

Ana Carolina Dias Baêsso

Estudo experimental da determinação da resistência a tração direta de rochas

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Rio de Janeiro Março de 2021



Ana Carolina Dias Baêsso

Estudo experimental da determinação da resistência a tração direta de rochas

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior Orientador Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof^a. Raquel Quadros Velloso Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

5

Eduardo Antônio Gomes Marques

Departamento de Engenharia Civil - UFV

Rio de Janeiro, 3 de março de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Ana Carolina Dias Baêsso

Graduou-se em Engenharia Civil pela Faculdade Ciências e Tecnologia de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, em dezembro de 2018. Durante a graduação atuou com a Mecânica dos Solos, especificamente na área de Geotecnia Experimental. Ingressou no Mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, em março de 2019, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Mecânica das Rochas e Geotecnia Experimental.

Ficha Catalográfica

Baêsso, Ana Carolina Dias

Estudo experimental da determinação da resistência a tração direta das rochas /Ana Carolina Dias Baêsso; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – 2021.

99 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2021.

Inclui bibliografia

 Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Ensaio de tração direta. 3. Resistência a tração das rochas. 4. Conversor de carga. I. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral.
 II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD:624

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1912652/CA

Aos meus pais, Sara e Jorge, e ao meu irmão Felipe.

Agradecimentos

A Deus, por ter me conduzido até aqui. Obrigada Pai pelos planos especiais pra mim. A Ti seja a glória pelo que fez por mim!

Aos meus pais, Jorge e Sara, que sonharam junto a mim, sempre me apoiaram em seguir a carreira acadêmica e sempre fizeram o possível para que eu pudesse priorizar meus estudos. Obrigada por deixarem impressos em mim os verdadeiros valores da vida. Amo vocês!

Ao meu irmão Felipe, por ter sido meu porto seguro durante o processo. Obrigada por colocar em prática os valores que nossos pais nos ensinaram. A você, dedico meu título de Mestre e exponho aqui minha eterna gratidão por tudo o que foi e é na minha vida. Te amo!

Ao meu orientador, Professor Dr.Eurípedes do Amaral Vargas Júnior, pela honra de ter sido sua orientada, obrigada pela paciência, ensinamentos e confiança depositada.

À Professora Dra.Raquel Quadros Velloso, pela orientação, atenção, apoio e incentivo, sem os quais eu não teria concluído este trabalho.

Aos meus tios e primos, eternos amigos, que me fazem acreditar que a família é o que temos de melhor, vocês foram essenciais nesta jornada.

A todos os amigos que fiz na PUC-Rio, por saberem que "fazer ciência" é, ao mesmo tempo, fascinante e desafiador. Em especial: Luiza, Érica, Juliana, Gabriel, Vitor, Alessandra, Tamires, Thiago, Marcus, Marcelle, David, e aos queridos da salinha 611.

Aos meus amigos de fora da PUC-Rio, por serem extensão da minha família, obrigada por acompanharem toda a luta, entenderem os momentos de abdicação, e por sempre torcerem por mim.

Ao Professor Dr.Eduardo Marques por ter concedido prontamente os blocos de rochas para a realização da pesquisa.

Ao Professor Dr.Daniel Jacques e à Professora Dra.Lilian Gonçalves por terem se disponibilizado à ajudarem com a identificação do material.

Agradeço ao Bruno Pires, Bruno Viana, Anderson, Vitor, Jhansen, Marques, Euclides e Rogério, ambos do Laboratório de Estruturas da PUC-Rio, por todo suporte para que esta pesquisa se concluísse.

Aos professores e funcionários do departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Às secretárias Rita e Luana por toda atenção recebida.

Aos colegas da SEINFRA-RIO e da Coba por todo esteio.

Àqueles que foram inspiração e tornaram possível o início dessa trajetória: Professor Dr.Eduardo de Souza Cândido, Professor Dr.Klinger Senra Rezende e Professor Dr.Enivaldo Minette.

