



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

Caracterização mecânica de rochas irregulares, através de ensaios acústicos, fotogrametria e método dos elementos finitos.

JOÃO PEDRO SCHMITZ

Foz do Iguaçu

2022



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

Caracterização mecânica de rochas irregulares, através de ensaios acústicos, fotogrametria e método dos elementos finitos.

JOÃO PEDRO SCHMITZ

Plano de Trabalho apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Gisele Suhett Helmer

Co-Orientador: Prof^o. Dr^o. Ivan Dario Gomez Araujo

Foz do Iguaçu
2022

JOÃO PEDRO SCHMITZ

Caracterização mecânica de rochas irregulares, através de ensaios acústicos, fotogrametria e método dos elementos finitos.

Plano de Trabalho apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr^o. Gisele Suhett Helmer
UNILA

Prof. Dr^o. Jesus Antonio Garcia Sanchez
(UNIFEI)

Prof. Dr^o. Patricio José Moreira Pires
(UFES)

Foz do Iguaçu, 05 de Agosto de 2022 _____.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): João Pedro Schmitz

Curso: Engenharia Civil de infraestrutura

Tipo de Documento

- | | |
|-------------------------------------|---|
| (.....) graduação | (.....) artigo |
| (.....) especialização | (.....) trabalho de conclusão de curso |
| (.....) mestrado | (X) monografia(.....) doutorado (.....) dissertação(.....) tese |
| (.....) CD/DVD – obras audiovisuais | |
| (.....) | |

Título do trabalho acadêmico: Caracterização mecânica de rochas irregulares, através de ensaios acústicos, fotogrametria e método dos elementos finitos.

Nome do orientador(a): Gisele Suhel Helmer

Data da Defesa: 05/08 /2022

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

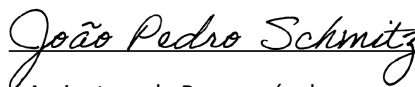
a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, 05 _____ de Setembro de 2022.



Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho a minha mãe, guerreira e dedicada, que sempre me apoiou e me incentivou, a minha irmã, que sempre me serviu de exemplo, aos meus amigos e namorada, que aguentaram meus estresses e me ajudaram a suportar essa jornada e a mim mesmo, que fui resiliente.

RESUMO

Diferentes ensaios de campo e laboratório são utilizados para a determinação das propriedades elásticas das rochas para projetos de obras de engenharia. Esses parâmetros também podem ser fundamentais para a classificação ou ainda para mensurar a intensidade de erosão de maciços rochosos. O ensaio de vibração acústica (EVA) é um método de ressonância dinâmica que permite estabelecer essas propriedades de forma não destrutiva. Conhecendo-se a geometria, a massa e as frequências de ressonância de um espécime do material, as propriedades elásticas do mesmo podem ser medidas. No entanto, todos os standards internacionais indicam o uso de geometrias pré-definidas para as amostras, entre elas as prismáticas e cilíndricas. Todavia, esse tipo de geometria necessita a confecção de corpos de prova, que dependem de equipamentos custosos para sua manufatura, o presente trabalho visa solucionar esse problema. Dessa forma, o objetivo geral da pesquisa é propor uma metodologia de caracterização mecânica de rochas com formato irregulares. A validação da metodologia foi feita com amostras prismáticas através de ensaios com ultrassom e de ensaios de vibração acústica. O módulo de deformação longitudinal (E_d) da amostra encontrado pelo método proposto é de 72,6 GPa, com o ultrassom é de 69,6 GPa e para o EVA com amostras prismáticas 63 e 71 GPa respectivamente. A variação entre os métodos foi de 12 %, enquanto a variabilidade natural do E_d é de 24%, confirmando a validação do método.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo (END). Modelo 3D. Ensaio de vibração acústica (EVA). Método dos elementos finitos (MEF).

ABSTRACT

Different field and lab tests are used to determine the rock elastic properties for civil engineering projects. These parameters can also be fundamental for the classification or the determination rock masses degree of erosion. The acoustic vibration test (AVT) is a dynamic resonance method that allows to establish these properties in a non-destructive manner. Knowing the geometry, mass and resonance frequency of a specimen, its elastic properties can be measured. However, all international standards determine the use of pre-defined geometries for samples, such as prismatic and cylindrical. However, this type of geometry calls demands the use of expensive equipment. The present work seeks to solve this issue. In this way, the general objective of the research is to propose a methodology for the mechanical characterization of rocks with irregular shapes. The validation of the methodology was done with prismatic specimens using ultrasound and acoustic vibration tests. The longitudinal deformation modulus (E_d) of the sample found via the proposed method was of 72,6 GPa, 69,6 GPa for the ultrasound test and for the AVT with prismatic samples the results are 63 and 71 GPa, respectively. The variation between methods was of 12%, while the natural variability of E_d is 24%, validating the method.

