Ryuji Soma por toda atenção e ensino prestados.

À FAPESP (Processo nº 2016/00658-4) pelo recurso fornecido para o desenvolvimento da pesquisa.



EPÍGRAFE

“O que sabemos é uma gota, o que não sabemos é um oceano”. (Sir Isaac Newton)

RESUMO

A dificuldade de obtenção dos parâmetros elásticos de um material depende da sua complexidade em termos de anisotropia elástica, a qual caracteriza o material em função da sua resposta aos esforços nas diferentes direções. A anisotropia das rochas é discutida em vários estudos, sendo que muitos deles apresentam resultados de caracterização adotando-a como isotrópica, porém muitos autores citam anisotropia fraca apresentada por esse material. Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento elástico de rochas simulando três condições de anisotropia: isotropia, isotropia transversal e ortotropia por meio de ensaio propagação de onda de ultrassom e comparar os parâmetros obtidos por esse método com os obtidos por meio de ensaio de compressão estática. A caracterização de três tipos de rochas, por meio de ensaio não destrutivo, foi realizada em corpos de prova poliédricos de 26 faces com utilização de equipamento de ultrassom e transdutores de compressão e de cisalhamento de 1,0 MHz de frequência. Para os ensaios destrutivos a caracterização foi realizada para dois tipos de rochas em corpos de prova cilíndricos com o uso de máquina universal de ensaios com uso extensômetros elétricos resistivos acoplados aos cilindros de rocha. Os resultados da pesquisa indicaram comportamento isotrópico das rochas pois, independente do comportamento elástico adotado nas análises (ortotropia, isotropia transversal ou isotropia), não houve diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros elásticos (módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson) nos três eixos de simetria avaliados. Os parâmetros elásticos determinados por ensaio mecânico de compressão estática apresentaram valores inferiores quando comparado com os obtidos por meio de ensaio de propagação de onda.

ABSTRACT

The difficulty in obtaining the elastic parameters of a material depends on its complexity in terms of elastic anisotropy, which characterizes the material as a function of its response to stress in different directions. Rock anisotropy is discussed in several studies, many of which have characterization results adopting it as isotropic, but many authors cite weak anisotropy presented by this material. Thus, the objective of this research was to evaluate the elastic behavior of rocks simulating three anisotropy conditions: isotropy, transverse isotropy and orthotropy by ultrasound wave propagation test and compare the parameters obtained by this method with those obtained by static compression test. The characterization of three rock types by non-destructive testing was performed on polyhedron specimens with 26-faces using ultrasound equipment and 1.0 MHz frequency shear and compression transducers. For the destructive tests the characterization was performed for two types of rocks in cylindrical specimens using a universal testing machine and resistive electric strain gauges coupled to the rock cylinders. The results of the research indicated isotropic behavior of the rocks because, independently of the elastic behavior adopted in the analyzes (orthotropy, transverse isotropy or isotropy), there were no statistically significant differences in the elastic parameters (elastic modulus, shear modulus and Poisson's ratio) in the three symmetry axes evaluated. The elastic parameters determined by static compression test presented lower values when compared to those obtained by wave propagation test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação comprimento/diâmetro utilizado em ensaio de compressão uniaxial em cilindros de rocha (a) e representação do ângulo de fratura máximo suportado pela rocha (b). Fonte: MOGI (2006).	15
Figura 2. Equipamento de ultrassom (a), transdutores de faces planas de 1,0 MHz de frequência (b) e direções das propagações de onda de ultrassom (c).....	17
Figura 3. Matriz de rigidez.....	18
Figura 4. Matriz de flexibilidade.....	19
Figura 5. Esquema do posicionamento dos <i>strain gages</i> no corpo de prova de compressão.....	19
Figura 6. Esquema do posicionamento dos <i>strain gages</i> no corpo de prova de compressão de rocha (a). Ensaio de compressão estática em corpo de prova de rocha instrumentado (b).....	20
Figura 7. Rocha fragmentada após o ensaio de compressão estática.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros elásticos obtidos pelo ensaio de ultrassom em cilindro de rocha, através do equipamento Pundit conectado em um osciloscópio (CHRISTARAS et al., 1994).	14
Tabela 2. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para a rocha Estratificada – caracterização considerando a rocha como material ortotrópico.	24
Tabela 3. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas Athol (At) e PD – caracterização considerando as rochas como material ortotrópico.	25
Tabela 4. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para a rocha Estratificada – caracterização considerando a rocha como material com isotropia transversal.	26
Tabela 5. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas atol (At) e PD – caracterização considerando as rochas como material com isotropia transversal.	27
Tabela 6. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para a rocha Estratificada – caracterização considerando a rocha como material isotrópico.	28
Tabela 7. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas Athol (At) e PD – caracterização considerando as rochas como material isotrópico.	28
Tabela 8. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas atol (At) e PD – caracterização resultante do ensaio de compressão dos cilindros de rocha.	29
Tabela 9. Parâmetros elásticos obtidos através de ensaio de propagação de onda de ultrassom e compressão estática para as rochas Athol (At) e PD.	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO	16
2.1. Objetivos específicos.....	16
3. METODOLOGIA.....	16
3.1. Materiais.....	16
3.2. Métodos	17
3.2.1. Caracterização por ensaio de propagação de ondas de ultrassom.....	17
3.2.2. Caracterização por ensaio de compressão estática instrumentada	20
3.3. Análise dos resultados para a análise do comportamento elástico do material.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1. Resultados e discussão dos ensaios de propagação de ondas por ultrassom.....	22
4.2. Resultados dos ensaios de compressão estática instrumentada.....	28
4.3. Comparação entre ensaios de compressão estática instrumentada e ensaios de propagação de ondas por ultrassom	30
5. CONCLUSÃO.....	31
6. REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as rochas estão sendo aplicadas em revestimento de obras civis, devido ao surgimento da inovação tecnológica e de materiais que permitem um ganho considerável de produtividade e qualidade. Devido a esse crescimento, observado principalmente no final dos anos 90, fez com que novas tendências arquitetônicas surgissem, valorizando e priorizando o uso das rochas para o revestimento de obras civis, pois ela promove uma proteção à fachada, agrega estilo e enobrece os padrões estéticos das construções (NAVARRO, 2006).

Outras aplicações de rochas são a estatuária, arte funerária e peças especiais (balcões, fontes, colunas, pilares). A durabilidade das rochas depende de uma complexa combinação de fatores de suas propriedades litológicas de formação (tais como temperatura e pressão), que por sua vez promovem diferentes arranjos mineralógicos, texturais e estruturais na sua constituição.

No país existem mais de 600 tipos comerciais de rochas oriundas de aproximadamente 1500 diferentes jazidas, abrangendo uma vasta gama de tipos rochosos tais como o granito, mármore, quartzitos, ardósias, basaltos, serpentinitos, conglomerados, calcários, arenitos, e etc. (NAVARRO, 2006). Durante a sua formação, as rochas podem sofrer processos de intemperismo, podendo ser químico ou físico e, devido à sucessão de tais eventos, a rocha pode sofrer alterações em suas propriedades mecânicas e elásticas (NAVARRO, 2006).

