

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

DJONATHAN GOULART

**ANÁLISE E CORRELAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
ROCHAS DA FORMAÇÃO BOTUCATU E GRUPO SERRA GERAL**

Florianópolis
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**ANÁLISE E CORRELAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
ROCHAS DA FORMAÇÃO BOTUCATU E GRUPO SERRA GERAL**

Djonathan Goulart

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a banca examinadora para a obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Goulart, Djonathan

Análise e correlação de propriedades físicas e mecânicas
de rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra Geral /
Djonathan Goulart ; orientador, Murilo da Silva Espíndola,
2019.

135 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia,
Florianópolis, 2019.

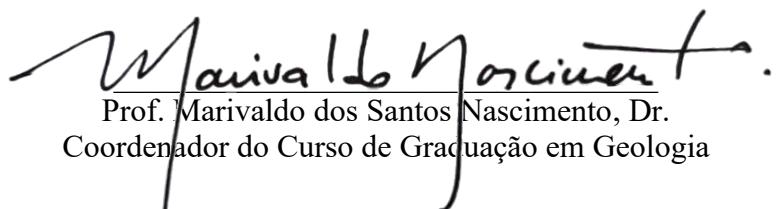
Inclui referências.

1. Geologia. 2. UCS. 3. Módulo de Young. 4. Bacia do
Paraná. I. da Silva Espíndola, Murilo. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Geologia. III.
Título.

DJONATHAN GOULART

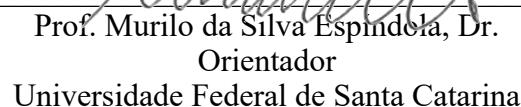
**ANÁLISE E CORRELAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
ROCHAS DA FORMAÇÃO BOTUCATU E GRUPO SERRA GERAL**

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção de Título de Bacharel em Geologia, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Geologia da Universidade Federal de Santa Catarina.

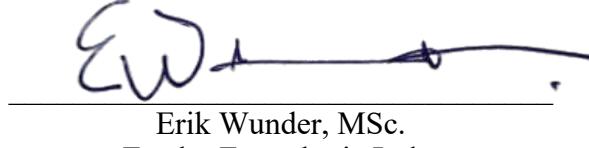


Prof. Marivaldo dos Santos Nascimento, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Geologia

Banca Examinadora:



Prof. Murilo da Silva Espíndola, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Erik Wunder, MSc.
Estelar Engenharia Ltda.



Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cleia e Pedro, por terem me proporcionado uma educação de qualidade e por todo o apoio, incentivo e carinho.

Ao professor Murilo, pela orientação, amizade, paciência, conselhos e todo o conhecimento compartilhado ao longo da graduação.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Geotecnica Aplicada, Marixco, Sutil, Zanini, Vitor, Nara, Hickel, Carioca e Renata pelas discussões, zoações, cafés e parceria.

À minha equipe de mapeamento, Fabiane e Smeagol, pelos melhores dez dias de campo da graduação, pela amizade, companheirismo, noites viradas compilando dados de campo, e pelas cervejas e diversão compartilhados.

À Bruninha e Luiza, pela amizade, conversas, conselhos, apoio nas horas dificeis, e pelas diversas risadas nos bares e *happy hours*.

A todos os professores do curso de geologia por todo o conhecimento compartilhado que me proporcionaram uma visão única de nosso planeta.

A todas as amizades que fiz durante a graduação, por terem proporcionado essa experiência incrível e momentos únicos.

Ao Erik e à Estelar Engenharia, por terem doado os testemunhos de sondagem que permitiram a realização deste trabalho.

Ao Milto de Concórdia por ter armazenado os testemunhos até que fossem transferidos para Florianópolis.

À Defesa Civil de Santa Catarina, pelo importante e excelente trabalho que realizam, e por terem transportado os testemunhos de Concórdia até a Universidade Federais de Santa Catarina.

À Hella, ao Isaque e ao Grupo de Pesquisa em Ensaios não Destrutivos, por terem disponibilizado o equipamento ultrassônico utilizado nos ensaios e pelo auxílio na execução dos mesmos.

Ao professor César e à Franciely, por terem disponibilizado a estrutura do Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL campus Pedra Branca e pelo auxílio na execução dos ensaios.

A todos que de alguma forma contribuíram na execução deste trabalho ou para a minha formação acadêmica.

*“Nós estávamos excedendo os limites
de nossa capacidade em prever as
consequências de nossas ações.”*

(Karl Terzaghi, 1936)

RESUMO

A necessidade de se prever o comportamento mecânico da rocha diante das tensões impostas por uma obra de engenharia, seja apoiada ou escavada no material rochoso, é fundamental para que se reduza os riscos de acidentes e garantir o sucesso do empreendimento. Dois parâmetros amplamente utilizados e que quantificam esse comportamento são a resistência à compressão uniaxial (UCS) e o módulo de Young. A obtenção destes parâmetros envolve a execução de ensaios que demandam tempo, possuem custos elevados e, por serem destrutivos, impossibilitam a reutilização do material em caso de erros. Uma crescente tendência a prever estes dois parâmetros a partir de outras propriedades, físicas e mecânicas, obtidas a um custo menor e por ensaios não destrutivos, levou diversos pesquisadores a utilizarem técnicas estatísticas de regressão linear capazes de fornecer modelos de previsão significativos. Entretanto, estes modelos servem apenas para as rochas utilizadas na correlação, sendo necessárias calibrações para que seja possível utilizá-los em rochas de outros locais. Para rochas da Bacia do Paraná, este tipo de estudo é antigo e de difícil acesso. Desta forma, foram utilizados neste trabalho 38 corpos de prova de rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra Geral, posicionados no topo da Bacia, com o objetivo de fornecer modelos que permitam prever o comportamento mecânico destas rochas. Foram realizados ensaios de caracterização geológico-geotécnica, em condição seca e saturada, e os resultados obtidos passaram por uma análise estatística, que mostrou boas correlações entre quase todas as propriedades obtidas. Para o modelo de previsão de UCS, foram utilizados o peso específico seco e a velocidade de propagação de ondas P, enquanto que para o módulo foi utilizada apenas a velocidade de ondas P. Ambos os modelos apresentaram bons coeficientes de correlação: 0.898 e 0.889, respectivamente. Para um intervalo de previsão com confiança de 95%, o erro variou de 59 a 167% do valor previsto para UCS e 69 a 144% para o módulo. Foram disponibilizadas tabelas com fatores para diferentes intervalos de previsão, para que se possa trabalhar com diferentes níveis de incerteza. Embora não substituam dados de campo ou mesmo de laboratório, estes modelos permitem reduzir incertezas a um baixo custo em etapas preliminares de projeto.

Palavras-chaves: UCS; Módulo de Young; Bacia do Paraná.

ABSTRACT

The need to predict the mechanical behaviour of rocks in the face of stress imposed by engineering work, supported or excavated in rock material, is fundamental for reducing the risk of accidents and ensuring the success of the project. Two parameters widely used that quantify this behaviour are uniaxial compressive strength and Young's modulus. Obtaining these parameters involves the execution of time and money demanding tests and, by being destructive, make it impossible to reuse samples in case of errors. A growing tendency to correlate these two parameters with other physical and mechanical properties, obtained by testing that require less time and money and are non-destructive, has motivated several researchers to use linear regression statistical technics that can provide significant prediction models. However, these models can only be used with the same rocks used in the correlation, requiring calibrations to enable use with rocks from another locations. For Paraná Basin rocks, this type of study is old and difficult to find. Thus, in this work, 38 samples from Botucatu Formation and Serra Geral Group, placed at the top of Paraná Basin stratigraphy, were used to provide models that enable the prediction of the mechanical behaviour of these rocks. Geological-geotechnical characterization tests were performed, under dry and saturated conditions, and the results were subjected to a statistical analysis, which showed good correlation between almost all the tested properties. For the UCS prediction model, dry specific weight and P-wave propagation velocity were used, while for the Young's modulus only P-wave velocity was used. Both models showed a good correlation index: 0.898 and 0.889, respectively. For a prediction interval with 95% of confidence, the error ranged from 59 to 167% of the predicted value for UCS and 69 to 144% for the modulus. Factors for different prediction intervals were provided to allow work with different levels of uncertainty. Although these models do not replace in situ or laboratory data, they allow for the reduction of uncertainty at low cost in the early stages of engineering projects.

Key words: UCS; Young's Modulus; Paraná Basin.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1: Mapa de localização dos furos de sondagem.....	24
Figura 2: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná.....	28
Figura 3: Transição do material rochoso, de rocha intacta para maciço altamente fraturado, conforme aumenta-se a escala de trabalho.....	33
Figura 4: Tensões principais atuando em um corpo de dimensões infinitesimais.....	34
Figura 5: (A) Corpo de prova cilíndrico sob tensão uniaxial. (B) Círculo de Mohr representando o estado de tensões do corpo de prova.....	35
Figura 6: (A) Elongação (e) de um corpo comprimido, onde l_0 é seu comprimento inicial, l_1 seu comprimento final. (B) Deformação causada em um corpo pela tensão axial σ . O coeficiente de Poisson relaciona o encurtamento e_a com a elongação e_t	36
Figura 7: Diagramas genéricos tensão x deformação. (A) Deformação inicia-se e permanece como elástica até o ponto de cedência. A partir deste ponto a deformação se torna plástica. Ao remover a tensão atuante, a deformação elástica é revertida, enquanto a plástica permanece. (B) Tensão aumentada até atingir o ponto de ruptura, onde ocorre a perda da coesão do material pelo desenvolvimento de um plano de fratura.....	37
Figura 8: comportamento do material associado à variação no regime de deformação, conforme aumenta-se a pressão confinante e a temperatura.....	38
Figura 9: Fases constituintes de uma rocha.....	41
Figura 10: Covariância entre porosidade total e (A) grau de alteração, (B) módulo de elasticidade, resistência à compressão uniaxial simples e à tração.....	45
Figura 11: Onda P, com direção de vibração das partículas paralela à direção de propagação da onda. Onda S, com direção de vibração das partículas perpendicular à direção de propagação da onda.....	46
Figura 12: Valores de V_p e V_s para diferentes tipos de rochas.....	47
Figura 13: Correlação entre densidade e velocidade de propagação de ondas P em rochas ígneas e metamórficas.....	47
Figura 14: Variação de V_p e V_s em função da porosidade e conteúdo de argilominerais. Ensaios realizados em 75 amostras de arenito, saturadas em água, sob pressão confinante de 40 MPa e poropressão de 1 MPa.....	49
Figura 15: Histograma com a diferença entre V_p para a rocha seca e saturada (ΔV_p) para diferentes tipos de rochas. Valores positivos de ΔV_p indicam uma relação direta entre V_p e o grau de saturação, valores negativos indicam uma relação inversa.....	49
Figura 16: Correlação de V_p com a resistência a compressão uniaxial, para diferentes teores de umidade.....	52
Figura 17: Dispersão dos valores de coeficiente de Poisson estático e dinâmico, mostrando ausência de correlação entre estes parâmetros.....	53
Figura 18: Caixas com os testemunhos de sondagem, armazenadas no Núcleo de Pesquisas Geológicas, UFSC.....	56
Figura 19: Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.....	58
Figura 20: Posição dos corpos de prova em cada testemunho de sondagem. A imagem não representa a disposição espacial dos furos de sondagem.....	59
Figura 21: Equipamento utilizado para o corte dos corpos de prova.....	60
Figura 22: Faceamento dos corpos de prova utilizando a retífica pertencente ao Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL.....	61
Figura 23: Laminas petrográficas e corpos de prova de onde foram extraídas.....	62
Figura 24: (A) Paquímetro utilização para a determinação das dimensões dos corpos de prova. (B) Medidas obtidas para o cálculo da altura e diâmetro médios de cada testemunhos.....	63
Figura 25: (A) Secagem dos corpos de prova a 105° C durante 24 h. (B) Balança digital utilizada para determinar o peso dos sólidos.....	64

Figura 26: Saturação dos corpos de prova. À esquerda, o recipiente contendo os corpos de prova imersos em água. À esquerda, a bomba de vácuo utilizada.....	64
Figura 27: (A) Equipamento Pundit Lab+, utilizado medir a velocidade de propagação de ondas. (B) Bloco padrão para a calibração do equipamento. (C) Ensaio sendo executado, com emissão e leitura direta de pulsos ultrassônicos.....	65
Figura 28: Método <i>zero-crossing</i> : possíveis tempos de chegada e média de cada tempo entre todos os testes em condição não saturada para o corpo de prova MA01-02.....	66
Figura 29: (A) Sistema de Ensaios da EMIC: Maquina Universal à esquerda e Estrutura de Compressão à direita. (B) Corpo de prova posicionado na prensa uniaxial e com os extensômetros fixados.....	67
Figura 30: Arranjo e funcionamento dos equipamentos do Sistema de Ensaios da EMIC.....	68
Figura 31: Gráfico com os ciclos de carga e descarga seguidos da ruptura do corpo de prova....	69
Figura 32: Gráfico deformação específica x tensão de uma etapa de carregamento. O coeficiente angular da equação da reta ajustada representa o módulo de Young em MPa.....	69
Figura 33: (A) Distribuição com assimetria à direita. (B) Distribuição próxima à normal.....	72
Figura 34: Posição dos corpos de prova em cada testemunho de sondagem, com classificação litológica. A imagem não representa a disposição espacial dos furos de sondagem.....	73
Figura 35: (A) Lâmina EU05-01, PP: Basalto afanítico holocrystalino com microvesículas (ves) e amígdalas preenchidas por celadonita (cel). (B) Lâmina EU05-01, PC: Fenocristais de plagioclásio sub e euédricos (plg) e piroxênio anédrico (px). (C) Lâmina MA02-06, PC: basalto hipocrystalino, com 50% de teor de vidro vulcânico. (D) Brecha basáltica com zeólita e celadonita preenchendo vesículas e fraturas. (E) Corpo de prova QD05-01: Vesículas total e parcialmente preenchidas por celadonita em matriz com alto grau de intemperismo. (F) Corpo de prova MA03-03: Vesículas e fraturas preenchidas por zeólitas em matriz com alto grau de intemperismo.....	75
Figura 36: (A) CP QD03-01: Fraturas regeneradas com bandas de hidrotermalismo. (B) Lâmina QD03-01, PC: cristal de quartzo formado por hidrotermalismo em matriz basáltica composta por plagioclásio e piroxênio.....	76
Figura 37: (A) Lâmina QD03-02: quartzo e feldspato em matriz vítrea. (B) Níveis milimétricos de óxido de ferro.....	76
Figura 38: (A) Corpo de prova MA01-03: Clasto juvenil com vesículas preenchidas por sedimentos e zeólitas. (B) Lâmina MA01-05, PP: Clasto juvenil com morfologia irregular fluidal. Vesículas e fraturas preenchidas por sedimentos, indício de interação do magma com sedimentos inconsolidados e úmidos.....	77
Figura 39: (A) Estrutura de lamination inclinada. (B) Foto em lupa do corpo de prova CB05-01: arenito de textura fina, composto predominantemente por grãos de quartzo, com feldspato caulinizado em menor quantidade. (C) Lâmina CB05-01: grãos de quartzo com média a alta esfericidade, sub a arredondados, bem selecionados (Obs.: lâmina com defeito).....	78
Figura 40: Matriz de correlação entre propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova ensaiados.....	82
Figura 41: Gráfico peso específico seco X porosidade efetiva.....	84
Figura 42: Relação entre peso específico seco, saturado e teor de umidade.....	85
Figura 43: Relação entre ondas P e S, com teor de umidade igual a zero.....	86
Figura 44: Correlações de velocidades de propagação com peso específico e porosidade efetiva.....	87
Figura 45: Variações entre V_p e V_s em função da porosidade.....	88
Figura 46: Efeito da saturação da velocidade de ondas P e S.....	89
Figura 47: Correlações entre UCS e propriedades físicas e velocidade de ondas.....	92
Figura 48: Correlação entre módulo de Young dinâmico seco com propriedades físicas e velocidade de ondas.....	94
Figura 49: Correlação entre Poisson e peso específico, ao considerar os efeitos da porosidade..	95

Figura 50: Correlação entre módulo de Young estático e propriedades físicas e velocidade de propagação.....	96
Figura 51: Correlação entre condição seca e saturada para módulo de Young e coeficiente de Poisson dinâmicos.....	97
Figura 52: Correlações entre ΔE_{din} , ΔV_p e ΔV_s	98
Figura 53: Variação dos resultados de módulo e Poisson dinâmicos devido à saturação.....	98
Figura 54: Correlação entre módulo estático saturado e dinâmico seco e saturado.....	99
Figura 55: Gráfico σ_c previsto x observado, com intervalo de previsão com 95% de confiança..	
101	
Figura 56: Intervalo de previsão com nível de confiança de 80%, onde espera-se que em 90% das previsões o valor real esteja acima do limite inferior.....	102
Figura 57: (A) Gráfico de distribuição dos resíduos padrões; (B) histograma de resíduos; (C) gráfico Q-Q.....	103
Figura 58: Intervalos de previsão com 95% de confiança para o modelo proposto por diferentes autores.....	104
Figura 59: Gráfico E_{est_seco} previsto x observado, com intervalo de previsão com 95% de confiança.....	105
Figura 60: (A) Gráfico de distribuição dos resíduos padrões; (B) histograma de resíduos; (C) gráfico Q-Q.....	106
Figura 61: Intervalos de previsão com 95% de confiança para o modelo proposto por diferentes autores.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Propriedades geológicas e geomecânicas da matriz rochosa e métodos de determinação.....	41
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados das sondagens rotativas dos testemunhos utilizados.....	25
Tabela 2: Relação do peso específico com as diferentes fases presentes em uma rocha.....	42
Tabela 3: Valores típicos de pesos específicos para algumas rochas.....	43
Tabela 4: Valores típicos de porosidade para algumas rochas.....	45
Tabela 5: Valores típicos de resistência à compressão uniaxial obtidos para diversos tipos de rochas.....	50
Tabela 6: valores de a e b de diferentes rochas para a equação 19.....	51
Tabela 7: Valores obtidos empiricamente por diferentes autores para as constantes a e b da equação 20.....	51
Tabela 8: Valores típicos de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, ambos estáticos.	52
Tabela 9: Correlações entre porosidade e módulo de elasticidade estático para diferentes rochas.....	54
Tabela 10: Correlações entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico para vários tipos de rochas. Módulos de elasticidade em GPa, densidade (ρ) em kg/m ³ , porosidade (n) em %, resistência à compressão uniaxial (σ_c) em MPa.....	54
Tabela 11: generalização das correlações da Tabela 10, com as constantes a serem determinadas empiricamente.....	55
Tabela 12: Dados das sondagens rotativas dos testemunhos utilizados.....	57
Tabela 13: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica.....	80
Tabela 14: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para peso específico seco e saturado, por litologia.....	83
Tabela 15: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para porosidade efetiva, por litologia.....	83
Tabela 16: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para velocidade de propagação de ondas P e S em condição não saturada, por litologia.....	86
Tabela 17: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para velocidade de propagação de ondas P e S, por litologia.....	89
Tabela 18: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para resistência à compressão uniaxial, por litologia.....	91
Tabela 19: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para módulo de elasticidade dinâmico, em condição seca e saturada, por litologia.....	93
Tabela 20: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para coeficiente de Poisson dinâmico, em condição seca e saturada, por litologia.....	93
Tabela 21: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para módulo de elasticidade estático em condição saturada, por litologia.....	93
Tabela 22: Resultados do teste t para o modelo proposto.....	102
Tabela 23: Resultados do teste F para o modelo proposto.....	102
Tabela 24: Resultados do teste t para o modelo proposto.....	105
Tabela 25: Resultados do teste F para o modelo proposto.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Arenito
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
BB	Basalto Brechado
BH	Basalto Hidrotermalizado
BM	Basalto Maciço
BV	Basalto Vesiculado
CB	Curitibanos
Cel	Celadonita
EU	Europa
Fs	Feldspato
GB	Goiabeiras
GPEND	Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos
GSG	Grupo Serra Geral
Inf	Inferior
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
LabLam	Laboratório de Laminação
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
Ltda	Limitada
MA	Monte Alegre
Max	Máximo
Méd.	Média
MEV	Microssonda Eletrônica de Varredura
Min	Mínimo.
NPG	Núcleo de Pesquisas Geológicas
NW	<i>Northwest</i>
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i>
Op	Opacos
PC	Polarizadores Cruzados
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
Plg	Plagioclásio
PP	Peperito, Polarizadores Paralelos
Px	Piroxênio
Q-Q	Quantil-Quantil
QD	Quebra Dentes
Qtde	Quantidade
RI	Riolito
S. A., SA	Sociedade Anônima
SC	Santa Catarina
SE	<i>Southeast</i>
Sla	<i>Low-angle cross-stratified sandstone</i>
Slp	<i>Large scale planar cross-bedded sandstone</i>
Slt	<i>Large scale trough cross-bedded sandstone</i>
Smt	<i>Medium-scale trough cross-bedded sandstone</i>
SR	Sondagem Rotativa
Std	<i>Standard Deviation</i>
Sup	Superior
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strength</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

UNISUL	Universidade do Sul de Santa Catarina
Ves	Vesícula
VIF	<i>Value of Inflection</i>
Zeo	Zeólita

LISTA DE SÍMBOLOS

Separador decimal: a linguagem de programação utilizada para o processamento, análise e geração dos gráficos presentes neste trabalho utiliza a notação internacional, onde o ponto é o separador decimal. Desta forma, optou-se por utilizar esta mesma notação para toda a monografia.

Altura	h
Área	A
Coeficiente de Poisson	ν
Coeficiente de Poisson dinâmico	ν_{din}
Coeficiente de Poisson dinâmico em condição saturada	ν_{din_sat}
Coeficiente de Poisson dinâmico em condição seca	ν_{din_seco}
Coeficiente de Poisson estático	ν_{est}
Coeficientes da regressão linear	β_n
Comprimento	L
Comprimento final	l_0
Comprimento inicial	l_1
Conteúdo de argilominerais	C
Densidade	ρ
Densidade da água	ρ_w
Diâmetro	d
Elongação	e
Elongação axial	e_a
Elongação transversal	e_t
Fator para diferentes intervalos de confiança	f
Força	F
Massa de água	W_w
Massa de gás	W_g
Massa de sólidos	W_s
Massa submersa	W_{sub}
Massa total	W_t
Módulo de cisalhamento	μ
Módulo de Young	E
Módulo de Young dinâmico	E_{din}
Módulo de Young dinâmico em condição saturada	E_{din_sat}
Módulo de Young dinâmico em condição seca	E_{din_seco}
Módulo de Young estático	E_{est}
Módulo de Young estático em condição saturada	E_{est_sat}
Módulo de Young secante	E_{sec}
Módulo de Young tangente	E_{tan}
Peso específico em condição natural	γ_{nat}
Peso específico em condição saturada	γ_{sat}
Peso específico em condição seca	γ_{dry}
Porosidade efetiva	n_e
Porosidade total	n
Resistência à compressão uniaxial	σ_c
Tempo	t
Tempo n	t_n
Tensão	σ
Tensão cisalhante	σ_c

Tensão diferencial	σ_{diff}
Tensão normal	σ_n
Tensões principais	σ_1, σ_2 e σ_3 ,
Teor de umidade	S_r
Variação da V_p da condição seca para a saturada	ΔV_p
Variação da V_s da condição seca para a saturada	ΔV_s
Variação de E_{din} da condição seca para a saturada	ΔE_{din}
Variação de velocidade	ΔV
Variação de v_{din} da condição seca para a saturada	Δv_{din}
Variáveis independentes	X_n
Variável dependente	Y
Velocidade de ondas P	V_p
Velocidade de ondas S	V_s
Volume	V
Volume de água	V_w
Volume de gás	V_g
Volume de sólidos	V_s
Volume de vazios	V_v
Volume de vazios conectados	V_{cv}
Volume total	V_t

UNIDADES DE GRANDEZA

Ângulo	Graus	°
Área	Metros quadrados	m ²
Comprimento	Metros	m
Deformação específica	Metros por metros	m/m
Densidade	Gramas por metro cúbico	g/m ³
Força	Newton	N
Frequência	Hertz	Hz
Massa	Gramas	g
Peso específico	Newtons por metro cúbico	N/m ³
Pressão	Pascal	Pa
Temperatura	Graus Célsius	°C
Tempo	Segundos	s
Velocidade	Metros por segundo	m/s
Volume	Metros cúbicos	m ³

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 OBJETIVO GERAL.....	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.3 JUSTIFICATIVA.....	23
1.4 LOCALIZAÇÃO.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	26
2.1.1 Bacia do Paraná.....	26
2.1.1.1 Formação Botucatu.....	29
2.1.1.2 Grupo Serra Geral.....	30
2.2 MECÂNICA DE ROCHAS.....	31
2.2.1 Tensão Uniaxial.....	33
2.2.2 Deformações Sob Tensão Uniaxial.....	35
2.2.3 Comportamento Tensão x Deformação.....	36
2.2.4 Resistência e Ruptura.....	39
2.2.5 Efeito Escala na Resistência e Elasticidade.....	40
2.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOMECÂNICA DA MATRIZ ROCHOSA.....	41
2.3.1 Peso Específico.....	42
2.3.2 Porosidade.....	44
2.3.3 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas.....	46
2.3.4 Resistência à Compressão Uniaxial.....	50
2.3.5 Módulo de Young e Coeficiente de Poisson.....	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	59
3.2 PETROGRAFIA.....	61
3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	62
3.4 ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....	65
3.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	67
3.6 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS.....	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73

4.1 PETROGRAFIA.....	73
4.1.1 Basaltos Maciços, Vesiculados e Brechados.....	74
4.1.2 Riolito.....	76
4.1.3 Peperito.....	77
4.1.4 Arenito.....	77
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	78
4.3 CORRELAÇÕES SIMPLES.....	82
4.3.1 Peso específico e porosidade.....	83
4.3.2 Velocidade de propagação de ondas.....	85
4.3.2.1 Ensaios não-saturados.....	85
4.3.2.2 Correlações com propriedades físicas.....	87
4.3.2.3 Efeito da saturação em água.....	88
4.3.3 Resistência à compressão uniaxial.....	90
4.3.4 Módulo de Young e Coeficiente de Poisson.....	92
4.3.4.1 Correlação com propriedades físicas e velocidade de ondas.....	94
4.3.4.2 Efeito da saturação no módulo de Young e Poisson dinâmicos.....	96
4.3.4.3 Módulo estático x módulo dinâmico.....	99
4.4 MODELOS PROPOSTOS.....	99
4.4.1 Previsão de UCS.....	100
4.4.2 Previsão do módulo de Young.....	104
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	108
5.1 CONCLUSÕES.....	108
5.2 SUGESTÕES.....	110
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE A – DADOS DETALHADOS DOS CORPOS DE PROVA.....	117
APÊNDICE B – FATORES TABELADOS PARA INTERVALOS DE CONFIANÇA DO MODELO PARA UCS.....	136
APÊNDICE C – FATORES TABELADOS PARA INTERVALOS DE CONFIANÇA DO MODELO PARA MÓDULO DE YOUNG ESTÁTICO.....	137

1 INTRODUÇÃO

Em 1936, durante a primeira *International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, o engenheiro austríaco Karl Terzaghi afirmou que “nós estávamos excedendo os limites de nossa capacidade em prever as consequências de nossas ações”, ao se referir às dezenas de deslizamentos em rocha ocorridos durante a construção do Canal do Panamá (TERZAGHI; VOIGHT, 1979). Ao projetar grandes obras de engenharia apoiadas ou escavadas em rocha, prever a resposta mecânica do material rochoso frente às tensões impostas pela obra é fundamental para reduzir as incertezas e o risco de acidentes e garantir o sucesso do empreendimento.

Segundo Baecher e Christian (2003), o desenvolvimento da engenharia geotécnica durante o século XX ocorreu pela aplicação de métodos e conceitos físico e mecânico, principalmente derivados da teoria da elasticidade, aos materiais geológicos, resultando no desenvolvimento de métodos de análise teórica, procedimentos laboratoriais e técnicas para levantamentos de campo, e provendo, assim, um sistema de referências parcimonioso com o qual catalogar observações e experiências. Desde então, os avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de métodos mais eficientes e precisos para a caracterização física e mecânica do material rochoso.

Os ensaios de laboratório, realizados em amostras de rocha coletadas em campo, permitem a quantificação de importantes propriedades físicas e mecânicas intrínsecas do material, relacionadas a seu comportamento quando submetido à variações de tensão. Apesar de não representarem com fidelidade as condições *in situ*, estes ensaios fornecem dados que reduzem as incertezas quanto ao comportamento da matriz rochosa podendo, com certa cautela e complementados por dados de campo, ser extrapolados para o maciço.

Entre as propriedades mecânicas da matriz rochosa, são de grande importância para a engenharia a resistência a compressão uniaxial (*Uniaxial Compressive Strength*, UCS) e o módulo de Young (E). Estas propriedades podem ser determinadas em laboratório por meio de ensaios destrutivos em amostras de geometria padronizada conforme estabelecido pela ISRM (1979). Contudo, nas últimas décadas, observou-se uma crescente busca por prever essas propriedades por meio de correlações com outros parâmetros físicos e mecânicos, de

obtenção mais simples, rápida e de menor custo, conforme trabalhos como Brotons et al. (2016), Elkatatny et al. (2018), Karakul e Ulusay (2013), Lashkaripour (2002), Marques et al. (2015) e Yilmaz e Yuksek (2009). Essas correlações, feitas por meio de regressões simples ou múltiplas e que adotam modelos lineares e não-lineares, são capazes de fornecer dados satisfatórios que possibilitam a redução de incertezas e custos durante as etapas preliminares em grandes obras de engenharia a um custo menor.

1.1 OBJETIVO GERAL

Como objetivo geral, este trabalho propõe fornecer dados que possam reduzir as incertezas quanto ao comportamento mecânico de rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra Geral, a partir de ensaios laboratoriais em testemunhos de sondagem de empreendimentos em pequenas centrais hidrelétricas em Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos são propostos:

- a) identificar as características geológicas da matriz rochosa por meio de análise petrográfica e mineralógica dos testemunhos de sondagem;
- b) verificar a existência de correlações entre as propriedades obtidas pelos ensaios de caracterização geotécnica.
- c) avaliar a influência da saturação em água nas propriedades mecânicas do material rochoso;
- d) comparar os módulos de Young dinâmico e estático;

- e) entender o efeito da porosidade no comportamento mecânico da matriz rochosa;
- f) verificar a variação das propriedades físicas e mecânicas nas diferentes litologias descritas;
- g) fornecer modelos de previsão de UCS e módulo de Young estático para rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra Geral, e fatores que possibilitem utilizar estes modelos com diferentes níveis de incerteza;
- h) sugerir rumos para futuros trabalhos na mesma linha de pesquisa.

1.3 JUSTIFICATIVA

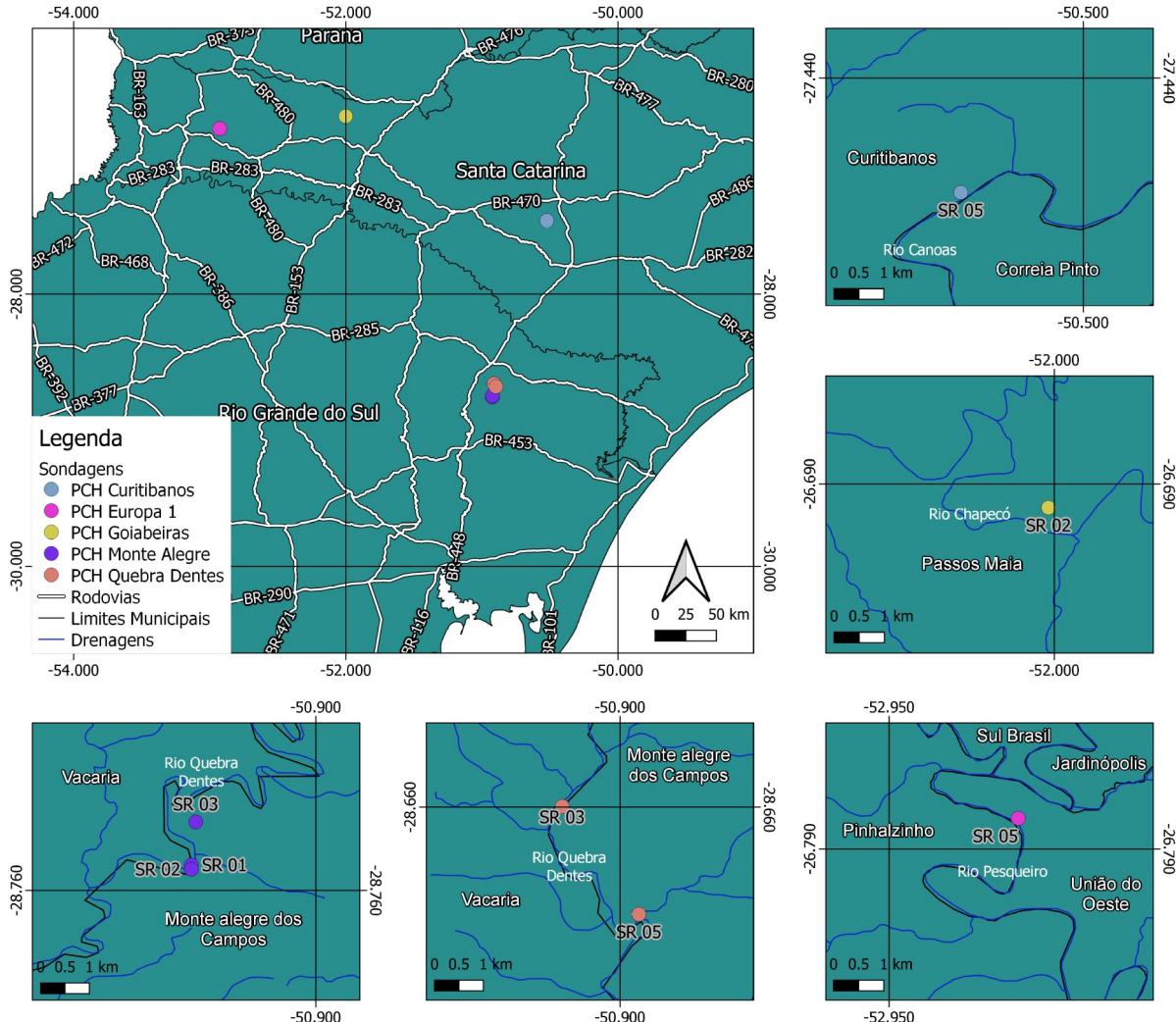
Durante a fase de investigação geológico-geotécnica, deve-se fazer correta caracterização, classificação e compartimentação do maciço rochoso para se chegar ao modelo geomecânico que permitirá compreender o comportamento do material onde a obra será executada. Para isto, torna-se imprescindível a realização de levantamentos geológicos e ensaios geotécnicos de campo e em laboratório. Os dados de propriedades físicas e mecânicas obtidos por meio de ensaios laboratoriais, apesar de não representarem com fidelidade as condições de campo, são uteis para reduzir às incertezas associadas ao comportamento do maciço. A obtenção destes parâmetros envolve a execução de ensaios que demandam tempo, possuem custos elevados e, por serem destrutivos, impossibilitam a reutilização do material em caso de erros. Correlações estatísticas entre propriedades físicas e mecânicas tem sido propostas por diversos autores. Estas correlações permitem estimar propriedades mecânicas a partir de outras propriedades como densidade, porosidade e velocidade de propagação de ondas, que podem ser obtidas por ensaios de menor custo e não-destrutivos. Contudo, estas correlações se limitam à região de onde foram retiradas as rochas utilizadas na calibração do modelo estatístico e, para rochas da Bacia do Paraná, este tipo de estudo são antigos e de difícil acesso. Este trabalho produzirá dados que contribuirão significativamente com o conhecimento em mecânica de rochas, sobretudo em relação às rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra Geral, pertencentes à Bacia do Paraná, estando alinhado com a missão da

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) de produzir, sistematizar e socializar conhecimento científico e tecnológico, contribuindo assim para o desenvolvimento da infraestrutura do País.

1.4 LOCALIZAÇÃO

Os testemunhos de sondagem rotativa utilizados neste trabalho foram extraídos de quatro regiões da Bacia do Paraná, em Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A Figura 1 mostra a localização dos furos de sondagem.

Figura 1: Mapa de localização dos furos de sondagem.



Fonte: Própria (2019).

Os testemunhos das PCHs Quebra Dentes e Monte Alegre foram retirados do nordeste do Rio Grande do Sul, próximo ao rio Quebra Dentes, entre as cidades de Vacaria e Monte Alegre dos Campos. Da PHC Curitibanos, foram retirados próximo ao rio Canoas, entre Curitibanos e Correia Pinto. Da PCH Goiabeiras, próximo ao rio Chapecó, no município de Passo Maia. Da PCH Europa I, o material foi extraído próximo ao rio Pesqueiro, entre Pinhalzinho e União do Oeste. A Tabela 1 mostra as coordenadas de cada furo de sondagem.

Tabela 1: Dados das sondagens rotativas dos testemunhos utilizados.