Key words: Non-Destructive testing (NDT). 3D Model. Acoustic vibration test (AVT). Finite elements method (FEM).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 : Amostra S01-05.....	Erro! Indicador não definido. 6
Figura 2 : Amostra S01-05 – Base retangular – BR (à esquerda); Amostra S01-05 – Base quadrada – BR (à direita);.....	Erro! Indicador não definido. 6
Figura 3 : Espectro de vibração das amostras S01-05 (acima); S01-05-BQ (centro); S01-05-BR (abaixo), sendo à esquerda os resultados dos ensaios e a direita o valor médio obtido.	Erro! Indicador não definido. 8
Figura 4 : Posicionamento de uma amostra do suporte.....	Erro! Indicador não definido. 9
Figura 5 : Detalhe do suporte (à esquerda); Amostra sob o suporte (à direita);	Erro! Indicador não definido. 9
Figura 6 : Malha aplicada ao modelo 3D no programa ReCap Photo. Amostra S01-05. (à esquerda acima); Malha refinada no programa ANSYS. Amostra S01-05 (à direita acima); Modo de vibração flexional. Amostra S01-05 (à esquerda abaixo) e Modo de vibração torcional (à direita abaixo).	Erro! Indicador não definido. 1
Figura 7 : Posicionamento do ultrassom na amostra (à esquerda); Medição com o ultrassom na amostra S01-05-BQ na posição 1c (à direita)	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físicas das amostras	Erro! Indicador não definido.	7
Tabela 2: Frequências principais das amostras	Erro! Indicador não definido.	8
Tabela 3: Propriedades mecânicas obtidas a partir do método proposto	Erro! Indicador não definido.	1
Tabela 4: Módulo dinâmico de deformação longitudinal obtidas através do ultrassom segundo sua posição (GPa) para a amostra S01-05-BQ	Erro! Indicador não definido.	2
Tabela 5: Resumo resultados ultrassom.....	Erro! Indicador não definido.	2
Tabela 6: Propriedades mecânicas obtidas a partir das equações 1-5 (Processo iterativo)	Erro! Indicador não definido.	2
Tabela 7: Resumo dos resultados		22
Tabela 8: Quantificação da divergência do módulo de deformação longitudinal dinâmico entre métodos (base método proposto).....	Erro! Indicador não definido.	3

Sumário

RESUMO	11
INTRODUÇÃO	12
METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
MASSA ESPECÍFICA.....	15
ENSAIO DE VIBRAÇÃO ACÚSTICO.....	17
MODELAGEM 3D E OBTENÇÃO DA MALHA.....	19
ANÁLISE MODAL.....	20
VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	21
CONCLUSÃO	23
REFERÊNCIAS	25

Caracterização mecânica de rochas irregulares, através de ensaios acústicos, fotogrametria e método dos elementos finitos.

Rock characterization of irregular samples through acoustic tests, photogrammetry and finite elements method.

João Pedro Schmitz

Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | joao.schmitz@aluno.unila.edu.br

Gisèle Suhett Helmer

Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | gisele.helmer@unila.edu.br

Iván Dario Gómez Araújo

Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | ivan.araujo@unila.edu.br

Resumo

Diferentes ensaios de campo e laboratório são utilizados para a determinação das propriedades elásticas das rochas para projetos de obras de engenharia. Esses parâmetros também podem ser fundamentais para a classificação ou ainda para mensurar a intensidade de erosão de maciços rochosos. O ensaio de vibração acústica (EVA) é um método de ressonância dinâmica que permite estabelecer essas propriedades de forma não destrutiva. Conhecendo-se a geometria, a massa e as frequências de ressonância de um espécime do material, as propriedades elásticas do mesmo podem ser medidas. No entanto, todos os standards internacionais indicam o uso de geometrias pré-definidas para as amostras, entre elas as prismáticas e cilíndricas. Todavia, esse tipo de geometria necessita a confecção de corpos de prova, que dependem de equipamentos custosos para sua manufatura, o presente trabalho visa solucionar esse problema. Dessa forma, o objetivo geral da pesquisa é propor uma metodologia de caracterização mecânica de rochas com formato irregulares. A validação da metodologia foi feita com amostras prismáticas através de ensaios com ultrassom e de ensaios de vibração acústica. O módulo de deformação longitudinal (E_d) da amostra encontrado pelo método proposto é de 72,6 GPa, com o ultrassom é de 69,6 GPa e para o EVA com amostras prismáticas 63 e 71 GPa respectivamente. A variação entre os métodos foi de 12 %, enquanto a variabilidade natural do E_d é de 24%, confirmando a validação do método.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo (END). Modelo 3D. Ensaio de vibração acústica (EVA). Método dos elementos finitos (MEF).

Abstract

Different field and lab tests are used to determine the rock elastic properties for civil engineering projects. These parameters can also be fundamental for the classification or the determination rock masses degree of erosion. The acoustic vibration test (AVT) is a dynamic resonance method that allows to establish these properties in a non-destructive manner. Knowing the geometry, mass and resonance frequency of a specimen, its elastic properties can be measured. However, all international standards determine the use of pre-defined geometries for samples, such as prismatic and cylindrical. However, this type of geometry calls demands the use of expensive equipment. The present work seeks to solve this issue. In this way, the general objective of the research is to propose a methodology for the mechanical characterization of rocks with irregular

shapes. The validation of the methodology was done with prismatic specimens using ultrasound and acoustic vibration tests. The longitudinal deformation modulus (E_d) of the sample found via the proposed method was of

72,6 GPa, 69,6 GPa for the ultrasound test and for the AVT with prismatic samples the results are 63 and 71 GPa, respectively. The variation between methods was of 12%, while the natural variability of E_d is 24%, validating the method.

Keywords: Non-Destructive testing (NDT). 3D Model. Acoustic vibration test (AVT). Finite elements method (FEM).

INTRODUÇÃO

Um das áreas de estudo de várias engenharias é conhecer as características físicas dos materiais empregados nas estruturas e no entorno natural, para isso os ensaios físicos destrutivos ou não destrutivos (END) são extensivamente utilizados.

Os ensaios mais recorrentes são os ensaios destrutivos, onde é necessária a preparação do corpo de prova em formato padronizado que são utilizados em equipamentos onerosos e após os ensaios o corpo de prova acaba ficando inutilizável.