A dificuldade de obtenção de todos os parâmetros elásticos de um material (módulos de elasticidade longitudinais nas diferentes direções, módulos de elasticidade transversais nos diferentes planos e coeficientes de Poisson) depende da complexidade do material em termos de anisotropia elástica. A anisotropia elástica define o material quanto a sua resposta aos esforços em diferentes direções. Dessa forma, para uma avaliação mais detalhada sobre a variação das propriedades elásticas das rochas, é preciso realizar um estudo da sua anisotropia e, dessa forma, verificar possíveis variações de tais propriedades em diferentes direções da rocha.

Com o objetivo de simplificar as análises, em geral, são considerados apenas três eixos de simetria elástica, perpendiculares entre si. Com esta simplificação, o material mais complexo é o ortotrópico, pois neste caso a resposta do material aos esforços varia nos três eixos de simetria, caso da madeira e de algumas rochas. Quando o material responde de forma distinta para duas das três direções diz-se que possui isotropia transversal, caso de diversos materiais à base de madeira, compósitos e algumas rochas. Finalmente, o material considerado mais simples é o que exibe comportamento isotrópico, não apresentando diferenças em sua resposta, independente da direção do

esforço ao qual está submetido, ou quando tais diferenças, por sua magnitude, podem ser negligenciadas, caso do concreto e de alguns tipos de rocha.

O ensaio de propagação de ondas por ultrassom pode ser aplicado em cilindros de rochas (CHRISTARAS, 1994) ou alternativamente em poliedros de 26 faces (VÁZQUEZ et al., 2015; GONÇALVES et al., 2014; BERTOLDO et al., 2013), permitindo a caracterização elástica completa do material (módulos de elasticidades e de cisalhamentos, coeficientes de Poisson).

A utilização de métodos de propagação de ondas na determinação de propriedades elásticas de materiais (matriz de rigidez) se fundamenta na teoria da elasticidade associada à teoria de propagação de ondas. A aplicação de tais métodos já é consolidada na área de metais e vem avançando de forma significativa na caracterização de outros materiais, como a madeira, o concreto, as rochas, os materiais compósitos e outros materiais biológicos, como é o caso de árvores vivas e de produtos agrícolas. A adesão de diversos setores à utilização destes métodos é função dos fundamentos teóricos, que lhe conferem confiabilidade, bem como ao fato de se constituir em técnica não destrutiva, que permite viabilizar ensaios in-situ, realizar repetições de ensaios em uma mesma peça ou estrutura, acompanhamento de deterioração em estruturas etc.

Na literatura, muitos artigos relatam sobre a anisotropia das rochas, porém a grande maioria utiliza a teoria aplicada aos materiais isotrópicos quando aplicam os ensaios de ultrassom para diferentes finalidades. Han et al. (2004) discorre a respeito da anisotropia de rochas, mostrando que a propagação de ondas longitudinais e de cisalhamento indicam anisotropia fraca das rochas, causadas por microfraturas e pela orientação preferencial dos minerais. Segundo os autores as ondas longitudinais viajam mais rápido na direção paralela às fraturas do que na direção perpendicular. As velocidades são crescentes em condições de pressão de até 100 MPa, tornando-se mais constantes acima deste nível (HAN et al., 2004). Os autores afirmam ainda que a anisotropia é uma propriedade fundamental das rochas, porém a nossa compreensão anisotrópica de muitas rochas ainda é limitada, e mais pesquisas são de fundamental importância para melhorar a concepção do tema.

Ao assumir que as rochas são de fraca a medianamente anisotrópicas os cálculos se simplificam consideravelmente (THOMSEN, 1986), sendo o mais simples a consideração de isotropia transversal. Neste caso as suas propriedades são definidas por sete constantes elásticas. Usualmente, no caso de rochas, a direção diferenciada é a vertical, enquanto as outras duas direções podem ser consideradas iguais (THOMSEN, 1986).

Confirmando a proposição de Thomsen (1986), Beneduzi et al. (2013) e Frydman (2010) indicam que o comportamento isotrópico não explica bem as propriedades das rochas, sendo, portanto, o tratamento isotrópico transversal ou ortotrópico os mais apropriados para a obtenção de resultados de propriedades mais próximas do real.

Christaras et al. (1994) realizaram um ensaio de propagação de onda, através do equipamento Pundit conectado a um osciloscópio, para determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson de 8 rochas oriundas de diversas regiões da França (Tabela 1). Foram utilizados corpos de prova cilíndricos e os resultados dos parâmetros acústico e elásticos obtidos pelos autores durante a pesquisa foram satisfatórios, indicando comportamento isotrópico das rochas. Porém, a geometria cilíndrica dos corpos de prova não possibilitou uma caracterização mais detalhada em relação ao comportamento anisotrópico que a rocha poderia apresentar (em diferentes direções de propagação de onda).

Tabela 1. Parâmetros acústicos e elásticos obtidos pelo ensaio de ultrassom em cilindro de rocha, através do equipamento Pundit conectado em um osciloscópio (CHRISTARAS et al., 1994).

Rocha	V (m.s⁻¹)	E (GPa)	ν
Limestone Ré	1972	24,700	0,184
Gypsum Rose	2530	33,080	0,376
Andesite Volvic	2377	26,580	0,251
Basalt Sauvât	3965	101,660	0,246
Basalt Pradel 1	3750	103,340	0,249
Basalt Pradel 2	3848	110,210	0,243
Granite Gueret	3194	64,000	0,196
Phonolite	2784	56,000	0,210

Outra importante metodologia de obtenção de propriedades mecânicas é o ensaio de compressão estática que permite a obtenção de parâmetros de resistência, de rigidez e de coeficientes de Poisson. O ensaio de compressão uniaxial, em que um cilindro é carregado axialmente, é um dos procedimentos experimentais mais difundidos na mecânica das rochas. Esta configuração é usada em estudos de comportamento frágil e dúctil, em estudos de fluência em longo prazo, bem como em estudos de comportamento elástico (MOGI, 2006).

A relação comprimento/diâmetro do cilindro de rocha a ser comprimido uniaxialmente nesse ensaio é de aproximadamente 2 (Figura 1a), para que qualquer falha com uma inclinação natural máxima menor que 25° (Figura 1b) seja suportada pela compressão axial sobre a rocha (MOGI, 2006). A relação comprimento/diâmetro igual a 2 também é recomendada pela norma ASTM D7012 (STANDART, 2014), a qual possibilita a obtenção de valores de parâmetros das rochas tais como: força uniaxial, força de cisalhamento, ângulo de atrito interno, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Porém essa relação da norma ASTM D7012 pode ser alterada para valores entre 1 e 4, respeitando o comportamento elástico linear da curva Tensão vs Deformação, conforme demonstrado por Mogi (2006).

Madhubabu et al. (2016) realizaram um estudo de ensaio de compressão uniaxial de cilindros de rochas de Carbonato, seguindo a norma ASTM D7012 (relação comprimento e diâmetro igual a 2), e obtiveram módulos de elasticidade (E), através da Lei de Hooke, variando entre 5,46 e 6,89 GPa. JIA et al. (2013) realizaram um estudo experimental e modelagem numérica de fratura frágil de rocha carbonática sob compressão uniaxial, e obtiveram um módulo de elasticidade de 17,4 GPa e coeficiente de Poisson de 0,23 para o resultado experimental.