À PUC-Rio pela bolsa de isenção concedida e pela oportunidade de cursar o Mestrado nesta instituição que tanto admiro.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

A todas as outras pessoas que participaram direta e indiretamente da minha caminhada nesta fase.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Baêsso, Ana Carolina Dias; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (Orientador). Estudo experimental da determinação da resistência a tração direta de rochas. Rio de Janeiro, 2021. 99p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A resistência à tração das rochas é de grande importância em muitas aplicações de engenharia e geofísica. Considerada um parâmetro chave em projetos de mecânica de rochas, sua determinação em laboratório tem sido discutida há anos por muitos pesquisadores com duas vertentes: o ensaio de tração direta, considerado o ideal e mais realístico, tem sua credibilidade comprometida devido à possibilidade de alteração do resultado final envolvendo sua má execução, por outro lado, os ensaios indiretos, devido à praticidade, difundiu-se pelo mundo, entretanto, a comunidade científica não ignora as deficiências envolvendo os resultados. Assim, diante desse cenário, esse trabalho traz a construção de um conversor de carga compressão-tração (CTC), que possibilita a determinação da resistência à tração das rochas de forma direta e confiável. Fez-se necessário uma análise numérica para a determinação da geometria ideal do corpo de prova. Foram realizados em sienogranitos de Cachoeiro de Itapemirim-ES testes de compressão uniaxial, ensaios brasileiros e ensaios de tração direta (CTC), a fim de comparar os resultados obtidos com os dados da literatura. Os resultados mostraram que o conversor de carga teve um bom desempenho de acordo com os objetivos propostos, as amostras romperam por tração pura no centro do corpo de prova em formato de halter, e conforme evidenciado, para todas as amostras de rochas testadas, as resistências à tração direta são claramente menores do que as resistências à tração indireta.

Palavras-chave

Ensaio de tração direta; Resistência à tração das rochas; Conversor de carga.

Abstract

Baêsso, Ana Carolina Dias; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (Advisor). **Experimental study of the determination of the tensile strength of rocks.** Rio de Janeiro, 2021. 99p. Master's Dissertation - Department of Civil and Environmental Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The tensile strength of rocks is of great importance in many engineering and geophysical applications. Considered a key parameter in rock mechanics projects, its determination in the laboratory has been discussed for years by many researchers with two strands: the direct tensile test, considered the ideal and most realistic, has its credibility compromised due to the possibility of altering the final result involving its poor execution, on the other hand, the indirect tests, due to practicality, spread around the world, however, a scientific community does not ignore such deficiencies involving the results. Thus, from this scenario, this work brings the construction of a compression to tension load converter (CTC), which allows the determination of the tensile strength of the rocks in a direct and reliable way. A numerical analysis was necessary to determine the ideal geometry of the specimen. Uniaxial compression tests, brazilian tests and direct tensile strength tests (CTC), were perfomed in syenogranites from Cachoeiro de Itapemirim-ES, in order to compare the results obtained with the literature data. The results showed that, the load converter has a good performance according to the proposed objectives, the samples broke due to pure tensile in the center of the halter-shaped specimen, and as evidenced, for all tested rock samples, to the direct tensile strength are clearly lower than the indirect tensile strength.

Keywords

Direct Tensile Test; Tensile strength of rocks; Load converter.

Sumário

| 1 | Introdução | 16 |
|--------|--|----|
| 1.1. | Justificativa | 17 |
| 1.2. | Objetivos | 17 |
| 1.3. | Estrutura da dissertação | 18 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 19 |
| 2.1. | Propriedades de resistência das rochas | 19 |
| 2.2. | Resistência à tração de rochas | 20 |
| 2.3. | Estimativas da resistência à tração | 22 |
| 2.4. | Ensaio de tração | 23 |
| 2.4.1. | Métodos diretos | 23 |
| 2.4.2. | Métodos indiretos | 29 |
| 2.5. | Resistência à tração dos granitos | 33 |
| 3 | Construção do equipamento | 34 |
| 3.1. | Concepção | 34 |
| 3.2. | Conversor de carga de compressão para tração (CTC) | 36 |
| 4 | Análise numérica | 41 |
| 4.1. | Modelagem do corpo de prova | 41 |
| 4.2. | Resultados | 43 |
| 5 | Materiais e Métodos | 50 |
| 5.1. | Materiais | 50 |
| 5.1.1. | Contexto geológico da área | 54 |
| 5.1.2. | Descrição macroscópica das rochas | 55 |
| 5.1.3. | Descrição microscópica das rochas | 56 |
| 5.1.4. | Preparação dos corpos de prova | 57 |
| 5.2. | Metodologia | 62 |
| 5.2.1. | Caracterização de Índices Físicos | 62 |
| 5.2.2. | Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt) | 64 |
| 5.2.3. | Ensaio de velocidade de propagação de ondas | 65 |
| 5.2.4. | Ensaio de resistência à compressão uniaxial | 67 |
| 5.2.5. | Ensaio de resistência à tração indireta (brasileiro) | 72 |
| 5.2.6. | Ensaio CTC (Tração direta) | 75 |
| 6 | Apresentação e Discussão dos resultados | 77 |
| 6.1. | Caracterização de Índices Físicos | 77 |
| 6.2. | Propriedades Índices | 79 |
| 6.2.1. | Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt) | 80 |
| 6.2.2. | Ensaio de velocidade de propagação de ondas | 81 |
| 6.3. | Propriedades Geomecânicas | 84 |