Os ensaios não destrutivos (END) em rochas e materiais cimentícios é uma área da pesquisa já bem consolidada, as diferentes normas que tratam do assunto abrangem tanto os ensaios in-situ, quanto em laboratório.

Ensaio não destrutivo (END) permitem ensaios relativamente menos custosos em relação aos equipamentos e segundo (1) a principal vantagem de ensaios não destrutivos (ENDs) é o fato de poder ser aplicado em estruturas durante o uso, permitindo o monitoramento, o ensaio também serve para amostras, pois devido ao fato de o ensaio não danificar a estrutura interna, é possível realizar várias vezes o ensaio na mesma amostra, buscando validar os valores desejados.

Os ensaios in-situ mais utilizados são, métodos acústicos e elétricos, que permitem obter algumas características do material sem danificar a estrutura e sem necessidade de retirar amostras. Porém existem limitações para estas técnicas, como a dificuldade de acesso ao local para o ensaio ou a presença de fissuras que comprometem a análise dos dados. Segundo o Guia de ensaios não destrutivos (GENDEC) (2) a detecção e definição da extensão de defeitos internos devem ser restritos a profissionais bem qualificados com experiência anterior em interpretação dos resultados, pois a onda será difratada na fissura podendo assim ocasionar uma leitura deficiente, resultando numa interpretação errônea dos dados.

Já nos ensaios em laboratório, os ensaios disponíveis são ensaios de ultrassom e de percussão, onde as dificuldades são principalmente, a padronização do formato da amostra, a demanda de equipamentos espaçosos e a capacitação do responsável pelo ensaio, pois ele utilizará equipamentos delicados e de alto custo. Estes ensaios exigem um formato padronizado de corpo de prova para poder ser utilizados os cálculos de suas propriedades mecânicas.

Os ensaios não destrutivos nos permitem ter acesso a diversas propriedades, entre elas a GENDEC (2002) destaca os seguintes parâmetros fundamentais como massa

específica, módulo de elasticidade e resistência bem como dureza superficial, tamanho e distância da superfície de fratura. Estas propriedades são essenciais para a caracterização mecânica dos elementos analisados sendo eles materiais cimentícios.

No Quadro 1 encontram-se de forma sintetizada as diferenças entre tipos de ensaios, a diferença nos custos se dá principalmente devido a necessidade de moldar os corpos de prova para a realização de ensaios.

Quadro 1: Comparativo entre tipos de ensaios

Ensaio	Custo	Capacidade de reuso da amostra	Formato padronizado
Destrutivo	Alto	Não	Sim*
Não Destrutivo	Médio	Sim	Sim**
Método proposto	Baixo	Sim	Não

Notas: *o ensaio puntiforme é uma exceção. **para ensaios não destrutivos realizados em laboratório as amostras normalmente são ou quadradas ou cilíndricas. Fonte: o autor.

O EVA é uma técnica não destrutiva utilizada para a caracterização das propriedades mecânicas de amostras em formatos padronizados (cilíndricos ou prismáticos) por meio da obtenção das frequências de ressonância da amostra e aplicação de equacionamentos que relacionam as frequências naturais com as propriedades mecânicas dos materiais. Atualmente vem sendo cada vez mais utilizado em pesquisas de materiais cimentícios, esta técnica é respaldada pelas normas ASTM (3) e JIS (4). No Brasil recentemente no ano 2021 foi criada a norma ABNT NBR 8522-2 (5).

O ensaio de vibração acústica consiste em aplicar uma sequência de impactos leves com um martetele semi flexível na amostra, que devido aos impactos vibra. As oscilações são captadas por um microfone, o sinal é então processado por um programa, de forma a obter o espectro de frequências naturais da amostra, que são identificadas através dos picos locais do espectro.

Orientadas da teoria das vibrações no contínuo, as equações das principais frequências de ressonância para amostras de formato regulares podem ser deduzidas de forma analítica com relativa facilidade, as normas definem os formatos recomendados para a obtenção de Módulo de cisalhamento (G), Módulo de Young (E) e Coeficiente de Poisson (μ), sendo os formatos padronizados como cilindros ou barras retangulares. Onde os únicos parâmetros necessários para a obtenção das propriedades são, as dimensões (diâmetro e comprimento), a massa específica.

De acordo com (3), para uma barra retangular, temos as seguintes equações.

$$E = 0,9465(mf_f^2 / b)(L^3 / t^3)T_1 \quad (1)$$

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2)(t/L)^2 - 0,868(t/L)^4 - \left[\frac{8,340(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2)(t/L)^4}{(1 + 6,338(1 + 0,1408\mu + 1,5362\mu^2)(t/L)^2)} \right] \quad (2)$$

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt} [B / (1 + A)] \quad (3)$$

$$B = \left[\frac{(b/t + t/b)}{(4(t/b) - 2,52(t/b)^2 + 0,21(t/b)^6)} \right] \quad (4)$$

$$A = \frac{0,5062 - 0,8776(b/t) + 0,3507(b/t)^2 - 0,0078(b/t)^3}{12,03(b/t) + 9,892(b/t)^2} \quad (5)$$

Onde E é o módulo dinâmico de Young (Pa), m é a massa da amostra (kg), b é a largura (m), L é o comprimento (m), t é a espessura da barra (m), f_r é a frequência flexional de ressonância da barra em Hz, f_t é a frequência torcional, T1, A e B são fatores de correção e μ é o coeficiente de Poisson, que segundo a norma pode ser tanto um dado para o cálculo de T₁, como pode ser obtido através de um processo iterativo.