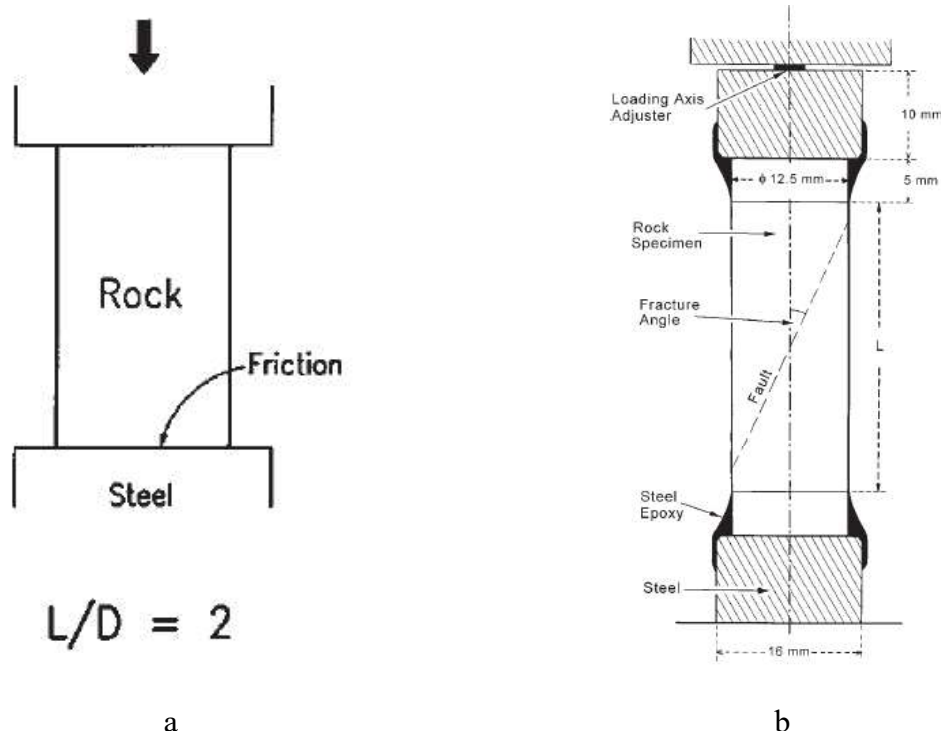


Figura 1. Relação comprimento/diâmetro utilizado em ensaio de compressão uniaxial em cilindros de rocha (a) e representação do ângulo de fratura máximo suportado pela rocha (b). Fonte: MOGI (2006).

2. OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento elástico de rochas simulando três condições de anisotropia: isotropia, isotropia transversal e ortotropia por meio de ensaio propagação de onda de ultrassom e comparar os parâmetros obtidos por esse método com os obtidos por meio de ensaio de compressão estática.

2.1. Objetivos específicos

Caracterização elástica das rochas por meio de propagação de ondas de ultrassom;

Caracterização elástica simplificada da rocha por meio de ensaio de compressão estática instrumentada

Comparação dos parâmetros elásticos obtidos por ensaio dinâmico com os parâmetros obtidos do ensaio estático.

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados três tipos de rochas, denominadas, somente para fins do desenvolvimento do trabalho, de Estratificada, Athol e PD. De cada tipo de rocha foram obtidos no mínimo três corpos de prova para a caracterização acústica e três corpos de prova para a caracterização estática. O material (rochas) utilizado na pesquisa foi fornecido pela Faculdade de Engenharia Civil (FEC) da UNICAMP, por meio de convênio entre esta e a Empresa Petrobrás, a qual fornece rochas do pré sal para pesquisa.

Para a caracterização dinâmica, foi utilizado corpo de prova no formato de poliedro de 26 faces em função da sua utilização na caracterização de materiais ortotrópicos, como é o caso da madeira (François, 1995; Trinca, 2011; Gonçalves et al., 2011; Bertoldo et al., 2013 e Gonçalves et al., 2014), uma vez que permite a obtenção de todos os termos da matriz de rigidez com um único corpo de prova. Já para a caracterização estática, foi adotado corpo de prova cilíndrico, conforme especificado pela norma ASTM D7012 (2014). A confecção dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Protótipos da FEAGRI (UNICAMP) por funcionário capacitado para executar tal serviço.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização por ensaio de propagação de ondas de ultrassom

Para a caracterização por meio de ensaio não destrutivo, foi utilizado equipamento de ultrassom (EP1000, Olympus, EUA – Figura 2a) e transdutores longitudinais e transversais de faces planas e de 1,0 MHz de frequência (Figura 2b). A glucose de amido foi utilizada como acoplante nos ensaios, uma vez constatada a eficácia deste material para a propagação adequada principalmente da onda de cisalhamento (GONÇALVES et al., 2011).

Para a retirada do poliedro a direção 1 foi identificada como sendo a vertical de formação da rocha, tendo as outras duas direções (2 e 3) marcadas de maneira aleatória, formando 3 planos perpendiculares entre si (Figura 3).

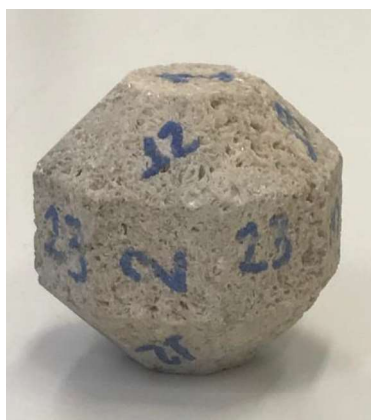


a

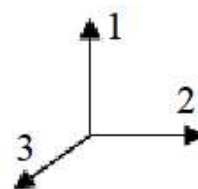


b

Figura 2. Equipamento de ultrassom (a), transdutores de faces planas de 1,0 MHz de frequência (b).



a



b

Figura 3. Poliedro de 26 faces de rocha e direções (a) direções identificadas nos corpos de prova (b).

Para determinar o comprimento do percurso das ondas nos corpos de prova foi utilizado o paquímetro digital. Com os tempos de propagação de onda nas direções 1, 2 e 3 (Figura 3b), determinados pelo equipamento de ultrassom, juntamente com transdutores longitudinais, foi calculada as respectivas velocidades nestas direções (V_{11} , V_{22} e V_{33}). Utilizando o transdutor de cisalhamento (de ondas transversais), para ensaios realizados também nos planos de simetria da rocha, calculamos as velocidades transversais (V_{12} , V_{13} , V_{21} , V_{23} , V_{32} e V_{31}). Para obter as velocidades fora dos eixos de simetria, os transdutores transversais foram acoplados nas faces inclinadas à 45° do poliedro.

Primeiramente a matriz de rigidez $[C]$ foi determinada considerando a rocha como material ortotrópico, para isso, foram determinados os nove coeficientes de rigidez independentes. Com as velocidades obtidas para cada direção obtemos os coeficientes da matriz de rigidez $[C]$ (Figura 3) empregando as equações de Christoffel (Equações 1-9). Ao inverter essa matriz, utilizando métodos matemáticos, determinamos a matriz de flexibilidade $[S]$ (Figura 4), a qual contempla todos os parâmetros necessários para a caracterização elástica da rocha.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Figura 3. Matriz de rigidez.

$$C_{11} = \rho \cdot V_{11}^2 \quad \text{Equação 1}$$

$$C_{22} = \rho \cdot V_{22}^2 \quad \text{Equação 2}$$

$$C_{33} = \rho \cdot V_{33}^2 \quad \text{Equação 3}$$

$$C_{44} = \rho \cdot ((V_{23} + V_{32}) / 2)^2 \quad \text{Equação 4}$$

$$C_{55} = \rho \cdot ((V_{13} + V_{31}) / 2)^2 \quad \text{Equação 5}$$

$$C_{66} = \rho \cdot ((V_{12} + V_{21}) / 2)^2 \quad \text{Equação 6}$$

$$(C_{12} + C_{66}) n_1 n_2 = [(C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 7}$$

$$(C_{13} + C_{55}) n_1 n_3 = [(C_{11} n_1^2 + C_{55} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{55} n_1^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 8}$$

$$(C_{23} + C_{44}) n_2 n_3 = [(C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 9}$$

Onde: V_α é a velocidade da onda na direção α ($= 45^\circ$ em m.s^{-1}); ρ é a densidade da rocha (kg.m^{-3}); $n_1 = \cos \alpha$; $n_2 = \sin \alpha$ e $n_3 = 0$ quando α é tomado em relação ao eixo 1 (Plano 12); $n_1 = \cos \alpha$; $n_3 = \sin \alpha$ e $n_2 = 0$ quando α é tomado em relação ao eixo 1 (Plano 13); $n_2 = \cos \alpha$; $n_3 = \sin \alpha$ e $n_1 = 0$ quando α é tomado em relação ao eixo 2 (Plano 23).