| 6.3.1. | Ensaio de resistência à compressão uniaxial | 84 |
|--------|--|------|
| 6.3.2. | Ensaio de resistência à tração indireta (brasileiro) | 87 |
| 6.3.3. | Ensaio CTC (Tração direta) | 88 |
| 7 | Conclusões e sugestões de trabalhos futuros | . 92 |
| 7.1. | Conclusões | . 92 |
| 7.2. | Sugestões para futuros trabalhos | 93 |
| | Referências Bibliográficas | 94 |
| | Apêndice I | 98 |

Lista de figuras

| Figura 2.1 - Principais métodos de determinação da resistência à tração das |
|--|
| rochas21 |
| Figura 2.2 - Corpo de Prova Posicionado para Ensaio de Tração Direta23 |
| Figura 2.3 - Modelo para ensaio de tração. Modificado de Blümel (2000)25 |
| Figura 2.4 - Ensaio de Divisão. Fonte: Zhao (2011) |
| Figura 2.5 - Mandíbula proposta por Tufekci (2016)27 |
| Figura 2.6 - Ensaio POT. Fonte: Adaptado de Cacciari (2019) |
| Figura 2.7 - Ensaio brasileiro. Adaptado de Aadnoy e Looyeh (2014)30 |
| Figura 2.8 - Corpo de prova entre os mordentes. Fonte: Erarslan & Williams |
| (2012) |
| Figura 2.9 - Orifícios centrais e seus modos de fraturas em discos de rochas 31 |
| Figura 2.10 - Comparação dos resultados de resistência à tração. Adaptado de |
| Efe et al. (2018) |
| Figura 3.1 - Conversor de carga compressão-tração (CTC) |
| Figura 3.2 - (1) Placas de apoio, (2) Corpo de prova, (3) Blocos de transferência |
| de carga, (4) Coluna de aço, (5) Placas de extremidade e (6) Porcas de |
| |
| segurança |
| segurança |
| segurança |
| segurança. 35 Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4- Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4- Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4- Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40Figura 3.10 - Detalhamento da porca.40 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40Figura 3.10 - Detalhamento da porca.40Figura 4.1 - Dimensões em milímetros da geometria em dog bone encontrada por |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40Figura 3.10 - Detalhamento da porca.40Figura 4.1 - Dimensões em milímetros da geometria em dog bone encontrada por42 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40Figura 3.10 - Detalhamento da porca.40Figura 4.1 - Dimensões em milímetros da geometria em dog bone encontrada por42Figura 4.2 - Dimensões em milímetros da geometria em halter encontrada por42 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40Figura 3.10 - Detalhamento da porca.40Figura 4.1 - Dimensões em milímetros da geometria em dog bone encontrada por42Figura 4.2 - Dimensões em milímetros da geometria em halter encontrada por42 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40Figura 3.10 - Detalhamento da porca.40Figura 4.1 - Dimensões em milímetros da geometria em dog bone encontrada por42Figura 4.2 - Dimensões em milímetros da geometria em halter encontrada por42Figura 4.3 - Modelo da malha indicando as condições de contorno e o40 |
| segurança.35Figura 3.3 – Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado36Figura 3.4 - Detalhamento da placa de apoio37Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade37Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC.38Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.39Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.39Figura 3.9 - Vistas do CTC.40Figura 3.10 - Detalhamento da porca.40Figura 4.1 - Dimensões em milímetros da geometria em dog bone encontrada por42Figura 4.2 - Dimensões em milímetros da geometria em halter encontrada por42Figura 4.3 - Modelo da malha indicando as condições de contorno e o43 |