Sendo assim, a necessidade de amostras regulares é a principal limitação das normas (3), (4) e (5), tornando a aplicação das fórmulas acima citadas em outras formas geométricas impossível.

Visando suprir a necessidade de um formato padronizado para a aplicação das fórmulas citadas acima, pode ser utilizado uma combinação de modelagem 3D da amostra e o processamento das propriedades é dado através de uma análise modal utilizando o método dos elementos finitos.

O uso de modelagem 3D vem ganhando espaço em várias áreas de pesquisa, como no estudo de previsão do módulo de elasticidade de rochas (6), simulação de brocas de perfuração (7) ou bolts de reforço na iteração concreto projetado e rocha (8). Suas aplicações se expandem a outras áreas, como na medicina, sendo utilizado para a criação de modelos 3D de fêmur fraturado com o auxílio de imagens de tomografia (9).

Estes modelos podem ser facilmente obtidos, através da fotogrametria, que é definido como um conjunto de métodos para determinar as propriedades geométricas de objetos a partir de imagens fotográficas (10). Esse método pode ser aplicado com o auxílio de programas especializados, como por exemplo o ReCap Photo Pro da Autodesk (11), que unem estas fotos e cria uma reprodução da amostra em elemento 3D.

Segundo (12) o método dos elementos finitos (MEF) são utilizados em larga escala para calcular os módulos elásticos de modelos 2D e 3D. Esta análise, exige que o modelo 3D seja transformado em uma malha (mesh). Essa malha então pode ser analisada por programas especializados, como o ANSYS (13).

Utilizando análise inversa é possível determinar as propriedades mecânicas da amostra, como módulo dinâmico de deformação longitudinal (E_d), o coeficiente de Poisson (μ) e módulo de cisalhamento (G) através da calibração do MEF (14).

Abaixo é possível comparar os custos, nível de treinamento e necessidade de padronização dos corpos de prova.

Quadro 2: Comparativo entre os diferentes tipos de ensaios não destrutivos

Ensaio	Custo	Formato padronizado
TEI	Alto	Sim
Ultrassom	Alto	Sim*
Método proposto	Baixo	Não

Nota: *Caso a amostra não seja regular, é necessário deixar pelo menos duas faces paralelas e lisas. Fonte: o autor.

Logo é possível elaborar um novo ensaio não destrutivo (END) combinando o ensaio de vibração acústica (EVA) para obter as frequências principais de ressonância de uma amostra em formato irregular, então utilizando um modelo 3D da amostra é possível elaborar uma malha (mesh) e com isso

simulações são realizadas através do método dos elementos finitos (MEF), obtendo os valores das propriedades mecânicas.

O método proposto neste artigo, como pode ser visto no Quadro 2 tem como objetivo diminuir gastos para estudantes e pesquisadores que buscam obter as características mecânicas amostras irregulares. O método combina técnicas, como o EVA, modelagem 3D e o método dos elementos finitos (MEF), necessitando apenas, equipamentos de baixo custo e pouca especialização para a utilização do mesmo. Para a aferição da metodologia proposta será moldado dois corpos de prova prismáticos (S01-05-BQ e S01-05-BR) a partir da amostra original de formato irregular (S01-05) para aplicação de ensaios de ultrassom e EVA seguindo as respectivas normas (15) e (3).

METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método aqui proposto busca elaborar um ensaio não destrutivo para a caracterização de propriedades mecânicas de rochas em formatos não padronizados utilizando uma mescla de técnicas e tecnologias já consolidadas, mas ainda não utilizadas em conjunto com essa finalidade. A proposta consiste numa sequência de 4 passos para que se obtenha as propriedades mecânicas desejadas de amostrar em formatos irregulares, sendo eles:

- I. Cálculo de massa específica;
- II. Obtenção das frequências naturais longitudinais, flexionais e torcionais das amostras através de ensaio de vibração acústica;
- III. Obtenção do modelo 3D da amostra através de fotogrametria;
- IV. Definição dos módulos de Young, Poisson e cisalhamento utilizando análise inversa através da calibração de um MEF.

MASSA ESPECÍFICA

Para o cálculo da massa específica é utilizado o princípio de Arquimedes. Nesse processo recomenda-se que as amostras, sejam pesadas várias vezes. No caso de o formato da rocha ser muito irregular, é também recomendado que a mesma seja pesada cada vez com uma face diferente sendo apoiada na balança, ela deve ser

posicionada de forma que o centroide da amostra esteja o máximo possível alinhado com o centro da balança, as diferentes medições devem mostrar valores similares com o mínimo de erro.

Figura 1 : Amostra S01-05



Fonte: o autor.

Figura 2 : Amostra S01-05 – Base retangular – BR (à esquerda); Amostra S01-05 – Base quadrada – BR (à direita);



Fonte: o autor.

Para a obtenção do volume da amostra segundo o princípio de Arquimedes o princípio de Arquimedes define a seguinte relação

$$F_e = M_f \cdot g = \rho_f \cdot V_f \quad (6)$$

Onde: F_e é módulo da força de empuxo, M_f é a massa do fluido deslocado; g é a constante da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$); ρ_f é a massa específica do fluido; V_f é o volume do fluido deslocado. Sendo assim, o volume de fluido deslocado é igual ao volume do objeto submerso no fluido.