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

Figura 4. Matriz de flexibilidade.

Onde: E_1 , E_2 e E_3 são os módulos de elasticidade longitudinais; G_{12} , G_{13} e G_{23} são os módulos de elasticidade transversais e ν_{12} , ν_{21} , ν_{23} , ν_{32} , ν_{13} , ν_{31} são os coeficientes de Poisson.

Ao considerar o material com isotropia transversal, assumiu-se o eixo 1 como sendo diferente dos eixos 2 e 3, os quais foram considerados com propriedades semelhantes. Os mesmos dados de velocidades utilizados para a determinação das propriedades elásticas considerando a rocha como sendo ortotrópica, foram utilizadas para a determinação das 7 propriedades elásticas da rocha, assumido como tendo isotropia transversal. No entanto para os cálculos dos coeficientes de rigidez nas direções consideradas isotrópicas ($C_{22}=C_{33}$, $C_{55}=C_{66}$, $C_{12}=C_{13}$), foram adotadas as velocidades médias.

Quando a rocha foi avaliada como sendo isotrópica, as propriedades elásticas nos eixos 1, 2 e 3 foram consideradas como sendo iguais, dessa forma, para o cálculo dos coeficientes de rigidez ($C_{11}=C_{22}=C_{33}$, $C_{44}=C_{55}=C_{66}$ e $C_{23}=C_{12}=C_{13}$), foram utilizadas as velocidades médias obtidas nos três eixos de simetria do poliedro (Figura 3), tanto com o transdutor longitudinal como com o transdutor de cisalhamento.

3.2.2. Caracterização por ensaio de compressão estática instrumentada

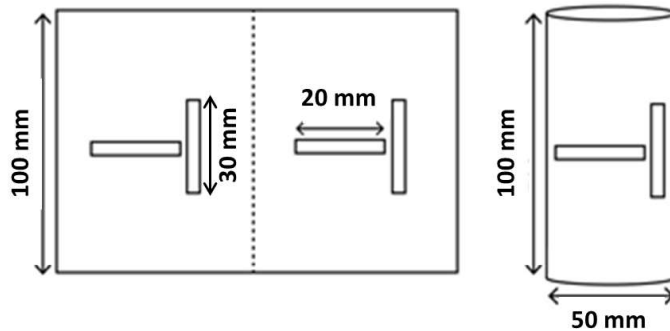
Os cilindros de rochas foram confeccionados apresentando dimensão de 0,05 m de diâmetro e 0,10 m de comprimento (Figura 5), de acordo com a relação comprimento/diâmetro (igual a 2) especificado pela norma ASTM D7012 (STANDART, 2014).



Figura 5. Cilindro utilizado no ensaio de compressão.

Para o ensaio de compressão instrumentada foi utilizado extensômetros elétricos resistivos (*strain gages* – KFG-30-120-C1-11 e KFG-20-120-C1, KYOWA, Japão) de 20 e 30 mm de comprimento. Cada corpo de prova cilíndrico foi instrumentado com 4 extensômetros, sendo dois colados na direção do carregamento e em posições diametralmente opostas, e dois na direção perpendicular à do carregamento, também em faces diametralmente opostas (Figura 6a). A fixação dos *strain gages* nas faces do corpo de prova foi realizada com adesivo químico base – cianoacrilato.

Os ensaios foram realizados em Máquina Universal de Ensaio (VERSA TESTER; SOIL TEST INC.; EVANSTON, ILL. USA) com capacidade de 3,0 kN, os *strain gages* foram ligados à sistema de aquisição de dados com 8 canais (HBM, Spider 8) para a leitura das deformações durante o carregamento (Figura 6b).



a



b

Figura 6. Esquema do posicionamento dos *strain gages* no corpo de prova de compressão de rocha (a). Ensaio de compressão estática em corpo de prova de rocha instrumentado (b).

Por meio do ensaio de compressão nos corpos de prova instrumentados foi determinado o módulo de elasticidade (E_c - Equação 10) considerando o trecho linear do diagrama tensão-deformação específica (σ - ϵ) o qual deve apresentar coeficiente de determinação entre os parâmetros superior a 0,99.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: $\Delta\sigma$ e $\Delta\epsilon$ são trechos de tensão e de deformação específica, respectivamente, que delimitam o trecho linear da reta do diagrama tensão-deformação específica (σ - ϵ) com coeficiente de determinação entre os parâmetros superior a 0,99.

Por meio das deformações longitudinais e transversais, que foram obtidas no ensaio de compressão instrumentado, foi determinado o coeficiente de Poisson (ν - Equação 11).

$$\nu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde: ϵ_t é a deformação transversal e ϵ_l é a deformação longitudinal.

Após a obtenção do E_c e do coeficiente de Poisson (ν), foi possível calcular o módulo de cisalhamento das rochas (G) utilizando relação constitutiva de materiais isotrópicos (Equação 12).

$$G = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (\text{Equação 12})$$

3.3. Análise dos resultados para a análise do comportamento elástico do material

Primeiramente, quando a rocha foi caracterizada considerando-a como sendo material ortotrópico, determinou-se doze parâmetros elásticos, sendo três módulos de elasticidade (referentes às direções 1, 2 e 3), três módulos de cisalhamento (relacionados aos planos 1-2, 1-3 e 2-3) e seis coeficientes de Poisson (de acordo com os planos 1-2, 2-1, 1-3, 3-1, 2-3 e 3-2). Os valores obtidos para os módulos de elasticidade nos diferentes eixos, assim como os módulos de cisalhamento e os coeficientes de Poisson nos diferentes planos, foram avaliados estatisticamente por meio de comparação de médias (*Test t* e *Multiple Range Tests*) a fim de verificar a existência de diferença entre os valores dos parâmetros obtidos nos diferentes eixos e/ou planos e o agrupamento dos valores estatisticamente equivalentes, com 95% de nível de confiança.