| carregamento aplicado para o halter |
|---|
| Figura 4.5 - Distribuição de tensão de tração no CP - Geometria Klanphumusri |
| (2010) |
| Figura 4.6 - Distribuição de tensão de tração - Geometria proposta para o formato |
| dog bone |
| Figura 4.7 - Distribuição de tensão cisalhante no CP - Geometria Klanphumusri |
| (2010) |
| Figura 4.8 - Distribuição de tensão cisalhante - Geometria proposta para o |
| formato dog bone |
| Figura 4.9 - Distribuição de tração ao longo do comprimento do dog bone 46 |
| Figura 4.10 - Distribuição de tração ao longo da seção média do dog bone46 |
| Figura 4.11 - Distribuição de tensão de tração - Geometria proposta para o |
| formato de halter |
| Figura 4.12 - Distribuição de tensão cisalhante - Geometria proposta para o |
| formato de halter |
| Figura 4.13 – Tensor de tensões para a geometria em formato de dog bone 48 |
| Figura 4.14 - Tensor de tensões para a geometria em formato de halter49 |
| Figura 5.1 - Blocos de sienogranitos doados pela UFV |
| Figura 5.2 - Blocos de rocha extraídos na pedreira de Cachoriro de |
| Itapemirim -ES |
| Figura 5.3 - Aspecto geral do talude de corte |
| Figura 5.4 - Corte dos blocos de sienogranitos na pedreira53 |
| Figura 5.5 - Localização da pedreira de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Fonte: |
| Google earth (2020) e Mapa Geológico do estado do ES (CPRM)54 |
| Figura 5.6 - Aspecto ao olho nu dos minerais na amostra de rocha55 |
| Figura 5.7- Fotos ao microscópio petrográfico, com aumento de 5 x a nicois |
| cruzado e descruzados do perfil de intemperismo W1. Fonte: Jaques (2019) 56 |
| Figura 5.8 - Fotos ao microscópio petrográfico, com aumento de 5 x a nicois |
| cruzado e descruzados do perfil de intemperismo W2. Fonte: Jaques (2019) 57 |
| Figura 5.9- Perfuração dos blocos de rocha |
| Figura 5.10 - Testemunhos de rocha após perfuração |
| Figura 5.11 - Cortadora metalográfica Arotec |
| Figura 5.12 – Cortadora Coretest |
| Figura 5.13 - Retífica automática de corpos de prova60 |
| |

| Figura 5.14 - Corpos de prova retificados |
|--|
| Figura 5.15 – Torno e detalhe do disco diamantado61 |
| Figura 5.16 - Corpo de prova em formato de halter61 |
| Figura 5.17 - Sistema de saturação dos corpos de prova. Em destaque os CPs |
| imersos em água deionizada63 |
| Figura 5.18 - Sistema de balanças para medir os pesos saturados, secos e |
| submersos dos CPs |
| Figura 5.19 - Ensaio esclerométrico. Corpo de prova apoiado em uma base |
| rígida64 |
| Figura 5.20 - Deformações elásticas e movimentos de partículas associadas à |
| passagem de ondas de corpo: (A) onda P e (B) onda S. Fonte: Castro (2013) 66 |
| Figura 5.21 – Ensaio de velocidade de onda no osciloscópio67 |
| Figura 5.22 - Representação esquemática do ensaio de compressão simples e da |
| força atuante |
| Figura 5.23 - Corpos de prova do ensaio de compressão simples69 |
| Figura 5.24 - Máquina de ensaio MTS 81569 |
| Figura 5.25 - Corpo de prova com extensômetros circunferencial e axial |
| acoplados70 |
| Figura 5.26 – Fendilhamento no corpo de prova rompido após ensaio de |
| compressão simples71 |
| Figura 5.27 - Representação esquemática do ensaio brasileiro e da força |
| atuante72 |
| Figura 5.28 - Corpos de prova em formato de disco73 |
| Figura 5.29 - Máquina de ensaio MTS 81073 |
| Figura 5.30 - Conjunto de ensaio (mordentes, CP e rótula)74 |
| Figura 5.31 - Corpos de prova rompidos após ensaio |
| Figura 5.32 - Dispositivo CTC |
| Figura 6.1 - Médias de valores de porosidade para o sienogranito e rochas |
| graníticas de outros trabalhos |
| Figura 6.2 - Médias de valores do peso específico seco para o sienogranito e |
| rochas graníticas de outros trabalhos79 |
| Figura 6.3 - Médias de valores de onda P para o sienogranito e rochas graníticas |
| de outros trabalhos |
| Figura 6.4 - Comparação dos resultados obtidos com o de Jaques (2019) |