PCH	Sondagem	Coordenadas UTM
Monte Alegre	SR01	507519.8 / 6819199.9
	SR02	507519.9 / 6819034.4

PCH	Sondagem	Coordenadas UTM
Goiabeiras	SR03	507602.0 / 6819999.3
	SR04	Não Disponível
Goiabeiras	SR02	400409.991 / 7047042.988
Quebra Dentes	SR03	508730.539 / 8829691.820
	SR05	510106.669 / 6827496.492
Curitibanos	SR05	547217.618 / 6962453.619
Europa I	SR05	308431.519 / 7035977.916

Fonte: Caenge Geotecnica Ltda. (2009), Gehidro Engenharia e Consultoria Ltda. (2011).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta sessão trata do estado da arte dos assuntos relacionados à temática deste trabalho, que serviram de embasamento teórico do mesmo. São abordados o contexto geológico ao qual está inserido o trabalho, conceitos referentes à mecânica de rochas, propriedades e métodos de caracterização geológica e geotécnica da matriz rochosa. Também são apresentados dados relacionados ao tema, obtidos por outros autores.

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

Segundo Schobbenhaus e Brito Neves (2003), a Plataforma Sul-Americana, situada na fração continental da placa homônima, representa um terreno que permaneceu estável durante a evolução das faixas móveis do Caribe e Andina nas Eras Meso-Cenozóicas. Os mesmos autores afirmam que sua composição é complexa e variada, compreendendo crátons, bacias sedimentares e vulcanosedimentares, plutons e derrames vulcânicos, e que possui mais de 75% de sua área ocupada pelo território brasileiro.

No interior desta plataforma estão situadas as bacias intracratônicas fanerozóicas brasileiras. Estas bacias interiores estão distribuídas por todo o País, abrangem do paleozóico ao meso-cenozóico e podem ser classificadas como Intracratônica, *Strike-Slip*, Antepaís e Riftes Abortados (Aulacógenos; SILVA et al., 2003). Entre elas encontra-se a Bacia do Paraná, origem das rochas estudadas neste trabalho.

2.1.1 Bacia do Paraná

Segundo Milani et al. (2007), a Bacia do Paraná corresponde a uma área de aproximadamente 1,5 milhão de quilômetros quadrados, situada no centro-leste da América do Sul, que abrange porções territoriais do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai (Figura 2).

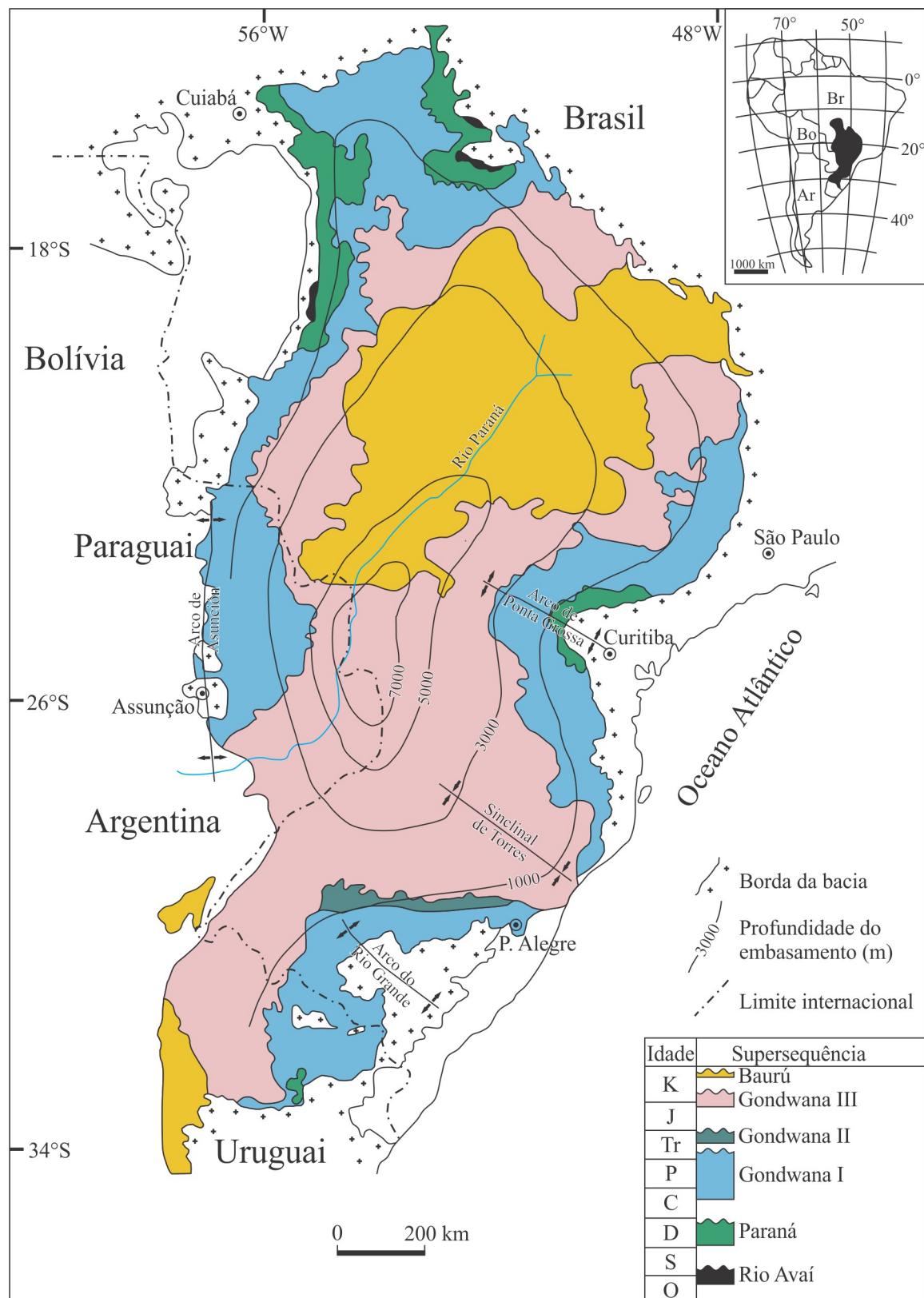
Os mesmos afirmam que, com um formato ovalado com eixo maior na direção Norte-Sul e até 7 mil metros de espessura, ela possui um extenso registro vulcanosedimentar que abrange do Neo-Ordoviciano ao Neo-Cretáceo e seu depocentro coincidente com a região da calha do Rio Paraná, que dá origem ao nome da bacia.

O registro estratigráfico da bacia está dividido em seis grandes unidades: Supersequência Rio Avaí (Ordoviciano-Ciluriano), Supersequência Paraná (Devoniano), Supersequência Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Supersequência Gondwana II (Meso a Neotriássico), Supersequência Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Supersequência Baurú (Neocretáceo; MILANI, 1997). As três primeiras são compostas por pacotes sedimentares originados por ciclos transgressivo-regressivos ligados à variações no nível do mar durante o Paleozoico, enquanto as três últimas constituem-se por pacotes sedimentares associados a rochas ígneas (MILANI et al., 2007).

Existem diferentes explicações para a origem e evolução da Bacia do Paraná. Milani et al. (2007) afirmam que a flexura da litosfera, provocada por sobrecarga tectônica devido a episódios orogenéticos e propagada continente adentro, atuou como um importante mecanismo de subsidência durante a evolução da bacia. Para Zalán et al. (1990), a implantação da sinéclise estaria relacionada à contração térmica que teriam sucedido eventos tectono-magmáticos do Ciclo Brasiliano. Enquanto que, para Fúlfaro et al., (1982), a sedimentação cratônica teria ocorrido devido a um conjunto de calhas aulacogênicas de orientação NW-SE.

A Supersequência Gondwana III é descrita por Milani et al. (2007) como sendo de idade Jurássica-Eocretácica, com ampla distribuição pela Bacia do Paraná, e composta pelos sedimentos eólicos da Formação Botucatu em sua base, seguidos pelos magmatitos da Formação Serra Geral.

Figura 2: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná.



Fonte: adaptado de Milani (2004).

2.1.1.1 Formação Botucatu

A Formação Botucatu representa um extenso deserto que existiu no interior do continente Gondwana durante o Jurássico. Ela cobre uma extensão de, pelo menos, 1 300 000 km², abrangendo parcialmente o território brasileiro, paraguaio, uruguai e argentino (SCHERER, 2002). Sua espessura geralmente varia de 50 a 100 m, pode chegar a mais de 300 m (BIGARELLA; SALAMUNI, 1961), e está ausente em algumas áreas do Rio Grande do Sul devido a não deposição (SCHERER, 2000).

Seus imensos campos de dunas deram origem a arenitos médios a finos, de coloração rósea, com grãos foscos de alta esfericidade e estratificação cruzada tangencial de médio a grande porte (MILANI et al., 2007; SCHERER, 2000, 2002). A ausência de depósitos interdunas sugere o sistema de deposição eólico seco (SCHERER, 2000, 2002).

Localmente na base da formação ocorrem arenitos argilosos mal selecionados de ambientes lacustre (WILDNER et al., 2014), conglomerados, arenitos cascalhosos depositados por cursos d'água efêmeros, e arenitos grossos de depósitos eólicos em lençol (*sand sheet*; SCHERER, 1998 apud SCHERER, 2000). Em alguns horizontes da unidade também ocorrem ventifacts (BIGARELLA; SALAMUNI, 1961).

Os primeiros derrames da sequência vulcânica sobrejacente cobriram os campos de dunas, preservando sua morfologia, e se intercalaram com depósitos eólicos posteriores, indicando contemporaneidade entre os dois eventos (SCHERER, 2000, 2002; WAICHEL; SCHERER; FRANK, 2008).

Scherer (2000) identifica e descreve quatro fácies eólicas de distintas morfologias de dunas: *large scale trough cross-bedded sandstone* (Slt), *large scale planar cross-bedded sandstone* (Slp), *medium-scale trough cross-bedded sandstone* (Smt), *low-angle cross-stratified sandstone* (Sla). Segundo o mesmo autor, elas são descritas como:

- a) fácies Slt: arenitos finos a grossos, com estratificação cruzada acanalada com até 200 metros de extensão, espessura variando de 4 a 20 metros, e estratos tangenciais à superfície de deposição na base e mergulhando de 25-30º em direção ao topo;
- b) fácies Slp: arenitos finos a médios, com estratificações planares com até 300 m de extensão, 3 a 30 metros de espessura e estratos com 5º de mergulho na base e 25º no topo;
- c) fácies Smt: arenitos finos a médios, estratificação cruzada acanalada com até 15 metros de extensão, espessura de 1 a 3 m e estratos tangenciais à superfície na base e mergulho médio de 20º em direção ao topo;
- d) fácies Sla: arenitos finos a médios, com estratos planares, centenas de metros de extensão, 2 a 6 m de espessura e baixo ângulo de mergulho, geralmente não mais de 10º.

2.1.1.2 Grupo Serra Geral

Inicialmente designado como Formação Serra Geral por White em 1906, o Grupo Serra Geral (GSG; WILDNER et al., 2014) compõe a maior parte da Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka, a qual possui seu outro fragmento no oeste do continente africano e tem sua origem relacionada à fragmentação do antigo continente Gowndwana e à abertura do Oceano Atlântico Sul, durante o Cretáceo Inferior (WAICHEL, 2006).

O GSG ocupa uma área de aproximadamente 917 000 km², possui um volume de pelo menos 600 000 km³ (FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009) e sua espessura máxima, em torno de 1.720 m, ocorre junto ao depocentro da Bacia do Paraná (WILDNER et al., 2006).

As sequências vulcânicas são compostas predominantemente por basaltos e basaltos andesíticos de filiação toleítica, e subordinadamente por riódacitos e riolitos (PICCIRILLO et

al., 2010). Ao longo das principais descontinuidades da bacia, ocorreram injeções de soleiras e diques que precederam a atividade vulcânica e atuaram como alimentadores do vulcanismo (WILDNER et al., 2006).

Segundo Waichel (2006), os derrames desta província vulcânica são majoritariamente do tipo pahoehoe simples e composto, subdivididos em porção proximal, mediana e distal, e estruturados internamente em zonas superior e inferior vesiculadas e núcleo maciço. Subordinadamente ocorrem derrames do tipo ‘a’á, com núcleo maciço e crostas superior e inferior constituída por fragmentos angulosos (HARTMANN et al., 2010; WAICHEL, 2006).

A ocorrência de peperitos, termo utilizado para rochas formadas pela intrusão e mistura de magma em sedimentos úmidos inconsolidados ou pouco consolidados (WHITE; MCPHIE; SKILLING, 2000), foi observada nesta unidade por Waichel (2006) e Waichel et al. (2006, 2007). Os mesmos autores interpretam esta ocorrência como produto da interação de derrames do tipo pahoehoe com sedimento predominantemente siltosos e argilosos em ambientes lacustres.

2.2 MECÂNICA DE ROCHAS

A mecânica de rochas, segundo o *Committee of Rock Mechanics of the Geological Society of America*, é definida como “a ciência teórica e aplicada do comportamento mecânico da rocha; é o ramo que se preocupa com a resposta da rocha aos campos de força do seu ambiente físico” (JUDD, 1964). Junto com a mecânica de solos e a geologia de engenharia, ela faz parte da ciência conhecida como engenharia geotécnica, a qual possui aplicação principalmente em engenharia civil e mineração.

Diferente da mecânica de sólidos, onde geralmente assume-se que os materiais estudados possuem um comportamento idealmente homogêneo, contínuo, isótropo, elástico e linear, a natureza dos materiais rochosos faz com que os mesmos tenham um caráter heterogêneo, descontínuo, anisotrópico, inelástico e não linear na maioria das situações (GOODMAN, 1989; VALLEJO et al., 2012). Estas características estão relacionadas aos

processos genéticos que originam as rochas e aos processos geológicos que atuam sobre elas durante milhões de anos. A grande variabilidade das características e propriedades e ao elevado número de fatores condicionantes tornam complexo o estudo dos materiais rochosos (VALLEJO et al., 2012), o que justifica a existência de uma área do conhecimento exclusivamente dedicada ao estudo do comportamento mecânico destes materiais

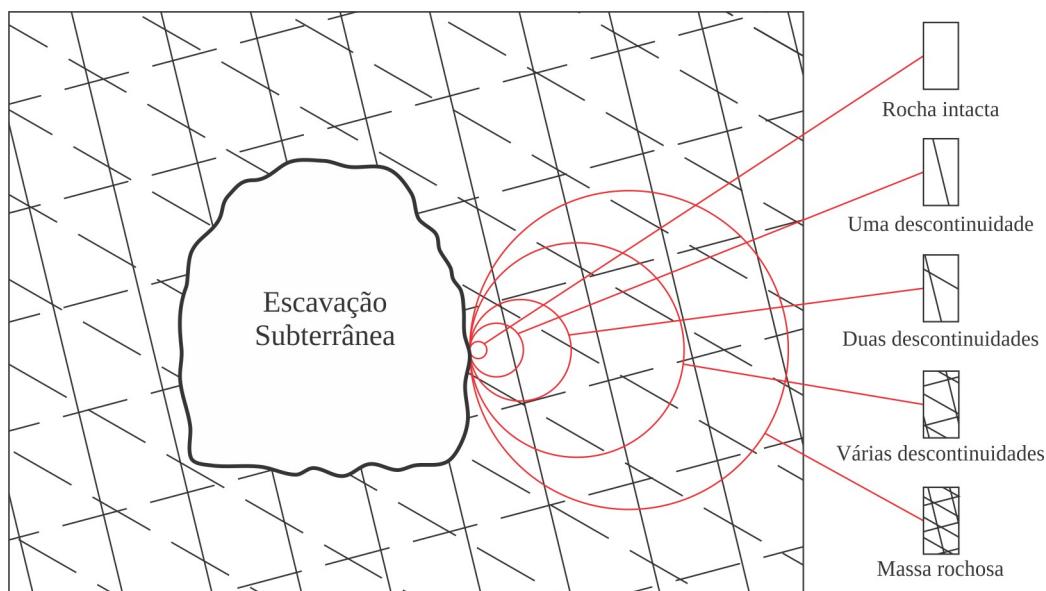
Para entender a natureza mecânica das rochas, inicialmente é preciso definir matriz rochosa ou rocha intacta, maciço rochoso e descontinuidade, do ponto de vista da engenharia. Hoek e Brown (1980) estabelecem que:

- a) matriz rochosa ou rocha intacta é definida como a rocha isenta de descontinuidades significativas;
- b) maciço rochoso é o meio *in situ* composto por blocos de rocha justapostos e separados por descontinuidades;
- c) descontinuidades são planos de fraqueza representados por elementos estruturais como fraturas, falhas, juntas, acamamentos e contatos fracos, que separam os blocos de rocha em um maciço rochoso e geralmente possuem resistência à tração muito baixa ou nula.

Os mesmos autores afirmam que a transição estrutural do material rochoso, de rocha intacta para maciço altamente fraturado, ocorre conforme aumenta-se a escala de trabalho (Figura 3).

As obras de engenharia modificam o estado de tensões original ao qual o maciço está submetido, o que causa a liberação e redistribuição destas tensões e faz com que o maciço responda sofrendo deformações, podendo chegar à ruptura (VALLEJO et al., 2012). Prever a resposta do material por meio de ensaios *in situ* e de laboratório torna-se, assim, uma prática indispensável para a avaliação da viabilidade técnica da obra e dos custos envolvidos, bem como para a redução dos riscos e incertezas envolvidos.

Figura 3: Transição do material rochoso, de rocha intacta para maciço altamente fraturado, conforme aumenta-se a escala de trabalho.



Fonte: adaptado de Hoek e Brown (1980).

A caracterização da matriz rochosa, realizada em laboratório, consiste na determinação de suas propriedades físicas e geomecânicas, a partir de amostras coletadas em campo. Segundo Fiori (2015), o comportamento geomecânico da matriz é governado por suas características físicas e petrológicas, pelo grau de intemperismo e de saturação em água. Ensaios de compressão uniaxial, no qual uma crescente tensão uniaxial é aplicada em corpos de prova de geometria definida até que ocorra sua ruptura, permitem determinar os parâmetros de resistência e elasticidade da rocha.

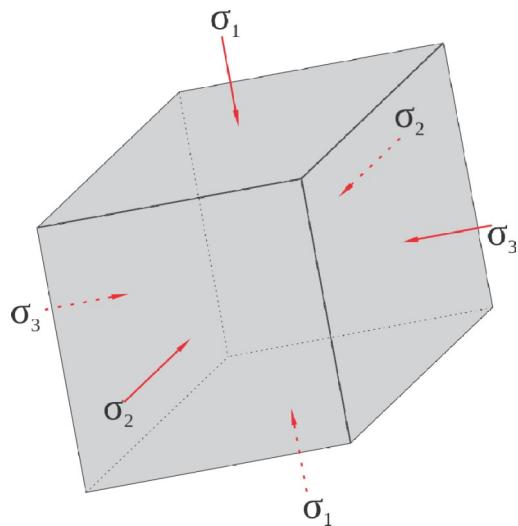
2.2.1 Tensão Uniaxial

Tensão é uma grandeza vetorial definida como uma medida da intensidade das forças internas atuando em um corpo quando submetido à forças externas (BRADY; BROWN, 2004). A tensão σ atuante em um plano de área A sob influência de uma força externa F pode ser calculada a partir da equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Um corpo de dimensões infinitesimais em um espaço tridimensional pode estar sob a atuação de três tensões perpendiculares entre si, chamadas tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 , sendo elas máxima, intermediária e mínima, respectivamente (Figura 4). Quando não confinado, um corpo sobre o qual é exercida tensão em apenas uma direção encontra-se em um estado de tensão uniaxial. Neste estado, as tensões principais σ_2 e σ_3 são nulas, enquanto que σ_1 representa a tensão sendo exercida.

Figura 4: Tensões principais atuando em um corpo de dimensões infinitesimais.



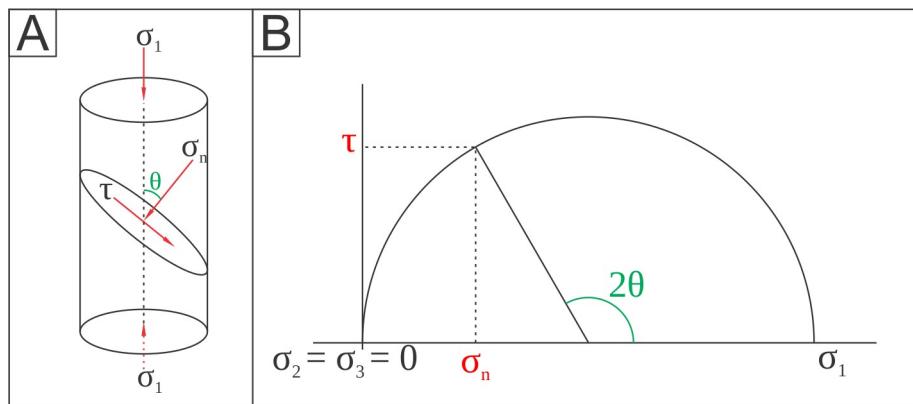
Fonte: adaptado de Vallejo et al. (2012).

Um plano que secciona um corpo de prova de formato cilíndrico sob tensão uniaxial, está sujeito à tensão normal (σ_n) e cisalhante (τ), decompostas a partir da tensão principal σ_1 (Figura 5A). Com o ângulo θ , formado entre as direções dos vetores σ_1 e σ_n , pode-se calcular as tensões normal e cisalhante ao plano considerado com as equações 2 e 3 (FIORI; WANDRESEN, 2014). O círculo de Mohr é outra possível representação gráfica para estados de tensões (Figura 5B).

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \theta \quad (2)$$

$$\tau = \sigma_1 \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

Figura 5: (A) Corpo de prova cilíndrico sob tensão uniaxial. (B) Círculo de Mohr representando o estado de tensões do corpo de prova.



Fonte: própria (2019)

2.2.2 Deformações Sob Tensão Uniaxial

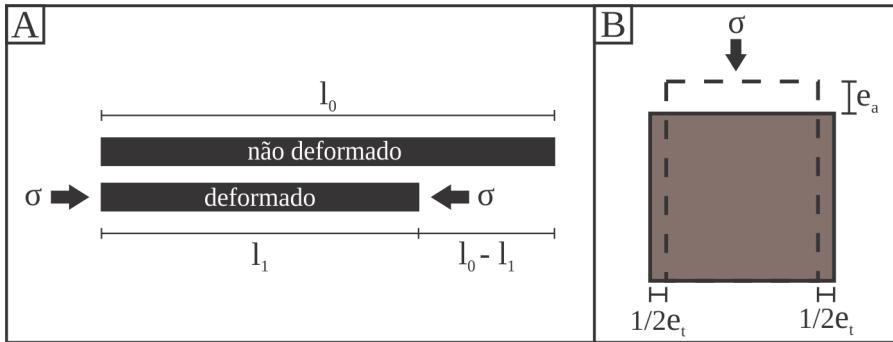
Fossen (2016) define deformação como a diferença entre a posição, forma e orientação de um objeto antes e depois da aplicação de tensão. Quando forças são aplicadas em um corpo, elas produzem deformações quantificadas pelas mudanças na forma e/ou no volume do corpo, dependendo de sua resistência à deformação. Uma medida comumente utilizada para a quantificação da deformação é a elongação (e), definida como a variação relativa do comprimento final (l_1) em relação ao comprimento inicial (l_0), conforme a equação 4 e ilustrada na Figura 6A.

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (4)$$

Outro parâmetro utilizado na análise da deformação é o coeficiente de Poisson (v), que expressa a relação entre duas deformações ortogonais em um corpo, como a deformação transversal (e_t) e axial (e_a) conforme demonstrado na equação 5 e ilustrado na Figura 6B. Allmendinger (2017) observa que $v = 0.5$ para deformações de volume constante, contudo, na maioria das rochas, os valores de v estão entre 0.1 e 0.33.

$$\nu = -\frac{e_t}{e_a} \quad (5)$$

Figura 6: (A) Elongação (e_t) de um corpo comprimido, onde l_0 é seu comprimento inicial, l_1 seu comprimento final. (B) Deformação causada em um corpo pela tensão axial σ . O coeficiente de Poisson relaciona o encurtamento e_a com a elongação e_t .



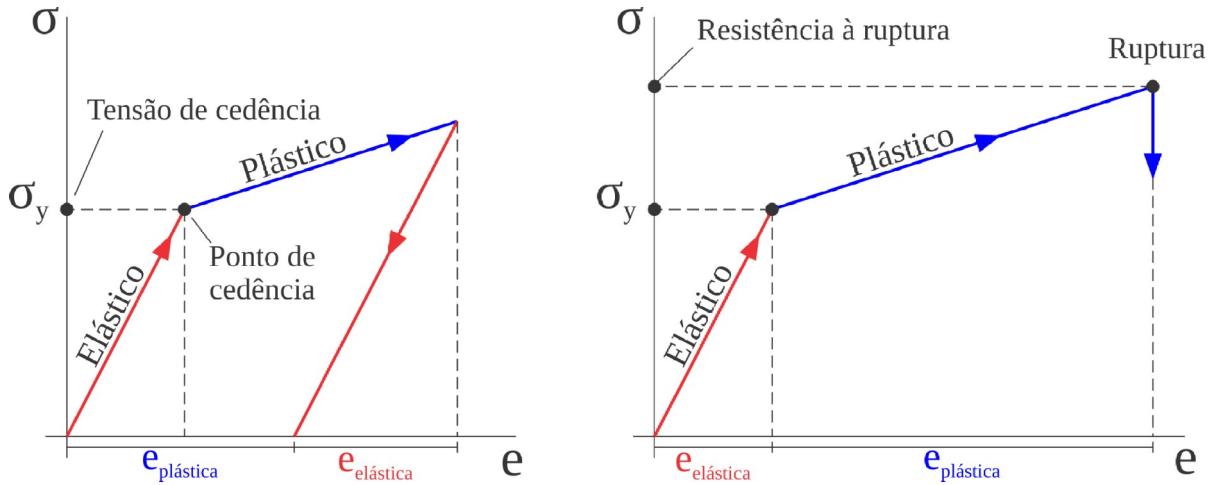
Fonte: adaptado de Fossen (2016).

2.2.3 Comportamento Tensão x Deformação

Segundo Fiori e Wandresen (2014), a propagação da tensão e da deformação por um corpo ocorrem concomitantemente e o estudo das relações entre a tensão aplicada e a deformação produzida é feito por meio de diagramas tensão x deformação.

As deformações causadas em materiais sob tensão podem ser do tipo elástica ou não permanente (o corpo recupera sua forma original quando cessada a tensão), plástica ou permanente (a deformação permanece mesmo quando cessada a tensão), ou rúptil (ocorre a perda da coesão devido ao desenvolvimento de um plano de fratura), conforme ilustrado na Figura 7 (ALLMENDINGER, 2017; ALLMENDINGER; CARDOZO; FISHER, 2012; FOSSEN, 2016). Submetida à baixa tensão confinante e temperatura, as rochas apresentam um comportamento frágil: respondem à tensão pela formação de fraturas extensionais ou cisalhantes, com ruptura rápida e violenta quando sua resistência é superada. Observa-se deformação elástica seguida de pouca ou nenhuma deformação plástica e perda instantânea da resistência pelo desenvolvimento de um plano de fratura (FOSSEN, 2016).

Figura 7: Diagramas genéricos tensão x deformação. (A) Deformação inicia-se e permanece como elástica até o ponto de cedência. A partir deste ponto a deformação se torna plástica. Ao remover a tensão atuante, a deformação elástica é revertida, enquanto a plástica permanece. (B) Tensão aumentada até atingir o ponto de ruptura, onde ocorre a perda da coesão do material pelo desenvolvimento de um plano de fratura.



Fonte: adaptado de Fossen (2016).

Observa-se uma relação linear entre tensão e deformação no campo elástico, até que seja atingida a tensão de cedência. Essa relação linear entre tensão e deformação é expressa pela Lei de Hook (equação 6). O módulo de Young ou de elasticidade (E) representa à resistência a deformação axial (unidimensional) do material.

$$\sigma = Ee \quad (6)$$

2.2.4 Resistência e Ruptura

Segundo Brady e Brown (2004), a resistência de uma rocha é a tensão máxima que a mesma pode suportar quando submetida a um determinado conjunto de condições, e sua falha, ou ruptura, ocorre quando a mesma não consegue mais suportar adequadamente as forças aplicadas.

Fiori e Wandersen (2014) definem ruptura como a perda da coesão devido ao desenvolvimento de um plano de fratura quando as tensões aplicadas superam o limite de

elasticidade do material. Observam também que, em materiais rochosos, a resistência à compressão pode ser de 2 a 30 vezes maior que a resistência à tração.

Fossen (2016) enfatiza que a causa de uma ruptura não é o nível absoluto de tensão, mas sim a diferença entre as tensões principais mínima e máxima, respectivamente σ_3 e σ_1 , chamada tensão diferencial ou desviadora, conforme a equação 7. O mesmo afirma que o fraturamento tem início quando a tensão desviadora supera a resistência da rocha.

$$\sigma_{dif} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (7)$$

Vários critérios de ruptura para rochas e maciços rochosos foram desenvolvidos ao longo do tempo, a maioria destes relacionam as tensões principais σ_1 e σ_3 ou as tensões normal e cisalhante em um plano, para prever a resistência de pico em diferentes combinações de tensões (BRADY; BROWN, 2004).

2.2.5 Efeito Escala na Resistência e Elasticidade

O efeito escala consiste na variação das propriedades mecânicas da rocha conforme as dimensões do material ensaiado, em consequência do caráter descontínuo e heterogêneo dos maciços rochosos (BRADY; BROWN, 2004; VALLEJO et al., 2012). Uma rocha aparentemente isotrópica, homogênea e continua em uma amostra de mão, pode ser anisotrópica, heterogênea e descontínua em escalas maiores.

Ensaios conduzidos por Heuze (1980) mostram que, comparados aos resultados obtidos em laboratório, os valores de resistência obtidos *in situ* são significativamente menores, enquanto que a elasticidade diminui entre 40 e 80%. O mesmo afirma que a dispersão dos resultados obtidos em laboratório é significativamente maior e conclui que não existe uma relação que permita extrapolar os resultados em pequena escala para a escala de campo.

Devido ao efeito escala, Silveira (2003) afirma que, apesar de não ser possível caracterizar o maciço a partir de ensaios laboratoriais, estes resultados auxiliam na compreensão geral do maciço e na interpretação de ensaios *in situ*, principalmente para a avaliação do grau de faturamento em campo.

2.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOMECÂNICA DA MATRIZ ROCHOSA

A caracterização geológica de uma rocha consiste em sua classificação genética (ígnea, sedimentar ou metamórfica) e petrográfica (composição mineralógica, estruturas, texturas), por meio de análises em meso e microescala. Contudo, apesar de essas classificações revelarem algumas informações relacionadas aos propósitos da engenharia, elas não são suficientes para prever o comportamento mecânico da rocha (DEERE; MILLER, 1966).

Deere e Miller (1966) e Goodman (1989) estabeleceram algumas propriedades, as quais chamaram de propriedades índice, que descrevem quantitativamente as rochas para fins de engenharia. O Quadro 1 resume algumas das propriedades geológicas e geotécnicas e os correspondentes métodos para sua determinação.

Quadro 1: Propriedades geológicas e geomecânicas da matriz rochosa e métodos de determinação.

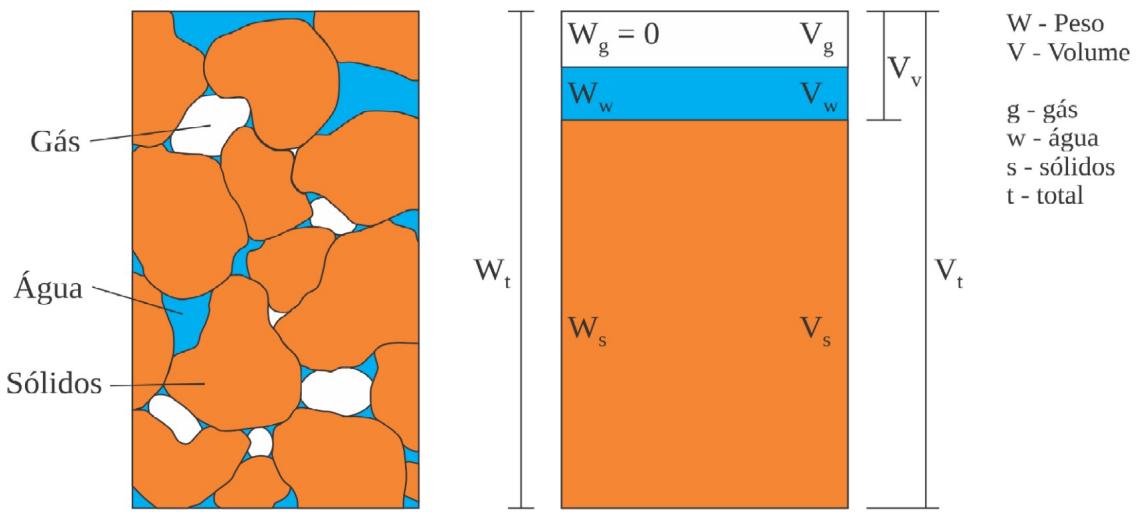
	Propriedades	Métodos de determinação
Propriedades de identificação e classificação	Composição mineralógica, Texturas e estruturas	Descrição visual Microscopia ótica e eletrônica Difração de Raios-X
	Porosidade (n)	Técnicas laboratoriais
	Peso específicos (γ)	
	Teor de umidade (w%)	
	Permeabilidade	Ensaio de permeabilidade
	Durabilidade Alterabilidade	Ensaio de alterabilidade
Propriedades mecânicas	Resistência à compressão simples	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de carga pontual Martelo de Schmidt
	Resistência à tração	Ensaios de tração direta e indireta
	Velocidade de propagação de ondas sônicas	Equipamentos de ultrassom
	Coesão e ângulo de atrito interno	Ensaio de compressão triaxial
	Módulos de Deformabilidade	Ensaio de compressão uniaxial
	Coeficiente de Poisson	Ensaio de velocidade de ondas sônicas

Fonte: Vallejo et al. (2012).

2.3.1 Peso Específico

O peso específico é a relação entre o peso de uma amostra e seu volume. Segundo Farmer (1983), as rochas geralmente são constituídas por três fases (Figura 8).

Figura 8: Fases constituintes de uma rocha.



Fonte: adaptado de Farmer (1983).

Devido à existência de vazios que podem ou não estar preenchidos por água, diferentes pesos específicos podem ser determinados para uma mesma amostra, relacionando-se suas diferentes fases (Tabela 2). Zhang (2016) observa que a densidade depende da constituição mineralógica, da porosidade e do material preenchendo os vazios.

Tabela 2: Relação do peso específico com as diferentes fases presentes em uma rocha.

Peso Específico	Fórmula	Observações
Natural	$\gamma_{nat} = \frac{W_t}{V_t}$	Condições naturais de teor de umidade
Seco	$\gamma_{dry} = \frac{W_s}{V_t}$	Considera-se inexistente a presença de água nos poros ($W_t = W_s$)
Saturado	$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_t}$	Considera-se todo o volume de vazios preenchidos por água ($V_v = V_w$)
Sólidos	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$	Peso específico da parte sólida apenas, desconsiderando o volume de vazios

Fonte: Zhang (2016).

A Tabela 3 mostra valores típicos de peso específico para algumas rochas.

Tabela 3: Valores típicos de pesos específicos para algumas rochas.

Ígneas		Sedimentares		Metamórficas	
Rocha	γ_{dry} (kN/m ³)	Rocha	γ_{dry} (kN/m ³)	Rocha	γ_{dry} (kN/m ³)
Andesito	21.57 – 23.05	Carvão	9.81 – 19.61	Ardósia	24.52 – 26.48
Riolito	23.54 – 25.50	Giz	16.67 – 22.56	Xisto	24.52 – 27.46
Granito	25.50 – 26.48	Lutito	21.57 – 25.50	Quartzito	25.50 – 26.48
Diorito	26.48 – 27.95	Arenito	22.56 – 25.50	Mármore	25.50 – 27.46
Basalto	26.48 – 28.44	Calcário	22.56 – 25.50	Gnaisse	26.48 – 29.42
Diabásio	28.44	Dolomito	24.52 – 25.50	Anfibolito	28.44 – 29.42
Gabro	29.42 – 30.40	Grauvaca	27.46		

Fonte: Vallejo et al. (2012).

2.3.2 Porosidade

Amyx, Bass e Whiting (1960) definem porosidade (n) como a proporção entre o volume de vazios presentes em uma rocha e seu volume total, conforme a equação 8, e a classificam em original, relacionada à gênese na rocha, e induzida formada posteriormente por processos geológicos.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100\% \quad (8)$$

Devido à existência de poros que não possuem interconectividade e, consequentemente, não contribuem com a percolação de fluidos, a porosidade da rocha é subdividida em total (n) e efetiva (n_e). A porosidade total é calculada em função do total de vazios, enquanto a porosidade efetiva considera apenas o volume de poros conectados (V_{cv}).

O volume de poros conectados pode ser obtido pela diferença entre o peso do corpo de prova seco (W_{dry}) e saturado em água destilada (W_{sat}), divididos pelo peso específico da água (γ_w), conforme a equação 9:

$$V_{cv} = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{\gamma_w} \quad (9)$$

Substituindo V_v da equação 8 por V_{cv} , chega-se à porosidade efetiva pela equação 10:

$$n_e = \frac{V_{cv}}{V_t} = \frac{(W_{sat} - W_{dry})\gamma_w^{-1}}{V_t} = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{V_t\gamma_w} \quad (10)$$

Essa propriedade é especialmente significante em rochas sedimentares devido aos processos envolvidos em sua gênese. Goodman (1989) cita que porosidade pode variar de 0 a 90% em rochas sedimentares, apresentar valores elevados em algumas rochas vulcânicas devido ao aprisionamento de gases vulcânicos, embora nesse caso a conectividade entre os poros possa ser baixa, e nas demais rochas cristalinas a porosidade dificilmente supera 2% e geralmente ocorre na forma de microfissuras. A Tabela 4 mostra valores típicos de porosidade para algumas rochas.