Aplicação do princípio de Arquimedes necessita que a amostra seja submersa em um fluido com massa específica conhecida, neste artigo o fluido escolhido foi a água realizando simultaneamente a medição da temperatura para definir a massa específica da água, eg. $20\text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho_f = 0,9982$). A amostra deve ser fixada a um fio de forma a permanecer o máximo possível na horizontal. Antes da submersão o recipiente com água deve ser pesado e o valor deve ser tarado na balança, então com a submersão da amostra de forma a não encostar nos lados ou no fundo do recipiente, o valor da massa de fluido deslocada (M_f) é obtido. Com isso podemos aplicar a equação (6) e obtermos o volume da amostra, os resultados para amostras podem ser vistos na Tabela 1.

$$V_f = M_f / \rho_f \quad (7)$$

Tabela 1: Características físicas das amostras

Amostra	Massa (g)	Mr(g)	Volume (cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
S01-05	2343	811	812,46	2,884
S01-05-BQ	584	205,1	205	2,841
S01-05-BR	280	98,6	98,8	2,835

Fonte: o autor.

ENSAIO DE VIBRAÇÃO ACÚSTICO

O EVA consiste em apoiar a amostra sobre um suporte com fios de aço (Figura 4) que idealiza um sistema sem restrições ou condições de contorno (livre-livre) e excitá-la com impactos diversas vezes em diferentes pontos do corpo de prova de forma aleatória com um martetele de haste flexível. Um microfone é utilizado para captar os sons e o software de análise espectral deve ser utilizado para analisar o conteúdo das frequências dos registros de som. Nesse caso foi utilizado o software UNILASTIC (16) desenvolvido na UNILA que realiza o processamento do sinal e gera o espectro de frequências do sinal.

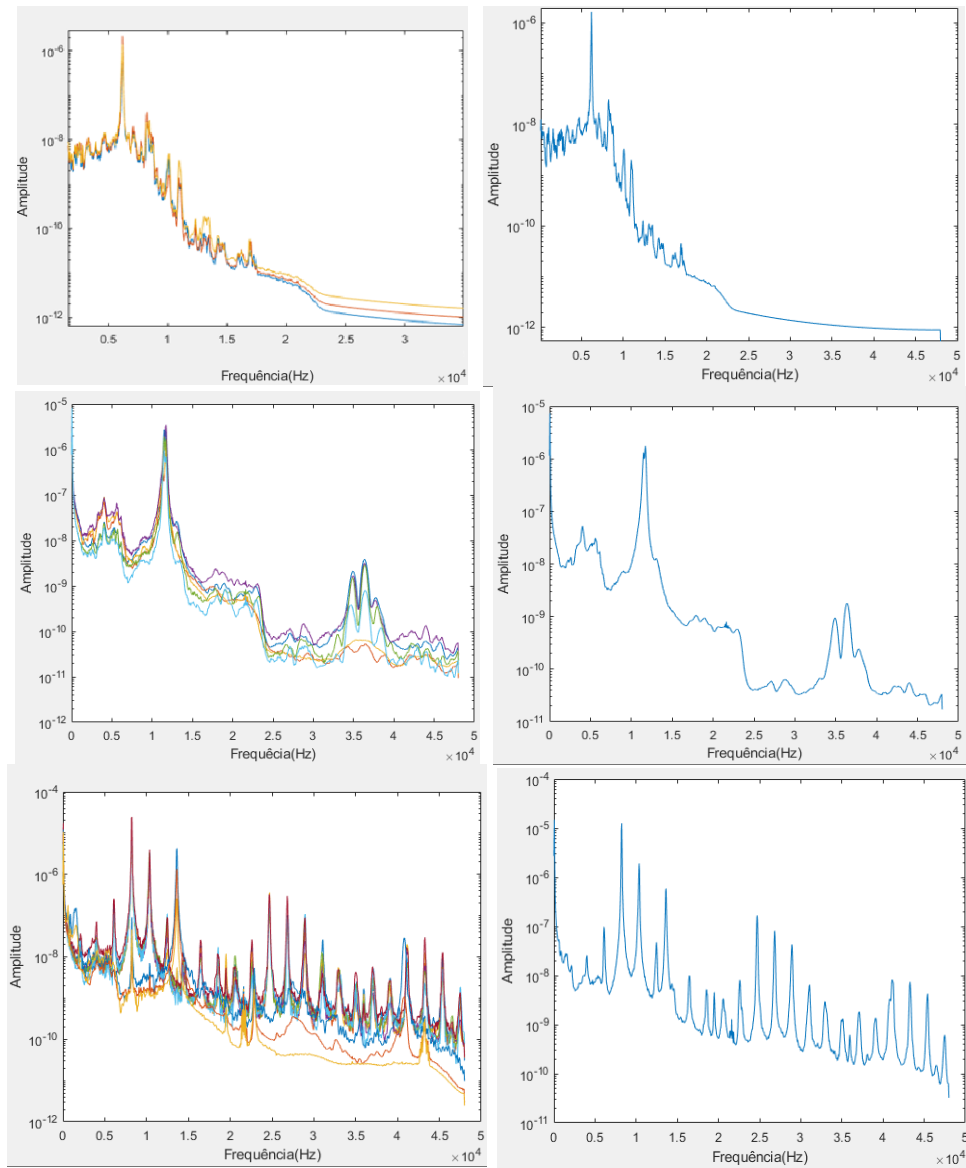
A partir do espectro em frequência podem ser extraídos os valores de todos os picos que representem as frequências naturais da amostra. Nesse ponto não é possível saber a que tipo de forma de vibração (e.g. flexional, torcional, longitudinal) pertence cada pico.

O ensaio de vibração acústico foi repetido diversas vezes para cada uma das amostras S01-05, S01-05-BQ e S01-05-BR, três, seis e 10 vezes, respectivamente. Isso permite averiguar a repetibilidade dos resultados. Cada ensaio foi realizado variando um pouco a forma da aplicação dos impactos de forma a estimular o máximo possível as frequências de vibração. As frequências encontradas para as amostras estudadas foram retiradas da Figura 3 e foram resumidas na Tabela 2.