| Figura 6.5 - Sienogranito apresentando leve coloração alaranjada a olho nu | 83 |
|--|----|
| Figura 6.6 - Variação da onda S maior em função da onda S menor | 83 |
| Figura 6.7 - Curvas tensão x deformação. | 85 |
| Figura 6-8 - Comparação dos resultados obtidos com o de Jaques (2019) | 86 |
| Figura 6.9 - Gráfico tensão de tração x deformação | 89 |
| Figura 6.10 - Corpos de prova bipartidos após ensaio | 89 |
| Figura 6.11 - Ruptura no centro do CP - Amostragem 1 | 90 |
| Figura 6.12 - Ruptura no centro do CP - Amostragem 2 | 90 |
| Figura 6.13 - Ruptura inesperada do CP05 | 90 |
| Figura 6.14- Indicação no sistema da substituição dos blocos pelas porcas | 91 |
| | |

Lista de tabelas

| Tabela 1 - Resumo das resistências à tração direta e indireta. | |
|---|------|
| Fonte: Klanphumusri (2010) | .26 |
| Tabela 2 - Parâmetros de tração direta de granitos e arenitos. | |
| Fonte: Zhao (2011) | .26 |
| Tabela 3 - Propriedades das rochas. Fonte: Tufecki (2016) e Demidarg et al. | |
| (2019) | .28 |
| Tabela 4 - Valores de resistência à tração de granitos obtidos por diversos | |
| pesquisadores | .33 |
| Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço inox 304 | . 34 |
| Tabela 6 - Enquadramento do sienogranito quanto aos níveis de intemperismo. | 51 |
| Tabela 7 - Programa experimental | .53 |
| Tabela 8 - Modal de composição mineralógica do sienogranito, em % | .56 |
| Tabela 9 - Valores de índices físicos avaliados para o sienogranito | .77 |
| Tabela 10 - Resultados do ensaio de Martelo de Schimdt | . 81 |
| Tabela 11 - Resultados do ensaio de velocidade de propação de ondas | . 81 |
| Tabela 12 - Resultados do ensaio de compressão simples | . 84 |
| Tabela 13 - Resultados do ensaio brasileiro | . 87 |
| Tabela 14 - Resultados do ensaio de tração direta | . 88 |
| Tabela 15 - Comparação dos resultados de resistência à tração | . 92 |

Introdução

As dificuldades de obtenção da resistência a tração por métodos convencionais de forma precisa e representativa associada com sua relevância em projetos da mecânica de rochas tem despertado o interesse da comunidade científica nos últimos anos.

16

Caracterizar a resistência à tração das rochas é de grande importância em muitas aplicações de engenharia e geofísica (Dai et al. 2010). Ela é considerada um parâmetro chave para determinar a capacidade de carga das rochas, sua deformação, danos e fraturamento, esmagamento, perfuração de túneis e detonação e etc.., além de ser usada para determinar a estabilidade e a capacidade de manutenção de estruturas rochosas.

Entretanto, sua determinação tem sido comprometida, o ensaio de tração direta, realizado com grande frequência em materiais como o concreto, tornou-se raro em rochas devido à dificuldade de preparação das amostras e às suscetibilidades de alteração do resultado final envolvendo sua má execução. Como resultado, métodos indiretos têm sido amplamente utilizados como alternativas mais rápidas e acessíveis para determinar a resistência à tração das rochas.

Porém, apesar de estarem sendo praticados no mundo inteiro, a comunidade científica não ignora as deficiências envolvendo os ensaios indiretos, principalmente o mais difundido entre eles, o ensaio brasileiro. Komurlu et al. (2016) expõe a necessidade do surgimento de um método de ensaio direto que seja capaz de fornecer valores confiáveis de resistência e contribuir significativamente com a mecânica de rochas.