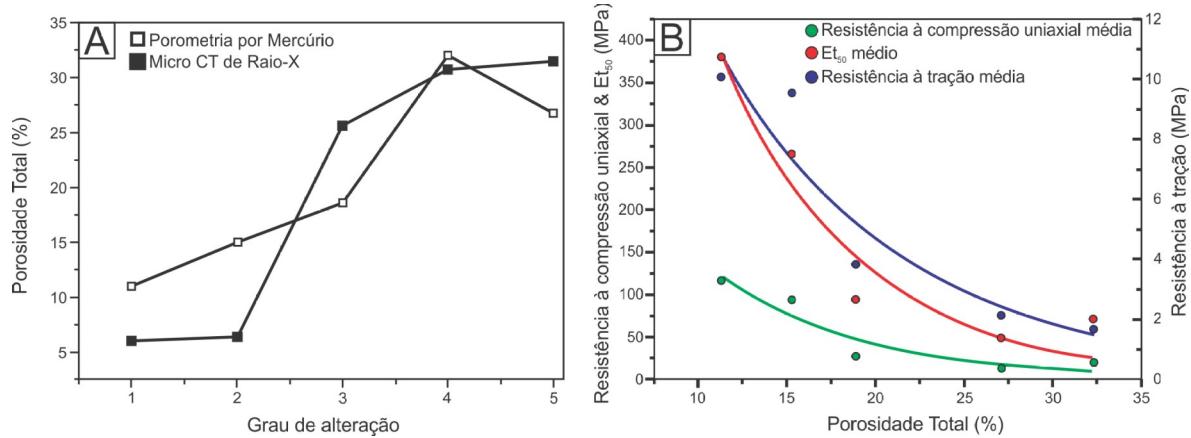
Tabela 4: Valores típicos de porosidade para algumas rochas.

Ígneas		Sedimentares		Metamórficas	
Rocha	n (%)	Rocha	n (%)	Rocha	n (%)
Diabásio	0.1	Dolomito	0.5 – 10	Quartzito	0.1 – 0.5
Gabro	0.1 – 0.2	Carvão	10	Ardósia	0.1 – 1
Basalto Maciço	0.1 – 2	Lutito	2 – 15	Mármore	0.3 – 2
Granito	0.5 – 1.5	Calcário	5 – 20	Gnaisse	0.5 – 1.5
Riolito	4 – 6	Arenito	5 – 25	Xisto	3
Andesito	10 – 15	Giz	30		

Fonte: Vallejo et al. (2012).

Segundo Vallejo et al. (2012), a porosidade é inversamente proporcional à resistência mecânica, densidade e ao módulo de elasticidade. Goodman (1989) afirma que a porosidade pode aumentar em até 20% devido ao intemperismo. Ensaios realizados por Pola et al. (2010) em amostras de rocha vulcânica com diferentes graus de alteração concordam com estas afirmações (Figura 9).

Figura 9: Covariância entre porosidade total e (A) grau de alteração, (B) módulo de elasticidade, resistência à compressão uniaxial simples e à tração.

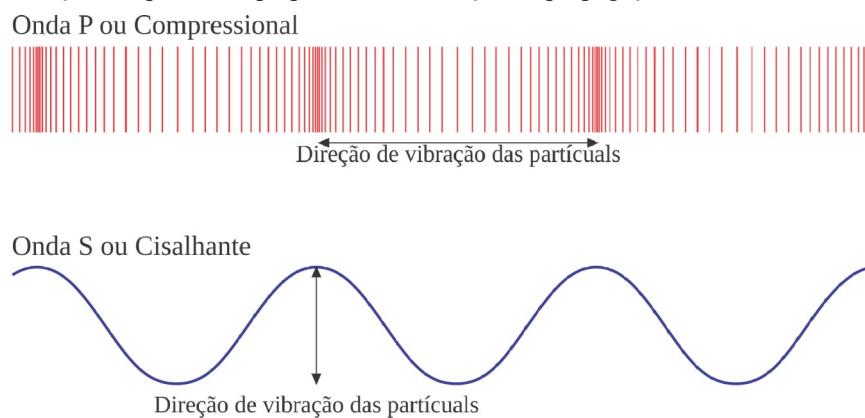


Fonte: Pola et al. (2010).

2.3.3 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é uma propriedade mecânica da rocha que está diretamente relacionada às suas propriedades elásticas, densidade, porosidade e presença de fissuras, anisotropia, teor de umidade, temperatura, pressão confinante e grau de intemperismo (VALLEJO et al., 2012; ZHANG, 2016). Esta propriedade é subdividida em velocidade de ondas P (ou primárias/compressionais/longitudinais; V_p) e ondas S (ou secundárias/cisalhantes/transversais; V_s), conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Onda P, com direção de vibração das partículas paralela à direção de propagação da onda. Onda S, com direção de vibração das partículas perpendicular à direção de propagação da onda.



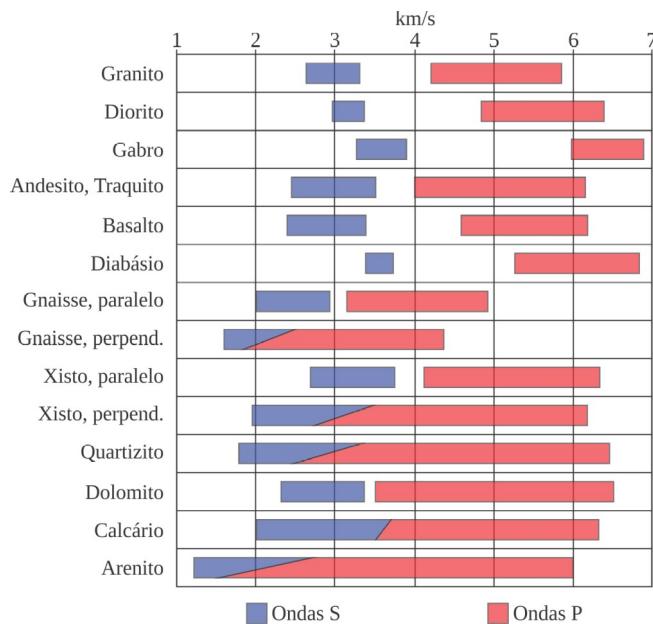
Fonte: própria (2019).

A ISRM sugere a utilização da técnica de transmissão de pulsos ultrassônicos para a determinação de V_p e V_s , que consiste na geração, transmissão e recepção de ondas de baixa amplitude com comprimento e frequência de pulsos ajustáveis (AYDIN, 2014). As velocidades são determinadas a partir da equação 11 onde L é a distância percorrida pela onda e t é o tempos levados pelas ondas P e S viajar do transmissor ao receptor.

$$V_p, V_s = \frac{L}{t} \quad (11)$$

Por estar intimamente relacionada às propriedades tanto da rocha intacta tanto em laboratório quanto *in situ*, há uma crescente tendência em prever as propriedades físicas e mecânicas das rochas a partir da determinação das ondas P (KARAKUL; ULUSAY, 2013). Valores de V_p e V_s para diferentes rochas podem ser vistos na Figura 11.

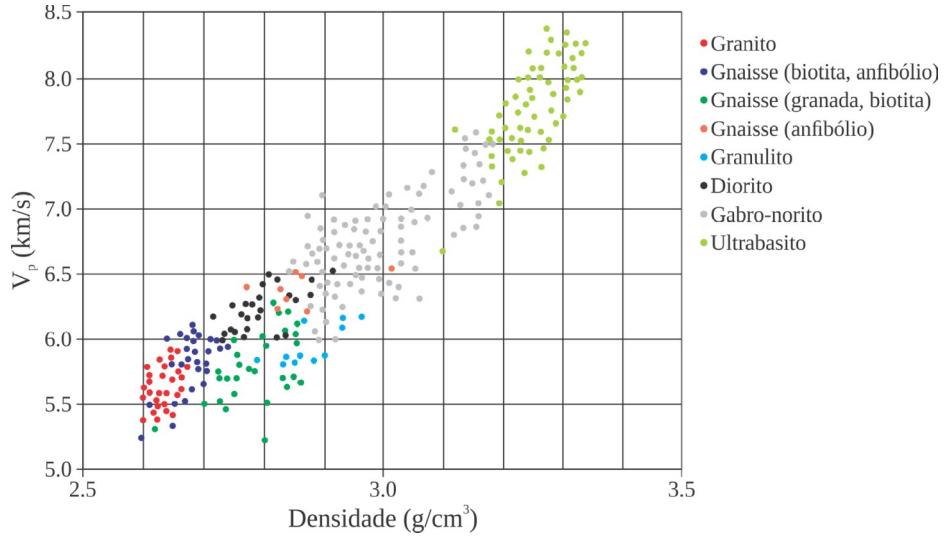
Figura 11: Valores de V_p e V_s para diferentes tipos de rochas.



Fonte: Schön (2015).

De acordo com Schön (2015), a velocidade de propagação em rochas ígneas e metamórficas aumenta com a densidade da rocha (Figura 12) e, portanto, é maior em rochas básicas do que em rochas ácidas.

Figura 12: Correlação entre densidade e velocidade de propagação de ondas P em rochas ígneas e metamórficas.



Fonte: Schön (2015).

Birch (1960, 1961) estabeleceu a seguinte correlação entre V_p (km/s) e densidade (10^3 kg/m³), para rochas magmáticas:

$$V_p = 2.76 \rho - 0.98 \quad (12)$$

Gebrände et al. (1982) obtiveram as seguintes relações entre densidade e velocidade de propagação das ondas P e S para rochas plutônicas (13), vulcânicas (14) e metamórficas (15):

$$V_p = 4.36 \rho - 6.73 \pm 0.03 \quad V_s = 1.66 \rho - 1.48 \pm 0.06 \quad (13)$$

$$V_p = 2.81 \rho - 2.37 \pm 0.18 \quad V_s = 1.46 \rho - 1.02 \pm 0.22 \quad (14)$$

$$V_p = 4.41 \rho - 6.93 \pm 0.37 \quad V_s = 1.70 \rho - 1.62 \pm 0.22 \quad (15)$$

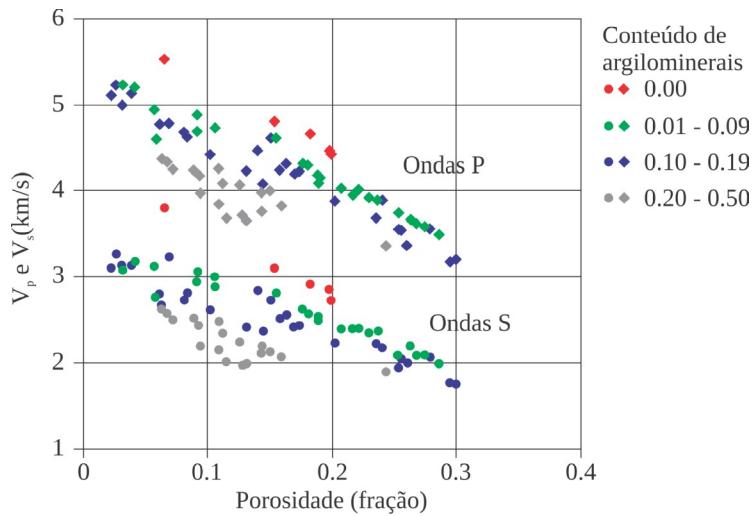
Christensen e Salibury (1975) estabeleceram uma relação não-linear entre V_p , V_s e densidade para basaltos de crosta oceânica:

$$V_p = 2.33 + 0.08 \rho^{3.63} \quad V_s = 1.33 + 0.011 \rho^{4.85} \quad (16)$$

Han, Nur e Morgan (1986) observaram relações lineares para V_p e V_s em função da porosidade e conteúdo de argilominerais (respectivamente n e C , em fração, na equação 17), a partir de ensaios realizados em arenitos saturados sob pressão confinante constante (Figura 13). Os resultados mostram que a velocidade de propagação é fortemente influenciada pela porosidade e conteúdo de argilominerais nos poros.

$$V_p = 5.59 - 6.93n - 2.18C \quad V_s = 3.52 - 4.91n - 1.89C \quad (17)$$

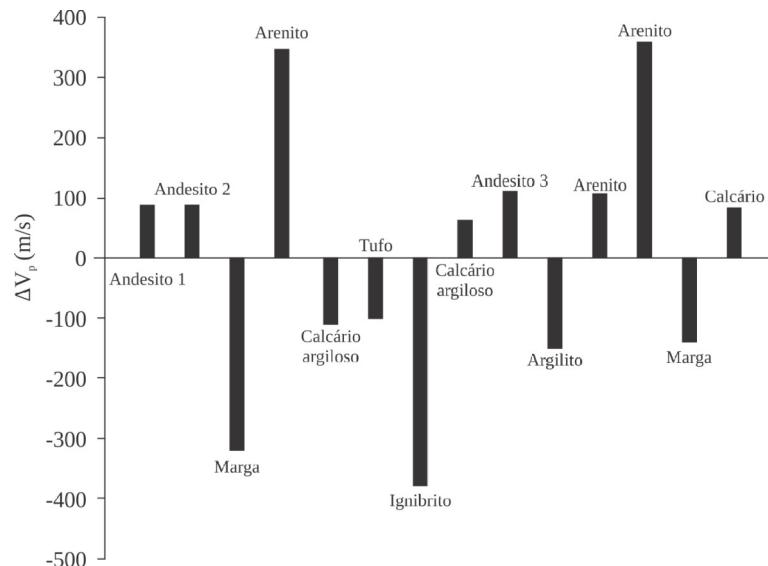
Figura 13: Variação de V_p e V_s em função da porosidade e conteúdo de argilominerais. Ensaios realizados em 75 amostras de arenito, saturadas em água, sob pressão confinante de 40 MPa e poropressão de 1 MPa.



Fonte: Han, Nur e Morgan (1986).

Ensaios realizados por Karakul e Ulusay (2013) em diferentes rochas mostram que a velocidade de propagação das ondas P podem tanto aumentar quanto diminuir com a variação no grau de saturação (Figura 14).

Figura 14: Histograma com a diferença entre V_p para a rocha seca e saturada (ΔV_p) para diferentes tipos de rochas. Valores positivos de ΔV_p indicam uma relação direta entre V_p e o grau de saturação, valores negativos indicam uma relação inversa.



Fonte: Karakul e Ulusay (2013).

2.3.4 Resistência à Compressão Uniaxial

A resistência a compressão uniaxial (σ_c) consiste na resistência mecânica da rocha em condição não confinada, com as tensões principais σ_2 e σ_3 iguais a zero. Valores típicos de resistência à compressão uniaxial podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5: Valores típicos de resistência à compressão uniaxial obtidos para diversos tipos de rochas.

Ígneas		Sedimentares		Metamórficas	
Rocha	σ_c (MPa)	Rocha	σ_c (MPa)	Rocha	σ_c (MPa)
Diabásio	21 – 572	Dolomito	33 – 310	Quartzito	62 – 379
Gabro	124 – 310	Calcário	24 – 290	Gnaisse	24 – 310
Basalto	105 – 360	Arenito	67 – 172	Xisto	10 – 145
Granito	14 – 338				

Fonte: AASHTO (2002), Schön (2015).

Para a determinação deste parâmetro, a ISRM sugere a utilização de corpos de prova cilíndricos, com não menos de 54 mm de diâmetro e proporção entre altura e diâmetro de 2.5 a 3.0 (ISRM, 1979a). Também sugere que seja utilizado um instrumento com precisão de 0.1

mm para a determinação do diâmetro, a partir da média de duas medições perpendiculares na parte superior, média e inferior do corpo de prova, totalizando 6 medidas. A carga deve ser aplicada continuamente à taxa constante de forma que a ruptura ocorra entre 5 e 10 minutos de ensaio. A resistência é obtida dividindo a carga aplicada no momento da ruptura pela área da sessão circular do corpo de prova.

Palchik e Hatzor (2004) estabeleceram uma relação empírica entre σ_c e a porosidade (equação 18), onde a e b são constantes obtidas a partir de resultados experimentais. Valores de a e b para algumas rochas podem ser vistos na Tabela 6. Essa relação mostra uma diminuição da resistência com o aumento da porosidade.

$$\sigma_c = ae^{-bn} \quad (18)$$

Tabela 6: valores de a e b de diferentes rochas para a equação 18.

a	b	r^2	Rocha	Referência
74.4	0.048	0.79	Arenito	a
210.12	0.8214	0.67	Argilito, folhelho argiloso, siltito, folhelho siltoso	b
195.0	0.21	0.89	Arenito, calcário, basalto, granodiorito	c
135.9	0.048	-	Arenito	d

Fonte: (a) Palchik (1999); (b) Lashkaripour (2002); (c) (TUĞRUL, 2004); (d) Rabbani et al. (2012).

De acordo com Del Potro e Hürlimann (2009) e Vásárhelyi (2005), é possível estabelecer uma relação entre σ_c e o peso específico da rocha pela equação 19, onde a e b são constantes determinadas empiricamente. Valores para as constantes obtidos pelos autores podem ser vistos na Tabela 7.

$$\sigma_c = ae^{b\rho} \quad (19)$$

Tabela 7: Valores obtidos empiricamente por diferentes autores para as constantes a e b da equação 19.

a	b	r^2	Rocha	Referência
0.0561	2.751	0.641	Calcário (seco)	a
0.0009	4.277	0.679	Calcário (saturado)	a
0.626	0.178	0.93	Vulcânica	b

Fonte: (a) Vásárhelyi (2005); (b) Del Potro e Hürlimann (2009).

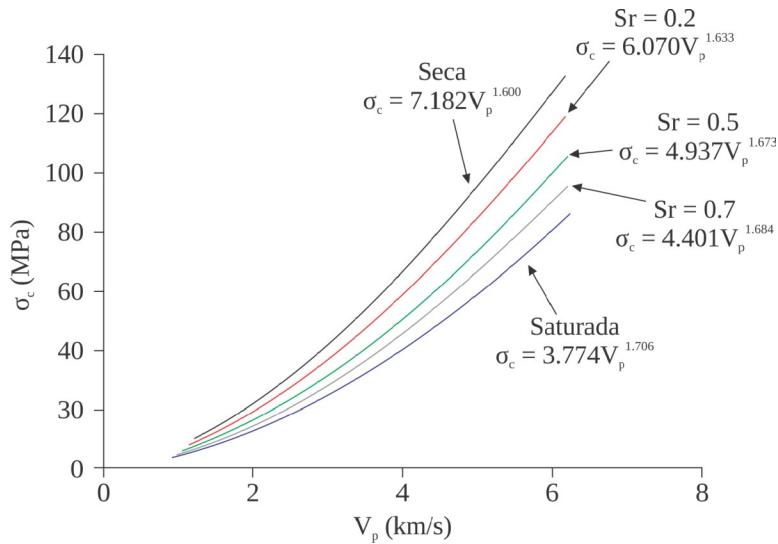
Karakul e Ulusay (2013) relacionaram σ_c com o grau de saturação e a velocidade de propagação de ondas P através de ensaios em diferentes tipos de rochas, estabelecendo a equação 20, onde a e b são calculados a partir do grau de saturação pelas equações 21 e 22. As curvas obtidas pelos autores mostram que a resistência diminui com o aumento do grau de saturação, como pode ser observadas na Figura 15.

$$\sigma_c = aV_p^b \quad (20)$$

$$a = 6.987 e^{-0.64Sr} \quad (r^2 = 0.99) \quad (21)$$

$$b = 1.608 e^{0.064Sr} \quad (r^2 = 0.96) \quad (22)$$

Figura 15: Correlação de V_p com a resistência a compressão uniaxial, para diferentes teores de umidade.



Fonte: Karakul e Ulusay (2013).

2.3.5 Módulo de Young e Coeficiente de Poisson

O módulo de Young ou de elasticidade define a resistência da rocha à deformação elástica. Ele pode ser do tipo estático (E_{est}), obtido pela aplicação de cargas em um corpo de prova, ou dinâmico, determinado a partir da velocidade de propagação de ondas sísmicas

(E_{din}). Da mesma forma, o coeficiente de Poisson pode ser do tipo estático (ν_{est}) ou dinâmico (ν_{din}). Valores típicos de módulo de deformação e coeficiente de Poisson podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8: Valores típicos de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, ambos estáticos.

Rocha	Módulo de elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson
Ígneas		
Granito	6.41 – 100	0.09 – 0.39
Gabro	67.6 – 84.1	0.16 – 0.20
Diabásio	69.0 – 104.0	0.20 – 0.38
Basalto	29.0 – 84.1	0.16 – 0.32
Sedimentares		
Arenito	0.62 – 39.2	0.08 – 0.46
Folhelho	0.007 – 38.6	0.03 – 0.18
Calcário	4.48 – 89.6	0.12 – 0.33
Siltito	2.62 – 32.8	0.09 – 0.23
Metamórficas		
Quartzito	36.5 – 88.3	0.08 – 0.22
Mármore	4.0 – 73.8	0.17 – 0.40
Gnaisse	28.5 – 82.1	0.09 – 0.40

Fonte: AASHTO (2002).

O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson dinâmicos podem ser calculados a partir de V_p , V_s (em m/s) e da densidade ρ (em g/cm³) conforme as equações 23 e 24, respectivamente (SCHÖN, 2015).

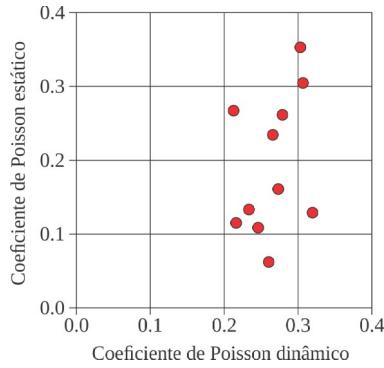
$$E_{din} = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (23)$$

$$\nu_{din} = \frac{1}{2} \times \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (24)$$

Afsari et al. (2009) sugerem que o coeficiente de Poisson estático e dinâmico podem ser relacionados através da equação 25. Fei et al. (2016), a partir de ensaios realizados em arenitos, observam que não existe uma relação óbvia entre estes parâmetros (Figura 16).

$$\nu_{est} = 0.7 \nu_{din} \quad (25)$$

Figura 16: Dispersão dos valores de coeficiente de Poisson estático e dinâmico, mostrando ausência de correlação entre estes parâmetros.



Fonte: Fei et al. (2016).

Experimentos realizados por vários autores (LASHKARIPOUR, 2002; LEITE; FERLAND, 2001; PALCHIK; HATZOR, 2002; YILMAZ; YUKSEK, 2009) mostram que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da porosidade. Correlações para diferentes rochas podem ser vistas na Tabela 9.

Tabela 9: Correlações entre porosidade e módulo de elasticidade estático para diferentes rochas.

Correlação	r^2	Rochas	Referência
$E = 10.101 - 0.1093n$	0.739	Artificiais	a
$E = 37.897e^{-0.8629n}$	0.684	Argilito, siltito, lamito, folhelho	b
$E = -39\ln(n) + 100.3$	0.83	Gipso	c

Fonte: (a) Leite e Ferland (2001); (b) Lashkaripour (2002); (c) Yilmaz e Yuksek (2009).

Nas últimas décadas, diversos experimentos foram realizados para determinar a relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico (BROTTONS et al., 2014, 2016; CHRISTARAS; AUGER; MOSSE, 1994; EISSL; KAZI, 1988; ELKATATNY et al., 2018; FEI et al., 2016; KING, 1983; MCCANN; ENTWISLE, 1992; OHEN, 2003). Isso se deve à existência de diferenças significativas entre o módulo estático e dinâmico para uma mesma rocha e ao fato de que o módulo estático representa melhor as condições de campo. Algumas dessas correlações podem ser vistas na Tabela 10. Os resultados demonstram uma boa correlação entre os módulos e mostram que E_{din} costuma ser superior ao E_{est} .

Tabela 10: Correlações entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico para vários tipos de rochas. Módulos de elasticidade em GPa, densidade (ρ) em kg/m³, porosidade (n) em %, resistência à compressão uniaxial (σ_c) em MPa.

Correlação	r^2	Rocha	Ref.
$E_{est} = 1.263 E_{din} - 29.5$	0.904	Ígneas e metamórficas	a
$E_{est} = 0.5640 E_{din} - 0.7246$	0.725	Arenito	b
$E_{est} = 0.0158 E_{din}^{2.7399}$	0.847	Folhelho	c
$E_{Est} = 11.531 \rho^{-0.457} E_{din}^{1.251}$	0.993		d
$E_{Est} = 3.97 \times 10^6 \rho^{-2.090} E_{din}^{1.287} n^{-0.116}$	0.994	Ígneas, sedimentares e metamórficas	d
$E_{Est} = 4.71 \times 10^6 \rho^{-2.100} E_{din}^{1.232} n^{-0.129} \sigma_c^{0.035}$	0.996		d
$\log_{10} E_{est} = 1.275 \log_{10}(\rho E_{din}) - 4.714$	0.94	Calcarenito	e

Fonte: (a) King (1983); (b) Fei et al., (2016); (c) Ohen (2003); (d) Brotons et al. (2016); (e) Brotons et al. (2014).

Schön (2015) aponta que a diferença entre o módulo estático e dinâmico pode ser relacionada à maior amplitude de deformação e a ocorrência de deformação não-elástica devido à mobilização de microfraturas, ambas na condição estática. Segundo Fjær et al. (2008), enquanto a amplitude de deformação dinâmica varia de 10^{-7} à 10^{-6} , na condição estática ela chega a ser dez mil vezes maior, de 10^{-3} à 10^{-2} .

Zhang (2016) salienta que para obter resultados confiáveis é necessário calibrar as correlações. Essas correlações podem ser generalizadas em modelos conforme a Tabela 11, os quais possuem coeficientes que devem ser determinados por meio de regressões estatísticas para cada caso, a partir dos dados obtidos em ensaios de caracterização física e mecânica.

Tabela 11: generalização das correlações da Tabela 10, com as constantes a serem determinadas empiricamente.

Modelos	Coeficientes	Referências
$E_{est} = aE_{din} - b$	a, b	a, b
$E_{est} = aE_{din}^b$	a, b	c
$E_{Est} = a \rho^{-b} E_{din}^c$	a, b, c	d
$E_{Est} = a \rho^{-b} E_{din}^c n^{-d}$	a, b, c, d	d
$E_{Est} = a \rho^{-b} E_{din}^c n^{-d} \sigma_c^e$	a, b, c, d, e	d
$\log_{10} E_{est} = a \log_{10}(\rho E_{din}) - b$	a, b	e

Fonte: (a) King (1983); (b) Fei et al. (2016); (c) Ohen (2003); (d) Brotons et al. (2016); (e) Brotons et al. (2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo discorre sobre os procedimentos adotados para a caracterização geológica e geomecânica do material de estudo. Procurou-se seguir os métodos sugeridos por entidades como a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) e a *American Society for Testing Materials* (ASTM), bem como sugestões encontradas na literatura, adaptando-as ao contexto do trabalho quando necessário.

O material utilizado consiste de aproximadamente 150 m de testemunhos de sondagem rotativa, distribuídos entre 54 caixas (Figura 17), doados à Universidade pela empresa Estelar Engenharia Ltda., que atua na área de energia elétrica com ênfase em fontes renováveis. São testemunhos vindos de seus empreendimentos em pequenas centrais hidrelétricas nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, sobre rochas da Bacia do Paraná. Dados referentes às sondagens podem ser vistos na Tabela 12. É importante observar que na maioria das sondagens não estavam disponíveis os testemunhos em toda a extensão da perfuração.

Os testemunhos foram transportados do município de Concórdia – SC, para o Núcleo de Pesquisas Geológicas (NPG), situado na UFSC, pela Defesa Civil de Santa Catarina.

Figura 17: Caixas com os testemunhos de sondagem, armazenadas no Núcleo de Pesquisas Geológicas, UFSC.



Fonte: própria (2019).

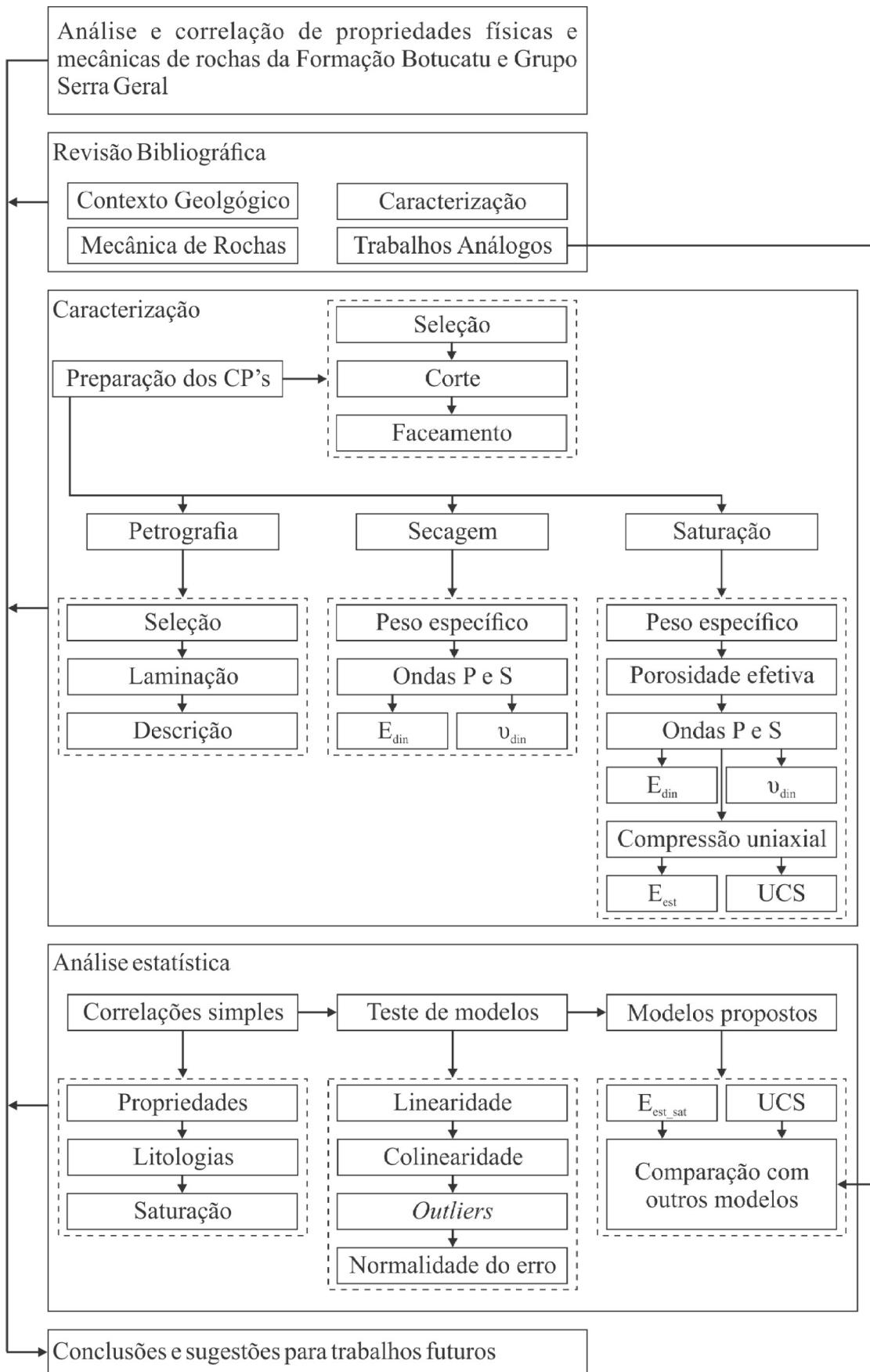
Tabela 12: Dados das sondagens rotativas dos testemunhos utilizados.

PCH	Sondagem	Caixas Disponíveis/Total	Coordenadas UTM	Cota (m)	Profundidade (m)
Monte Alegre	SR01	10/10	507519.8 / 6819199.9	451.700	29.00
	SR02	9/11	507519.9 / 6819034.4	457.200	35.00
	SR03	9/10	507602.0 / 6819999.3	468.300	33.00
	SR04	5/13	-	462.000	46.13
Goiabeiras	SR02	7/07	400409.991 / 7047042.988	925.095	25.38
Quebra Dentes	SR03	2/09	508730.539 / 8829691.820	756.400	29.88
Curitibanos	SR05	2/06	510106.669 / 6827496.492	627.970	20.87
	SR05	2/-	547217.618 / 6962453.619	-	-
Europa I	SR05	1/07	308431.519 / 7035977.916	329.400	21.28

Fonte: Caenge Geotecnica Ltda. (2009), Gehidro Engenharia e Consultoria Ltda. (2011).

Os ensaios foram realizados utilizando a estrutura laboratorial da UFSC e da Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), Campus Pedra Branca, localizado no município de Palhoça – SC. O fluxograma da Figura 18 sintetiza os procedimentos realizados durante a execução deste trabalho.

Figura 18: Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.

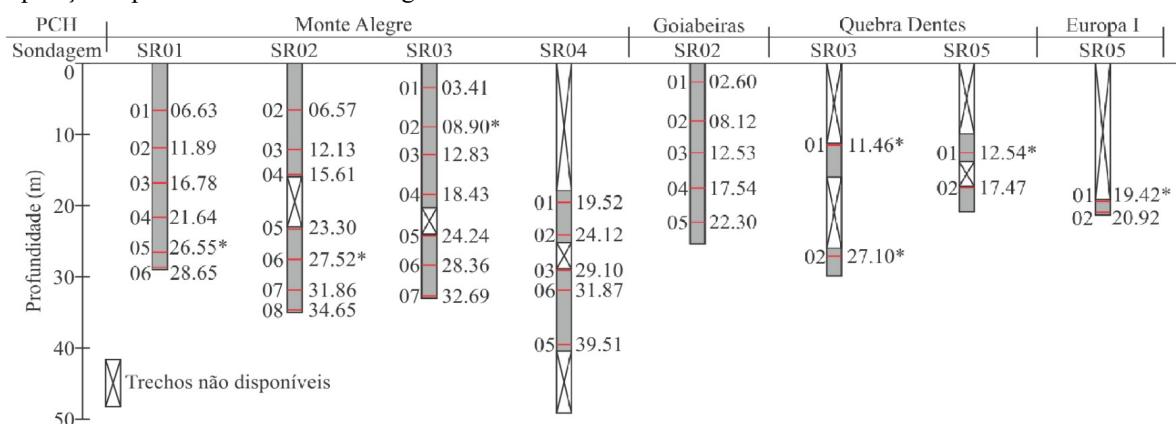


Fonte: Própria (2019).

3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a realização dos ensaios de caracterização geológico-geotécnica, foram preparados 38 corpos de prova, com espaçamento de aproximadamente 5 metros ao longo da extensão dos testemunhos, com exceções onde ocorriam ausência de um trecho, variações litológicas, ou trechos altamente fraturados com espaçamento entre fraturas inferior ao tamanho mínimo do corpo de prova. A profundidade de cada corpo de prova pode ser vista na Figura 19, com exceção dos dois corpos de prova da sondagem Curitibanos SR05, pois a profundidade do trecho disponível do testemunho é desconhecida (Tabela 12).

Figura 19: Posição dos corpos de prova em cada testemunho de sondagem. A imagem não representa a disposição espacial dos furos de sondagem.



Fonte: própria (2019).

Notas:

* Corpos de prova laminados para petrografia.

Os testemunhos foram cortados utilizando uma serra pertencente ao laboratório de pavimentação, no Departamento de Engenharia Civil da UFSC (Figura 20). Foi construído um suporte de madeira para fixar os testemunhos, que possibilitou o corte simultâneo de até 7 corpos de prova.