As frequências selecionadas seguem um padrão onde as frequências flexionais e torcionais estão nos três primeiros picos. No caso da amostra S01-05-BQ é possível notar claramente o pico da frequência flexional, porém o pico de frequência torcional apresentou uma amplitude reduzida, localizado próximo a base do primeiro pico mais proeminente.

As normas citadas anteriormente servem apenas com amostras em formatos padronizados. Nesta metodologia, os procedimentos para obtenção das frequências de ressonâncias são iguais. Porém para que seja possível encontrar as propriedades mecânicas das rochas em formatos irregulares mais algumas etapas são necessárias.

Figura 3: Espectro de vibração das amostras S01-05 (acima); S01-05-BQ (centro); S01-05-BR (abaixo), sendo à esquerda os resultados dos ensaios e a direita o valor médio obtido.



Fonte: o autor.

Tabela 2: Frequências principais das amostras

Amostra	Frequência 1 (Hz)	Frequência 2 (Hz)
S01-05	6187	8250
S01-05-BQ	11484	13078
S01-05-BR	8203	10359

Fonte: o autor.

Figura 4 : Posicionamento de uma amostra do suporte



Fonte: o autor.

MODELAGEM 3D E OBTENÇÃO DA MALHA

Para a modelagem 3D a técnica utilizada se chama fotogrametria, onde é criado um modelo 3D através de fotografias e posteriormente, uma malha da amostra é elaborada. As etapas para realizar o modelo, consistem em:

- A amostra deve ser fotografada visando toda sua superfície em todos os ângulos possíveis, buscando a menor quantidade de pontos cegos da amostra, ou seja, a parte apoiada da amostra deve ser mínima, para esta etapa é recomendado o uso de 100 fotos.
- Para que a amostra seja fotografada com a menor superfície de apoio possível um suporte foi elaborado utilizando uma barra de aço fixada a uma base de madeira (Figura 5).
- É recomendado que use ao menos 2 focos fixos de luz vindos da parte superior, para que seja revezado a direção da iluminação, juntamente com o flash da câmera, visando a menor quantidade de sombras nas fotografias.

Figura 5 : Detalhe do suporte (à esquerda); Amostra sob o suporte (à direita);



Fonte: o autor.

As fotos foram importadas no programa ReCap Photo PRO da Autodesk.

- O modelo gerado deve ser tratado, buscando retirar partes divergentes da amostra.
- A escala deve ser definida, medindo uma das faces da amostra real, então é compatibilizado o volume do modelo, utilizando para isso o volume obtido através do princípio de Arquimedes.
- O modelo geométrico 3D deve ser exportado em formato compatível com o programa ANSYS, neste caso foi o formato (.STL).

Os modelos gerados podem ser vistos na Figura 6.

ANÁLISE MODAL

A análise modal consiste em definir as frequências naturais e modos de vibração de um modelo em elementos finitos, para isto é necessário definir as características físicas, geométricas e condições de contorno do modelo.

Dessa forma, inicialmente deve ser criado um material com as características físicas citadas na Tabela 1, o material é definido como isotrópico, com valores iniciais do Módulo de Young e do Coeficiente de Poisson de acordo com a literatura e como esperado para a amostra estudada.

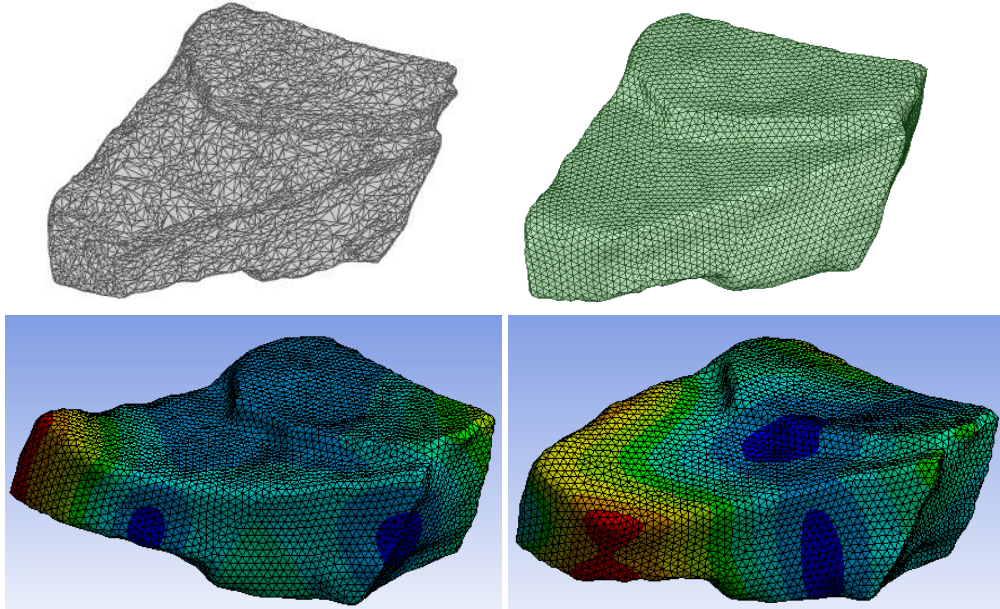
O modelo 3D (Figura 6 acima à esquerda) é então adicionado ao programa e sua malha é refinada (Figura 6 acima à direita) buscando suavização na superfície da amostra. O material criado é associado ao modelo geométrico 3D.