Portanto, este estudo apresenta a construção e os resultados de ensaios de tração direta realizados em um conversor de carga compressão-tração criado por Klanphumeesri em 2010. O equipamento foi reproduzido com o intuito de determinar, por meio de uma campanha experimental, a resistência à tração direta

de sienogranitos provenientes de uma pedreira da cidade de Cachoeiro de Itapemirim – ES.

1.1 Justificativa

A escolha do tema e, portanto, deste projeto de pesquisa em nível de Mestrado, justifica-se pelas seguintes motivações:

- Verificou-se, após extensa revisão bibliográfica, a necessidade de um aparato que determine de forma mais simplificada e confiável a resistência à tração de rochas em laboratório;
- Muitas correlações envolvendo a resistência à tração merecem ser testadas para verificar a sua aplicabilidade. Neste sentido, este trabalho também pode contribuir ao estabelecer este parâmetro de maneira confiável para avaliar a aplicabilidade de correlações de outros trabalhos ao material que se investiga;

1.2 Objetivos da pesquisa

O presente trabalho tem como objetivo principal a construção de um equipamento de tração direta denominado conversor de carga de compressãotração, CTC, que possibilite a aplicação de tensão de tração pura no núcleo da amostra de rocha a fim de determinar a resistência à tração desses materiais.

Como objetivos secundários e também necessários à integralização do primeiro, enumera-se:

- Replicar e desenhar o equipamento criado por Klanphumusri (2010) para ensaios de resistência à tração de rochas;
- Determinar, por meio de modelagem numérica, a geometria dos corpos de prova em formato *dog bone* e halter;
- Realizar a programação do procedimento de ensaios no equipamento;
- Validar o uso do aparato para determinar a resistência à tração direta das rochas.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em sete capítulos, iniciando com este capítulo introdutório, em que se apresenta o tema fundamental do trabalho, a justificativa do estudo e a definição dos objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2, em que é apresentada uma revisão bibliográfica, compreende tópicos referentes as propriedades de resistência das rochas, conceituando a resistência à tração de rochas e os principais métodos de obtenção por meio de ensaios laboratoriais.

O Capítulo 3 apresenta o detalhamento da concepção do projeto do conversor de carga compressão-tração.

O Capítulo 4 traz o estudo, por meio de modelagem numérica, da geometria adequada dos corpos de prova em formato de *dog bone* e halter a serem utilizadas nos ensaios de tração direta. Neste capítulo, além das discussões envolvendo a distribuição de tensões, estão apresentados também os resultados encontrados.

O Capítulo 5 descreve detalhadamente os materiais e as metodologias utilizadas na campanha experimental. São apresentados os equipamentos, setups e normas seguidas para a realização dos ensaios.

O Capítulo 6 consiste na apresentação, na análise e na discussão dos resultados obtidos por meio dos ensaios realizados.

No Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Revisão Bibliográfica

2.1 Propriedades de Resistência das Rochas

As propriedades de resistência são características mecânicas importantes a serem determinadas em projetos da engenharia de rochas, e podem ser definidas em termos de resistência à tração, à compressão, ao cisalhamento e resistência ao impacto.

19

Denomina-se resistência a propriedade de um sólido opor-se à ruptura quando submetido à ação de uma carga estática ou dinâmica. A tensão de ruptura de uma rocha é o valor da tensão na qual a rocha ou o maciço rochoso inicia o processo de perda de capacidade de suporte segundo mecanismos de cisalhamento, tração e compressão (Zacarias, 2003).

A ruptura do elemento rochoso dependerá do tipo de material, da geometria da amostra e do estado de tensão sob o qual ele estará submetido. Para avaliar o comportamento mecânico das rochas em laboratório, corpos de prova são ensaiados, fornecendo através de medições diretas e indiretas os parâmetros de resistência e as propriedades de deformabilidade.