Quando a análise da anisotropia da rocha foi realizada considerando-a como material que apresenta isotropia transversal, foram determinadas sete propriedades elásticas para a rocha (2 módulos de elasticidade longitudinal – eixos 1 e 2=3; 2 módulos de elasticidade transversal – planos 2-3 e 1-3=1-2; e 3 coeficientes de Poisson – planos 2-1=3-1, 1-2=1-3 e 3-2=2-3). Os valores obtidos para os módulos de elasticidade nos dois eixos considerados diferentes, assim como os valores obtidos para os módulos de cisalhamento nos dois planos considerados diferentes, foram avaliados estatisticamente utilizando o intervalo de confiança (IC) da diferença de médias. Nesse teste estatístico, se o IC da diferença de médias contiver o zero, não há diferença estatisticamente significativa entre os parâmetros que estão sendo comparados, com 95% de nível de confiança. No caso dos coeficientes de Poisson obtidos considerando-se isotropia transversal, utilizou-se o *Test t* e o *Multiple Range Test*, de forma semelhante ao utilizado para as considerações teóricas de ortotropia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados e discussão dos ensaios de propagação de ondas por ultrassom

As rochas que compuseram a amostragem da pesquisa possuem densidades médias de 2669 kg.m⁻³ (rocha Estratificada), 2136 kg.m⁻³ (rocha Athol) e 2265 kg.m⁻³ (rocha PD).

Ao se considerar a rocha estratificada como sendo um material ortotrópico, obteve-se valores de módulo de elasticidade médio variando entre 39688 MPa a 59315 MPa (Tabela 2). Segundo JAEGER et al. (2009) essa variação se deve a composição mineralógica de formação das rochas (porosidade e orientação de seus minerais constituintes). O módulo de cisalhamento médio variou de 16505 MPa a 23474 MPa (Tabela 2). Já o coeficiente de Poisson médio variou entre 0,24 a 0,31

(Tabela 2). Considerando a rocha PD como sendo um material ortotrópico, obteve-se valores de módulo de elasticidade médio variando entre 31775 MPa a 33625 MPa (Tabela 3). O módulo de cisalhamento médio variou de 12400 MPa a 13354 MPa (Tabela 2). Já o coeficiente de Poisson médio variou entre 0,18 a 0,28 (Tabela 3). Considerando a rocha Athol (At_1 , At_2 e At_3) como sendo um material ortotrópico, obteve-se valores de módulo de elasticidade médio variando entre 14006 MPa e 22056 MPa (Tabela 3). O módulo de cisalhamento médio variou de 5523 MPa a 8409 MPa (Tabela 3). Já o coeficiente de Poisson médio variou entre 0,29 a 0,32 (Tabela 3). Os valores das propriedades elásticas obtidos nessa pesquisa estão de acordo com os obtidos por Christaras *et al.* (1994), por meio de um ensaio dinâmico. Apenas os módulos de elasticidade da rocha Athol apresentaram valores inferiores aos obtidos pelos pesquisadores, os quais obtiveram valores médios para esse parâmetro de 8 tipos rochas variando entre 24700 MPa a 110210 MPa e o coeficiente de Poisson médio obtido foi de 0,18 a 0,38 (CHRISTARAS *et al.*, 1994).

Os coeficientes de variação das médias dos módulos de elasticidade, considerando cada rocha estratificada, variou de 2 e 16% (Tabela 2), já para o módulo de cisalhamento médio, houve uma variação de 1 a 6% (Tabela 2). Para o coeficiente de Poisson médio, as rochas estratificadas assumiram valores de coeficientes de variação entre 3 a 35% (Tabela 2). O coeficiente de variação do módulo de elasticidade para a rocha PD variou de 1 a 15%, já para o módulo de cisalhamento, houve uma variação de 1 a 5% (Tabela 3). Para o coeficiente de Poisson, as rochas PD apresentaram valores de coeficientes de variação entre 3 e 38% (Tabela 3). Para a rocha Athol, o coeficiente de variação do módulo de elasticidade variou de 5 a 18%, já para o módulo de cisalhamento médio, houve uma variação de 1 a 13% e para o coeficiente de Poisson médio os coeficientes de variação apresentaram valores entre 5 a 40% (Tabela 3).

As análises estatísticas de comparação de médias para o módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson não indicaram diferenças estatisticamente significativa, com nível de confiança de 95%, para as três direções avaliadas (1, 2 e 3), para os três tipos de rocha (Estratificada – Tabela 2 e Athol e PD – Tabela 3).

Tabela 2. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para a rocha Estratificada – caracterização considerando a rocha como material ortotrópico.

Parâmetros elásticos	1X	1Y	2X	2Y	2Z	3X	4X	4Y	Média	CV (%)
E₁ (MPa)	54774	48630	51062	50889	47147	56721	45178	50840	50655 (a)	7
E₂ (MPa)	59357	51047	40589	53470	51486	47687	35857	65126	50577 (a)	19
E₃ (MPa)	60982	50257	37965	55091	51531	50677	38029	61979	50814 (a)	18
Média (MPa)	58371	49978	43205	53150	50054	51695	39688	59315	-	-
CV (%)	6	2	16	4	5	9	12	13	-	-
G₂₃ (MPa)	22788	19135	17065	20614	20634	18761	15826	23730	19819 (b)	14
G₁₃ (MPa)	22276	19450	16677	20268	19989	20660	16319	23574	19902 (b)	12
G₁₂ (MPa)	21515	18864	18596	19581	20125	20873	17370	23117	20005 (b)	9
Média (MPa)	22193	19150	17446	20154	20250	20098	16505	23474	-	-
CV (%)	3	2	6	3	2	6	5	1	-	-
v₂₁	0,28	0,25	0,32	0,28	0,25	0,25	0,21	0,26	0,26 (c)	12
v₃₁	0,19	0,26	0,31	0,28	0,24	0,29	0,25	0,22	0,25 (c)	16
v₁₂	0,26	0,24	0,40	0,27	0,23	0,29	0,27	0,20	0,27 (c)	23
v₃₂	0,29	0,26	0,17	0,25	0,29	0,23	0,42	0,36	0,28 (c)	27
v₁₃	0,17	0,25	0,41	0,26	0,22	0,32	0,30	0,18	0,26 (c)	31
v₂₃	0,28	0,26	0,18	0,25	0,29	0,22	0,39	0,38	0,28 (c)	26
Média	0,24	0,25	0,30	0,27	0,25	0,27	0,31	0,27	-	-
CV (%)	22	3	35	6	12	15	27	32	-	-

Letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes.

E₁, E₂ e E₃ = módulo de elasticidade das rochas Estratificadas nas direções 1, 2 e 3, respectivamente (conforme figura 2c); G₂₃, G₁₃ e G₁₂ = módulos de cisalhamento nos planos 2-3, 1-3 e 1-2, respectivamente (conforme figura 3b); v₂₁, v₃₁, v₁₂, v₃₂, v₁₃, v₂₃ = coeficientes de Poisson nos planos 2-1, 3-1, 1-2, 3-2, 1-3, 2-3, respectivamente.

Tabela 3. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas Athol (At) e PD – caracterização considerando as rochas como material ortotrópico.