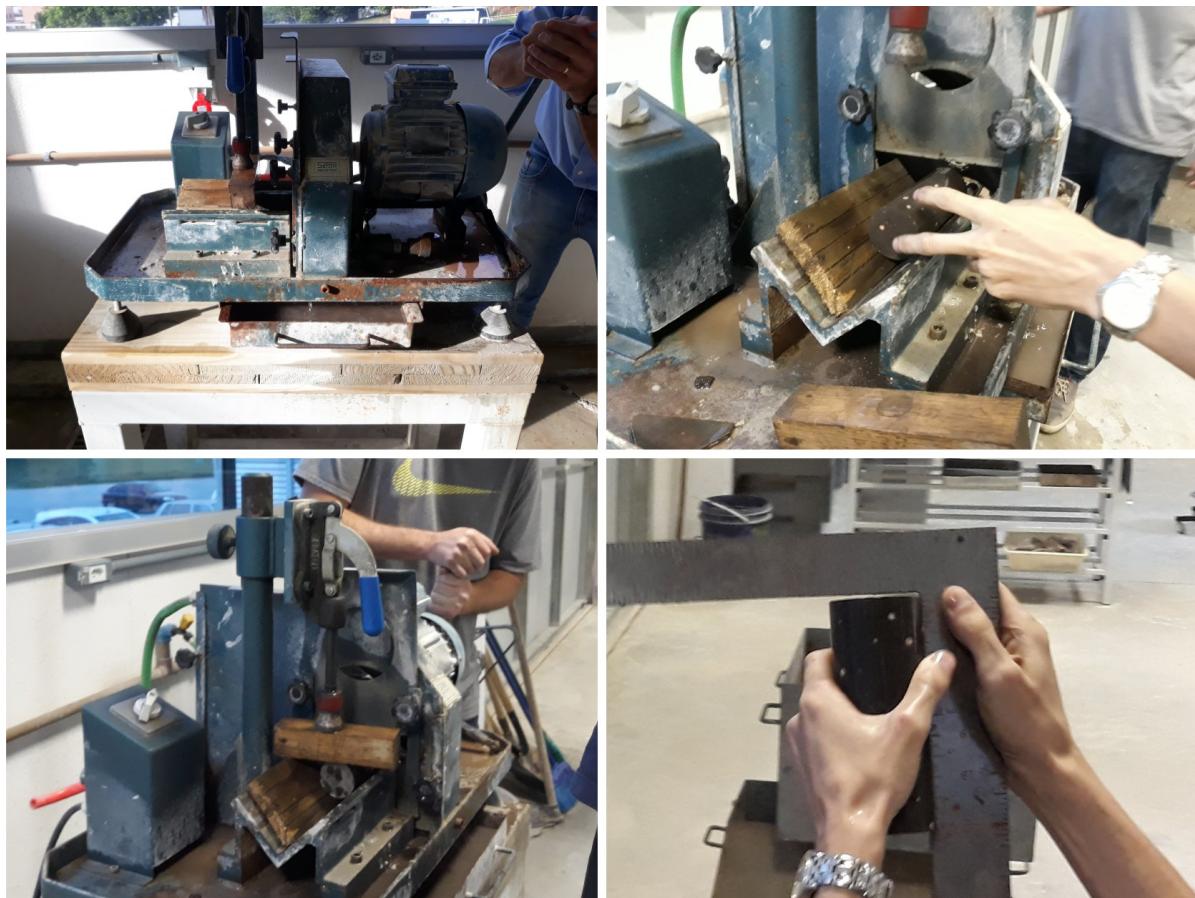
Figura 20: Equipamento utilizado para o corte dos corpos de prova.



Fonte: própria (2019)

Após o corte, foi necessário facear as extremidades dos corpos de prova para que ficassem o mais paralelas possível entre si, e perpendiculares em relação ao eixo do corpo de prova. Para esta etapa foi utilizada a retífica para corpo de provas SET 50, fabricada pela empresa Setor Indústria, e pertencente ao Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL (Figura 21).

Figura 21: Faceamento dos corpos de prova utilizando a retífica pertencente ao Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL.

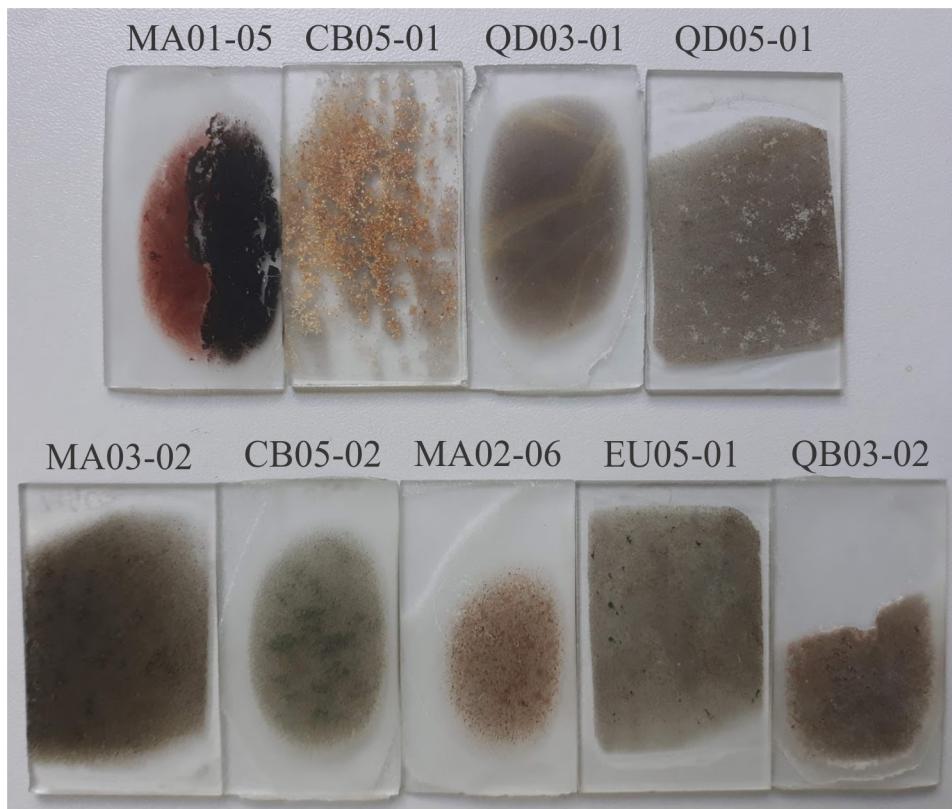


Fonte: própria (2019).

3.2 PETROGRAFIA

A caracterização petrográfica foi feita por meio de análise macro e microscópica. A descrição macroscópica foi realizada em todos os 38 corpos de prova. Para a descrição microscópica, foram confeccionadas 9 lâminas petrográficas pelo Laboratório de Laminação (LabLam), descritas no Laboratório de Microscopia Óptica, ambos pertencentes ao Departamento de Geologia. Foram confeccionadas lâminas para os seguintes corpos de prova: MA01-05, MA02-06, MA03-02, QD03-01, QD03-02, QD05-01, EU05-01, CB05-01 e CB05-02 (Figura 19 e 22).

Figura 22: Laminas petrográficas e corpos de prova de onde foram extraídas.



Fonte: Própria (2019).

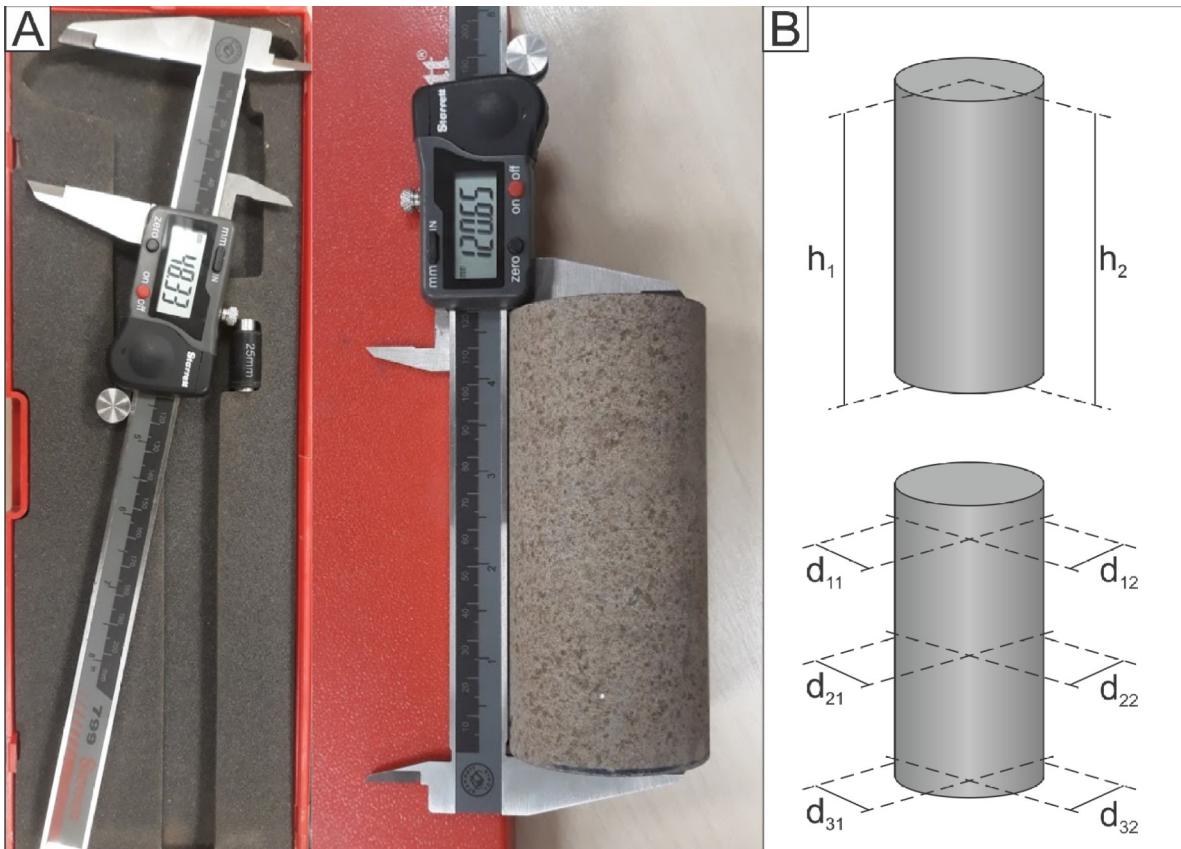
3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Para esta etapa, foram seguidos os procedimentos sugeridos pela ISRM (1979). Com os corpos de prova prontos, suas dimensões foram determinadas utilizando um paquímetro digital com resolução de 0.01 mm (Figura 23A). Para a altura, foi calculada a média entre duas medidas perpendiculares entre si (equação 26), enquanto que para o diâmetro, a média entre seis medidas nas posições superior, média e inferior, duas em cada posição, perpendiculares entre si (equação 27). A Figura 23B demonstra como foram determinadas as medidas.

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (26)$$

$$d = \frac{d_{11} + d_{12} + d_{21} + d_{22} + d_{31} + d_{32}}{6} \quad (27)$$

Figura 23: (A) Paquímetro utilização para a determinação das dimensões dos corpos de prova. (B) Medidas obtidas para o cálculo da altura e diâmetro médios de cada testemunhos.



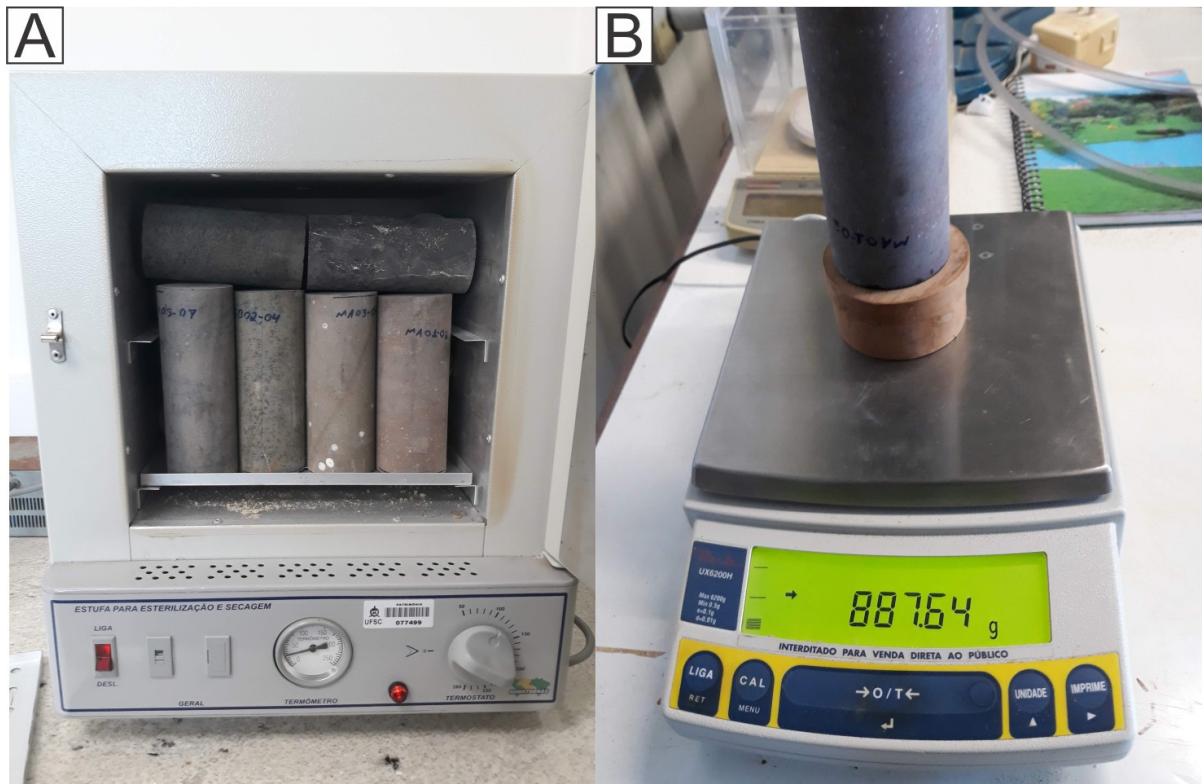
Fonte: própria (2019).

Em seguida, os corpos de prova foram colocados para secar em uma estufa à 105º C durante 24 h (Figura 24A). Após a etapa de secagem, a massa dos sólidos de cada corpo de prova foi determinada utilizando uma balança digital com sensibilidade de 0.01 g (Figura 24B). Com estes dados, calculou-se o peso específico dos corpos de prova secos.

A próxima etapa consistiu na saturação dos corpos de prova em água, realizada utilizando um recipiente de vidro no qual até 5 corpos de prova podiam ser imersos simultaneamente. Uma bomba de vácuo foi conectada ao recipiente e um vácuo de 97.33 kPa foi aplicado durante 2 h (Figura 25). Em seguida, os corpos de prova foram imersos em outro recipiente por mais 24 h, sem aplicação de vácuo. Passadas às 24 h em imersão, os corpos de prova tiveram suas superfícies levemente secas com uma flanela macia para a retirada do

excesso de água aderida e, em seguida, foram pesados. Com estes dados em mãos, foram calculados o peso específico saturado e a porosidade efetiva de cada corpo de prova.

Figura 24: (A) Secagem dos corpos de prova a 105º C durante 24 h. (B) Balança digital utilizada para determinar o peso dos sólidos.



Fonte: própria (2019).

Figura 25: Saturação dos corpos de prova. À esquerda, o recipiente contendo os corpos de prova imersos em água. À esquerda, a bomba de vácuo utilizada.



Fonte: própria (2019).

3.4 ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Esta etapa consistiu na determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais e transversais nos testemunhos secos e saturados. Os ensaios foram executados por meio do equipamento Pundit Lab+, fabricado pela empresa suíça Proceq S. A. (Figura 26A) e pertencente ao Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos (GPEND), do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

A leitura dos pulsos ultrassônicos foi realizada com os transdutores de emissão e recepção posicionados em cada extremidade do corpo de prova, com um gel de acoplamento aplicado entre a interface transdutor/rocha (Figura 26C). Para cada tipo de onda (longitudinal e transversal) foram utilizados transdutores e gel específicos. Antes da realização dos ensaios, foi necessário calibrar o equipamento utilizando o bloco de calibração (Figura 26B) com a aplicação do gel acoplante específico para o tipo de onda.

Figura 26: (A) Equipamento Pundit Lab+, utilizado medir a velocidade de propagação de ondas. (B) Bloco padrão para a calibração do equipamento. (C) Ensaio sendo executado, com emissão e leitura direta de pulsos ultrassônicos.

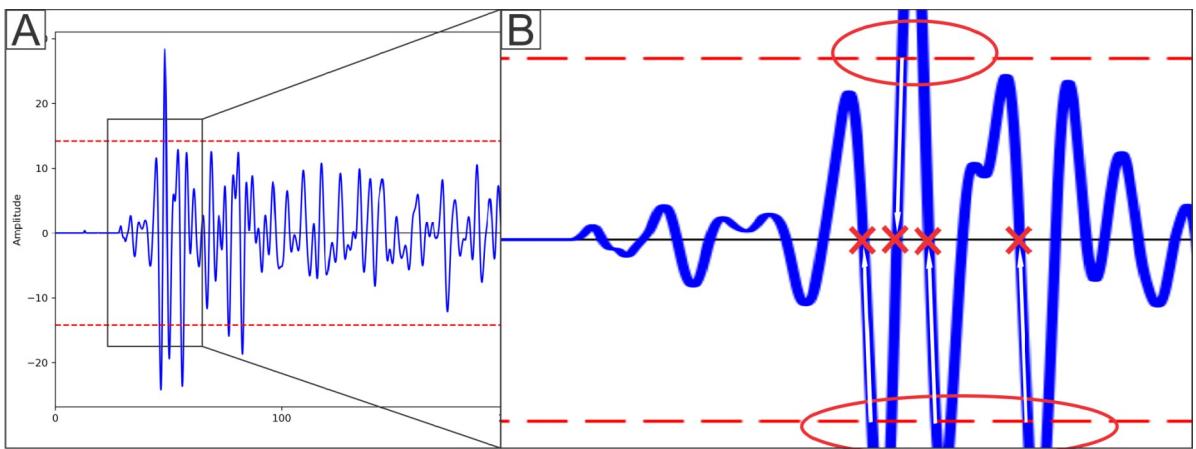


Fonte: própria (2019).

Para as ondas longitudinais, foram emitidos pulsos de 54 kHz, enquanto que para as ondas transversais, pulsos de 250 kHz. Em ambos os casos foram realizadas 500 leituras com o intervalo entre leituras de 0.5 μ s.

Enquanto que para ondas P o tempo de chegada é fornecido pelo equipamento, para ondas S o mesmo precisa ser determinado manualmente. Para isto, foi utilizada a técnica *zero-crossing*, que consiste pegar os n primeiros tempos t_n que antecedem os trechos da forma da onda que cruzarem um limiar estabelecido, e escolher como tempo de chegada o primeiro tempo t_n que fornecer resultados coerentes (Figura 27; MAŽEIKA & DRAUDVILIENE, 2010).

Figura 27: Método *zero-crossing*: possíveis tempos de chegada e média de cada tempo entre todos os testes em condição não-saturada para o corpo de prova MA01-02.



Fonte: própria (2019).

Um algoritmo na linguagem de programação Python foi escrito para determinar automaticamente os n tempos para um determinado limiar. O limiar foi estabelecido como metade da amplitude máxima de cada onda. Foram pegos os 5 primeiros tempos para cada onda e, como cada ensaio possuía mais de uma onda, foi calculada a média entre cada tempo t_n (p. ex.: em um ensaio com 6 ondas, foi retirada a média entre os 6 t_1 obtidos em cada uma). Após, foi escolhido o primeiro tempo que permitiu a obtenção de valores positivos para E_{din} e v_{din} . As únicas exceções quanto ao limiar ocorram no ensaio seco para o corpo de prova MA01-03 e no ensaio saturado para o corpo de prova CB05-01, em que os limiares precisaram ser alterados respectivamente para 65% e 30% da amplitude máxima pois com 50% nenhum tempo apresentou resultados positivos. Para a maior parte dos corpos de prova, foi utilizado o

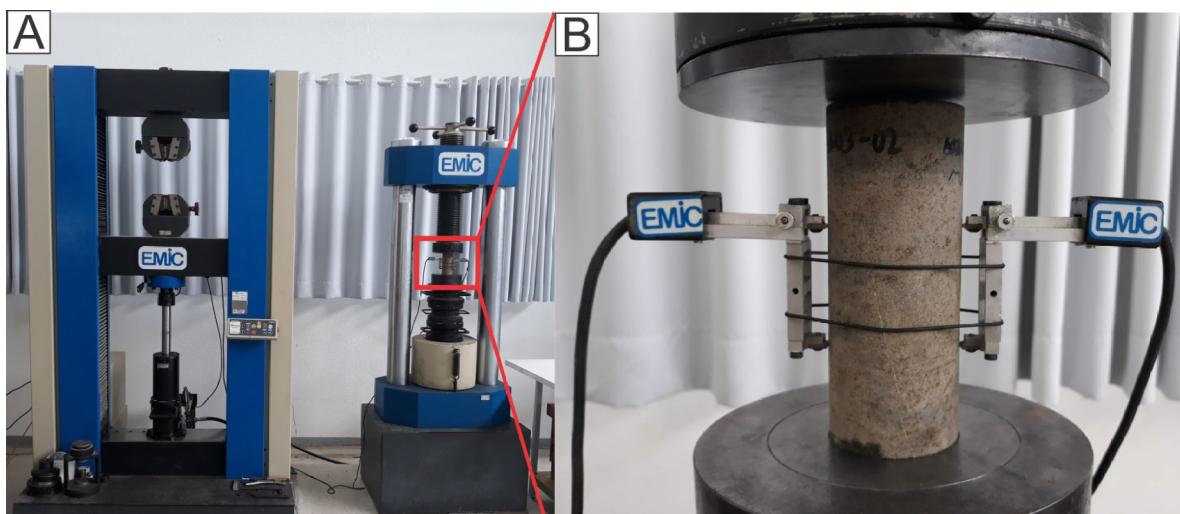
primeiro tempo. No ensaio seco, as exceções foram: MA03-01 e QD05-01 (segundo tempo) e CB05-01 (quarto tempo). No ensaio saturado, as exceções foram: MA03-03 e QD05-01 (segundo tempo) e CB05-01 (quinto tempo).

3.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Este ensaios permitiu a determinação do módulo de Young estático para a deformação axial e a resistência à compressão uniaxial quando aplicadas tensões uniaxiais crescentes. Sua realização ocorreu no Laboratório de Engenharia Civil (LEC), localizado na Unisul campus Pedra Branca.

Foram utilizados equipamentos da marca nacional EMIC, pertencente à empresa Instron Brasil. Para a aplicação da tensão uniaxial, foi utilizada o Sistema de Ensaios, um equipamento que permite ensaios de tração, compressão e flexão (Figura 28A). Este equipamento consiste em três componentes: a Maquina Universal, a Estrutura de Compressão de 2000 kN e o *software* Bluehill. Para medir a deformação, foi utilizado o extensômetro eletrônico de configuração dupla para pequenas deformações em corpos de prova rígidos, fixado em lados opostos do corpo de prova (Figura 28B).

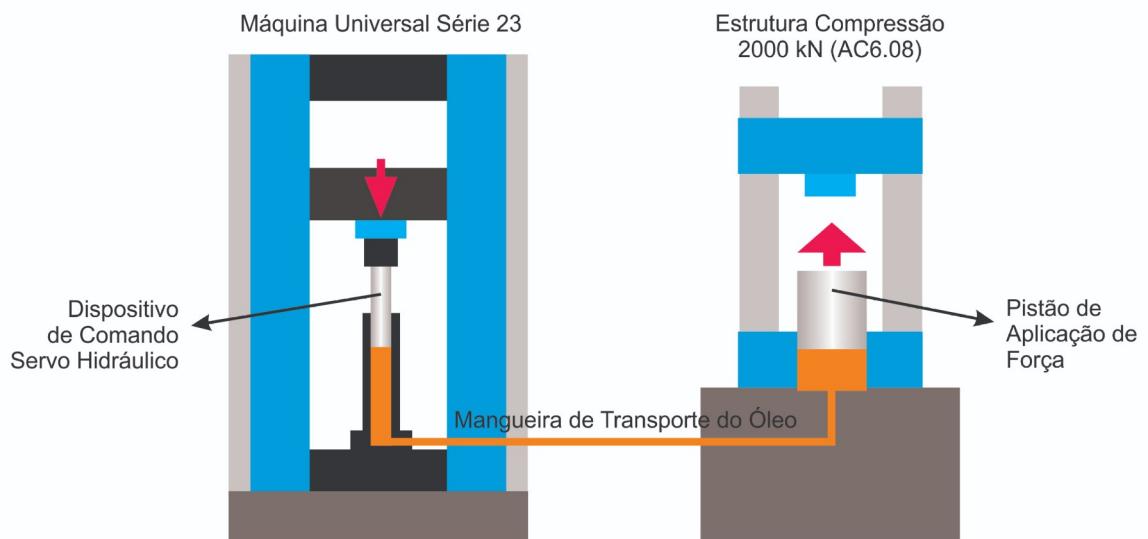
Figura 28: (A) Sistema de Ensaios da EMIC: Maquina Universal à esquerda e Estrutura de Compressão à direita. (B) Corpo de prova posicionado na prensa uniaxial e com os extensômetros fixados.



Fonte: Própria (2019).

Para ensaios de compressão, a tensão aplicada pela Maquina Universal é transferida para a Estrutura de Compressão por meio de uma mangueira de transporte de óleo (Figura 29). O *software* é responsável por controlar os equipamentos, registrar das leituras e fornecer ao usuário curvas de ensaios e meios de exportar os dados.

Figura 29: Arranjo e funcionamento dos equipamentos do Sistema de Ensaios da EMIC.



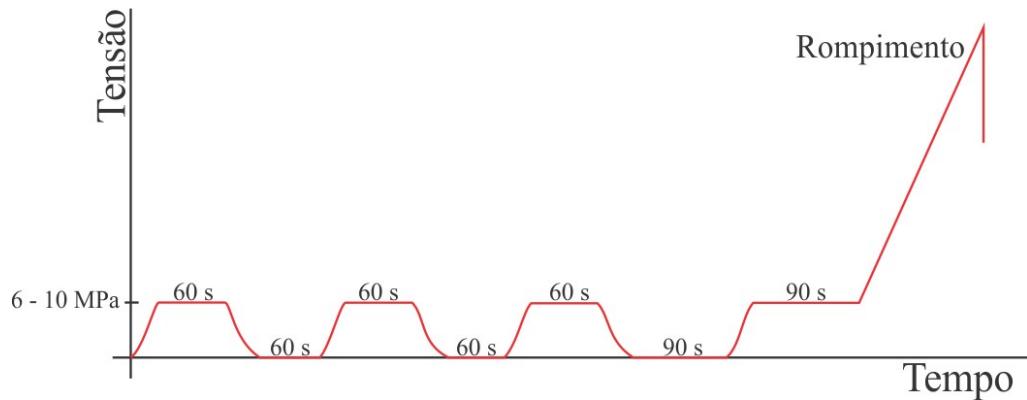
Fonte: EMIC – Equipamentos para Ensaios Mecânicos Destrutivos¹.

Foram aplicados três ciclos de carga e descarga em cada corpo de prova (Figura 30). Em cada ciclo, a tensão aumentava gradativamente até atingir um limite entre 6 a 10 MPa (limite estabelecido com base nas condições do corpo de prova). Após atingido o limite, a tensão era mantida por 60 segundos e depois descarregada, com um intervalo de mais 60 segundos até a carga seguinte. Após terceira descarga, seguia-se uma pausa de 90 segundos até o quarto carregamento, com outro intervalo de 90 segundos após. Terminado o intervalo, os extensômetros eram retirados e a carga elevada até o rompimento do corpo de prova.

Os valores de UCS foram fornecidos pelo *software* do equipamento. Os corpos de prova que romperam em descontinuidades foram descartados das correlações com UCS pois a resistência obtida representa a resistência do material de preenchimento das descontinuidades e não da matriz rochosa e, por isso, não é possível estabelecer correlação com as demais propriedades físicas e mecânicas.

1 Disponível em <<http://www.emic.com.br/Produtos+Mais/4/80>>. Acesso em fev. 2019.

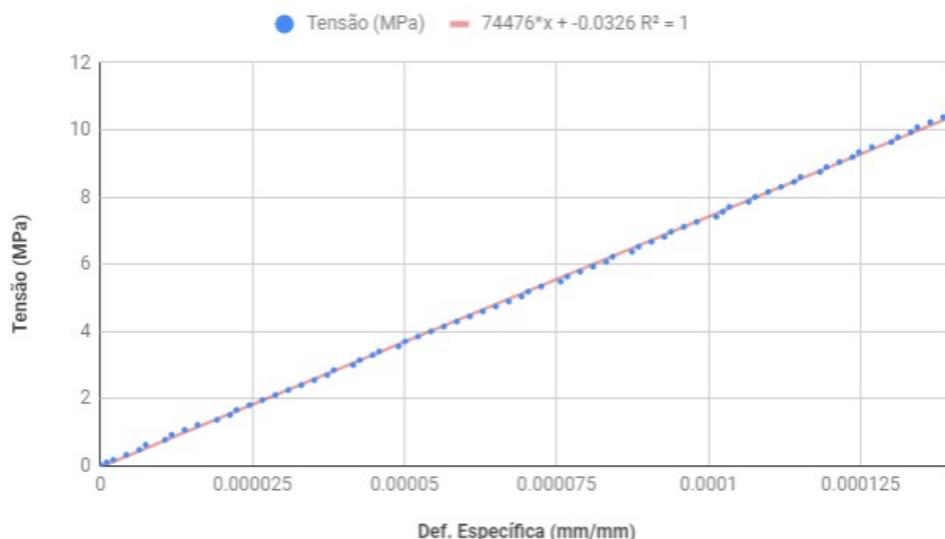
Figura 30: Gráfico com os ciclos de carga e descarga seguidos da ruptura do corpo de prova.



Fonte: Própria (2019).

Para a elasticidade, apesar de o *software* fornecer os valores, optou-se por recalculará-los a partir das leituras de tensão e deformação também fornecidas pelo mesmo. Foi escrito um algorítimo em Python para este processamento, que separou as leituras de cada etapa de carga e descarga e determinou o módulo para cada uma por meio de regressão linear. O coeficiente angular da equação da reta de melhor ajuste representa o módulo de Young, conforme a Figura 31. No total foram determinados 7 módulos por corpo de prova, quatro de carregamento e três de descarregamento. Para as correlações, foi utilizada a elasticidade média entre o segundo, terceiro e quarto carregamentos, pois no primeiro pode ocorrer o fechamento de microfissuras, que representa deformação plástica em vez de elástica.

Figura 31: Gráfico deformação específica x tensão de uma etapa de carregamento. O coeficiente angular da equação da reta ajustada representa o módulo de Young em MPa.



3.6 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

O processamento dos dados foi realizado por meio de planilhas eletrônicas e algoritmos escritos na linguagem de programação Python. Estes algoritmos utilizaram as bibliotecas *open source Pandas* para a manipulação dos dados, *StatsModel* e *SciPy* para a análise estatística, e *MatPlotLib* e *Seaborn* para a geração dos gráficos. Todos os dados e algoritmos estão disponíveis no *GitHub* do autor².

As correlações simples entre propriedades físicas e mecânicas foram feitas por meio de regressões lineares e o r^2 foi usado como métrica para a avaliação do nível de correlação. O método de regressão utilizado foi o *Ordinary Least Squares* (OLS), que procura pelos coeficientes que resultem em um modelo com a menor soma dos quadrados dos resíduos.

Para a previsão de UCS e E_{est_sat} foram utilizados modelos exponenciais (28) linearizados por meio de transformação logarítmica (29) para que fosse possível utilizar o método OLS.

$$Y = \beta_0 e^{\beta_1 X_1} \dots e^{\beta_n X_n} \quad (28)$$

$$\ln(Y) = \ln(\beta_0) + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (29)$$

A validação dos modelos propostos foi feita pela verificação de três potenciais problemas:

- a) Não-linearidade entre a variável independente com as variáveis dependentes;
- b) Existência de correlação perfeita entre variáveis independentes (colinearidade);
- c) Presença de *outliers*;

² <https://github.com/DjouGoulart/TCC>.

d) Não-normalidade na distribuição dos resíduos.

O primeiro problema foi verificado por meio de regressões simples entre a variável dependente com cada uma das variáveis dependentes. Para aquelas que de fato mostraram uma relação não-linear, o problema foi resolvido por meio da transformação logarítmica da variável dependente.

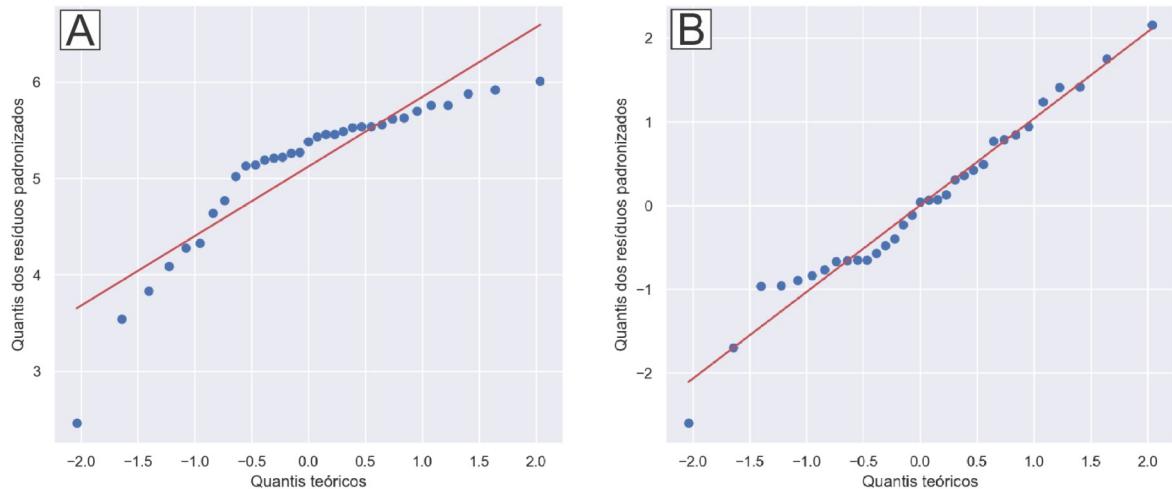
O segundo problema consiste na existência de correlação linear entre duas ou mais variáveis independentes do modelo, o que faz com que a incerteza quanto aos coeficientes relacionados às variáveis correlacionadas e, consequentemente, a incerteza do modelo, aumentem (JAMES et al., 2013). Para verificar este problema foi utilizado o *value of inflection* (VIF, equação 30). James et al. (2013) recomenda um VIF acima de 5 ou 10 para indicar a existência de colinearidade significativa.

$$VIF = \frac{1}{1 - r^2} \quad (30)$$

O terceiro problema foi verificado pelo gráfico de resíduos padrões. James et al. (2013) sugerem que sejam considerados *outliers* quaisquer observações com resíduos padronizados acima de 3 em valor absoluto. *Outliers* detectados foram removidos e a regressão foi realizada novamente, repetindo o processo até que não restasse nenhum.

Por último, a normalidade da distribuição dos resíduos é necessária para que se possa estabelecer os intervalos de previsão corretamente. Esta premissa é verificada pelo histograma e gráfico quantil-quantil (Q-Q) para a distribuição de *student*, que compara os quantis normalizados teóricos (esperados para uma distribuição normalizada) com os quantis dos resíduos: quanto mais os pontos se aproximarem de uma reta, maior a normalidade (Figura 32).

Figura 32: (A) Distribuição com assimetria à direita. (B) Distribuição próxima à normal.



Fonte: própria (2019).

Com o objetivo de fornecer modelo de fácil utilização, optou-se por utilizar o mínimo de variáveis que possibilitessem obter bons resultados. As variáveis obtidas em condição saturada foram eliminadas pela maior dificuldade em determiná-las. Entre as demais, a escolha foi feita com base no teste t e na existência de colinearidade com VIF acima de 5.

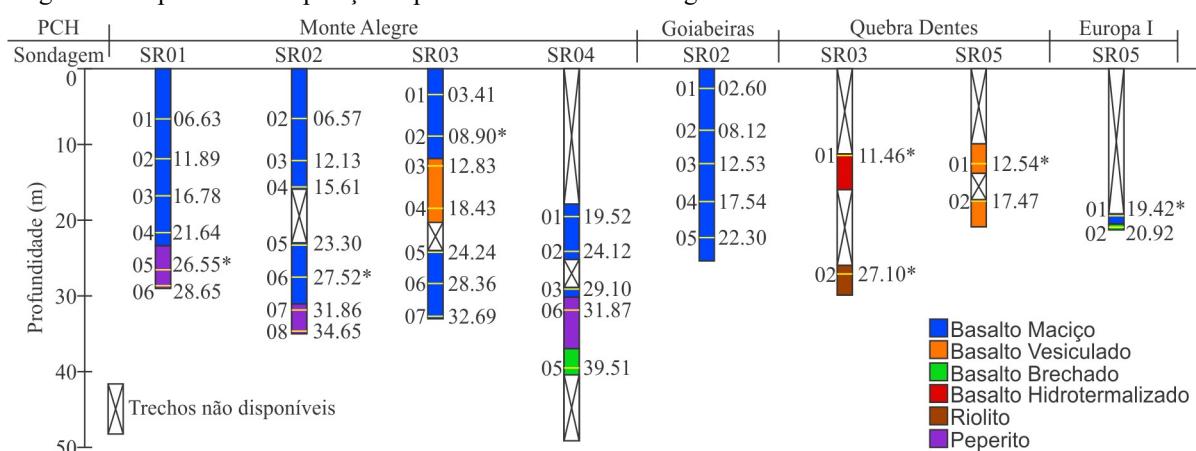
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados a caracterização petrográfica e os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica, discutidas as correlações entre as propriedades físicas e mecânicas e propostos modelos para a previsão da UCS e módulo de Young estático.

4.1 PETROGRAFIA

A petrografia foi realizada por descrição macroscópica das amostras e microscópica utilizando nove lâminas petrográficas. Foram tiradas fotografias em escala macro e fotomicrografia com polarizadores paralelos (PP) e cruzados (PC). A Figura 33 mostra a variação litológica em cada furo de sondagem, com exceção da sondagem SR05, PCH Curitibanos, que não está representada na imagem pois a profundidade do trecho disponível é desconhecida. Foram considerados basaltos vesiculados aqueles com mais de 5% de porosidade efetiva.