De acordo com Carreño et al. (2011), os testes de laboratório geralmente consistem em experimentos apropriados à natureza da rocha, e esses testes determinam informações importantes como tensões e deformações. O tipo de ensaio selecionado para medir uma característica particular da rocha deve simular o mais próximo possível as condições encontradas em campo. No entanto, deve-se levar em consideração que esses dados não reproduzem exatamente as propriedades *in situ* em larga escala, pois essas propriedades são influenciadas por juntas, falhas, heterogeneidades, planos de fraqueza e outros fatores.

Conhecer as propriedades de resistência preliminarmente ao propor soluções de engenharia para a estabilização de estruturas é indispensável, pois estas propriedades são conceitos essenciais da geomecânica de rochas, objeto de estudo de muitos pesquisadores e parâmetros chaves em projetos de engenharia.

2.2 Resistência à tração das rochas

De acordo com Sjöberg (1999), em uma análise de estabilidade para taludes de grande altura em mineração por exemplo, a resistência a tração do maciço rochoso constitui possivelmente o parâmetro mais importante que deve ser fornecido, sendo ao mesmo tempo, um dos parâmetros mais difíceis de determinar.

A resistência à tração é muitas vezes definida como o parâmetro mecânico crítico na prática da engenharia de rochas, governando o colapso de maciços rochosos em problemas geotécnicos como: galerias, fraturamento hidráulico, britagem, perfuração e detonação de túneis, entre outros. Ela pode ser definida como a força de tração necessária para romper uma amostra de rocha, dividida pela área da seção transversal da amostra (Aadnoy & Looyeh, 2014).

Materiais rochosos apresentam uma resistência à tração na ordem de dez vezes menor que a resistência a compressão. Erarslan & Williams (2012) pontuam que a resistência a tração das rochas torna-se um dos parâmetros mais importantes a serem determinados, pois está relacionada com os parâmetros de deformabilidade e tenacidade à fratura (K_{IC}), além de permitir avaliar o comportamento frágil do material e o processo de iniciação de fissuras. Tufekci et al. (2016) conceituam resistência à tração como sendo a tensão de ruptura de um elemento de rocha submetido a um carregamento de tração uniaxial puro.

De acordo com Dermidag et al. (2019), a resistência à tração das rochas é um fator de projeto importante para se conhecer a capacidade da rocha em resistir a um carregamento dinâmico. Entretanto, é comum na prática geotécnica que os projetistas considerem a resistência à tração próxima de zero, a fim de garantirem a segurança do projeto, pois as rochas não se caracterizam como materiais homogêneos e nem isotrópicos (são constituídas de grãos minerais de diversos tamanhos, formas e orientações, e frequentemente microfissuras ou fissuras podem ser encontradas em determinadas direções na formação devido a processos geológicos). Por conterem naturalmente essas fissuras ou fraturas multidirecionais, se uma estrutura rochosa apresentar trincas que seguem perpendicularmente à carga de tração, sua resistência à tração pode se aproximar de zero.

Uma compreensão do comportamento das rochas sob tensão de tração contribui significativamente para análises que envolvem maciços rochosos e rochas intactas. Erarslan & Williams (2012) relatam a dificuldade de reproduzir em laboratório ensaios para a determinação da resistência de rochas, além de serem caros, os resultados são altamente sensíveis ao método prático e ao tipo de carregamento aplicado. Atualmente um dos grandes desafios dos laboratórios de mecânica das rochas é medir a resistência à tração. A Figura 2.1 lista alguns dos métodos mais utilizados por pesquisadores ao longo dos anos e suas respectivas formulações.

| ↓ Fa ↓ Fa | Tração Direta | $\sigma_t = \frac{Fa}{A}$ |
|--------------------|------------------------------------|---|
| D T Fa | Brasileiro | $\sigma_t = 0,636 \frac{Fa}{Db}$ |
| Fa L | Flexão de 4 pontos | $\sigma_t = \frac{2LFa}{bh^2}$ |
| Fa H D Fa | Push-Pull | $\sigma_t = \frac{Fa}{(2D+2H)R}$ |
| | Conversor de carga de Blümel | $\sigma_t = \frac{Fa}{\pi r_1^2 - \pi r_2^2}$ |

Figura 2.1 - Principais métodos de determinação da resistência à tração das rochas.