Parâmetros elásticos	At ₁	At ₂	At ₃	Média	CV (%)	PD ₁	PD ₂	PD ₃	Média	CV (%)
E₁ (MPa)	20616	24321	13270	19402 (a)	29	33123	30657	36602	33461 (d)	9
E₂ (MPa)	22730	20186	14546	19154 (a)	22	33778	31930	27118	30942 (d)	11
E₃ (MPa)	22822	17138	14200	18053 (a)	24	33974	32737	30968	32560 (d)	5
Média (MPa)	22056	20548	14006	-	-	33625	31775	31563	-	-
CV (%)	6	18	5	-	-	1	3	15	-	-
G₂₃ (MPa)	8508	6737	5574	6939 (b)	21	13275	13489	11708	12824 (e)	8
G₁₃ (MPa)	8308	8767	5490	7521 (b)	24	13365	12868	12450	12894 (e)	4
G₁₂ (MPa)	8410	7645	5507	7187 (b)	21	13422	13297	13042	13254 (e)	1
Média (MPa)	8409	7716	5523	-	-	13354	13218	12400	-	-
CV (%)	1	13	1	-	-	1	2	5	-	-
v₂₁	0,28	0,23	0,34	0,28 (c)	20	0,26	0,25	0,12	0,21 (f)	37
v₃₁	0,30	0,34	0,32	0,32 (c)	6	0,31	0,31	0,25	0,29 (f)	12
v₁₂	0,26	0,27	0,31	0,28 (c)	10	0,25	0,24	0,16	0,22 (f)	23
v₃₂	0,34	0,18	0,32	0,28 (c)	32	0,27	0,28	0,15	0,23 (f)	31
v₁₃	0,27	0,49	0,30	0,35 (c)	33	0,30	0,29	0,29	0,29 (f)	2
v₂₃	0,34	0,21	0,32	0,29 (c)	25	0,27	0,27	0,13	0,22 (f)	36
Média	0,30	0,29	0,32	-	-	0,28	0,27	0,18	-	-
CV (%)	12	40	5	-	-	9	9	38	-	-

Letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes.

E₁, E₂ e E₃ = módulo de elasticidade das rochas Athol e PD nas direções 1, 2 e 3, respectivamente (conforme figura 2c); G₂₃, G₁₃ e G₁₂ = módulos de cisalhamento nos planos 2-3, 1-3 e 1-2, respectivamente (conforme figura 3b); v₂₁, v₃₁, v₁₂, v₃₂, v₁₃, v₂₃ = coeficientes de Poisson nos planos 2-1, 3-1, 1-2, 3-2, 1-3, 2-3, respectivamente.

Considerando a rocha Estratificada como sendo um material com isotropia transversal, sendo o eixo 1 de propriedades diferenciadas com relação aos eixos 2 e 3 (considerados com propriedades semelhantes), obteve-se valores de módulo de elasticidade médio variando entre 41060 MPa a 57619 MPa (Tabela 4). O módulo de cisalhamento médio variou de 16333 MPa a 23538 MPa, já o coeficiente de Poisson médio variou entre 0,25 a 0,31 (Tabela 4). Já para as rochas PD e Athol, quando as mesmas foram avaliadas como sendo materiais com isotropia transversal, para a PD obteve-se valores de módulo de elasticidade médio variando entre 31516 MPa a 33525 MPa, módulo de cisalhamento médio entre 12226 MPa e 13334 MPa e coeficiente de Poisson médio variando entre 0,18 a 0,28 (Tabela 5). Para a rocha Athol obteve-se valores de módulo de elasticidade médio variando entre 13822 MPa a 21698 MPa, módulo de cisalhamento médio entre 5536 MPa a 8433 MPa e coeficientes de Poisson médio variando entre 0,29 e 0,32 (Tabela 5).

Os coeficientes de variação do módulo de elasticidade médios, para cada rocha Estratificada, variaram de 3 a 18%, já para o módulo de cisalhamento médio, houve uma variação de 0 a 7% (Tabela 4). Para o coeficiente de Poisson médio, as rochas estratificadas assumiram valores de coeficientes

de variação que variou entre 3 e 39% (Tabela 4). O coeficiente de variação do módulo de elasticidade médio, para cada rocha PD, variou de 2 a 17%, já para o módulo de cisalhamento médio, houve uma variação de 1 a 6% e para o coeficiente de Poisson médio obteve-se valores de coeficientes de variação entre 3 a 25% (Tabela 5). O coeficiente de variação do módulo de elasticidade médio, para cada rocha Athol, variou de 6 a 19%, para o módulo de cisalhamento médio, houve uma variação de 1 a 14% e para o coeficiente de Poisson médio, obteve-se valores de coeficientes de variação entre 4 a 34% (Tabela 5).

O intervalo de confiança da diferença de médias para os módulos de elasticidade e de cisalhamento, para os três tipos de rochas, continham o zero, o que indica não haver diferença entre os parâmetros nas duas direções avaliadas (1 e 2=3), com nível de confiança de 95% (Tabelas 4 e 5). Já para a análise estatística de diferença de médias dos coeficientes de Poisson, os resultados das análises também mostraram que não houve diferença estatística entre os parâmetros nos diferentes planos avaliados (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para a rocha Estratificada – caracterização considerando a rocha como material com isotropia transversal.

Parâmetros elásticos	1X	1Y	2X	2Y	2Z	3X	4X	4Y	Média	CV (%)
E_1' (MPa)	54948	48632	51055	50890	47150	56734	45186	50849	50680 (a)	8
$E_2=E_3$ (MPa)	60291	50652	39253	54275	51510	49167	36933	63540	50703 (a)	18
Média (MPa)	57619	49642	45154	52582	49330	52951	41060	57194	-	-
CV (%)	7	3	18	5	6	10	14	16	-	-
G_{23}' (MPa)	22788	19135	17065	20614	20634	18761	15826	23730	19819 (b)	14
$G_{12}=G_{13}$ (MPa)	21894	19156	17623	19923	20057	20766	16841	23345	19951 (b)	11
Média	22341	19146	17344	20268	20346	19764	16333	23538	-	-
CV (%)	3	0	2	2	2	7	4	1	-	-
$\nu_{21}=\nu_{31}$	0,233	0,256	0,314	0,284	0,243	0,267	0,231	0,237	0,26 (c)	11
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0,212	0,246	0,408	0,266	0,223	0,308	0,283	0,189	0,27 (c)	26
$\nu_{32}=\nu_{23}$	0,281	0,261	0,175	0,250	0,287	0,226	0,404	0,370	0,28 (c)	26
Média	0,24	0,25	0,30	0,27	0,25	0,27	0,31	0,27	-	-
CV (%)	15	3	39	6	13	15	29	35	-	-

Letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes.

E_1' e $E_2=E_3$ = módulo de elasticidade das rochas Estratificadas nas direções 1 e 2=3, respectivamente (conforme figura 2c); G_{23}' e $G_{12}=G_{13}$ = módulos de cisalhamento nos planos 2-3 e 1-2=1-3, respectivamente (conforme figura 3b); $\nu_{21}=\nu_{31}$, $\nu_{12}=\nu_{13}$ e $\nu_{32}=\nu_{23}$ = coeficientes de Poisson nos planos 2-1=3-1, 1-2=1-3 e 3-2=2-3, respectivamente.

Tabela 5. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas Athol (At) e PD – caracterização considerando as rochas como material com isotropia transversal.