Figura 33: Posição dos corpos de prova em cada testemunho de sondagem, com classificação litológica. A imagem não representa a disposição espacial dos furos de sondagem.



Fonte: própria (2019).

Notas:

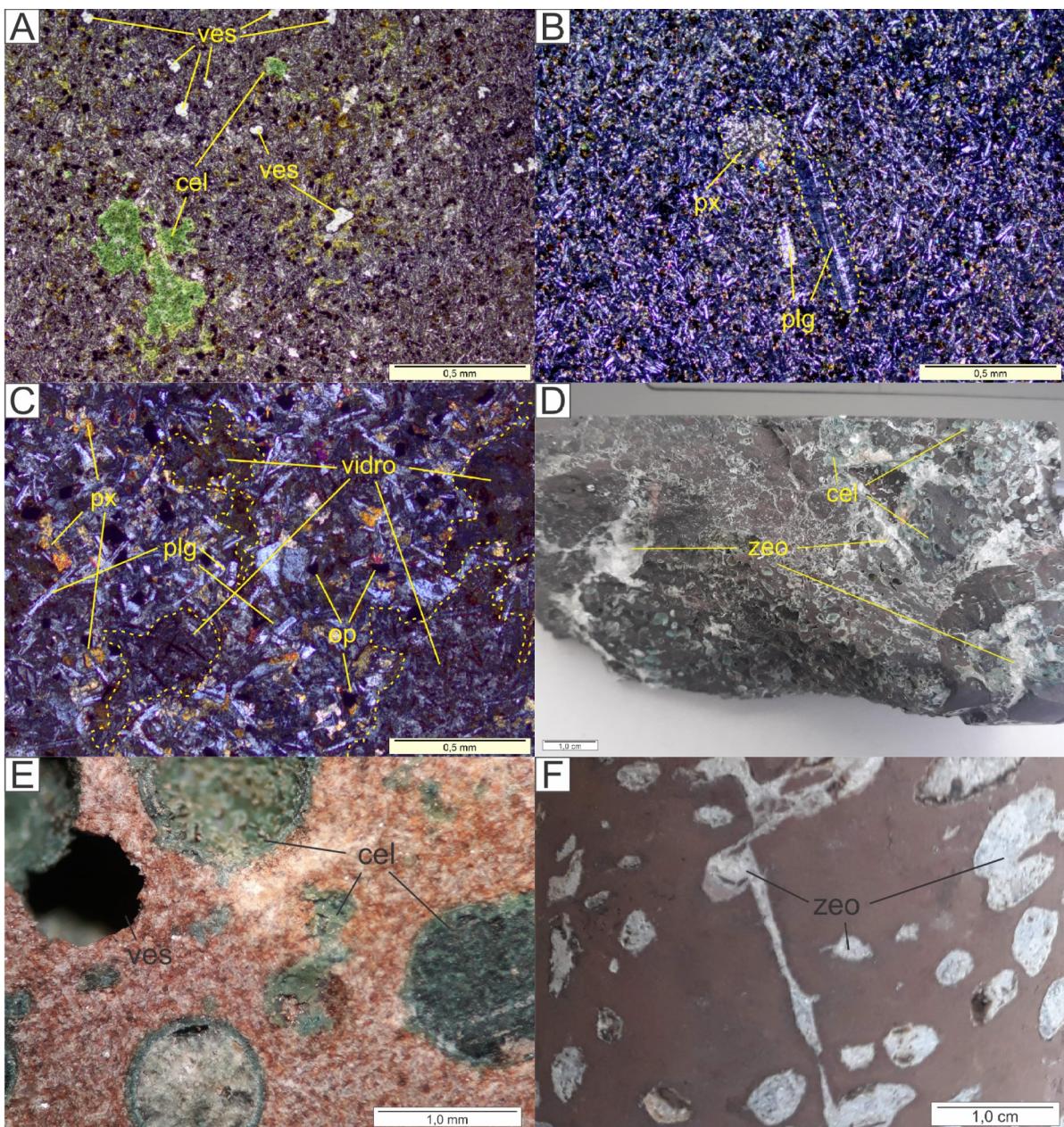
* Corpos de prova laminados para petrografia.

4.1.1 Basaltos Maciços, Vesiculados e Brechados

Os basaltos são mesocráticos, de coloração cinza médio a escuro, por vezes levemente avermelhados devido à oxidação e marrons quando muito alterados. A estrutura é maciça. A textura é principalmente afanítica, holo a hipocristalina e hipidiomórfica. Ocorrem variações vesiculares, amigdaloidais e brechadas (Figura 34D, E, F). Os cristais variam de 0.01 a 0.2 mm. São compostos predominantemente por plagioclásio (45 – 50%), piroxênio (30 – 40%), opacos (10 – 20%) e vidro vulcânico (<1 – 15%), ocasionalmente por quartzo (até 3%). Outra variedade de basalto pode chegar à 50% de material vítreo (Figura 34C). Ocorrem raros fenocristais de plagioclásio e piroxênio, com 0.8 à 1.6 mm (Figura 34B). As vesículas e amígdalas ocorrem em escala micro e macro, entre 0.03 mm a 2.5 cm (Figura 34A, E, F).

O piroxênio é anédrico a subédrico e, quando fenocristal, subédrico com textura de dissolução ou euédrico. O plagioclásio é subédrico a euédrico ripiformes, inclusive quando fenocristal. Os opacos são euédricos cúbicos e losangulares a anédricos. O quartzo, quando ocorre, é anédrico e intersticial, e indica uma afinidade toleítica. Como minerais secundários ocorrem celadonita, quartzo, zeólita e carbonato preenchendo amígdalas e fraturas, óxido/hidróxido de ferro e argilominerais.

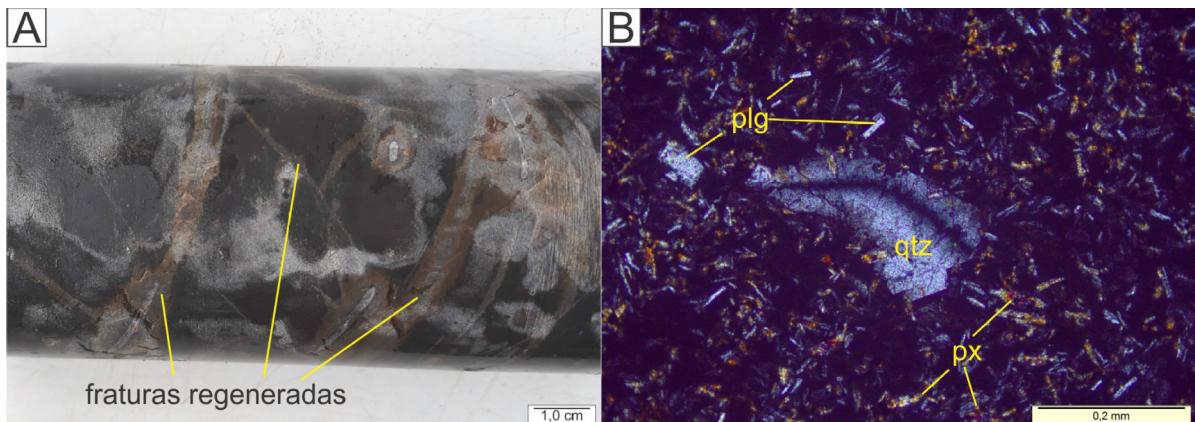
Figura 34: (A) Lâmina EU05-01, PP: Basalto afanítico holocrystalino com microvesículas (ves) e amígdalas preenchidas por celadonita (cel). (B) Lâmina EU05-01, PC: Fenocristais de plagioclásio sub e euédricos (plg) e piroxênio anédrico (px). (C) Lâmina MA02-06, PC: basalto hipocrystalino, com 50% de teor de vidro vulcânico. (D) Brecha basáltica com zeólita e celadonita preenchendo vesículas e fraturas. (E) Corpo de prova QD05-01: Vesículas total e parcialmente preenchidas por celadonita em matriz com alto grau de intemperismo. (F) Corpo de prova MA03-03: Vesículas e fraturas preenchidas por zeólitas em matriz com alto grau de intemperismo.



Fonte: própria (2019).

Um dos basaltos (QD03-01) apresenta brechamento hidráulico, observado principalmente na forma de fraturas total ou parcialmente regeneradas, e hidrotermalismo, o que levou ao aumento no teor de sílica, evidenciado pela presença de grandes cristais de quartzo em escala micro (Figura 35B), bandas de hidrotermalização (Figura 35A) e geodos de quartzo micro a criptocristalino. As fraturas, por vezes, estão preenchidas por epidoto.

Figura 35: (A) CP QD03-01: Fraturas regeneradas com bandas de hidrotermalismo. (B) Lâmina QD03-01, PC: cristal de quartzo formado por hidrotermalismo em matriz basáltica composta por plagioclásio e piroxênio.

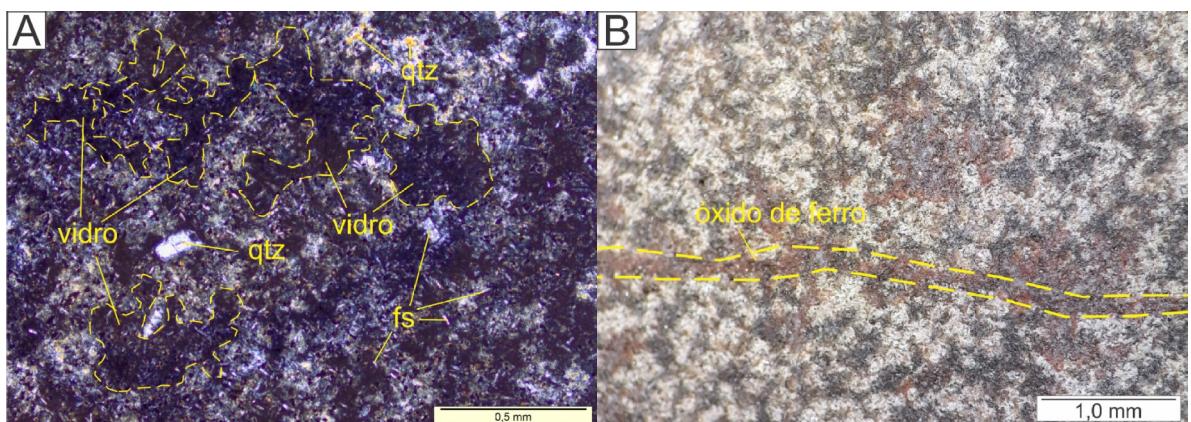


Fonte: própria (2019).

4.1.2 Riolito

O riolito é mesocrático, de coloração cinza clara. Apresenta estrutura maciça e textura afanítica e hipovítreia, com cristais de até 0.02 mm. É composto por quartzo (20%) e k-feldspato/plagioclásio (20%), em uma matriz vítreia (60%; Figura 36A). O quarto é amorfo e intersticial. Os feldspatos são subédricos a euédricos ripiformes. Ocorrem microfenocristais de ambos os minerais com 0.02 a 0.06 mm. Níveis de óxido de ferro com menos de 1 mm de espessura, mas observáveis em escala macro, ocorrem ao longo de toda a extensão do testemunho (Figura 36B).

Figura 36: (A) Lâmina QD03-02: quartzo e feldspato em matriz vítreia. (B) Níveis milimétricos de óxido de ferro.



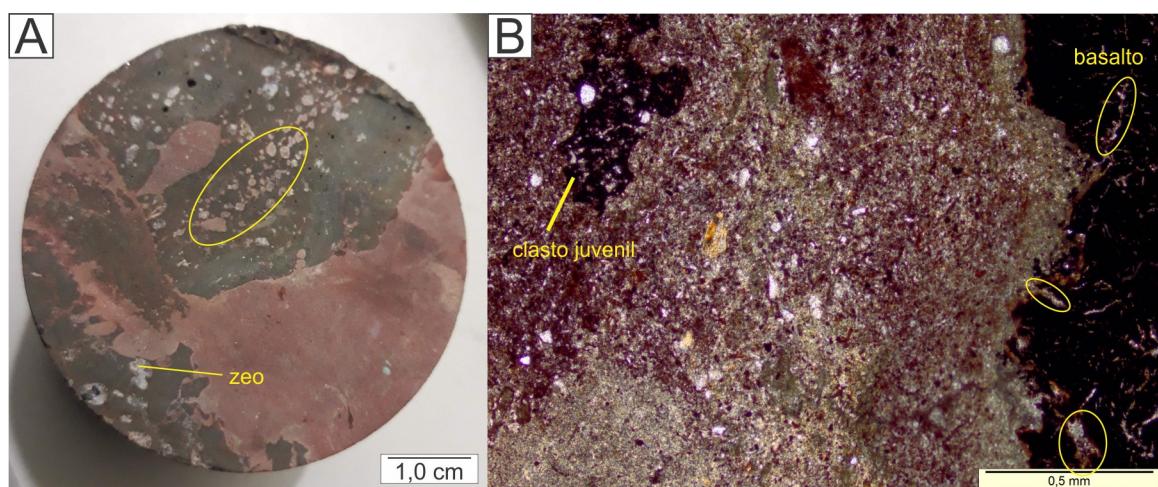
Fonte: própria (2019).

4.1.3 Peperito

Os peperitos possuem uma parte sedimentar rosa avermelhada, com granulometria que varia de argila para areia fina. São compostos por quartzo, mica, feldspato e argilominerais. A elevada espessura da lâmina na parte ígnea impossibilitou sua descrição, mas presume-se que possua as mesmas características dos basaltos descritos anteriormente.

Ocorrem clastos juvenis com morfologia irregular fluidal e angular, com vesículas e fraturas preenchidas por sedimentos (Figura 37), indício de que o sedimento estava inconsolidado e úmido durante a interação com o magma. Como minerais secundários, ocorrem zeólitas preenchendo vesículas e fraturas, e argilominerais como produto de alteração da matriz basáltica.

Figura 37: (A) Corpo de prova MA01-03: Clasto juvenil com vesículas preenchidas por sedimentos e zeólitas. (B) Lâmina MA01-05, PP: Clasto juvenil com morfologia irregular fluidal. Vesículas e fraturas preenchidas por sedimentos, indício de interação do magma com sedimentos inconsolidados e úmidos.



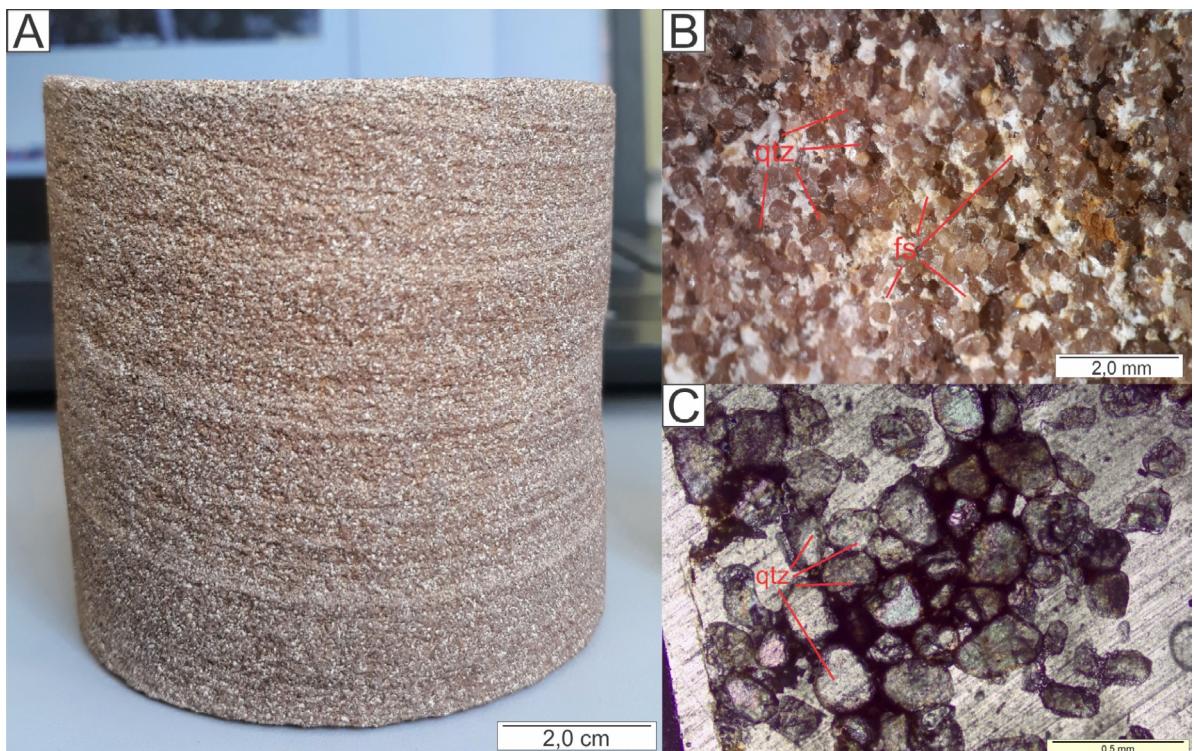
Fonte: própria (2019).

4.1.4 Arenito

O arenito é marrom amarelado, com estrutura de laminação inclinada (Figura 38A) e textura fina a muito fina. É composto quartzo (70%) e feldspato caulinizado (30%; Figura

38B). Os grãos de quartzo são bem selecionados, com média a alta esfericidade, sub a arredondados (Figura 38C).

Figura 38: (A) Estrutura de laminação inclinada. (B) Foto em lupa do corpo de prova CB05-01: arenito de textura fina, composto predominantemente por grãos de quartzo, com feldspato caulinizado em menor quantidade. (C) Lâmina CB05-01: grãos de quartzo com média a alta esfericidade, sub a arredondados, bem selecionados (Obs.: lâmina com defeito).



Fonte: própria (2019).

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos nos ensaios caracterização geotécnica. Estes dados serão discutidos no capítulo seguinte.

Os valores de UCS para o corpo de prova MA03-01, GB02-01, GB02-02, GB02-03, GB02-04, GB02-05 (todos os da PCH Goiabeiras) foram descartados por terem rompido em descontinuidades.

Nos resultados da elasticidade estática para os corpos de prova MA03-04, QD03-01 e QD03-02, excluiu-se da média o terceiro, quarto e segundo carregamento, respectivamente, pois diferiam muito dos outros dois. Os resultados dos corpos de prova MA01-03, MA03-02, QD05-01, GB02-02 foram descartados pois os corpos de prova romperam antes do esperado e foi obtido apenas o primeiro carregamento. Os resultados dos corpo de prova MA01-04 e GB02-04 foram descartados devido à alta variância nas elasticidades obtidas nos quatro carregamentos, o que pode ter ocorrido devido a problemas na fixação do extensômetro ou pelo fechamento das descontinuidades.

Tabela 13: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica

Código	Lit.*	Propriedades Físicas			Propriedades Mecânicas									
		γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n _e	Seco				Saturado					
					V _p (km/s)	V _s (km/s)	E _{din} (GPa)	v _{din}	V _p (km/s)	V _s (km/s)	E _{din} (GPa)	v _{din}	E _{est**} (GPa)	UCS*** (MPa)
MA01-01	BM	27.05	27.10	0.49%	5.56	3.00	64.20	0.29	5.64	3.19	70.97	0.27	102.93	228.50
MA01-02	BM	27.51	27.59	0.90%	5.63	2.95	64.07	0.31	5.63	3.07	68.05	0.29	68.72	262.40
MA01-03	BM	27.02	27.24	2.26%	5.29	2.88	58.94	0.29	5.49	3.13	69.97	0.26	-	136.70
MA01-04	BM	26.88	26.98	1.09%	5.27	2.83	57.09	0.30	5.27	2.92	59.70	0.28	-	97.60
MA01-05	PP	22.39	23.92	15.52%	4.28	2.09	26.91	0.34	4.28	1.91	22.99	0.38	40.67	46.30
MA01-06	PP	24.70	25.25	5.65%	5.13	2.49	41.97	0.35	5.13	2.49	42.07	0.35	57.96	93.90
MA02-02	BM	25.30	25.69	3.97%	5.22	2.94	56.44	0.27	5.22	2.92	55.95	0.27	52.02	181.40
MA02-03	BM	27.30	27.41	1.15%	5.76	3.11	69.70	0.29	5.76	3.22	73.46	0.27	77.05	193.00
MA02-04	BM	26.89	27.05	1.66%	5.53	2.84	58.37	0.32	5.57	2.97	62.84	0.30	75.00	195.10
MA02-05	BM	26.70	26.85	1.48%	5.62	2.91	60.62	0.32	5.62	2.95	61.90	0.31	93.01	190.20
MA02-06	BM	26.76	26.92	1.72%	5.26	2.94	59.87	0.27	5.26	3.03	62.74	0.25	54.60	138.00
MA02-07	BM	26.47	26.81	3.50%	5.14	2.80	54.44	0.29	5.23	2.83	55.79	0.29	51.49	113.70
MA02-08	PP	22.02	23.63	16.41%	4.09	2.00	24.18	0.34	4.18	1.82	20.49	0.38	29.40	32.50
MA03-01	BM	28.16	28.23	0.70%	5.46	3.15	71.22	0.25	5.46	2.97	65.18	0.29	75.02	183.90
MA03-02	BM	27.99	28.10	1.06%	5.64	2.88	62.60	0.32	5.64	2.86	61.82	0.33	-	-
MA03-03	BV	21.89	23.81	19.50%	3.54	1.69	17.26	0.35	3.58	1.89	20.84	0.31	18.23	29.00
MA03-04	BV	24.99	25.50	5.18%	5.19	2.41	40.37	0.36	5.39	2.93	56.46	0.29	76.38	121.30
MA03-05	BM	26.76	26.94	1.80%	5.54	2.97	62.45	0.30	5.67	3.16	69.47	0.28	86.75	122.40
MA03-06	BM	26.80	27.05	2.52%	5.43	2.87	58.95	0.31	5.47	3.25	70.92	0.23	66.99	208.80
MA03-07	BM	27.13	27.27	1.42%	5.70	3.21	72.34	0.27	5.82	3.18	72.15	0.29	85.10	261.20
MA04-01	BM	26.92	27.06	1.45%	5.49	2.85	58.74	0.32	5.49	2.93	61.44	0.30	78.98	139.70

Código	Lit.*	Propriedades Físicas			Propriedades Mecânicas									
		γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n _e	Seco				Saturado					
					V _p (km/s)	V _s (km/s)	E _{din} (GPa)	v _{din}	V _p (km/s)	V _s (km/s)	E _{din} (GPa)	v _{din}	E _{est**} (GPa)	UCS*** (MPa)
MA04-02	BM	27.25	27.37	1.21%	5.46	2.93	61.84	0.30	5.46	3.03	65.14	0.28	66.37	169.40
MA04-03	BM	26.90	27.00	1.02%	5.38	2.97	62.04	0.28	5.51	3.02	64.37	0.28	66.15	144.20
MA04-05	BB	23.93	24.78	8.69%	5.02	2.18	31.98	0.38	5.11	2.29	35.14	0.37	48.30	80.50
MA04-06	PP	21.33	22.86	15.56%	4.64	2.28	30.38	0.31	4.60	2.68	38.81	0.24	31.01	33.50
QD03-01	BH	24.69	24.84	1.58%	5.54	2.89	55.13	0.34	5.66	3.06	60.95	0.29	95.72	101.50
QD03-02	RI	25.19	25.63	4.42%	5.21	3.12	61.08	0.22	5.33	2.98	57.93	0.27	88.03	148.00
QD05-01	BV	21.30	22.96	16.93%	3.06	2.14	20.34	0.02	3.24	2.26	22.77	0.02	-	19.97
QD05-02	BV	25.55	26.18	6.41%	4.33	1.92	26.52	0.38	4.52	2.20	33.86	0.35	36.54	-
EU05-01	BM	27.07	27.49	4.22%	4.77	2.66	49.78	0.27	4.79	2.20	36.48	0.37	38.32	93.00
EU05-02	BB	21.00	22.76	17.99%	3.83	1.82	19.29	0.35	3.81	2.27	26.96	0.23	20.90	34.30
GB02-01	BM	28.85	28.90	0.46%	6.01	3.23	79.61	0.30	6.01	3.19	78.25	0.30	91.16	-
GB02-02	BM	28.58	28.77	1.88%	5.93	2.34	44.98	0.41	6.00	2.60	54.39	0.38	-	-
GB02-03	BM	29.01	29.07	0.64%	5.92	3.11	75.00	0.31	6.04	3.32	83.89	0.28	61.49	-
GB02-04	BM	28.95	29.03	0.77%	5.92	3.30	82.15	0.27	6.05	3.26	81.41	0.30	-	-
GB02-05	BM	28.78	28.89	1.14%	5.76	2.38	46.30	0.40	5.88	2.31	44.13	0.41	92.03	-
CB05-01	AR	19.82	21.57	17.84%	2.46	1.53	11.21	0.18	2.48	1.41	10.10	0.26	11.13	16.30
CB05-02	BM	28.40	28.49	0.91%	5.88	3.14	74.17	0.30	5.88	3.24	77.85	0.28	107.14	138.70

Fonte: própria (2019).

Notas:

* BM = Basalto Maciço; BV = Basalto Vesiculado; BB = Basalto Brechado; BH = Basalto Hidrotermalizado; PP = Peperito; RI = Riolito; AR = Arenito.

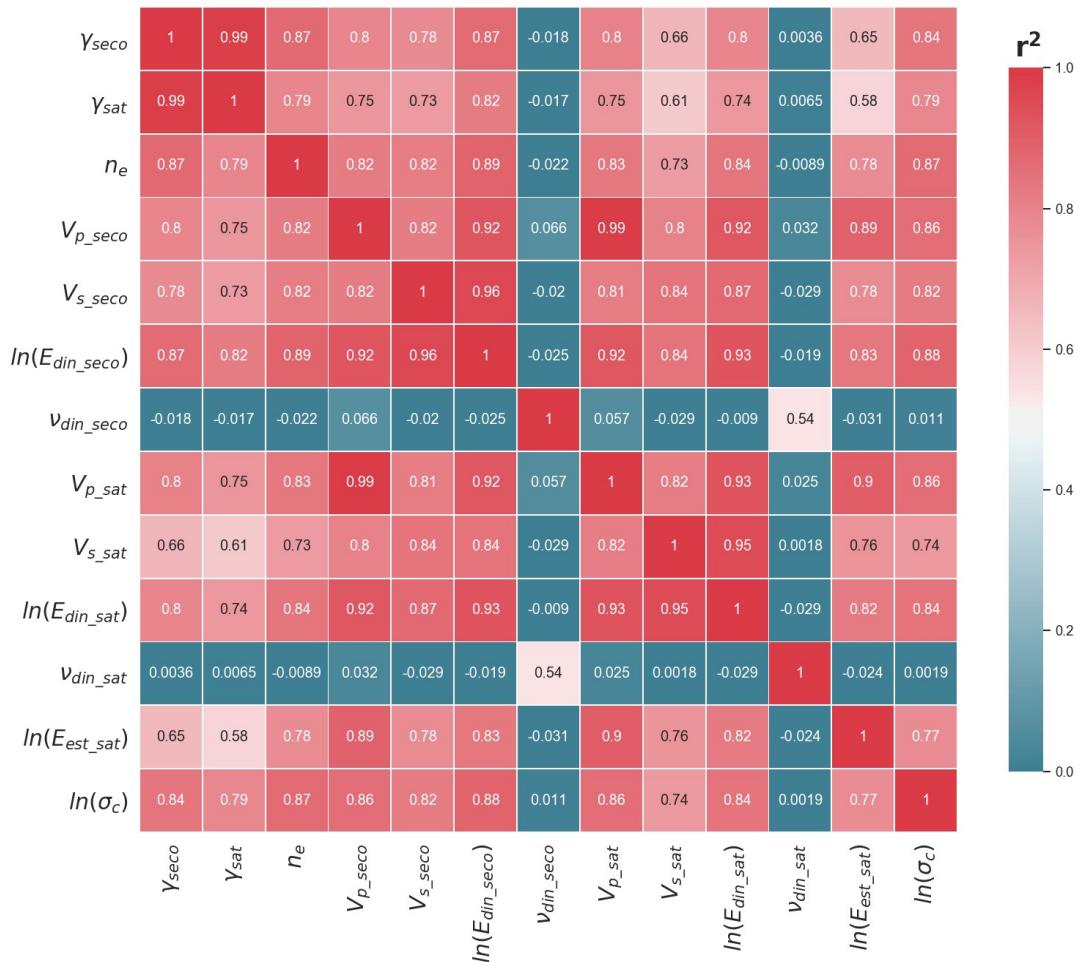
** Valores ausentes representam resultados descartados por problemas durante a execução do ensaio.

*** Valores ausentes representam resultados descartados por ruptura em descontinuidade presente no corpo de prova.

4.3 CORRELAÇÕES SIMPLES

A Figura 39 mostra a correlação entre todas as propriedades dos corpos de prova ensaiados.

Figura 39: Matriz de correlação entre propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova ensaiados.



Fonte: própria (2019).

Com exceção do coeficiente de Poisson, é possível observar que todas as outras propriedades possuem correlação com r^2 acima de 0.5. Nos itens seguintes, essas correlações serão mostradas em maiores detalhes.

4.3.1 Peso específico e porosidade

No geral, os valores obtidos para o peso específico e porosidade estão de acordo com o observado na literatura. As tabelas 14 e 15 resumem os dados dessas propriedades por litologia.

Tabela 14: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para peso específico seco e saturado, por litologia.

Litologia	Qtde	γ_{dry} (kN/m ³)				γ_{sat} (kN/m ³)			
		Min	Max	Méd	Std	Min	Max	Méd	Std
Basalto Maciço	25	25.30	29.01	27.42	0.93	25.69	29.07	27.57	0.87
Basalto Vesiculado	4	21.30	25.55	23.43	2.15	22.96	26.18	24.61	1.49
Peperito	4	21.33	24.70	22.61	1.46	22.86	25.25	23.91	1.00
Basalto Brechado	2	21.00	23.93	22.46	2.07	22.76	24.78	23.77	1.42
Basalto Hidrotermal	1			24.69	-			24.84	-
Riolito	1			25.19	-			25.63	-
Arenito	1			19.82	-			21.57	-

Fonte: própria (2019).

Tabela 15: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para porosidade efetiva, por litologia.

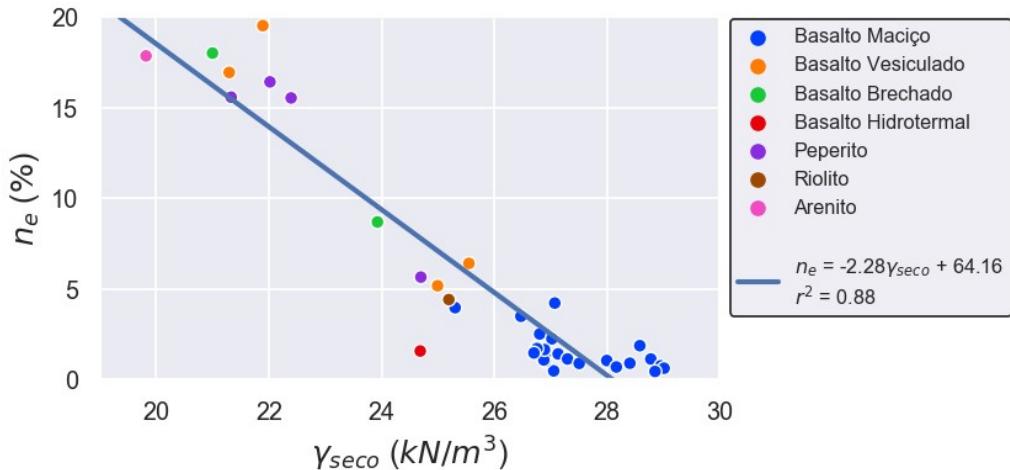
Litologia	Qtde	n _e (%)			
		Min	Max	Méd	Std
Basalto Maciço	25	0.46	4.22	1.58	1.02
Basalto Vesiculado	4	5.18	19.50	12.00	7.27
Peperito	4	5.65	16.41	13.29	5.10
Basalto Brechado	2	8.69	17.99	13.34	6.58
Basalto Hidrotermal	1			1.58	-
Riolito	1			4.42	-
Arenito	1			17.84	-

Fonte: própria (2019).

A Figura 40 mostra a relação entre as duas propriedades. Apesar de uma boa correlação ($r^2 = 0.88$) é importante levar em conta que a densidade da rocha não depende apenas da porosidade mas também de sua composição: rochas com maior teor de sílica tendem a ter menor densidade.

Os basaltos possuem, predominantemente, peso específico entre 26 e 29 kN/m³ e porosidade efetiva abaixo de 5%. Algumas exceções ocorrem nos basaltos vesiculados e brechados, que podem passar de 15% de porosidade efetiva, como no caso dos corpos de prova MA03-03, QD05-01 e EU05-02. Entre os corpos de prova mais porosos também estão os peperitos e o arenito. Nos peperitos, como são compostos por uma parte ígnea e outra sedimentar, suas propriedades estão diretamente relacionadas à proporção entre essas em cada corpo de prova: quando maior a porção sedimentar, maior a porosidade e menor o peso específico. O riolito possui porosidade próxima à dos basaltos maciços, mas com um peso específico inferior devido ao maior teor de sílica em sua composição.

Figura 40: Gráfico peso específico seco X porosidade efetiva.

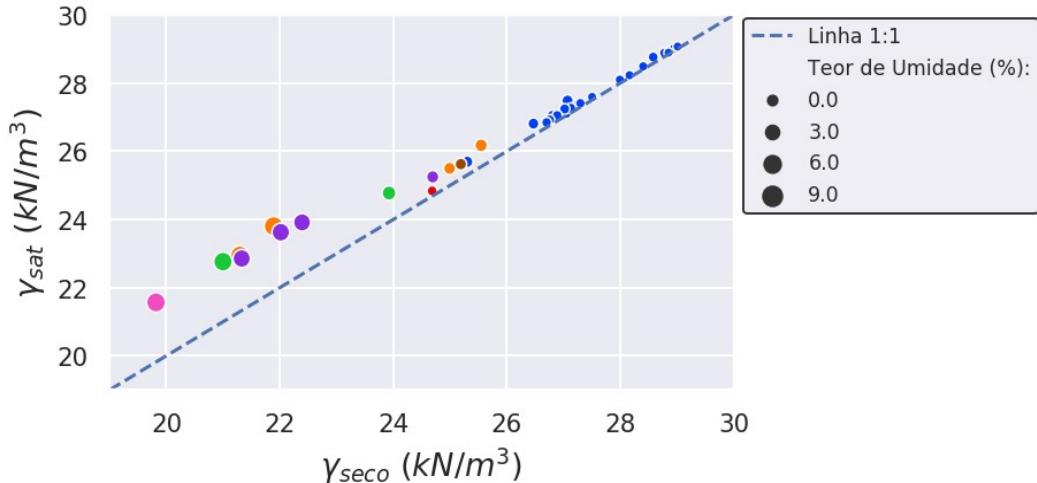


Fonte: própria (2019).

O basalto hidrotermalizado (QD03-01), apesar da baixa porosidade, possui peso específico inferior aos demais basaltos possivelmente devido ao aumento do teor de sílica em sua composição causado pelo processo de hidrotermalismo.

A saturação em água, como esperado, causa o aumento do peso específico proporcionalmente ao teor de umidade (Figura 41). Os basaltos, por sua baixa porosidade, apresentam pouca variação de densidade. A medida que a porosidade aumenta, e com isso sua capacidade em armazenar água, maior é a variação de densidade.

Figura 41: Relação entre peso específico seco, saturado e teor de umidade.



Fonte: própria (2019).

4.3.2 Velocidade de propagação de ondas

Os ensaios de propagação de ondas foram realizados com o objetivo de correlacionar os resultados com a resistência à compressão uniaxial e com o módulo de Young, como será visto mais adiante. Nesta sessão serão discutidos os resultados obtidos nestes ensaios, como se relacionam com as propriedades físicas, e qual o efeito da saturação em água.

4.3.2.1 Ensaios não-saturados

A Tabela 16 resume, por litologia, os valores de velocidade de propagação de ondas obtidos no ensaio não-saturado. Os maiores valores tanto para ondas P quanto para ondas S são observados nos basaltos maciços, enquanto que o arenito possui os menores valores.

Tabela 16: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para velocidade de propagação de ondas P e S em condição não saturada, por litologia.