Então a simulação é realizada na condição de corpo livre-livre, fornecendo assim os modos de vibração da amostra. Através da análise dos modos existentes, é identificado os modos de vibração flexional e torcional, (Figura 6 abaixo) que devem pertencer as frequências 1 e 2 identificadas pelo ensaio acústico da Tabela 2.

Com uso de ANSYS é realizado um processo iterativo de calibração do modelo de elementos finitos. Como valores iniciais do processo de calibração são definidos valores de Módulo de Young (E) e Coeficiente de Poisson (μ), limites máximo e mínimo do estipulado pela literatura para o material estudado. A análise é feita, definindo como função objetivo que as frequências flexionais e torcionais obtidas para o modelo 3D, sejam compatíveis ou próximas das obtidas no EVA. O método de otimização utilizado no ANSYS para realizar esse processo é chamado de Adaptive Single-Objective (13).

Na Tabela 3 para a amostra S01-05 é apresentado o resultado das propriedades mecânicas obtidas através do processo de calibração do modelo elementos finitos. Os resultados são compatíveis com os valores esperados para um basalto maciço denso.

Figura 6: Malha aplicada ao modelo 3D no programa ReCap Photo. Amostra S01-05. (à esquerda acima); Malha refinada no programa ANSYS. Amostra S01-05 (à direita acima); Modo de vibração flexional. Amostra S01-05 (à esquerda abaixo) e Modo de vibração torcional (à direita abaixo).



Fonte: o autor.

Tabela 3: Propriedades mecânicas obtidas a partir do método proposto

Amostra	Frequência Flexional (Hz)	Frequência Torcional (Hz)	Módulo dinâmico de deformação longitudinal (GPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo dinâmico de cisalhamento (GPa)
S01-05	6187	8250	72,6	0,273	28,50

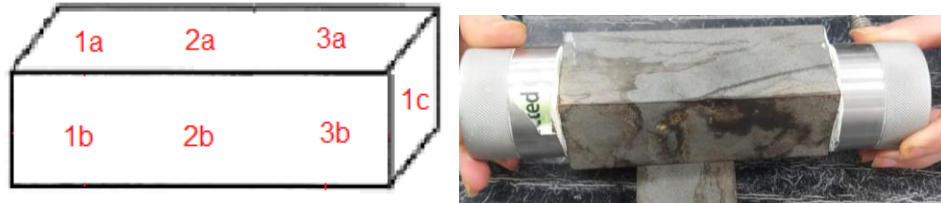
Fonte: o autor.

VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para a aferição dos valores obtidos, serão aplicados dois métodos normalizados.

- Ensaio de ultrassom com o equipamento ULTRACON-170 seguindo a norma (15) onde foi possível obter os valores abaixo para uma amostra prismática, com as dimensões de 4,155 x 4,241 x 11,438 cm (S01-05-BQ).
- Aplicação do EVA para um corpo de prova moldado da mesma amostra, seguindo o definido nas normas (3) e (4), para este ensaio foram realizados 2 corpos de provas a primeira com 4,155 x 4,241 x 11,438 cm (S01-05-BQ) e a segunda com 2,085 x 4,335 x 10,196 cm (S01-05-BR).

Figura 7 : Posicionamento do ultrassom na amostra (à esquerda); Medição com o ultrassom na amostra S01-05-BQ na posição 1c (à direita)



Fonte: o autor.

Tabela 4: Módulo dinâmico de deformação longitudinal obtidas através do ultrassom segundo sua posição (GPa) para a amostra S01-05-BQ

Local	a	b	c
1	86,3	68,2	64,9
2	70,1	66,3	-
3	78,7	52,6	-

Fonte: o autor.

Tabela 5: Resumo resultados ultrassom

	Módulo GPa	Erro
Valor máximo	86,3	24%
Valor mínimo	52,6	24%
Média	69,6	-

Fonte: o autor.

Tabela 6: Propriedades mecânicas obtidas a partir das equações 1-5 (Processo iterativo)

Amostra	Frequência Flexional (Hz)	Frequência Torcional (Hz)	Módulo dinâmico de deformação longitudinal (GPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo dinâmico de cisalhamento (GPa)
S01-05-BQ	11484	13125	63	0,027	31
S01-05-BR	8250	10359	71	0,312	27

Fonte: o autor.

Tabela 7: Resumo dos resultados

Amostra	Método	Módulo dinâmico de deformação longitudinal (GPa)	Coefficiente de Poisson	Módulo dinâmico de cisalhamento (GPa)
S01-05-BQ	EVA	63	0,027	31
S01-05-BR	EVA	71	0,312	27,1
S01-05-BQ	Ultrassom	69,6	-	-
S01-05	Método proposto	72,6	0,273	28,5

Fonte: o autor.

Tabela 8: Quantificação da divergência do módulo de deformação longitudinal dinâmico entre métodos (base método proposto)

Amostra	Método	Módulo dinâmico de deformação longitudinal (GPa)	Erro (%)
S01-05-BQ	EVA	63	13%
S01-05-BR	EVA	71	2%
S01-05-BQ	Ultrassom	69,6	4%
S01-05	Método proposto	72,6	-

Fonte: o autor.

A Tabela 4 e Tabela 6 mostram os resultados dos ensaios realizados para a validação do método proposto. Na Tabela 7 podemos ver o resumo dos resultados de todos os ensaios. Para o ultrassom foi realizada a média dos valores obtidos e explícitos na Tabela 4.