Parâmetros elásticos	At ₁	At ₂	At ₃	Média	CV (%)	PD ₁	PD ₂	PD ₃	Média	CV (%)
E ₁ ' (MPa)	20618	24612	13271	19500 (a)	29	33154	30683	36792	33543 (d)	9
E ₂ =E ₃ (MPa)	22777	18733	14373	18628 (a)	23	33897	32350	29087	31778 (d)	8
Média (MPa)	21698	21672	13822	-	-	33525	31516	32939	-	-
CV (%)	7	19	6	-	-	2	4	17	-	-
G ₂₃ ' (MPa)	8508	6737	5574	6939 (b)	21	13275	13489	11708	12824 (e)	8
G ₁₂ =G ₁₃ (MPa)	8359	8196	5498	7351 (b)	22	13393	13082	12744	13073 (e)	2
Média (MPa)	8433	7466	5536	-	-	13334	13285	12226	-	-
CV (%)	1	14	1	-	-	1	2	6	-	-
v ₂₁ =v ₃₁	0,29	0,29	0,33	0,30 (c)	7	0,28	0,28	0,18	0,25 (f)	23
v ₁₂ =v ₁₃	0,27	0,38	0,30	0,32 (c)	18	0,28	0,27	0,23	0,26 (f)	9
v ₃₂ =v ₂₃	0,34	0,19	0,32	0,28 (c)	30	0,27	0,27	0,14	0,23 (f)	34
Média	0,30	0,29	0,32	-	-	0,28	0,27	0,18	-	-
CV (%)	13	34	4	-	-	3	3	25	-	-

Letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes.

E₁' e E₂=E₃ = módulo de elasticidade das rochas nas direções 1 e 2=3, respectivamente (conforme figura 2c); G₂₃' e G₁₂=G₁₃ = módulos de cisalhamento nos planos 2-3 e 1-2=1-3, respectivamente (conforme figura 3b); v₂₁=v₃₁, v₁₂=v₁₃ e v₃₂=v₂₃ = coeficientes de Poisson nos planos 2-1=3-1, 1-2=1-3 e 3-2=2-3, respectivamente.

Ao fazer a análise considerando os três tipos de rochas como materiais isotrópicos, obteve-se, para a rocha Estratificada valores de módulo de elasticidade variando entre 44884 MPa a 59513 MPa, para módulo de cisalhamento uma variação de 16499 MPa a 23473 MPa e para o coeficiente de Poisson valores entre 0,25 a 0,39 (Tabela 6). Para a rocha PD obteve-se valores de módulo de elasticidade variando entre 30230 MPa a 33964 MPa, módulo de cisalhamento entre 12394 MPa a 13354 MPa e coeficiente de Poisson entre 0,22 a 0,27 (Tabela 7). Da mesma maneira, para a rocha Athol obteve-se valores de módulo de elasticidade variando entre 14446 MPa a 21917 MPa, módulo de cisalhamento entre 5523 MPa a 8408 MPa e o coeficiente de Poisson entre 0,30 a 0,31 (Tabela 7).

Na análise da rocha estratificada, obteve-se coeficiente de variação para os módulos de elasticidade e de cisalhamento de 11% e para o coeficiente de Poisson de 5% (Tabela 6). Considerando a rocha PD, foi obtido coeficiente de variação para módulo de elasticidade de 6%, para o módulo de cisalhamento de 4% e para o coeficiente de Poisson valor de 11% (Tabela 7). Para as rochas Athol, os coeficientes de variação dos módulos de elasticidade e de cisalhamento foram iguais a 21%, já o coeficiente de variação dos coeficientes de Poisson das rochas Atol foi igual 1% (Tabela 7).

Tabela 6. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para a rocha Estratificada – caracterização considerando a rocha como material isotrópico.

Parâmetros elásticos	1X	1Y	2X	2Y	2Z	3X	4X	4Y	Média	CV (%)
E (MPa)	56111	48577	44884	51590	50489	51110	42333	59513	50576	11
G (MPa)	22190	19149	17436	20152	20249	20087	16499	23473	19904	11
v	0,26	0,27	0,29	0,28	0,25	0,27	0,28	0,27	0,27	5

E = módulo de elasticidade das rochas Estratificadas nas direções 1=2 =3 (conforme figura 3b); G = módulo de cisalhamento nos planos 2-3=1-3=1-2; v = coeficiente de Poisson nos planos 2-1=3-1=1-2=1-3=3-2=2-3.

Tabela 7. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas Athol (At) e PD – caracterização considerando as rochas como material isotrópico.

Parâmetros elásticos	At ₁	At ₂	At ₃	Média	CV (%)	PD ₁	PD ₂	PD ₃	Média	CV (%)
E (MPa)	21917	19985	14446	18783	21	33964	33122	30230	32439	6
G (MPa)	8408	7694	5523	7208	21	13354	13217	12394	12988	4
v	0,30	0,30	0,31	0,30	1	0,27	0,25	0,22	0,25	11

E = módulo de elasticidade das rochas Athol e PD nas direções 1=2 =3 (conforme figura 3b); G = módulo de cisalhamento nos planos 2-3=1-3=1-2; v = coeficiente de Poisson nos planos 2-1=3-1=1-2=1-3=3-2=2-3.

Avaliando conjuntamente os parâmetros elásticos determinados nas diferentes condições de anisotropia (ortotropia, isotropia transversal e isotropia), é possível notar que as rochas apresentaram um comportamento isotrópico, independentemente da condição de anisotropia avaliada.

Os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos para os três tipos de rochas estão dentro da faixa de valores obtida por CHRISTARAS *et al.* (1994). O coeficiente de Poisson foi o parâmetro elástico com maiores valores de coeficientes de variação, nas condições de ortotropia (chegando a 40%) e isotrópica transversal (chegando a 39%).

4.2. Resultados dos ensaios de compressão estática instrumentada

Após serem comprimidos, os cilindros de rocha Athol obtiveram módulo de elasticidade médio de 3009 MPa, módulo de cisalhamento médio de 1036 MPa e o coeficiente de Poisson médio foi de 0,45 (Tabela 8). O coeficiente de variação obtido pelos três cilindros de rochas Athol comprimidos foi de 36% para o módulo de elasticidade, 37% para o módulo de cisalhamento e 9% para o coeficiente de Poisson (Tabela 8). Os baixos valores dos parâmetros elásticos obtidos por esta rocha para o ensaio de compressão estática instrumentada podem ser justificados pela natureza de formação geológica da rocha Athol e baixa resistência quando submetida a compressão ($f_c = 7,70$ MPa), a qual foi verificada ao longo da realização dos experimentos, em que o cilindro de rocha começou a apresentar fissuras com aplicação de baixos valores de cargas (Figura 7). A rocha PD, a

qual também foi ensaiada por compressão na pesquisa, pôde suportar cargas, aproximadamente, cinco vezes maiores ($f_c = 35,7$ MPa) do que as apresentadas pela rocha Athol.



Figura 7. Rocha fragmentada após o ensaio de compressão estática.

Os cilindros de rochas PD por sua vez apresentaram um módulo de elasticidade médio de 26496 MPa, módulo de cisalhamento médio de 8725 MPa e coeficiente de Poisson médio de 0,51 (Tabela 8). O ensaio de compressão obteve um coeficiente de variação de 57% para o módulo de elasticidade, 54% para o módulo de cisalhamento e 7% para o coeficiente de Poisson (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros elásticos, médias e coeficientes de variação (CV) obtidos para as rochas Athol (At) e PD – caracterização resultante do ensaio de compressão dos cilindros de rocha.

Parâmetros elásticos	At ₁	At ₂	At ₃	Média	CV (%)	PD ₁	PD ₂	PD ₃	Média	CV (%)
E (MPa)	4239	2211	2576	3009	36	12913	23987	42589	26496	57
G (MPa)	1472	778	859	1036	37	4333	8104	13738	8725	54
v	0,44	0,42	0,5	0,45	9	0,49	0,48	0,55	0,51	7

E = módulo de elasticidade das rochas Athol e PD nas direções de compressão do cilindro de rocha; G = módulo de cisalhamento; v = coeficiente de Poisson.