Litologia	Qtde	V _{p_seco} (km/s)				V _{s_seco} (km/s)			
		Min	Max	Média	Std	Min	Max	Média	Std
Basalto Maciço	25*	4.77	6.01	5.54	0.29	2.66	3.30	2.98	0.16
Basalto Vesiculado	4	3.06	5.19	4.03	0.93	1.69	2.41	2.04	0.31
Peperito	4	4.09	5.13	4.54	0.46	2.00	2.49	2.22	0.21
Basalto Brechado	2	3.83	5.02	4.43	0.84	1.82	2.18	2.00	0.25
Basalto Hidrotermal	1			5.54	-			2.89	-
Riolito	1			5.21	-			3.12	-
Arenito	1			2.46	-			1.53	-

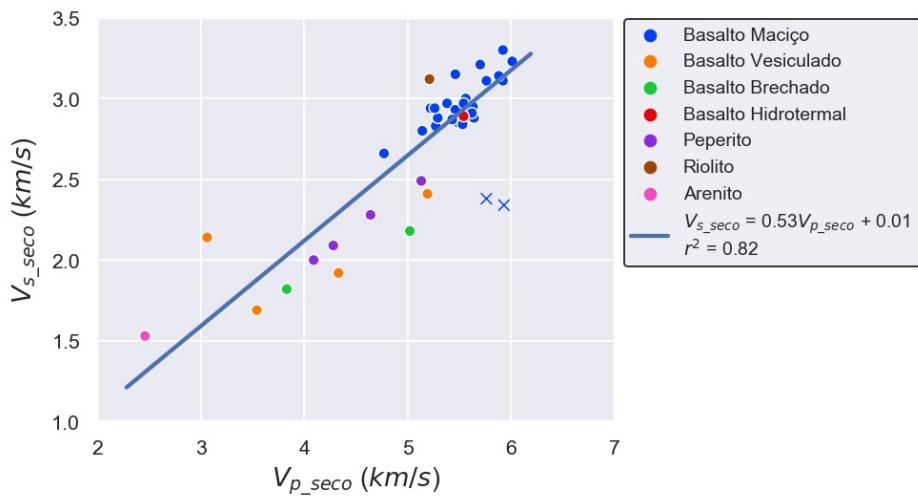
Fonte: própria (2019).

Notas:

* 23 corpos de prova para V_s.

Como pode ser observado na Figura 42, estas duas propriedades apresentam uma boa correlação, com V_s sendo aproximadamente metade de V_p. Dois basaltos apresentam V_s muito abaixo da tendência que seguem os demais: GB02-02 (2.34 km/s) e GB02-05 (2.38 km/s). Isto pode significar erros no ensaio ou algum outro fator influenciando V_s que não está presente nos demais corpos de prova. De qualquer forma, ambos foram considerados *outliers* e retirados desta e de outras correlações com V_s.

Figura 42: Relação entre ondas P e S, com teor de umidade igual a zero.



Fonte: própria (2019).

Os basaltos maciços possuem V_p e V_s predominantemente entre 5 e 6 km/s e 2.7 e 3.3 km/s, respectivamente. O riolito e o basalto hidrotermalizado também estão dentro destes

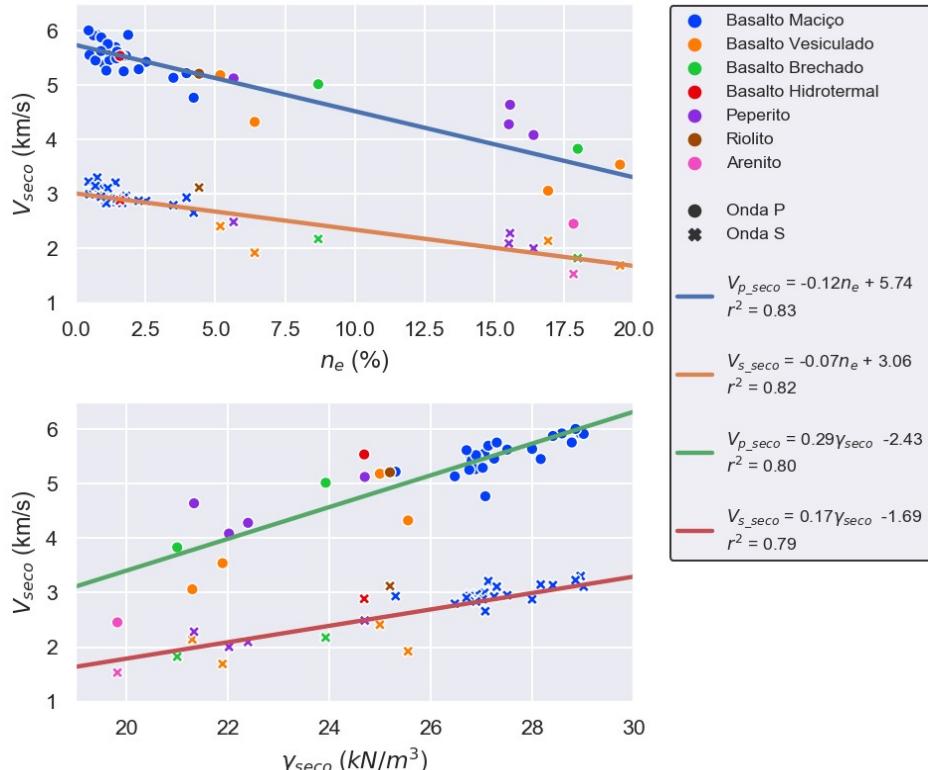
intervalos. As demais rochas possuem valores abaixo de 5.2 e 5 km/s para V_p e V_s , com os menores valores pertencendo ao arenito.

Nesta figura também observa-se que as rochas maciças possuem V_s acima do previsto pela regressão enquanto que as rochas porosas possuem predominantemente valores abaixo. Isso indica um efeito diferenciado da porosidade sobre ondas P e S, o que está de acordo com o fato de ondas S não se propagarem pelos fluidos nos poros, seja ar ou água.

4.3.2.2 Correlações com propriedades físicas

As velocidades de propagação apresentam boa correlação linear com a porosidade e o peso específico: inversamente proporcional com a primeira e diretamente proporcional com a segunda (Figura 43).

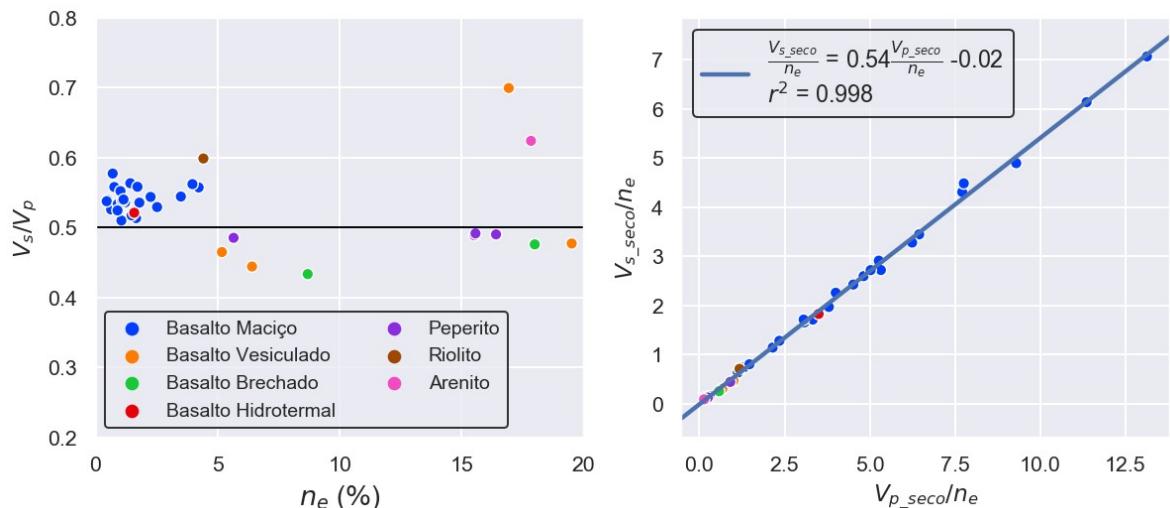
Figura 43: Correlações de velocidades de propagação com peso específico e porosidade efetiva.



Fonte: própria (2019).

A proporção V_s/V_p tende a ser menor conforme a porosidade aumenta. Para o intervalo de porosidade entre 0 e 20%, nas rochas maciças V_s fica entre 50 e 60% de V_p , enquanto que nas rochas porosas essa relação fica predominantemente entre 40 e 50% (Figura 44). Farrokhrouz (2016) atribui à porosidade a mudança do comportamento elástico da rocha para poroelástico, e sugere que uma melhor correlação entre V_p e V_s pode ser obtida ao dividir ambas as velocidades pela porosidade, o que é confirmado com os dados deste trabalho conforme visto na Figura 44. Isso implica em um maior controle das propriedades elásticas pela porosidade do que pela densidade da rocha.

Figura 44: Variações entre V_p e V_s em função da porosidade.



Fonte: própria (2019).

4.3.2.3 Efeito da saturação em água

Os valores mínimos, máximos e médios para o ensaio em condição saturada podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para velocidade de propagação de ondas P e S, por litologia.

Litologia	Qtde	V _{p,sat} (km/s)				V _{s,sat} (km/s)			
		Min	Max	Média	Std	Min	Max	Média	Std
Basalto Maciço	25*	4.79	6.05	5.59	0.30	2.20	3.32	3.04	0.23
Basalto Vesiculado	4	3.24	5.39	4.18	0.97	1.89	2.93	2.32	0.44
Peperito	4	4.18	5.13	4.55	0.43	1.82	2.68	2.22	0.43
Basalto Brechado	2	3.81	5.11	4.46	0.92	2.27	2.29	2.28	0.02
Basalto Hidrotermal	1			5.66	-			3.06	-
Riolito	1			5.33	-			2.98	-
Arenito	1			2.48	-			1.41	-

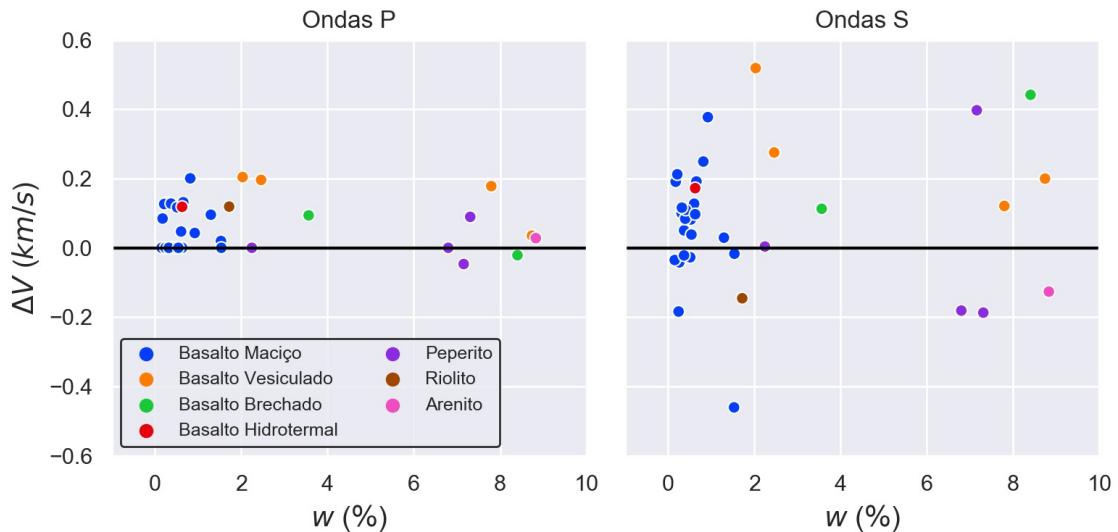
Fonte: própria (2019).

Notas:

* 23 corpos de prova para V_s.

Pela Figura 45 é possível observar o efeito da saturação na velocidade de propagação das ondas P e S, com ΔV sendo a variação da velocidade da condição seca para a saturada.

Figura 45: Efeito da saturação da velocidade de ondas P e S.



Fonte: própria (2019).

Para ondas P a variação tende a ser positiva, com um aumento médio de 67.98 m/s (descartando as duas variações negativas), mas que pode chegar à 200 m/s e ser nula em alguns casos. Isso está de acordo com o fato de ondas P serem capazes de se propagar por fluidos. A água, com uma densidade maior que a do ar, aumenta a densidade total do corpo de prova, o que reflete em um aumento em V_p. Mavko et al. (2009) afirmam que aumento da

velocidade também é consequência de um aumento temporário na rigidez da rocha, causado pela geração de poropressão devido à passagem de ondas de alta frequência. Alguns autores correlacionam a variação negativa com a presença de argilominerais nos poros (HAN; NUR; MORGAN, 1986; KLIMENTOS, 1991)

Nas ondas S, percebe-se uma maior dispersão em ΔV , tanto para valores positivo quanto para negativo, que vão de -460 a 520 m/s. A variação média é de 83.03 m/s, 178.84 m/s considerando apenas as positivas e -124.56 m/s somente as negativas. Estas ondas não são capazes de se propagarem em fluidos por estes não possuírem resistência ao cisalhamento, desta forma sua relação com a saturação torna-se mais complexa. Diversos trabalhos mostram que isto pode estar ligado à variações no módulo de cisalhamento (μ , equação 31) causadas pela pressão efetiva aplicada na rocha (BAECHLE et al., 2009; LI et al., 2017), frequência das ondas (MIKHALTSEVITCH; LEBEDEV; GUREVICH, 2016), propriedades do fluido (AMALOKWU; BEST; CHAPMAN, 2016), conteúdo de argilominerais nos poros (HAN; NUR; MORGAN, 1986) e tipo e estrutura dos poros (YAN; HAN, 2016). Para este trabalho, com ensaios realizados sobre pressão efetiva nula, frequência constante e saturação apenas em água, atribui-se essa maior dispersão às duas últimas explicações.

$$\mu = \rho V_s^2 \quad (31)$$

4.3.3 Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial é o principal parâmetro para avaliar a capacidade de uma rocha em suportar cargas. A Tabela 18 resume os resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão uniaxial. Os maiores valores de UCS pertencem aos basaltos maciços, 93 e 270 MPa. O basalto hidrotermalizado e o riolito possuem, respectivamente, 101.50 e 148.00 MPa. Nas demais litologias, UCS está predominantemente abaixo de 50 MPa, com poucas exceções.

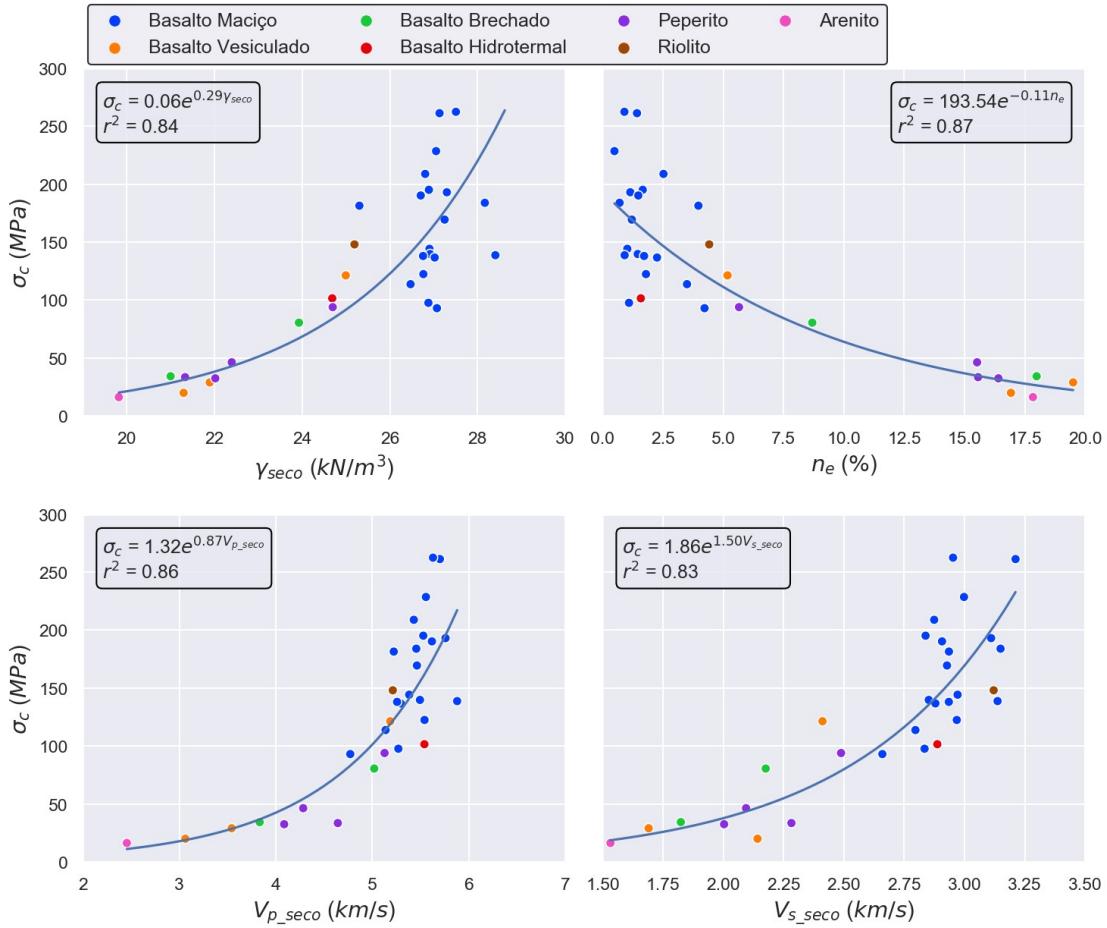
Tabela 18: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para resistência à compressão uniaxial, por litologia.

Litologia	Qtde	UCS (MPa)			
		Min	Max	Média	Std
Basalto Maciço	19	93.00	262.4	168.31	49.96
Basalto Vesiculado	3	19.97	121.3	56.76	56.08
Peperito	4	32.50	93.9	51.55	28.92
Basalto Brechado	2	34.30	80.5	57.40	32.67
Basalto Hidrotermal	1			101.50	-
Riolito	1			148.00	-
Arenito	1			16.30	-

Fonte: própria (2019).

Observa-se pela Figura 46 correlações exponenciais entre UCS e propriedades físicas, ondas P e S, com r^2 acima de 0.80, o que faz com que todas sejam boas candidatas à previsão de UCS. Estas correlações são positivas para o peso específico, V_p e V_s , e negativa para a porosidade. A diminuição de UCS com a porosidade não está relacionada apenas à diminuição do peso específico. Segundo Davis et al. (2017), os vazios agem como concentradores de estresse e levam à nucleação de fraturas, que se propagam e conectam os poros até que ocorra a ruptura da matriz. A correlação positiva entre UCS e velocidade de propagação é esperada, visto que a mesma correlação é observada entre estas e o peso específico.

Figura 46: Correlações entre UCS e propriedades físicas e velocidade de ondas.



Fonte: própria (2019).

4.3.4 Módulo de Young e Coeficiente de Poisson

O resumo dos resultados obtidos para elasticidade e Poisson dinâmicos secos e saturados e elasticidade estática podem ser vistos nas tabelas 19, 20 e 21, respectivamente.

Para correlações com o módulo dinâmico, calculado a partir de V_p e V_s , foram descartados os resultados dos corpos de prova GB02-02 e GB02-05 por terem sido considerados *outliers*, conforme visto no item 4.3.2.1.

Tabela 19: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para módulo de elasticidade dinâmico, em condição seca e saturada, por litologia.

Litologia	Qtde	E _{din_seco} (GPa)				E _{din_sat} (GPa)			
		Min	Max	Média	Std	Min	Max	Média	Std
Basalto Maciço	23	49.78	82.15	64.11	8.26	36.48	83.89	66.42	10.01
Basalto Vesiculado	4	17.26	40.37	26.12	10.25	20.84	56.46	33.48	16.36
Peperito	4	24.18	41.97	30.86	7.83	20.49	42.07	31.09	10.92
Basalto Brechado	2	19.29	31.98	25.63	8.98	26.96	35.14	31.05	5.78
Basalto Hidrotermal	1			55.13	-			60.95	-
Riolito	1			61.08	-			57.93	-
Arenito	1			11.21	-			10.10	-

Fonte: própria (2019).

Tabela 20: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para coeficiente de Poisson dinâmico, em condição seca e saturada, por litologia.

Litologia	Qtde	v _{din_seco}				v _{din_sat}			
		Min	Max	Média	Std	Min	Max	Média	Std
Basalto Maciço	23	0.25	0.32	0.29	0.02	0.23	0.37	0.29	0.03
Basalto Vesiculado	4	0.02	0.38	0.28	0.17	0.02	0.35	0.24	0.15
Peperito	4	0.34	0.35	0.34	0.00	0.24	0.38	0.34	0.06
Basalto Brechado	2	0.35	0.38	0.37	0.02	0.23	0.37	0.30	0.10
Basalto Hidrotermal	1			0.31	-			0.29	-
Riolito	1			0.22	-			0.27	-
Arenito	1			0.18	-			0.26	-

Fonte: própria (2019).

Tabela 21: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão para módulo de elasticidade estático em condição saturada, por litologia.

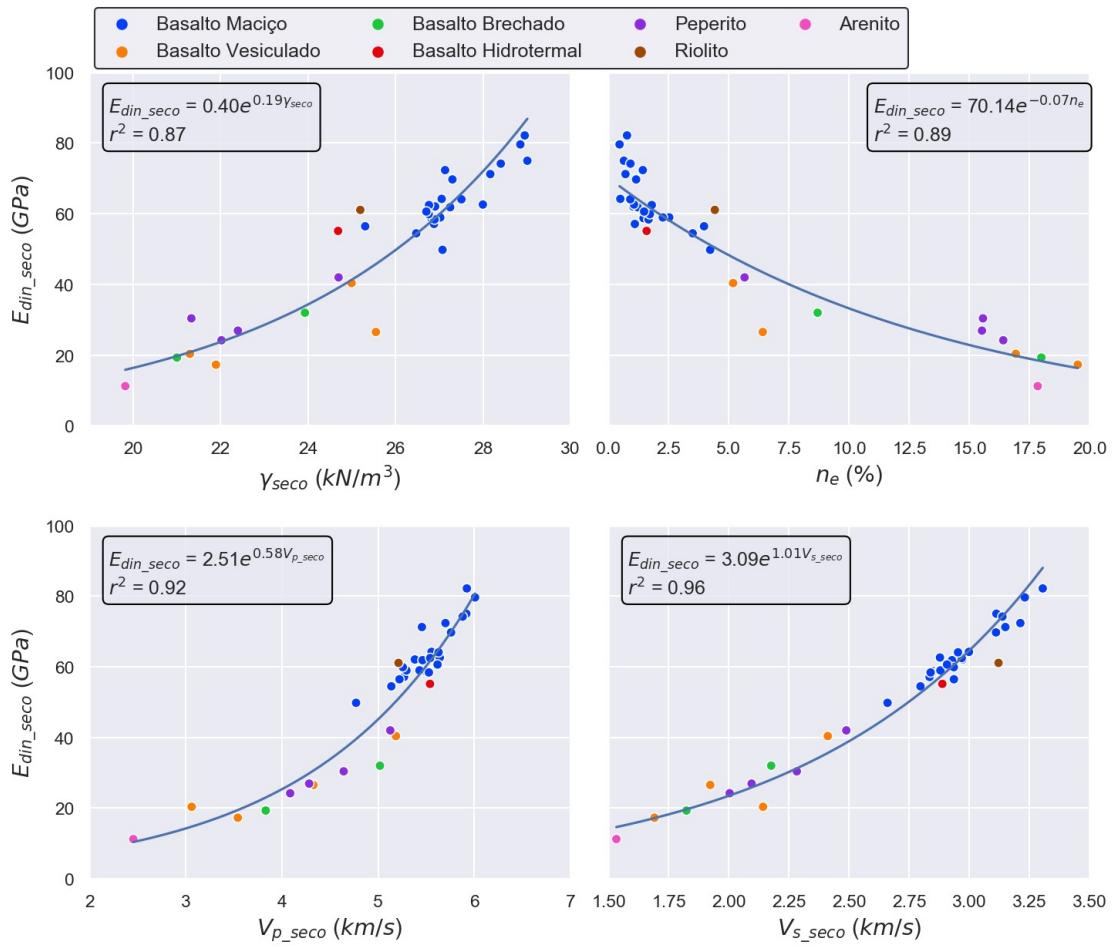
Litologia	Qtde	E _{est_sat} (m/s)			
		Min	Max	Média	Std
Basalto Maciço	20	38.32	107.14	74.52	18.10
Basalto Vesiculado	3	18.23	76.38	43.72	29.73
Peperito	4	29.40	57.96	39.76	13.11
Basalto Brechado	2	20.90	48.30	34.60	19.37
Basalto Hidrotermal	1			95.72	-
Riolito	1			88.03	-
Arenito	1			11.13	-

Fonte: própria (2019).

4.3.4.1 Correlação com propriedades físicas e velocidade de ondas

Para o módulo dinâmico, calculado a partir da densidade e velocidade de ondas, espera-se que exista uma alta correlação entre estas propriedades, o que pode ser visto na Figura 47. Em todas as casos, há uma correlação exponencial com o módulo. Esta correlação é positiva com o peso específico e velocidade de ondas e negativa com a porosidade.

Figura 47: Correlação entre módulo de Young dinâmico seco com propriedades físicas e velocidade de ondas.

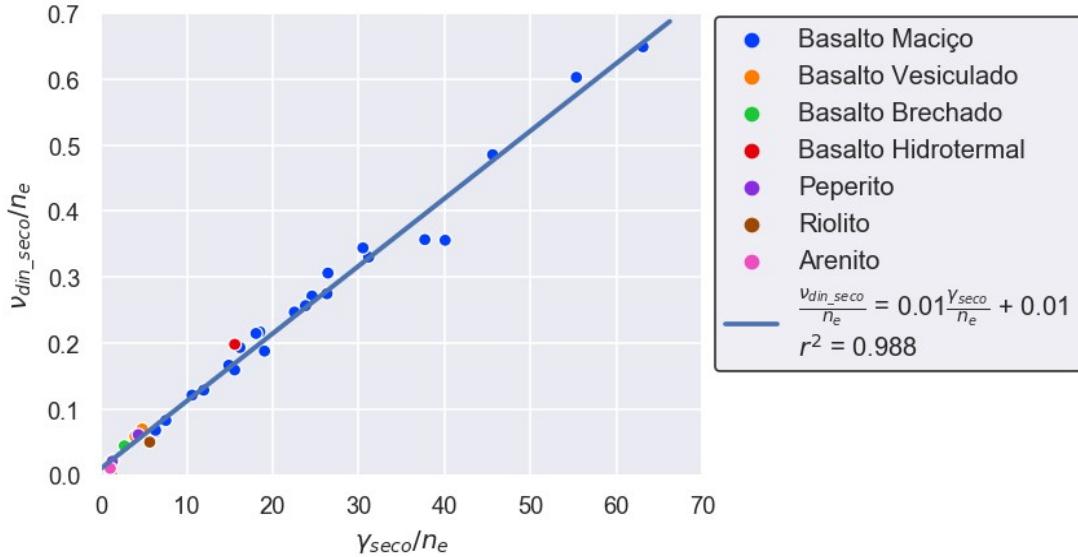


Fonte: própria (2019).

Como visto na matriz de correlação (Figura 39), o coeficiente de Poisson não apresenta correlação com as demais propriedades, contudo, ao usar o mesmo método sugerido por Farrokhrouz (2016) para correlacionar V_p e V_s (Figura 44) e dividir o coeficiente e o peso específico seco pela porosidade, é possível estabelecer uma excelente correlação entre as

propriedades (Figura 48). Isto significa que a porosidade possui um efeito significativo na relação entre deformação axial e transversal.

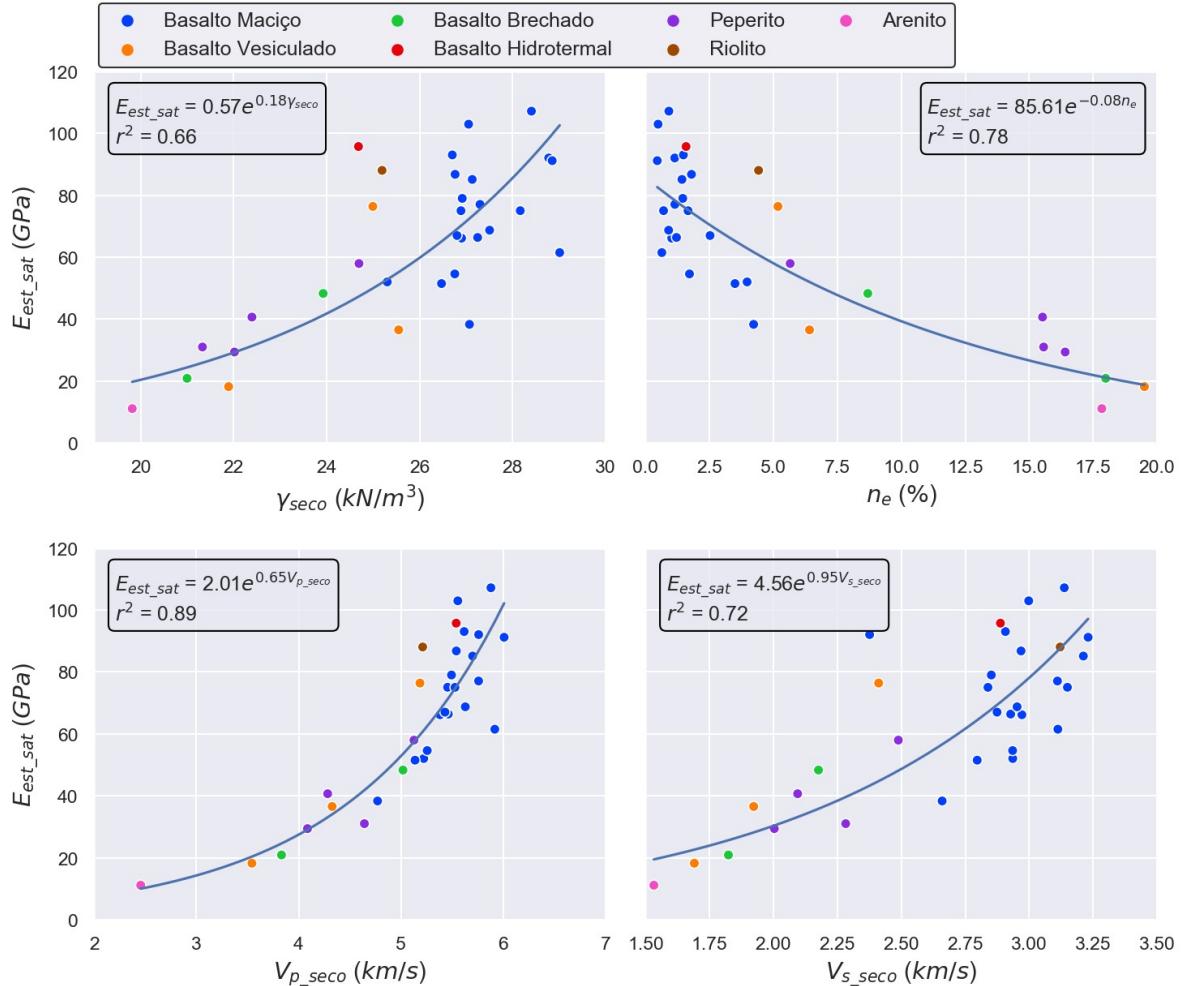
Figura 48: Correlação entre Poisson e peso específico, ao considerar os efeitos da porosidade.



Fonte: própria (2019).

A correlação das propriedades físicas e velocidade de ondas com o módulo estático possui a mesma tendência da correlação com o módulo dinâmico, contudo os coeficientes de correlação diminuem significativamente, deixando apenas V_p como uma boa candidata à previsão desta propriedade (Figura 49). Brotons et al. (2014) observam que o ensaio estático possui maior sensibilidade à presença de descontinuidades no corpo de prova, o que pode explicar a maior dispersão nas correlações.

Figura 49: Correlação entre módulo de Young estático e propriedades físicas e velocidade de propagação.

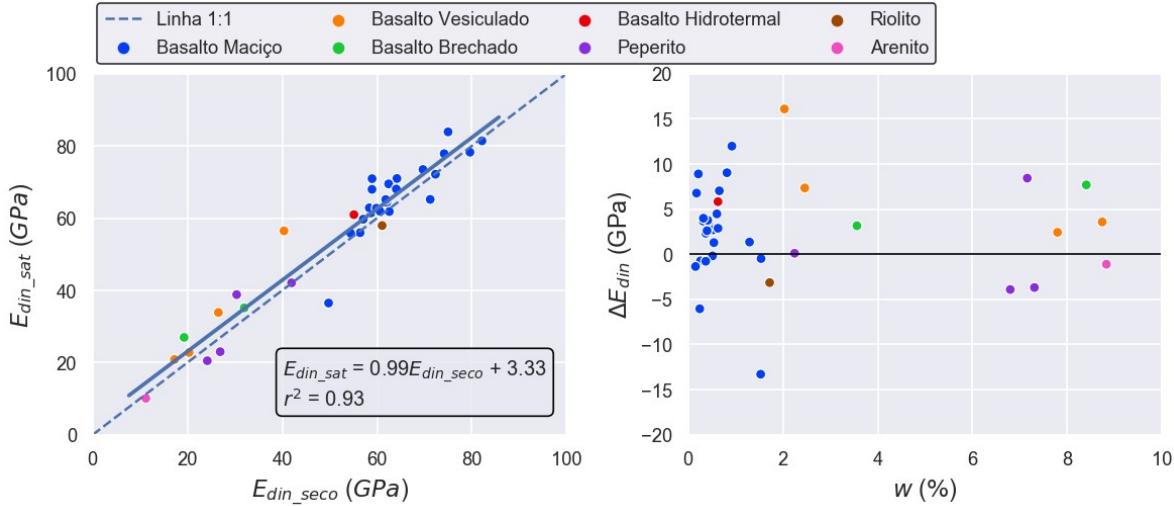


Fonte: própria (2019).

4.3.4.2 Efeito da saturação no módulo de Young e Poisson dinâmicos

Como visto anteriormente a elasticidade é positivamente correlacionada com a velocidade de ondas. Estas, por sua vez, são afetadas pela presença de água nos poros: ondas P tendem a ganhar velocidade enquanto que ondas S podem tanto ganhar quanto perder velocidade. Desta forma, espera-se que o efeito da saturação no módulo dinâmico seja um reflexo do efeito na velocidade de propagação, o que de fato ocorre, como pode ser visto na Figura 50.

Figura 50: Correlação entre condição seca e saturada para módulo de Young e coeficiente de Poisson dinâmicos.

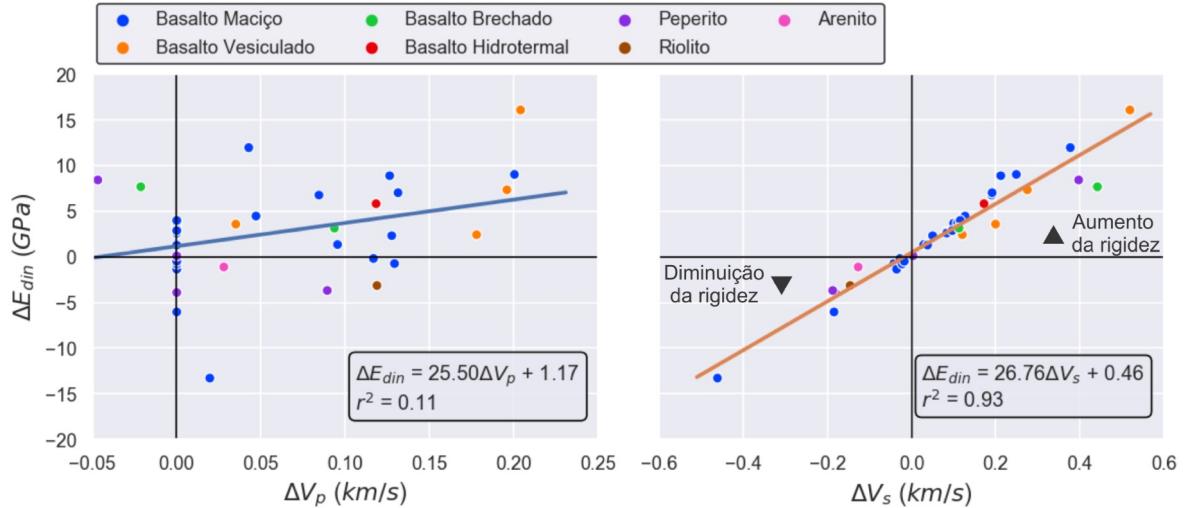


Fonte: própria (2019).

A correlação entre as condições de saturação segue uma reta próxima à relação 1:1, com um aumento de 3.33 GPa. Pelo gráfico de variação, observa-se que a distribuição dos pontos é semelhante à distribuição do gráfico de ΔV_s da Figura 45, indício de que o módulo é mais sensível à variações nesta onda do que em V_p . A variação média é de 2.71 GPa. Considerando apenas os casos onde houve um aumento do módulo, a média é de 5.39 GPa, enquanto que para os casos onde o módulo diminuiu, a média é -3.08 GPa.

Ao associar a variação em E_{din} com a variação em V_p e V_s , observa-se que no primeiro caso a correlação é de 11% enquanto que no segundo chega à 93% (Figura 51). Isto mostra que ΔE_{din} é mais sensível aos efeitos da saturação em V_s do que em V_p . Valores positivos de ΔE_{din} indicam um enrijecimento da rocha. Para valores negativos, a rigidez tende a diminuir.