Para as amostras prismáticas da Tabela 7, suas propriedades mecânicas foram calculadas utilizando os equacionamentos da norma (3). Como visto na Tabela 7, os resultados obtidos através do método proposto para o formato irregular S01-05 foram similares aos obtidos para as amostras prismáticas S01-05-BQ e a S01-05-BR. A amostra S01-05-BQ devido a sua geometria, as frequências flexionais e torcionais acabaram ficando relativamente próximas, resultando em valores que divergem tanto para o módulo dinâmico de deformação flexional, quanto para o Coeficiente de Poisson. Na normativa americana ASTM 1876 (3) é descrito que a amostras com formato mais cúbicos possuem este empecilho, por este motivo a amostra com formato prismático de base retangular é mais utilizada para a obtenção de ambas as frequências.

Com a

Tabela 8 pode-se então observar que os valores do módulo dinâmico de deformação longitudinal encontrados podem ser considerados bem próximos, com uma variabilidade menor que a encontrada para uma mesma amostra submetida em vários pontos distintos ao teste feito com o ultrassom Tabela 5. Já a divergência entre os valores do coeficiente de Poisson para os ensaios de EVA da amostra S01-05-BR e S01-05 do método proposto, podem estar relacionados a pequenas fraturas internas presentes na amostra S01-05-BR e assim como os valores dispersos encontrados no ensaio de ultrassom da amostra S01-05-BQ na Tabela 4 podem ser explicados devido ao fato de assumirmos as amostras como homogêneas e isotrópicas, que por ser um material de origem natural, esta simplificação pode acarretar possíveis divergências como as detectadas.

CONCLUSÃO

Neste artigo, é possível observar que a metodologia apresentada possui uma resposta satisfatória, resultando em valores dentro do esperado para as amostras de basalto, que segundo Goodman (1986), basaltos possuem módulo dinâmico de deformação

longitudinal (E_d) entre 41 e 87 GPa, o coeficiente de Poisson (μ) entre 0,19 e 0,38 e o módulo de cisalhamento (G) fica entre 20,5 e 43,5 GPa. Valores esses compatíveis com os encontrados no presente estudo (Tabela 7).

Logo a metodologia apresentada, que integra EVA, fotogrametria e análise modal, permite realizar ensaios não destrutivos em amostras de formatos irregulares, sem causar danos as mesmas, e sem necessitar de equipamentos onerosos para a moldar os corpos de prova, ou para o ensaio em si.

Os dados obtidos, além de se encontrarem de acordo com o indicado na literatura, se encontram também próximos aos valores obtidos com os ensaios de aferição (

Tabela 8), pois mesmo o maior erro encontrado entre as diferentes amostras e metodologias (12%) é menor que a variabilidade natural do módulo de deformação para esse tipo de material (24%) (Tabela 5) , sendo assim uma boa opção para estudantes e pesquisadores que possuam poucos recursos, porém grande interesse na área de pesquisa de resistência de materiais de difícil padronização geométrica.

As divergências nos valores obtidos podem estar relacionadas às simplificações utilizadas na hora da análise do método apresentado, como definir o material como isotrópico e homogêneo, ou devido a microfissuras internas, porém estas divergências podem ser mitigadas caso mais estudos sejam realizados nesta linha de pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. Schabowicz K. Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering. *Materials*. 2019 Oct 3;12(19):3237.
2. IAEA. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. 2002.
3. ASTM E1876-09. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. 2016.
4. JIS A 1127. Method of test for dynamics modulus of elasticity, rigidity and dynamic Poisson's Ratio of concrete specimens by ressonance vibration. 1993.
5. ABNT NBR 8522-2:2021. Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. 2021.
6. Sun Z, Salazar-Tio R, Duranti L, Crouse B, Fager A, Balasubramanian G. Prediction of rock elastic moduli based on a micromechanical finite element model. *Computers and Geotechnics*. 2021 Jul;135:104149.
7. Priest J, Ghadbeigi H, Avar-Soberanis S, Gerardis S. 3D finite element modelling of drilling: The effect of modelling method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021 Nov;35:158–68.
8. Dong X, Karrech A, Elchalakani M, Qi C, Manca M. 3D bolted cohesive element for the modelling of bolt-reinforced rough rock-shotcrete interfaces. *Computers and Geotechnics*. 2020 Sep;125:103659.
9. Bahia MT, Mercuri EGF, Hecke MB. Análise Estrutural via MEF de um Fêmur Reconstruído a partir de Imagens de Tomografia com Mapeamento de Densidades [Internet]. 2016. Available from: <https://www.ccad.uiowa.edu/MIMX/projects/IA-FEMesh>
10. Bravo, Buchón-Moragues, Redondo, Ferri, Sánchez-Pérez. Integrated Photogrammetric-Acoustic Technique for Qualitative Analysis of the Performance of Acoustic Screens in Sandy Soils. *Sensors*. 2019 Nov 8;19(22):4881.
11. Autodesk. ReCap Photo. 2021.
12. Garboczi EJ, Berryman JG. Elastic moduli of a material containing composite inclusions: effective medium theory and finite element computations. *Mechanics of Materials*. 2001 Aug;33(8):455–70.
13. ANSYS. ANSYS 19.2. 2019.
14. Karimpouli S, Tahmasebi P, Saenger EH. Estimating 3D elastic moduli of rock from 2D thin-section images using differential effective medium theory. *GEOPHYSICS*. 2018 Jul 1;83(4):MR211–9.
15. ABNT NBR 8802: 2019. Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 2019.
16. RAMIREZ PA, ARAUJO IDG. UNILASTIC: EQUIPMENT AND SOFTWARE TO EVALUATE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS BY ACOUSTIC TEST. In: XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2020, Foz do iguaçu. XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. In 2020.