O valor do módulo de elasticidade médio obtido para as rochas Athol (3,01 GPa) foi 44,1% inferior do que menor valor encontrado para esse parâmetro (5,46 GPa) dentro da faixa de valores obtida por Madhubabu et al. (2016) ao ensaiar à compressão rochas carbonáticas obtidas de duas áreas distintas de poços de extração de petróleo. Para a rocha PD o comportamento foi diferente, sendo o valor obtido para o módulo de elasticidade (26,5 GPa) cerca de 74% superior do que o maior valor (6,89 GPa) encontrado por Madhubabu et al. (2016). Para esse estudo (MADHUBABU et al., 2016) os valores de coeficientes de Poisson variaram de 0,23 a 0,39, inferiores aos valores obtidos

para esse parâmetro, para ambas as rochas, estudadas nessa pesquisa (Athol e PD). JIA et al. (2013) também avaliaram as propriedades mecânicas, por meio de ensaios de compressão estática, de rochas carbonáticas obtidas de poços petrolíferos e obtiveram valores médios para o módulo de elasticidade e para o coeficiente de Poisson de 17400 MPa e de 0,23, respectivamente.

4.3.Comparação entre ensaios de compressão estática instrumentada e ensaios de propagação de ondas por ultrassom

Os parâmetros elásticos determinados por ensaio mecânico de compressão estática (Tabela 8) apresentaram valores inferiores quando comparado com os obtidos por meio de ensaio de propagação de onda (Tabela 7). Os valores médios de módulo de elasticidade e de módulo de cisalhamento apresentaram elevado coeficiente de variação (Tabela 8). Dinis et al. (2000) discutem a diferença entre os ensaios estáticos e dinâmicos, indicando que o ensaio estático é isotérmico pois há tempo para que o material equilibre a perda ou o ganho de calor com o meio circundante, enquanto no ensaio dinâmico a transferência térmica não ocorre e a deformação da rocha será adiabática. Os autores explicam, desta forma, os maiores valores de resistência e de rigidez obtidos em ensaios dinâmicos quando comparados aos estáticos. Os autores citam publicações que indicam que a superioridade dos valores de propriedades obtidas por métodos dinâmicos em relação aos estáticos são de 5 a 13 vezes (Rinehart, 1964).

A relação K determinada pela relação entre o módulo de elasticidade determinado por ultrassom e por ensaio estático para a rocha Atol foi de 6,2 enquanto que para a rocha PD essa relação foi de 1,2. Al-Shayea (2004) avaliou a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson de rochas calcárias utilizando compressão estática e ultrassom. Os autores apresentam interessante revisão de valores obtidos para rochas calcárias por compressão (E_s) e por ultrassom (E_d) em diferentes artigos, mostrando que as relações entre E_d/E_s variaram de 0,85 a 1,86. Martínez et al. (2011) obtiveram valores de K variando de 0,5 a 2,1 e os autores verificaram que para módulo de elasticidade, determinado por ensaio estático, abaixo de 50 GPa os valores de K não têm uma tendência clara, enquanto para valores de E superiores existe correlação crescente com K. Os autores também comentam que valores baixos de módulos de elasticidade determinados por ensaio estático foram os encontrados nos corpos de prova com fraturas. Segundo Martínez et al. (2011) outros autores já haviam verificado que em rochas com fraturas os módulos determinados por ultrassom diferiam muito dos obtidos de forma estática, já que no ensaio estático há muita dependência da posição e tipo de fratura.

Christaras et al. (1994) apresentaram resultados de módulo de elasticidade de rochas obtidos por ultrassom e por ensaio estático em 8 tipos de rochas de diferentes regiões da França. Os ensaios foram realizados com transdutores de onda longitudinal e de cisalhamento de 300 kHz de frequência. Os corpos de prova possuíam 49 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento e foram utilizados tanto para os ensaios de ultrassom quanto de compressão estática. Os módulos de elasticidade longitudinais obtidos por ultrassom variaram de 24,7 a 110 GPa. Os valores do coeficiente de Poisson obtidos por ultrassom variaram de 0,184 a 0,376 enquanto os obtidos no ensaio estático de 0,176 a 0,336. Os valores de coeficiente de Poisson médios obtidos por ultrassom nessa pesquisa ($\nu = 0,30$ para a rocha Atol e $\nu = 0,25$ para a rocha PD) ficam próximos dos valores obtidos para esse parâmetro por Christaras et al. (1994), porém apresentam valores superiores quando determinados por compressão estática ($\nu = 0,45$ para a rocha Atol e $\nu = 0,51$ para a rocha PD).

5. CONCLUSÃO

Os resultados da pesquisa indicaram comportamento isotrópico das rochas pois, independente do comportamento elástico adotado nas análises (ortotropia, isotropia transversal ou isotropia), não houve diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros elásticos (módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson) nos três eixos de simetria avaliados. Os resultados dos módulos de elasticidade obtidos para a rocha Athol por meio de ensaio estático apresentou grande diferença quando comparado com os valores apresentados para esse parâmetro obtido por ultrassom, o que pode indicar fissuras internas no material, que acaba por afetar mais o ensaio de compressão do que o de ensaio dinâmico.

6. REFERÊNCIAS

AL-SHAYEA, N. A. Effects of testing methods and condition on the elastic properties of limestone rock. *Engineering Geology*, 74:139-156, 2004.

BERTOLDO, C.; GONÇALVES, R.; MERLO, E. S.; SANTA CLARA, O.; RUY, M.; MOREIRA, M. E. M. 2013. Elastic constants of Pinus pinaster wood determined by wave propagation. In: 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Madison, EUA.

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.

DINIS DA GAMA CA, COSTA E SILVA M, CARANHOLA PEREIRA H (2000). Correlação entre módulos estáticos e dinâmicos para mármore. In: Congresso Nacional de Geotecnia, 7, 8p.

GONÇALVES R, TRINCA AJ, PELLIS BP (2014) Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Sci Technol* 48:269–287.

HAN JZ, SCHMITT DR, COLLINS D, ESCARTIN J (2004). Laboratory determination of velocity anisotropy. In: 2004 CSEG National Convention, Canadá, 5p.

JAEGER, John Conrad; COOK, Neville GW; ZIMMERMAN, Robert. **Fundamentals of rock mechanics**. John Wiley & Sons, 2009.

JIA, Lichun et al. Experimental study and numerical modeling of brittle fracture of carbonate rock under uniaxial compression. **Mechanics Research Communications**, v. 50, p. 58-62, 2013.

NAVARRO, Fabiano Cabañas. Influência da petrografia sobre a anisotropia à tensão de compressão e dilatação térmica de rochas ornamentais. 2006.

MADHUBABU, N. et al. Prediction of compressive strength and elastic modulus of carbonate rocks. **Measurement**, v. 88, p. 202-213, 2016.

MARTINEZ-MARTINEZ, J.; BENAVENTE, D.; GARCIA-DEL-CURA, M. A. Spatial attenuation: the most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. *Engineering Geology* 119:84-95, 2011.

MOGI, Kiyoo. **Experimental rock mechanics**. CRC Press, 2006.

VAZQUEZ, GONÇALVES R, BERTOLDO, C, BAÑO, V ; GUAITA, M. (2015) Determination of the mechanical properties of Castanea sativa Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. *Wood Science and Technology*. 49. 10.1007/s00226-015-0719-7.



STANDARD, A. S. T. M. D7012–10 (2014) Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. **Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, p. 495-498, 2014.**