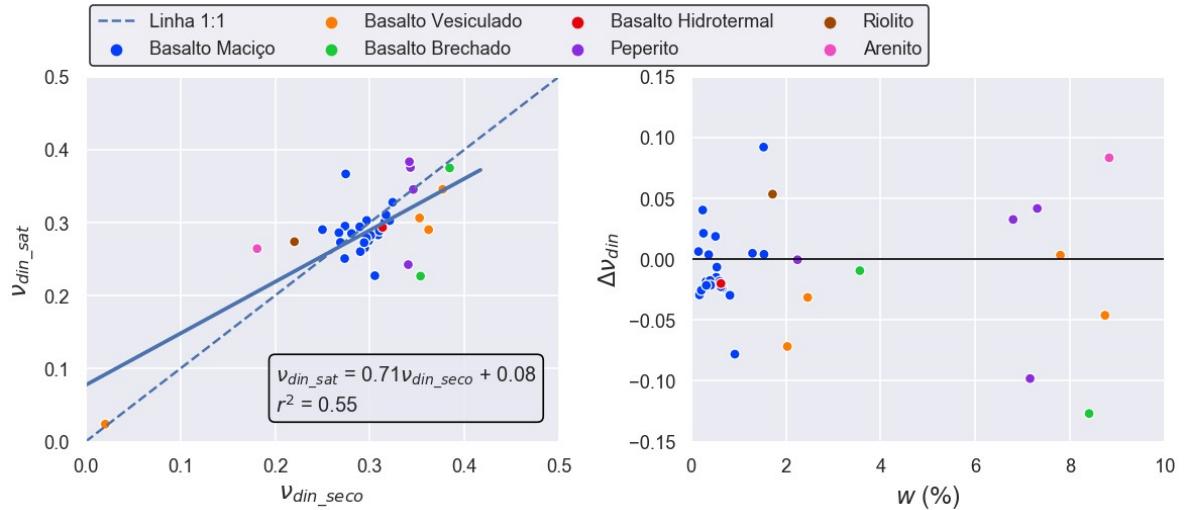
Figura 51: Correlações entre ΔE_{din} , ΔV_p e ΔV_s .



Fonte: própria (2019).

Para o coeficiente de Poisson, não há uma boa correlação entre os resultados em condição seca e saturada, a variação ocorre igualmente para valores positivos e negativos (Figura 52).

Figura 52: Variação dos resultados de módulo e Poisson dinâmicos devido à saturação.

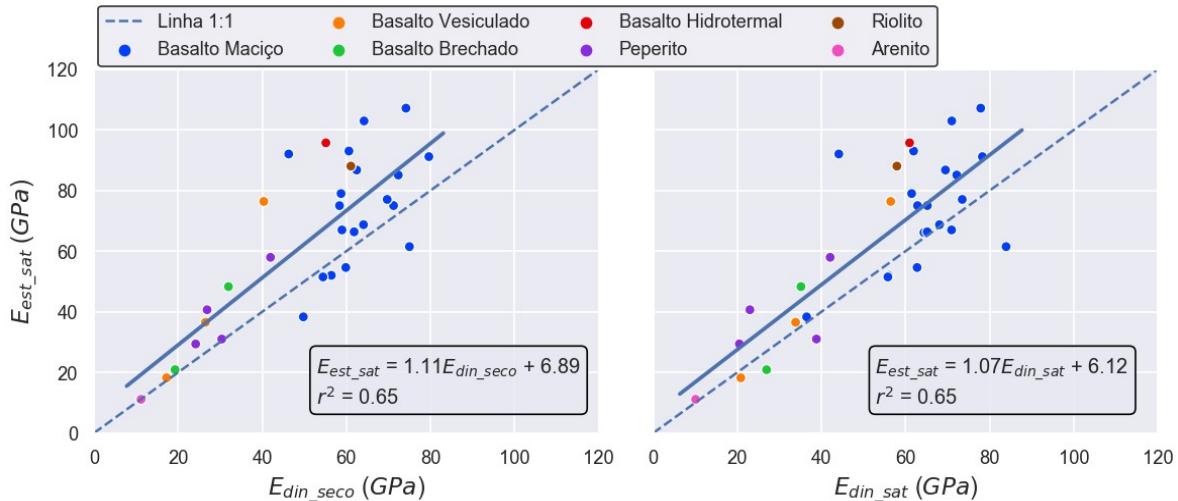


Fonte: própria (2019).

4.3.4.3 Módulo estático x módulo dinâmico

No geral, observa-se um aumento do módulo de Young estático em relação aos módulos dinâmicos, contudo, o coeficiente de correlação é de apenas 65%, tanto para a condição seca quanto para a saturada Figura 53. O módulo dinâmico é, em média, 84% e 89% do módulo estático, em condição seca e saturada, respectivamente. Estes resultados diferem do que é reportado pela literatura, onde os valores dinâmicos tendem a ser maiores que os estáticos (BROTONS et al., 2014, 2016; FEI et al., 2016; KING, 1983; OHEN, 2003), contudo, não há uma aparente explicação para esta divergência nem motivos para considerar incorretos os resultados obtidos.

Figura 53: Correlação entre módulo estático saturado e dinâmico seco e saturado.



Fonte: própria (2019).

4.4 MODELOS PROPOSTOS

Nesta sessão, será feita a análise estatística dos modelos propostos para a previsão da resistência à compressão uniaxial e do módulo de Young estático. Em ambos os modelos parte-se das seguintes hipóteses:

- a) hipótese nula: não há correlação entre as variáveis independentes com a variável dependente;
- b) hipótese alternativa: ao menos uma das variáveis independentes está correlacionada com a variável dependente.

4.4.1 Previsão de UCS

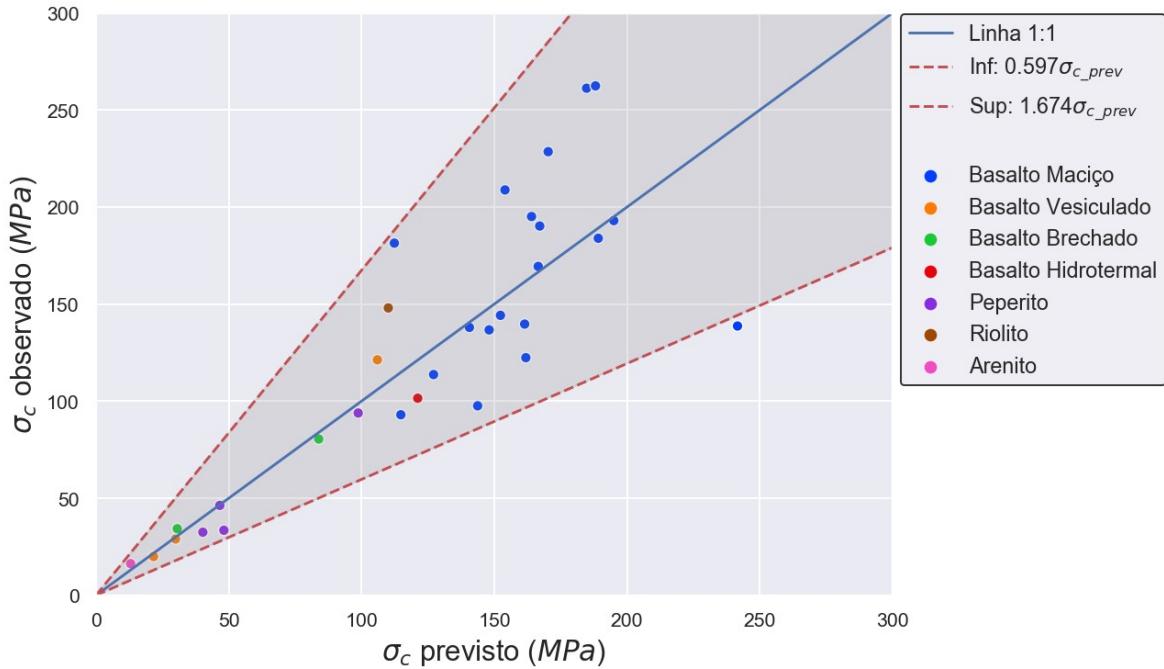
Os corpos de prova que romperam em uma descontinuidade (Tabela 13) foram descartados desse modelo, pois os resultados obtidos representam a resistência do material de preenchimento da descontinuidade e não da matriz rochosa e, logo, não está relacionado às propriedades da matriz.

O modelo proposto e sua transformação reversa podem ser vistos nas equações 32 e 33, com σ_c em MPa, γ_{seco} em kN/m³ e V_{p_seco} em km/s. Este modelo apresenta um r^2 ajustado de 0.898. A Figura 54 mostra a relação entre valores previstos e observado, com um intervalo de previsão com confiança de 95%, onde o valor real pode estar entre 60% e 167% do valor previsto. Observe-se também uma maior dispersão dos resultados com o aumento de UCS, mesmo padrão constatado por Karakul e Ulusay (2013).

$$\ln(\sigma_c) = 0.1400 \gamma_{seco} + 0.5027 V_{p_seco} - 1.4433 \quad r^2 \text{ aj.} = 0.898 \quad (32)$$

$$\sigma_c = 23.6148 \times 10^{-2} e^{0.1400 \gamma_{seco}} e^{0.5027 V_{p_seco}} \quad (33)$$

Figura 54: Gráfico σ_c previsto x observado, com intervalo de previsão com 95% de confiança.

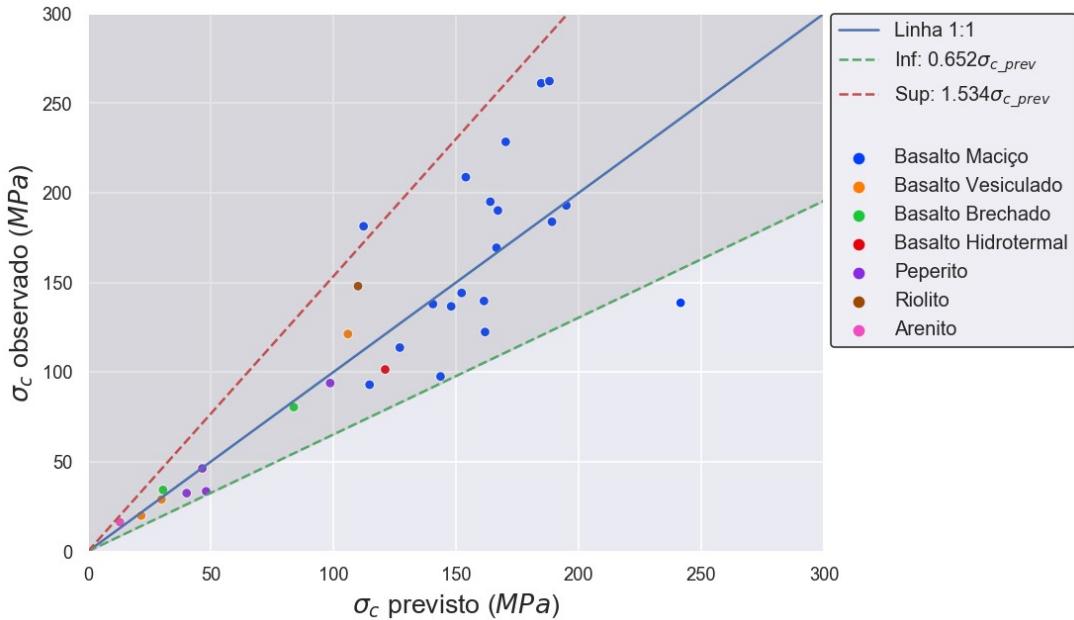


Fonte: própria (2019).

Os limites do intervalo de previsão para diferentes níveis de confianças podem ser generalizados na equação 34, onde f é um fator tabelado que pode ser visto no Apêndice B. Desta forma, é possível trabalhar com valores previstos de UCS mais conservadores, como na Figura 55, onde, ao considerar um intervalo com 80% de confiança, espera-se que em 90% das previsões o valor real esteja acima do limite inferior.

$$\sigma_{c_inf/sup} = f \sigma_{c_prev} \quad (34)$$

Figura 55: Intervalo de previsão com nível de confiança de 80%, onde espera-se que em 90% das previsões o valor real esteja acima do limite inferior.



Fonte: própria (2019).

As tabelas 22 e 23 mostram os resultados dos testes t e F, respectivamente. No teste t, todos valores de significância (p) estão abaixo de 0.05, o que comprova a significância da correlação entre cada variável independente com a variável dependente. O valor obtido para o teste F apresentou significância abaixo de 0.05 e, portanto, ao menos uma das variáveis do modelo é capaz de explicar a variação da variável dependente, o que permite rejeitar a hipótese nula.

Tabela 22: Resultados do teste t para o modelo proposto.

Parâmetros	Valor	Erro Padrão	t	p
Constante	-1.4433	0.568	-2.542	0.017
γ_{seco}	0.1400	0.040	3.466	0.002
V_{p_seco}	0.5027	0.119	4.232	0.000

Fonte: própria (2019).

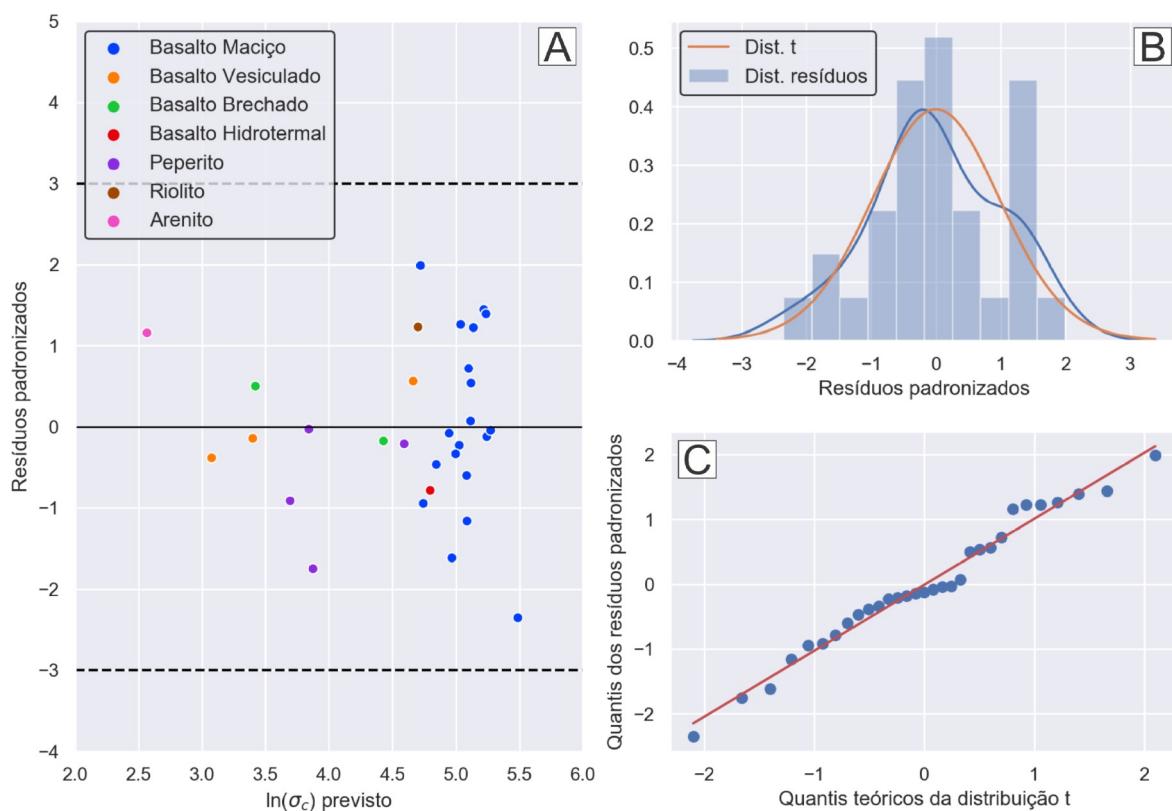
Tabela 23: Resultados do teste F para o modelo proposto.

	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	p
Regressão	2	16.133	8.067	132.800	0.000
Resíduos	28	1.700	0.061		
Total	30	17.833			

Fonte: própria (2019).

O fator de inflação da variância (4.7466) mostram uma baixa colinearidade, insuficiente para causar problemas no modelo. Pelo gráfico de resíduos padronizados (Figura 56A) é possível observar a inexistência de *outliers*. A distribuição resíduos se aproxima da distribuição t, como pode ser visto no histograma e gráfico Q-Q da Figura 56 B e C, respectivamente. Portanto, considera-se o modelo livre dos potenciais problemas da regressão linear expostos no item 3.6.

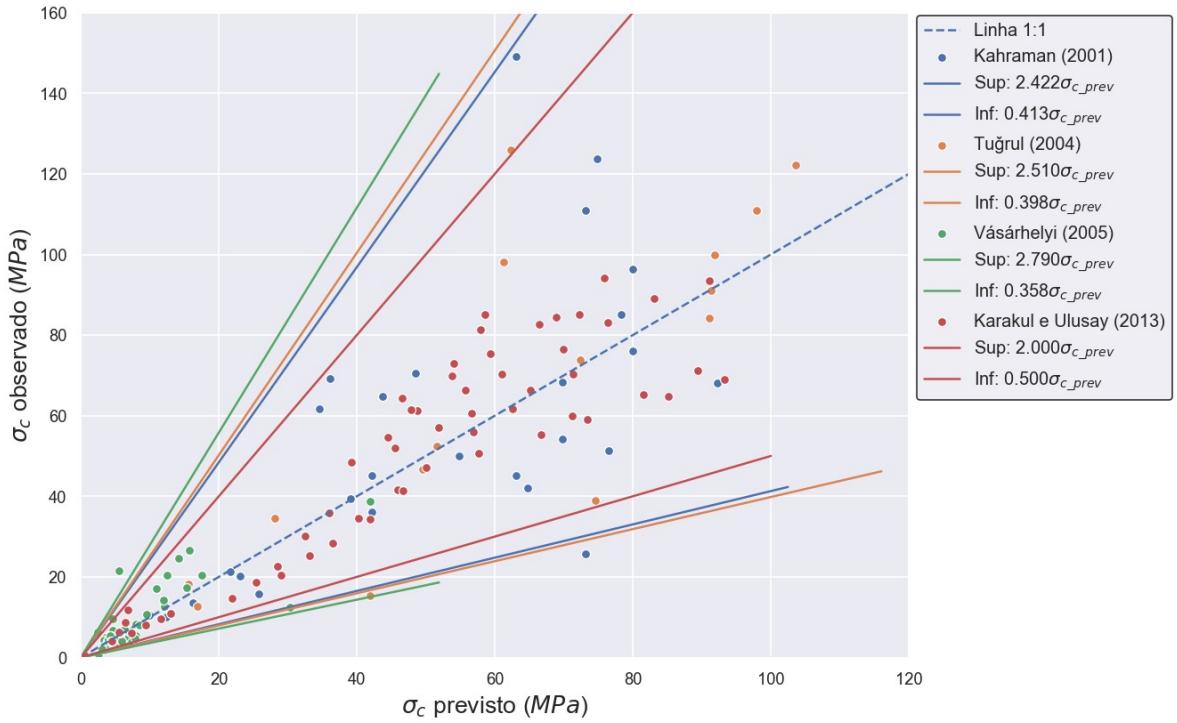
Figura 56: (A) Gráfico de distribuição dos resíduos padrões; (B) histograma de resíduos; (C) gráfico Q-Q.



Fonte: própria (2019).

A Figura 57 mostra os intervalos de previsão com 95% de confiança para os modelos de propostos por Kahraman (2001), Karakul e Ulusay (2013), Tuğrul (2004) e Vásárhelyi (2005). Comparando ao modelo deste trabalho, observa-se um aumento considerável proporcionalmente ao valor previsto.

Figura 57: Intervalos de previsão com 95% de confiança para o modelo proposto por diferentes autores.



Fonte: própria (2019).

4.4.2 Previsão do módulo de Young

Para este modelo, foram descartados os corpos de prova em que os ensaios forneceram resultados duvidosos devido a problemas durante sua execução (Tabela 13).

Apesar de a porosidade ter se mostrado uma relação significativa com a elasticidade devido à mudança do comportamento para poroelástico, as correlações considerando esta propriedade sozinha ou junto de outras não se mostraram superiores à apresentada aqui. Neste modelo foi utilizada apenas V_p pois a combinação com outras propriedades levaram à alta colinearidade.

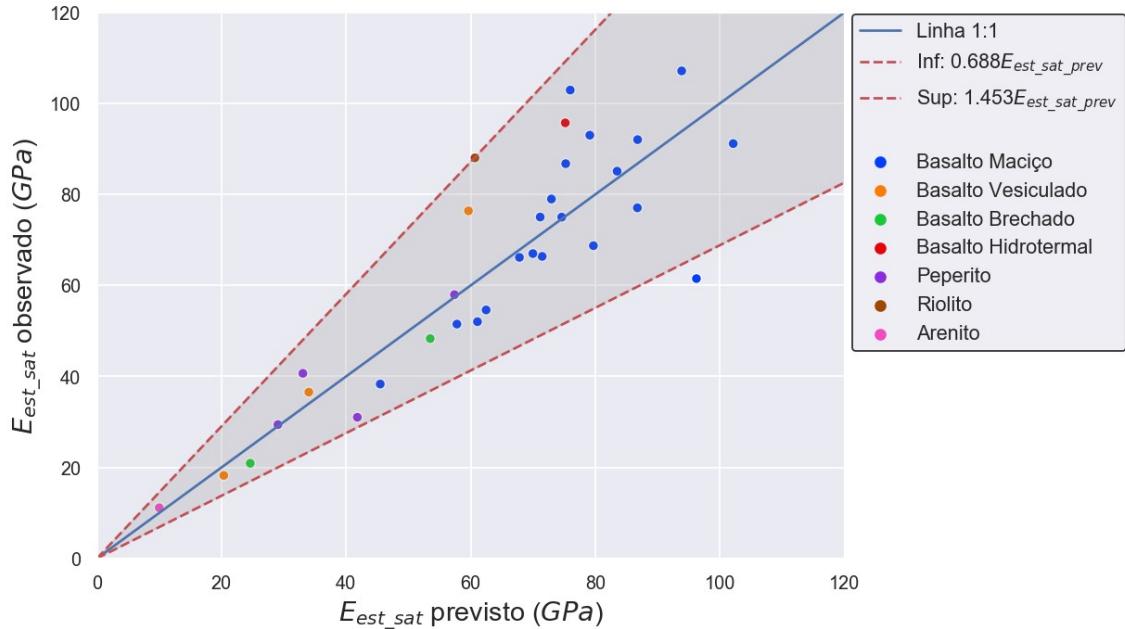
O modelo proposto e sua transformação reversa para o módulo de Young estático em condição saturada podem ser vistos nas equações 35 e 36, com E em GPa e V_{p_seco} em km/s. Este modelo apresenta um r^2 ajustado de 0.890. A Figura 58 mostra a relação entre valores previstos e observado, com um intervalo de previsão com confiança de 95%, onde o valor real

pode estar entre 69% e 145% do valor previsto. Os valores tabelados para diferentes intervalos de confiança podem ser vistos no Apêndice C.

$$\ln(E_{est_sat}) = 0.6542 V_{p_seco} + 0.6960 \quad r^2 \text{ aj.} = 0.890 \quad (35)$$

$$E_{est_sat} = 2.0057 e^{0.6542 V_{p_seco}} \quad (36)$$

Figura 58: Gráfico E_{est_seco} previsto x observado, com intervalo de previsão com 95% de confiança.



Fonte: Própria (2019).

As tabelas 24 e 25 mostram os resultados dos testes t e F, respectivamente. No teste t, todos valores de significância estão abaixo de 0.05, o que comprova a significância da correlação entre cada variável independente com a variável dependente. O valor obtido para o teste F, com significância abaixo de 0.05, permite rejeitar a hipótese nula. Por utilizar apenas uma variável independente, o modelo está ausente de problemas de colinearidade.

Tabela 24: Resultados do teste t para o modelo proposto.

Parâmetros	Valor	Erro Padrão	t	p
Constante	0.6960	0.214	3.257	0.003
V_{p_seco}	0.6542	0.041	15.841	0.000

Fonte: própria (2019).

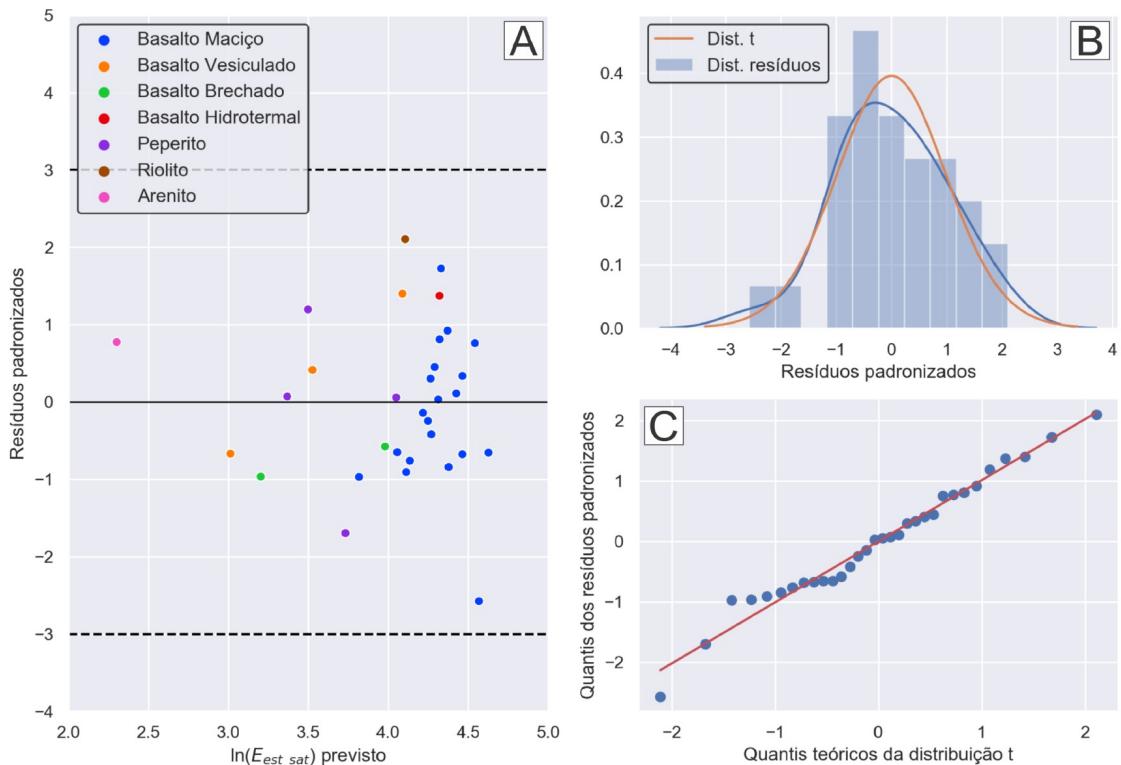
Tabela 25: Resultados do teste F para o modelo proposto.

	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	p
Régressão	1	8.109	8.109	250.900	0.000
Resíduos	30	0.969	0.032		
Total	31	9.078			

Fonte: própria (2019).

Pelo gráfico de resíduos padronizados (Figura 59A) observa-se a inexistência de *outliers*. A distribuição resíduos se aproxima da distribuição t, como pode ser visto no histograma e gráfico Q-Q da Figura 59 B e C, respectivamente. Portanto, consideram-se o modelo livre dos problemas expostos anteriormente e aceita-se sua validade.

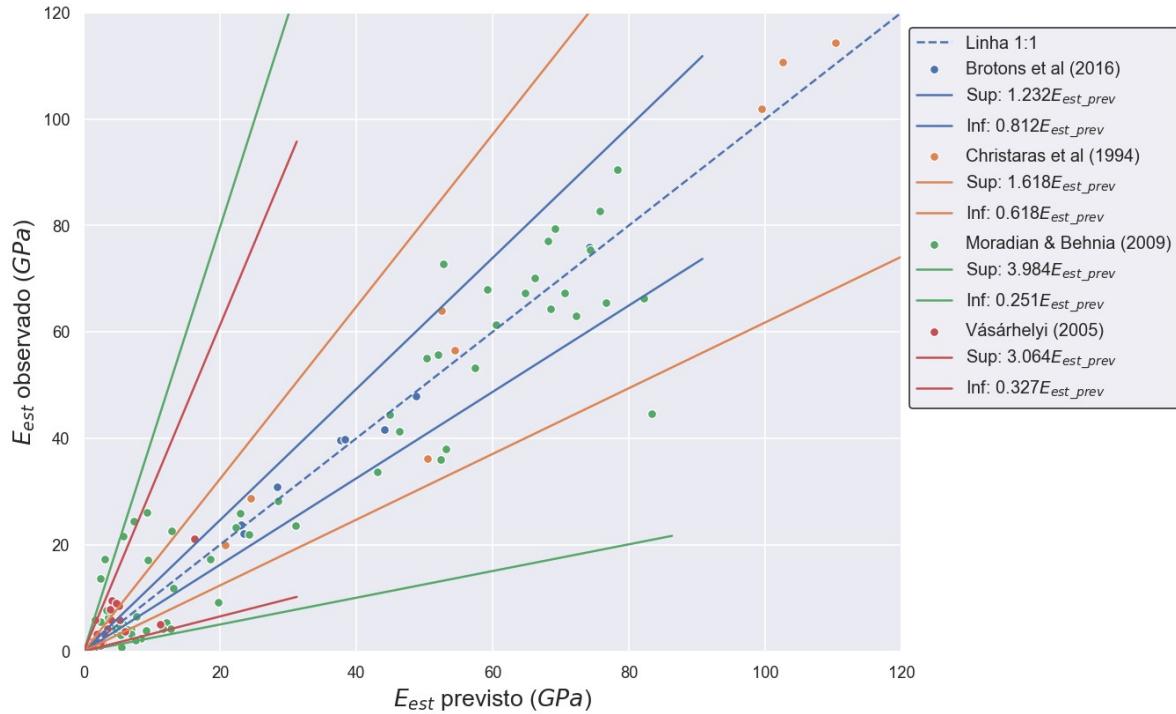
Figura 59: (A) Gráfico de distribuição dos resíduos padrões; (B) histograma de resíduos; (C) gráfico Q-Q.



Fonte: própria (2019).

Na Figura 60 observa-se o intervalo de previsão com 95% de confiança para o modelo proposto por Brotons et al. (2016), Christaras, Auget e Mosse (1994), Moradian e Behnia (2009) e Vásárhelyi (2005). Como ocorre com UCS, o intervalo de erro aumenta conforme o valor previsto.

Figura 60: Intervalos de previsão com 95% de confiança para o modelo proposto por diferentes autores.



Fonte: própria (2019).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho foi realizada a caracterização geológico-geotécnica de 38 corpos de prova provenientes de testemunhos de sondagem rotativa em rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra geral, pertencentes à Bacia do Paraná. A seguir, serão apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise estatística dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Regressões lineares por meio do método OLS, realizadas entre todas as propriedades físicas e mecânicas obtidas pelos ensaios de caracterização, permitiram observar a existência de correlação significativa entre quase todas as propriedades. As únicas exceções foram os coeficientes de Poisson dinâmicos, tanto em condição seca quanto em saturada, que apresentaram coeficiente de correlação inferior à 0.15, exceto quando considerado o efeito da porosidade.

A velocidade de propagação de ondas, principalmente ondas P, se mostrou útil para a previsão da resistência e elasticidade. O ensaio para a obtenção desta propriedade é de rápida execução, requer apenas o corte e a secagem dos corpos de prova e, sendo não-destrutivo, pode ser realizados novamente em caso de erros. Ao considerar esta propriedade no modelo de previsão, indiretamente leva-se em conta a densidade e porosidade, visto que ela possui correlação positiva com a primeira e negativa com a segunda.

A porosidade se mostrou particularmente importante no comportamento mecânico da rocha, que, segundo Farrokhrouz (2016), deixa de ser elástico e passa a ser poroelástico. Também foi observado um efeito diferenciado da porosidade sobre ondas P e S: apesar de ambas sofrerem uma redução, ela tende a ser maior na velocidade da onda S, o que significa que a proporção V_s/V_p tende a diminuir conforme o aumento da porosidade.

O efeito da saturação foi investigado na velocidade de propagação de ondas, na elasticidade e no coeficiente de Poisson. Em ondas P, a presença de água nos poros provocou um aumento médio de 67.98 m/s. Sobre ondas S, a influência se mostrou mais complexa, com variações tanto positivas quanto negativas, com uma média de 178.84 m/s e -124.56 m/s, respectivamente. No módulo de elasticidade dinâmico, a saturação provocou uma variação média de 2.71 GPa, 5.39 GPa e -3.08 GPa considerando apenas os aumentos e reduções, respectivamente. Esta variação está mais relacionada à variações em V_s do que em V_p . Uma variação positiva em V_s leva a uma variação também positiva no módulo, o que pode ser atribuído a um aumento na rigidez da rocha, enquanto que uma variação negativa em V_s e, consequentemente, no módulo, está relacionada a uma diminuição da rigidez. A mesma correlação não é observada em relação à variações em V_p . No coeficiente de Poisson não foi observado um padrão na variação, a saturação causou variações positivas e negativas em igual proporção.

Para as rochas analisadas neste trabalho, o módulo dinâmico em condição seca e saturada mostrou ser em média 84% e 89%, respectivamente, dos valores observados no módulo estático. Estes resultados divergiram do observado na literatura, os quais mostram que o módulo dinâmico tende à ser maior que o estático.

Os maiores valores de UCS e módulo de Young estático foram observados nas rochas maciças (basaltos, riolito e basalto hidrotermalizado), com valores que variaram de 93 a 260 MPa para a resistência e de 38 e 107 GPa para a elasticidade. Para as demais rochas, os valores obtidos ficaram entre 15 e 58 MPa para a resistência e 11 e 43 GPa para a elasticidade, com os menores valores pertencendo ao arenito.

A partir das correlações observadas, foram propostos modelos para a previsão de UCS e E_{est_sat} , ambos exponenciais. No primeiro caso foram utilizados o peso específico seco e a velocidade de ondas P como variáveis independentes. No segundo, optou-se por utilizar apenas V_p . Os dois modelos apresentaram bons coeficientes de correlação: 0.898 para o primeiro e 0.890 para o segundo. Observou-se que o erro da previsão nos modelos tende a aumentar proporcionalmente ao valor previsto. O mesmo padrão foi observado em outros modelos propostos na literatura. Para um intervalo de previsão com 95% de confiança, o erro de UCS pode ir de 59 a 167% do valor previsto, enquanto que para o módulo o erro pode variar de 69% a 145% do previsto. Apesar do amplo intervalo de erro, é possível trabalhar de

forma mais conservadora ao utilizar o limite inferior do intervalo e ter uma maior certeza de que o verdadeiro valor está acima deste limite. Foram disponibilizados fatores para diferentes intervalos de previsão para que se possa escolher o grau de incerteza que se está disposto a trabalhar.

Estes modelos não substituem dados de campo ou mesmo de laboratório, mas em uma etapa preliminar de projeto podem reduzir as incertezas quanto ao comportamento da rocha a um custo financeiro menor e auxiliar em tomadas de decisões.

5.2 SUGESTÕES

A partir de observações feitas durante a realização deste trabalho, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Realizar uma nova sequência de ensaios e comparar os resultados obtidos com os valores previstos pelos modelos aqui sugeridos;
- b) verificar se o efeito da saturação no módulo de Young estático é o mesmo ao observado no módulo dinâmico;
- c) correlacionar o grau de saturação com resistência à compressão uniaxial;
- d) utilizar técnicas mas avançadas de aprendizado de máquina, como *cross-validation* e algoritmos genéticos, que requerem uma quantidade maior de dados;
- e) analisar mais a fundo o comportamento poroelástico da rocha, por este ter se mostrado particularmente importante para as propriedades mecânicas;
- f) avaliar separadamente o comportamento de cada litologia.

REFERÊNCIAS

AASHTO (ED.). **Standard specifications for highway bridges.** 17. ed. Washington, DC: AASHTO, 2002.

AFSARI, M. et al. **Mechanical Earth Model (MEM): An Effective Tool for Borehole Stability Analysis and Managed Pressure Drilling (Case Study).** Proceedings. Anais... In: SPE MIDDLE EAST OIL AND GAS SHOW AND CONFERENCE. Manama: Society of Petroleum Engineers, 2009Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/118780-MS>>. Acesso em: 22 jun. 2018

ALLMENDINGER, R. W. **Modern Structural Practice: a structural geology laboratory manual for the 21st Century.** 1.7.0 ed. [s.l: s.n].

ALLMENDINGER, R. W.; CARDOZO, N.; FISHER, D. M. **Structural geology algorithms: vectors and tensors.** Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

AMALOKWU, K.; BEST, A. I.; CHAPMAN, M. Effects of aligned fractures on the response of velocity and attenuation ratios to water saturation variation: a laboratory study using synthetic sandstones: Effects of aligned fractures. **Geophysical Prospecting**, v. 64, n. 4, p. 942–957, jul. 2016.

AMYX, J. W.; BASS, D. M.; WHITING, R. L. **Petroleum reservoir engineering.** New York: McGraw-Hill, 1960.

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

BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering.** [s.l.] J. Wiley, 2003.

BAECHLE, G. T. et al. Changes in dynamic shear moduli of carbonate rocks with fluid substitution. **GEOPHYSICS**, v. 74, n. 3, p. E135–E147, maio 2009.

BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. Early Mesozoic Wind Patterns as Suggested by Dune Bedding in the Botucatú Sandstone of Brazil and Uruguay. **Geological Society of America Bulletin**, v. 72, n. 7, p. 1089, 1961.

BIRCH, F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 1. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 4, p. 1083–1102, 1960.

BIRCH, F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 2. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, n. 7, p. 2199–2224, 1961.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining.** 3. ed. Dordrecht: Springer, 2004.

BROTTONS, V. et al. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, n. 3, p. 791–799, 2014.

- BROTONS, V. et al. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. **Materials and Structures**, v. 49, n. 8, p. 3021–3037, 2016.
- CAENGE GEOTECNIA LTDA. **Testemunhos de sondagem rotativa extraídos da Bacia do Paraná, entre os anos de 2008 e 2009.**, 2009.
- 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.
- CHRISTENSEN, N. I.; SALISBURY, M. H. Structure and constitution of the lower oceanic crust. **Reviews of Geophysics**, v. 13, n. 1, p. 57–86, 1975.
- DAVIS, T. et al. Stress concentrations around voids in three dimensions: The roots of failure. **Journal of Structural Geology**, v. 102, p. 193–207, set. 2017.
- DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock**. New Mexico: Air Force Weapons Laboratory, 1966. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/docs/citations/AD0646610>>. Acesso em: 22 jun. 2018.
- DEL POTRO, R.; HÜRLIMANN, M. A Comparison of Different Indirect Techniques to Evaluate Volcanic Intact Rock Strength. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 42, n. 6, p. 931–938, 2009.
- EISSA, E. A.; KAZI, A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 25, n. 6, p. 479–482, 1988.
- ELKATATNY, S. et al. Development of a new correlation to determine the static Young's modulus. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v. 8, n. 1, p. 17–30, 2018.
- FARMER, I. W. **Engineering behaviour of rocks**. 2. ed. London: Chapman and Hall, 1983.
- FARROKHROUZ, M. Effects of rock porosity on acoustic wave velocities estimation from sonic logs. **ASEG Extended Abstracts**, v. 2016, n. 1, p. 1–4, dez. 2016.
- FEI, W. et al. Correlation of Dynamic and Static Elastic Parameters of Rock. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 21, n. 4, p. 1551–1560, 2016.
- FIORI, A. P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- FIORI, A. P.; WANDRESEN, R. **Tensões e Deformações em Geologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- FJÆR, E. et al. Geological aspects of petroleum related rock mechanics. In: **Petroleum Related Rock Mechanics**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. v. 53p. 103–133.
- FOSSEN, H. **Structural geology**. Second edition ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2016.
- FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. Review of the areal extent and the

volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 1, p. 49–57, 2009.

FÚLFARO, V. J. et al. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 12, n. 4, p. 233–256, 1982.

GEBRANDE, H. et al. Elasticity and Inelasticity. In: LANDOLT, H.; HELLWEGE, K.-H.; MADELUNG, O. (Eds.). **Physical Properties of Rocks**. Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series. Berlin Heidelberg: Springer, 1982. p. 96–252.

GE HIDRO ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA. **Testemunhos de sondagem rotativa extraídos da Bacia do Paraná, entre os anos de 2010 e 2011.**, 2011.

GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics**. 2. ed. New York: Wiley, 1989.

HAN, D.; NUR, A.; MORGAN, D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. **GEOPHYSICS**, v. 51, n. 11, p. 2093–2107, 1986.

HARTMANN, L. A. et al. Geochemical and scintillometric characterization and correlation of amethyst geode-bearing Paraná lavas from the Quaraí and Los Catalanes districts, Brazil and Uruguay. **Geological Magazine**, v. 147, n. 06, p. 954–970, 2010.

HEUZE, F. E. Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability. **Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches**, v. 12, n. 3–4, p. 167–192, 1980.

HOEK, E.; BROWN, E. T. Empirical strength criterion for rock masses. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 106, n. 9, p. 1013–1035, 1980.

ISRM. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 16, n. 2, p. 137, 1979a.

ISRM. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 16, n. 2, p. 143–151, 1979b.

JAMES, G. et al. (EDS.). **An introduction to statistical learning: with applications in R**. New York: Springer, 2013.

JUDD, W. R. **Rock stress, rock mechanics and research**. (W. R. Judd, Ed.). In: **STATE OF STRESS IN THE EARTH'S CRUST**. New York: Elsevier, 1964

KAHRAMAN, S. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 38, n. 7, p. 981–994, out. 2001.

KARAKUL, H.; ULUSAY, R. Empirical Correlations for Predicting Strength Properties of Rocks from P-Wave Velocity Under Different Degrees of Saturation. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 46, n. 5, p. 981–999, 2013.

KING, M. S. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield.

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 20, n. 5, p. 237–241, 1983.

KLIMENTOS, T. The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves. **GEOPHYSICS**, v. 56, n. 12, p. 1930–1939, 1991.

LASHKARIPOUR, G. R. Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 61, n. 1, p. 73–77, 2002.

LEITE, M. H.; FERLAND, F. Determination of unconfined compressive strength and Young's modulus of porous materials by indentation tests. **Engineering Geology**, v. 59, n. 3–4, p. 267–280, 2001.

LI, D. et al. The effect of fluid saturation on the dynamic shear modulus of tight sandstones. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 14, n. 5, p. 1072–1086, 1 out. 2017.

MARQUES, A. DE A. et al. Correlations between uniaxial compressive strength and point load strength for some Brazilian high-grade metamorphic rocks. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 47–58, 2015.

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

MAŽEIKA, L.; DRAUDVILIENE, L. Analysis of the zero-crossing technique in relation to measurements of phase velocities of the Lamb waves. **Ultragarsas (Ultrasound)**, v. 65, n. 2, p. 6, 2010.

MCCANN, D. M.; ENTWISLE, D. C. Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 65, n. 1, p. 317–325, 1992.

MIKHALTSEVITCH, V.; LEBEDEV, M.; GUREVICH, B. Laboratory measurements of the effect of fluid saturation on elastic properties of carbonates at seismic frequencies: Effect of fluid saturation on carbonates. **Geophysical Prospecting**, v. 64, n. 4, p. 799–809, jul. 2016.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-occidental**. Dissertação (Doutorado em Geociências)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V.; ALMEIDA, F. F. M. DE (Eds.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 239–264.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

MORADIAN, Z. A.; BEHNIA, M. Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young's Modulus of Intact Sedimentary Rocks Using the Ultrasonic Test. **International Journal of Geomechanics**, v. 9, n. 1, p. 14–19, jan. 2009.

OHEN, H. A. **Calibrated Wireline Mechanical Rock Properties Model for Predicting and Preventing Wellbore Collapse and Sanding.** . In: SPE EUROPEAN FORMATION DAMAGE CONFERENCE. Hague: Society of Petroleum Engineers, 2003

PALCHIK, V. Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstones. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 32, n. 4, p. 303–309, 1999.

PALCHIK, V.; HATZOR, Y. H. Crack damage stress as a composite function of porosity and elastic matrix stiffness in dolomites and limestones. **Engineering Geology**, v. 63, n. 3–4, p. 233–245, 2002.

PALCHIK, V.; HATZOR, Y. H. The Influence of Porosity on Tensile and Compressive Strength of Porous Chalks. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 37, n. 4, p. 331–341, out. 2004.

PICCIRILLO, E. M. et al. Continental Flood Volcanism From the Paraná Basin (Brazil). In: **Continental Flood Basalts**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 195–238.

POLA, A. et al. Relationships between porosity and physical mechanical properties in weathered volcanic rocks. In: OLALLA, C. et al. (Eds.). . **Rock Mechanics and Geo-engineering in Volcanic Environments**. [s.l.] CRC Press, 2010. p. 73–78.

RABBANI, E. et al. Application of neural network technique for prediction of uniaxial compressive strength using reservoir formation properties. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 56, p. 100–111, 2012.

SCHERER, C. M. S. Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin. **Sedimentary Geology**, v. 137, n. 1–2, p. 63–84, 2000.

SCHERER, C. M. S. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paran Basin, southern Brazil. **Sedimentology**, v. 49, n. 1, p. 97–116, 2002.

SCHOBENHAUS, C.; BRITO NEVES, B. B. A geologia do Brasil no contexto da plataforma Sul-Americana. In: BIZZI, L. A. et al. (Eds.). . **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2003. p. 5–54.

SCHÖN, J. H. **Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2015. v. 65

SILVA, A. J. P. DA et al. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. In: BIZZI, L. A. et al. (Eds.). . **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2003. p. 55–85.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

TERZAGHI, R. D.; VOIGHT, B. Karl Terzaghi on Rockslides: The Perspective of a Half-Century. In: **Developments in Geotechnical Engineering**. [s.l.] Elsevier, 1979. v. 14p. 111–134.

TUĞRUL, A. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of

selected rock types from Turkey. **Engineering Geology**, v. 75, n. 3–4, p. 215–227, 2004.

VALLEJO, L. I. G. DE et al. **Ingeniería geológica**. Madrid: Pearson Educación, 2012.

VÁSÁRHELYI, B. Statistical Analysis of the Influence of Water Content on the Strength of the Miocene Limestone. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 38, n. 1, p. 69–76, 2005.

WAICHEL, B. L. **Estruturação de derrames e interações lava-sedimento na porção central da província basáltica continental do Paraná**. Dissertação (Doutorado em Geociências)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

WAICHEL, B. L. et al. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. **Bulletin of Volcanology**, v. 68, n. 7–8, p. 599–610, 2006.

WAICHEL, B. L. et al. Peperite formed by lava flows over sediments: An example from the central Paraná Continental Flood Basalts, Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 159, n. 4, p. 343–354, 2007.

WAICHEL, B. L.; SCHERER, C. M. S.; FRANK, H. T. Basaltic lava flows covering active aeolian dunes in the Paraná Basin in southern Brazil: Features and emplacement aspects. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 171, n. 1–2, p. 59–72, 2008.

WHITE, J. D. L.; MCPHIE, J.; SKILLING, I. Peperite: a useful genetic term. **Bulletin of Volcanology**, v. 62, n. 1, p. 65–66, 2000.

WILDNER, W. et al. **Geologia e Recursos Minerais do Sudoeste do Estado do Paraná: Escala 1:200.000**. Brasília: Convênio CPRM/MINEROPAR, 2006.

WILDNER, W. et al. **Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina**, 2014.

YAN, F.; HAN, D.-H. Effect of pore geometry on Gassmann fluid substitution. **Geophysical Prospecting**, v. 64, n. 6, p. 1575–1587, nov. 2016.

YILMAZ, I.; YUKSEK, G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, n. 4, p. 803–810, 2009.

ZALÁN, P. V. et al. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W. et al. (Eds.). . **Interior cratonic basins**. American Association of Petroleum Geologists Memoir. Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1990. v. 51p. 681–708.

ZHANG, L. **Engineering properties of rocks**. 2. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2016.

APÊNDICE A – DADOS DETALHADOS DOS CORPOS DE PROVA

Código	MA01-01		
Profundidade do CP	6.63 m		
Litologia	Basalto Maciço		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	7.55 cm	Condição Seca	
Altura	18.56 cm	V_p	5.56 km/s
Diâmetro/Altura	2.46	V_s	3 km/s
Volume	830.7 cm ³	E_{din}	64.2 GPa
Massa seca	2291.63 g	v_{din}	0.29
γ_{seco}	27.05 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	2295.69 g	V_p	5.64 km/s
γ_{sat}	27.1 kN/m ³	V_s	3.19 km/s
n_e	0.49%	E_{din}	70.97 GPa
		v_{din}	0.27
		E_{est}	102.93 GPa
		UCS	228.5 MPa



Código	MA01-02		
Profundidade do CP	11.89 m		
Litologia	Basalto Maciço		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	13.45 cm	V_p	5.63 km/s
Diâmetro/Altura	2.46	V_s	2.95 km/s
Volume	316.24 cm ³	E_{din}	64.07 GPa
Massa seca	886.96 g	v_{din}	0.31
γ_{seco}	27.51 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	889.81 g	V_p	5.63 km/s
γ_{sat}	27.59 kN/m ³	V_s	3.07 km/s
n_e	0.90%	E_{din}	68.05 GPa
		v_{din}	0.29
		E_{est}	68.72 GPa
		UCS	262.4 MPa



Código		MA01-03	
Profundidade do CP		16.78 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	14.51 cm	V_p	5.29 km/s
Diâmetro/Altura	2.65	V_s	2.88 km/s
Volume	342.34 cm ³	E_{din}	58.94 GPa
Massa seca	943.27 g	v_{din}	0.29
γ_{seco}	27.02 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	950.99 g	V_p	5.49 km/s
γ_{sat}	27.24 kN/m ³	V_s	3.13 km/s
n_e	2.26%	E_{din}	67.97 GPa
		v_{din}	0.26
		E_{est}	-
		UCS	136.7 MPa



Código		MA01-04	
Profundidade do CP		21.64 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	13.91 cm	V_p	5.27 km/s
Diâmetro/Altura	2.54	V_s	2.83 km/s
Volume	327.52 cm ³	E_{din}	57.09 GPa
Massa seca	897.64 g	v_{din}	0.30
γ_{seco}	26.88 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	901.22 g	V_p	5.27 km/s
γ_{sat}	26.98 kN/m ³	V_s	2.92 km/s
n_e	1.09%	E_{din}	59.7 GPa
		v_{din}	0.28
		E_{est}	-
		UCS	97.6 MPa



Código		MA01-05	
Profundidade do CP		26.55 m	
Litologia		Peperito	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	14.39 cm	V_p	4.28 km/s
Diâmetro/Altura	2.63	V_s	2.09 km/s
Volume	338.94 cm ³	E_{din}	26.91 GPa
Massa seca	773.99 g	v_{din}	0.34
γ_{seco}	22.39 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	826.6 g	V_p	4.28 km/s
γ_{sat}	23.92 kN/m ³	V_s	1.91 km/s
n_e	15.52%	E_{din}	22.99 GPa
		v_{din}	0.38
		E_{est}	40.67 GPa
		UCS	46.3 MPa



Código		MA01-06	
Profundidade do CP		30.08 m	
Litologia		Peperito	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	12 cm	V_p	5.13 km/s
Diâmetro/Altura	2.19	V_s	2.49 km/s
Volume	282.63 cm ³	E_{din}	41.97 GPa
Massa seca	711.74 g	v_{din}	0.35
γ_{seco}	24.7 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	727.72 g	V_p	5.13 km/s
γ_{sat}	25.25 kN/m ³	V_s	2.49 km/s
n_e	5.65%	E_{din}	42.07 GPa
		v_{din}	0.35
		E_{est}	57.96 GPa
		UCS	93.9 MPa



Código	MA02-02		
Profundidade do CP	6.57 m		
Litologia	Basalto Maciço		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.49 cm	Condição Seca	
Altura	14.05 cm	V_p	5.22 km/s
Diâmetro/Altura	2.56	V_s	2.94 km/s
Volume	332.28 cm ³	E_{din}	56.44 GPa
Massa seca	857.38 g	v_{din}	0.27
γ_{seco}	25.3 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	870.57 g	V_p	5.22 km/s
γ_{sat}	25.69 kN/m ³	V_s	2.92 km/s
n_e	3.97%	E_{din}	55.95 GPa
		v_{din}	0.27
		E_{est}	52.02 GPa
		UCS	181.4 MPa



Código	MA02-03		
Profundidade do CP	12.13 m		
Litologia	Basalto Maciço		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.45 cm	Condição Seca	
Altura	14.05 cm	V_p	5.76 km/s
Diâmetro/Altura	2.58	V_s	3.11 km/s
Volume	328.24 cm ³	E_{din}	69.7 GPa
Massa seca	913.73 g	v_{din}	0.29
γ_{seco}	27.3 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	917.49 g	V_p	5.76 km/s
γ_{sat}	27.41 kN/m ³	V_s	3.22 km/s
n_e	1.15%	E_{din}	73.46 GPa
		v_{din}	0.27
		E_{est}	77.05 GPa
		UCS	193 MPa



Código	MA02-04		
Profundidade do CP	15.61 m		
Litologia	Basalto Maciço		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	13.1 cm	V_p	5.53 km/s
Diâmetro/Altura	2.40	V_s	2.84 km/s
Volume	307.69 cm ³	E_{din}	58.37 GPa
Massa seca	843.68 g	v_{din}	0.32
γ_{seco}	26.89 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	848.79 g	V_p	5.57 km/s
γ_{sat}	27.05 kN/m ³	V_s	2.97 km/s
n_e	1.66%	E_{din}	62.84 GPa
		v_{din}	0.30
		E_{est}	75 GPa
		UCS	195.1 MPa



Código	MA02-05		
Profundidade do CP	23.1 m		
Litologia	Basalto Maciço		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	13.71 cm	V_p	5.62 km/s
Diâmetro/Altura	2.51	V_s	2.91 km/s
Volume	322.04 cm ³	E_{din}	60.62 GPa
Massa seca	876.9 g	v_{din}	0.32
γ_{seco}	26.7 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	881.66 g	V_p	5.62 km/s
γ_{sat}	26.85 kN/m ³	V_s	2.95 km/s
n_e	1.48%	E_{din}	61.9 GPa
		v_{din}	0.31
		E_{est}	93.01 GPa
		UCS	190.2 MPa



Código	MA02-06		
Profundidade do CP	27.52 m		
Litologia	Basalto Maciço		
	Propriedades Físicas	Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.45 cm	Condição Seca	
Altura	12.04 cm	V_p	5.26 km/s
Diâmetro/Altura	2.21	V_s	2.94 km/s
Volume	281.21 cm ³	E_{din}	59.87 GPa
Massa seca	767.26 g	v_{din}	0.27
γ_{seco}	26.76 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	772.09 g	V_p	5.26 km/s
γ_{sat}	26.92 kN/m ³	V_s	3.03 km/s
n_e	1.72%	E_{din}	62.74 GPa
		v_{din}	0.25
		E_{est}	54.6 GPa
		UCS	138 MPa



Código	MA02-07		
Profundidade do CP	31.86 m		
Litologia	Basalto Maciço		
	Propriedades Físicas	Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.46 cm	Condição Seca	
Altura	14.08 cm	V_p	5.14 km/s
Diâmetro/Altura	2.58	V_s	2.8 km/s
Volume	330.05 cm ³	E_{din}	54.44 GPa
Massa seca	890.89 g	v_{din}	0.29
γ_{seco}	26.47 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	902.43 g	V_p	5.23 km/s
γ_{sat}	26.81 kN/m ³	V_s	2.83 km/s
n_e	3.50%	E_{din}	55.79 GPa
		v_{din}	0.29
		E_{est}	51.49 GPa
		UCS	113.7 MPa



Código	MA02-08		
Profundidade do CP	34.65 m		
Litologia	Peperito		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.46 cm	Condição Seca	
Altura	13.36 cm	V_p	4.09 km/s
Diâmetro/Altura	2.45	V_s	2 km/s
Volume	312.38 cm ³	E_{din}	24.18 GPa
Massa seca	701.38 g	v_{din}	0.34
γ_{seco}	22.02 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	752.63 g	V_p	4.18 km/s
γ_{sat}	23.63 kN/m ³	V_s	1.82 km/s
n_e	16.41%	E_{din}	20.49 GPa
		v_{din}	0.38
		E_{est}	29.4 GPa
		UCS	32.5 MPa



Código	MA03-01		
Profundidade do CP	3.41 m		
Litologia	Basalto Maciço		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	7.56 cm	Condição Seca	
Altura	19.04 cm	V_p	5.46 km/s
Diâmetro/Altura	2.52	V_s	3.15 km/s
Volume	855.17 cm ³	E_{din}	71.22 GPa
Massa seca	2456.06 g	v_{din}	0.25
γ_{seco}	28.16 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	2462.07 g	V_p	5.46 km/s
γ_{sat}	28.23 kN/m ³	V_s	2.97 km/s
n_e	0.70%	E_{din}	65.18 GPa
		v_{din}	0.29
		E_{est}	75.02 GPa
		UCS	183.9 MPa



Código	MA03-02		
Profundidade do CP	8.9 m		
Litologia	Basalto Maciço		
	Propriedades Físicas	Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	13.48 cm	V_p	5.64 km/s
Diâmetro/Altura	2.46	V_s	2.88 km/s
Volume	318.26 cm ³	E_{din}	62.6 GPa
Massa seca	908.54 g	v_{din}	0.32
γ_{seco}	27.99 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	911.91 g	V_p	5.64 km/s
γ_{sat}	28.1 kN/m ³	V_s	2.86 km/s
n_e	1.06%	E_{din}	61.82 GPa
		v_{din}	0.33
		E_{est}	-
		UCS	-



Código	MA03-03		
Profundidade do CP	12.83 m		
Litologia	Basalto Vesiculado		
	Propriedades Físicas	Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	14.45 cm	V_p	3.54 km/s
Diâmetro/Altura	2.64	V_s	1.69 km/s
Volume	339.82 cm ³	E_{din}	17.26 GPa
Massa seca	758.61 g	v_{din}	0.35
γ_{seco}	21.89 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	824.89 g	V_p	3.58 km/s
γ_{sat}	23.81 kN/m ³	V_s	1.89 km/s
n_e	19.50%	E_{din}	20.84 GPa
		v_{din}	0.31
		E_{est}	18.23 GPa
		UCS	29 MPa



Código		MA03-04	
Profundidade do CP		18.43 m	
Litologia		Basalto Vesiculado	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	13.69 cm	V_p	5.19 km/s
Diâmetro/Altura	2.50	V_s	2.41 km/s
Volume	323.1 cm ³	E_{din}	40.37 GPa
Massa seca	823.47 g	v_{din}	0.36
γ_{seco}	24.99 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	840.2 g	V_p	5.39 km/s
γ_{sat}	25.5 kN/m ³	V_s	2.93 km/s
n_e	5.18%	E_{din}	56.46 GPa
		v_{din}	0.29
		E_{est}	76.38 GPa
		UCS	121.3 MPa



Código		MA03-05	
Profundidade do CP		24.24 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	14.35 cm	V_p	5.54 km/s
Diâmetro/Altura	2.62	V_s	2.97 km/s
Volume	337.48 cm ³	E_{din}	62.45 GPa
Massa seca	921.02 g	v_{din}	0.30
γ_{seco}	26.76 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	927.08 g	V_p	5.67 km/s
γ_{sat}	26.94 kN/m ³	V_s	3.16 km/s
n_e	1.80%	E_{din}	69.47 GPa
		v_{din}	0.28
		E_{est}	86.75 GPa
		UCS	122.4 MPa



Código		MA03-06	
Profundidade do CP		28.36 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	13.9 cm	V_p	5.43 km/s
Diâmetro/Altura	2.54	V_s	2.87 km/s
Volume	327.96 cm ³	E_{din}	58.95 GPa
Massa seca	896.42 g	v_{din}	0.31
γ_{seco}	26.8 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	904.69 g	V_p	5.47 km/s
γ_{sat}	27.05 kN/m ³	V_s	3.25 km/s
n_e	2.52%	E_{din}	70.92 GPa
		v_{din}	0.23
		E_{est}	66.99 GPa
		UCS	208.8 MPa



Código		MA03-07	
Profundidade do CP		32.69 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.49 cm	Condição Seca	
Altura	14.19 cm	V_p	5.7 km/s
Diâmetro/Altura	2.59	V_s	3.21 km/s
Volume	335.72 cm ³	E_{din}	72.34 GPa
Massa seca	928.82 g	v_{din}	0.27
γ_{seco}	27.13 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	933.6 g	V_p	5.82 km/s
γ_{sat}	27.27 kN/m ³	V_s	3.18 km/s
n_e	1.42%	E_{din}	72.15 GPa
		v_{din}	0.29
		E_{est}	85.1 GPa
		UCS	261.2 MPa



Código		MA04-01	
Profundidade do CP		19.52 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.49 cm	Condição Seca	
Altura	13.4 cm	V_p	5.49 km/s
Diâmetro/Altura	2.44	V_s	2.85 km/s
Volume	317.65 cm ³	E_{din}	58.74 GPa
Massa seca	871.86 g	v_{din}	0.32
γ_{seco}	26.92 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	876.48 g	V_p	5.49 km/s
γ_{sat}	27.06 kN/m ³	V_s	2.93 km/s
n_e	1.45%	E_{din}	61.44 GPa
		v_{din}	0.30
		E_{est}	78.98 GPa
		UCS	139.7 MPa



Código		MA04-02	
Profundidade do CP		24.12 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.5 cm	Condição Seca	
Altura	13.87 cm	V_p	5.46 km/s
Diâmetro/Altura	2.52	V_s	2.93 km/s
Volume	329.25 cm ³	E_{din}	61.84 GPa
Massa seca	914.82 g	v_{din}	0.30
γ_{seco}	27.25 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	918.8 g	V_p	5.46 km/s
γ_{sat}	27.37 kN/m ³	V_s	3.03 km/s
n_e	1.21%	E_{din}	65.14 GPa
		v_{din}	0.28
		E_{est}	66.37 GPa
		UCS	169.4 MPa



Código		MA04-03	
Profundidade do CP		29.1 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	13.94 cm	V_p	5.38 km/s
Diâmetro/Altura	2.55	V_s	2.97 km/s
Volume	327.8 cm ³	E_{din}	62.04 GPa
Massa seca	899.26 g	v_{din}	0.28
γ_{seco}	26.9 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	902.61 g	V_p	5.51 km/s
γ_{sat}	27 kN/m ³	V_s	3.02 km/s
n_e	1.02%	E_{din}	64.37 GPa
		v_{din}	0.28
		E_{est}	66.15 GPa
		UCS	144.2 MPa



Código		MA04-05	
Profundidade do CP		39.51 m	
Litologia		Basalto Brechado	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	13.7 cm	V_p	5.02 km/s
Diâmetro/Altura	2.51	V_s	2.18 km/s
Volume	321.42 cm ³	E_{din}	31.98 GPa
Massa seca	784.17 g	v_{din}	0.38
γ_{seco}	23.93 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	812.1 g	V_p	5.11 km/s
γ_{sat}	24.78 kN/m ³	V_s	2.29 km/s
n_e	8.69%	E_{din}	35.14 GPa
		v_{din}	0.37
		E_{est}	48.3 GPa
		UCS	80.5 MPa



Código		MA04-06	
Profundidade do CP		31.87 m	
Litologia		Peperito	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.45 cm	Condição Seca	
Altura	13.65 cm	V_p	4.64 km/s
Diâmetro/Altura	2.50	V_s	2.28 km/s
Volume	318.43 cm ³	E_{din}	30.38 GPa
Massa seca	692.62 g	v_{din}	0.34
γ_{seco}	21.33 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	742.18 g	V_p	4.6 km/s
γ_{sat}	22.86 kN/m ³	V_s	2.68 km/s
n_e	15.56%	E_{din}	38.81 GPa
		v_{din}	0.24
		E_{est}	31.01 GPa
		UCS	33.5 MPa



Código		QD03-01	
Profundidade do CP		11.46 m	
Litologia		Basalto Hidrotermalizado	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.45 cm	Condição Seca	
Altura	13.24 cm	V_p	5.54 km/s
Diâmetro/Altura	2.43	V_s	2.89 km/s
Volume	308.96 cm ³	E_{din}	55.13 GPa
Massa seca	777.7 g	v_{din}	0.31
γ_{seco}	24.69 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	782.59 g	V_p	5.66 km/s
γ_{sat}	24.84 kN/m ³	V_s	3.06 km/s
n_e	1.58%	E_{din}	60.95 GPa
		v_{din}	0.29
		E_{est}	95.72 GPa
		UCS	101.5 MPa



Código	QD03-02		
Profundidade do CP	27.1 m		
Litologia	Riolito		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.4 cm	Condição Seca	
Altura	14.02 cm	V_p	5.21 km/s
Diâmetro/Altura	2.60	V_s	3.12 km/s
Volume	321.2 cm ³	E_{din}	61.08 GPa
Massa seca	825.13 g	v_{din}	0.22
γ_{seco}	25.19 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	839.32 g	V_p	5.33 km/s
γ_{sat}	25.63 kN/m ³	V_s	2.98 km/s
n_e	4.42%	E_{din}	57.93 GPa
		v_{din}	0.27
		E_{est}	88.03 GPa
		UCS	148 MPa



Código	QD05-01		
Profundidade do CP	12.54 m		
Litologia	Basalto Vesiculado		
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.33 cm	Condição Seca	
Altura	13.93 cm	V_p	3.06 km/s
Diâmetro/Altura	2.61	V_s	2.14 km/s
Volume	310.87 cm ³	E_{din}	20.34 GPa
Massa seca	675.07 g	v_{din}	0.02
γ_{seco}	21.3 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	727.69 g	V_p	3.24 km/s
γ_{sat}	22.96 kN/m ³	V_s	2.26 km/s
n_e	16.93%	E_{din}	22.77 GPa
		v_{din}	0.02
		E_{est}	-
		UCS	19.97 MPa



Código		QD05-02	
Profundidade do CP		17.47 m	
Litologia		Basalto Vesiculado	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.44 cm	Condição Seca	
Altura	13.98 cm	V_p	4.33 km/s
Diâmetro/Altura	2.57	V_s	1.92 km/s
Volume	324.95 cm ³	E_{din}	26.52 GPa
Massa seca	846.59 g	v_{din}	0.38
γ_{seco}	25.55 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	867.42 g	V_p	4.52 km/s
γ_{sat}	26.18 kN/m ³	V_s	2.2 km/s
n_e	6.41%	E_{din}	33.86 GPa
		v_{din}	0.35
		E_{est}	36.54 GPa
		UCS	-



Código		EU05-01	
Profundidade do CP		19.42 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	11.64 cm	V_p	4.77 km/s
Diâmetro/Altura	2.13	V_s	2.66 km/s
Volume	273.21 cm ³	E_{din}	49.78 GPa
Massa seca	754.23 g	v_{din}	0.27
γ_{seco}	27.07 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	765.77 g	V_p	4.79 km/s
γ_{sat}	27.49 kN/m ³	V_s	2.2 km/s
n_e	4.22%	E_{din}	36.48 GPa
		v_{din}	0.37
		E_{est}	38.32 GPa
		UCS	93 MPa



Código		EU05-02	
Profundidade do CP		20.92 m	
Litologia		Basalto Brechado	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.47 cm	Condição Seca	
Altura	13.68 cm	V_p	3.83 km/s
Diâmetro/Altura	2.50	V_s	1.82 km/s
Volume	321.71 cm ³	E_{din}	19.29 GPa
Massa seca	688.89 g	v_{din}	0.35
γ_{seco}	21 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	746.77 g	V_p	3.81 km/s
γ_{sat}	22.76 kN/m ³	V_s	2.27 km/s
n_e	17.99%	E_{din}	26.96 GPa
		v_{din}	0.23
		E_{est}	20.9 GPa
		UCS	34.3 MPa



Código		GB02-01	
Profundidade do CP		2.6 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.44 cm	Condição Seca	
Altura	13.16 cm	V_p	6.01 km/s
Diâmetro/Altura	2.42	V_s	3.23 km/s
Volume	306.2 cm ³	E_{din}	79.61 GPa
Massa seca	900.84 g	v_{din}	0.30
γ_{seco}	28.85 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	902.24 g	V_p	6.01 km/s
γ_{sat}	28.9 kN/m ³	V_s	3.19 km/s
n_e	0.46%	E_{din}	78.25 GPa
		v_{din}	0.30
		E_{est}	91.16 GPa
		UCS	-



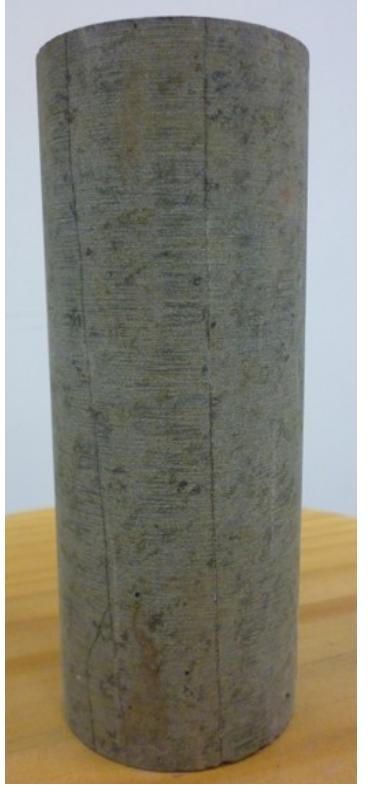
Código		GB02-02	
Profundidade do CP		8.12 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.42 cm	Condição Seca	
Altura	14.04 cm	V_p	5.93 km/s
Diâmetro/Altura	2.59	V_s	2.34 km/s
Volume	323.51 cm ³	E_{din}	44.98 GPa
Massa seca	942.88 g	v_{din}	0.41
γ_{seco}	28.58 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	948.95 g	V_p	6 km/s
γ_{sat}	28.77 kN/m ³	V_s	2.6 km/s
n_e	1.88%	E_{din}	54.39 GPa
		v_{din}	0.38
		E_{est}	-
		UCS	-



Código		GB02-03	
Profundidade do CP		12.53 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.41 cm	Condição Seca	
Altura	14.14 cm	V_p	5.92 km/s
Diâmetro/Altura	2.61	V_s	3.11 km/s
Volume	325.42 cm ³	E_{din}	75 GPa
Massa seca	962.73 g	v_{din}	0.31
γ_{seco}	29.01 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	964.8 g	V_p	6.04 km/s
γ_{sat}	29.07 kN/m ³	V_s	3.32 km/s
n_e	0.64%	E_{din}	83.89 GPa
		v_{din}	0.28
		E_{est}	61.49 GPa
		UCS	-



Código		GB02-04	
Profundidade do CP		17.54 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.42 cm	Condição Seca	
Altura	13.86 cm	V_p	5.92 km/s
Diâmetro/Altura	2.56	V_s	3.3 km/s
Volume	319.13 cm ³	E_{din}	82.15 GPa
Massa seca	942.18 g	v_{din}	0.27
γ_{seco}	28.95 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	944.63 g	V_p	6.05 km/s
γ_{sat}	29.03 kN/m ³	V_s	3.26 km/s
n_e	0.77%	E_{din}	81.41 GPa
		v_{din}	0.30
		E_{est}	-
		UCS	-



Código		GB02-05	
Profundidade do CP		22.3 m	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.41 cm	Condição Seca	
Altura	14.05 cm	V_p	5.76 km/s
Diâmetro/Altura	2.60	V_s	2.38 km/s
Volume	322.76 cm ³	E_{din}	46.3 GPa
Massa seca	947.12 g	v_{din}	0.40
γ_{seco}	28.78 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	950.8 g	V_p	5.88 km/s
γ_{sat}	28.89 kN/m ³	V_s	2.31 km/s
n_e	1.14%	E_{din}	44.13 GPa
		v_{din}	0.41
		E_{est}	92.03 GPa
		UCS	-



Código		CB05-01	
Profundidade do CP		Não disponível	
Litologia		Arenito	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	7.46 cm	Condição Seca	
Altura	19.62 cm	V_p	2.46 km/s
Diâmetro/Altura	2.63	V_s	1.53 km/s
Volume	858.1 cm ³	E_{din}	11.21 GPa
Massa seca	1734.25 g	v_{din}	0.18
γ_{seco}	19.82 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	1887.32 g	V_p	2.48 km/s
γ_{sat}	21.57 kN/m ³	V_s	1.41 km/s
n_e	17.84%	E_{din}	10.1 GPa
		v_{din}	0.26
		E_{est}	11.13 GPa
		UCS	16.3 MPa



Código		CB05-02	
Profundidade do CP		Não disponível	
Litologia		Basalto Maciço	
Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro	5.48 cm	Condição Seca	
Altura	14.64 cm	V_p	5.88 km/s
Diâmetro/Altura	2.67	V_s	3.14 km/s
Volume	344.62 cm ³	E_{din}	74.17 GPa
Massa seca	998.19 g	v_{din}	0.30
γ_{seco}	28.4 kN/m ³	Condição Saturada	
Massa saturada	1001.33 g	V_p	5.88 km/s
γ_{sat}	28.49 kN/m ³	V_s	3.24 km/s
n_e	0.91%	E_{din}	77.85 GPa
		v_{din}	0.28
		E_{est}	107.14 GPa
		UCS	138.7 MPa



**APÊNDICE B – FATORES TABELADOS PARA INTERVALOS DE CONFIANÇA
DO MODELO PARA UCS**

Tabela I: Fatores tabelados para intervalos de previsão com diferentes níveis de confiança, para o modelo de previsão de UCS.

Intervalo de confiança	Limite Inferior	Limite Superior
95%	0.597	1.674
90%	0.652	1.534
85%	0.689	1.451
80%	0.719	1.391
75%	0.744	1.344
70%	0.767	1.304
65%	0.787	1.270
60%	0.807	1.240
55%	0.825	1.213
50%	0.842	1.188
45%	0.859	1.164
40%	0.875	1.143
35%	0.891	1.122
30%	0.907	1.103
25%	0.922	1.084
20%	0.938	1.066
15%	0.953	1.049
10%	0.969	1.032
5%	0.984	1.016

Fonte: própria (2019).

**APÊNDICE C – FATORES TABELADOS PARA INTERVALOS DE CONFIANÇA
DO MODELO PARA MÓDULO DE YOUNG ESTÁTICO**

Tabela I: Fatores tabelados para intervalos de previsão com diferentes níveis de confiança, para o modelo de previsão de módulo de Young estático.

Intervalo de confiança	Limite Inferior	Limite Superior
95%	0.688	1.453
90%	0.733	1.364
85%	0.763	1.310
80%	0.787	1.271
75%	0.807	1.239
70%	0.825	1.213
65%	0.841	1.190
60%	0.855	1.169
55%	0.869	1.150
50%	0.883	1.133
45%	0.895	1.117
40%	0.908	1.102
35%	0.920	1.087
30%	0.931	1.074
25%	0.943	1.061
20%	0.954	1.048
15%	0.966	1.035
10%	0.977	1.023
5%	0.989	1.012

Fonte: própria (2019).