2.3 Estimativa da resistência à tração

As propriedades das rochas são frequentemente correlacionadas entre as medições de campo e os resultados de ensaios de laboratório, de modo que preliminarmente em projetos de engenharia envolvendo maciços rochosos, estimativas desses parâmetros podem ser realizadas antes da obtenção do resultado do ensaio.

Zhang (2005) sugere uma correlação da resistência à tração da rocha e o índice de carga pontual ($I_{S(50)}$):

$$\sigma_t = 1,5I_{S(50)} \tag{2.1}$$

Perras e Diederichs (2014) apresentam uma estimativa a ser feita usando a Eq. 2.2 para rochas frágeis, determinando m_i com base nas recomendações de Hoek e Brown (1997) de acordo com o tipo de rocha.

$$\sigma_t = -\frac{UCS}{m_i} \tag{2.2}$$

Uma outra maneira de estimar a resistência a tração de forma indireta é através de ensaios de compressão puntiforme. De acordo com Reichmuth (1963), o parâmetro de resistência pode ser dado por:

$$\sigma_{t,pl} = 6,62x10^{-3} \frac{P}{D^2} \tag{2.3}$$

Onde:

P - carga de ruptura do ensaio (MN);

D - distância entre os pontos de aplicação da carga (cm).

Perras e Diederichs (2014) enfatizam que essas relações são apenas para análise preliminar e nunca devem substituir ensaios de laboratório para determinar a resistência à tração. Portanto, na seção 2.4, são apresentados os principais métodos de determinação desse parâmetro por meio de ensaios laboratoriais.

2.4 Ensaios de tração

2.4.1 Ensaios diretos

A tração direta, comparada com métodos indiretos, fornece resultados mais próximos à tração real das rochas. Segundo Luong (1988) ensaios diretos possuem a vantagem de determinarem diretamente a resistência à tração pelo carregamento aplicado e as condições de contorno impostas, independente das propriedades do material ensaiado. É difícil medir diretamente a resistência à tração de materiais rochosos, a técnica mais conhecida para outros materiais é o ensaio de tração direta, que de acordo com a ASTM (2008a) consiste em usinar uma forma de haste no corpo de prova com relações de altura/diâmetro de 2,5 a 3,0 e aplicar uma carga de tração, conforme apresentado na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Corpo de Prova Posicionado para Ensaio de Tração Direta.

Fonte: Zhao (2011)

Em rochas, para a obtenção de um dispositivo de aplicação de tração direta mais confiável sem a introdução de tensões secundárias, seria necessário colar pratos de aço centrados nas bases do corpo de prova e tracioná-los até que a tensão transmitida à rocha estivesse na forma de tração pura. Este ensaio forneceria a verdadeira resistência à tração das rochas, uma vez que existem influências externas mínimas quando o ensaio é concluído corretamente (Hoek, 1964).

Algumas dificuldades são observadas em sua realização, principalmente

ligadas ao acoplamento da garra e à manutenção da axialidade do carregamento (Azevedo & Marques, 2002), resistindo pouco à tração um pequeno desalinhamento pode arruinar o ensaio de tração em rochas. A partir das dificuldades apresentadas em determinar a resistência à tração pela técnica mais difundida em metais, métodos alternativos foram desenvolvidos a fim de suprir a necessidade do conhecimento deste parâmetro mecânico das rochas.

Brace (1964) apud Dermidag et al. (2019) afirmou que a geometria do corpo de prova mais adequada a ser usada para determinar a resistência à tração direta dos materiais deve ser do tipo *dog bone*. Quando as amostras de rochas não possuem essa geometria, as forças de tração direta aplicadas podem gerar um fator de intensidade de tensão (K_I) na parte superior das amostras cilíndricas, ou seja, nos pontos de conexão de epóxi/cimento ou no ponto de fixação do lado da conexão. Assim, a ruptura dessas amostras podem ocorrer próxima à conexão devido à concentração de tensão nessa região e fornecer um valor inválido de resistência à tração.

Para evitar as dificuldades encontradas na adesão da amostra (para fixação), Gorski (1993) patenteou uma configuração de ensaio a fim de determinar a resistência à tração de materiais frágeis, que utiliza amostras em formato *dog bone*. O aparato caracterizou-se por ser relativamente barato e ser pioneiro em independer das células confinantes ao converter a carga compressiva aplicada ao aparelho, à uma carga de tração no corpo de prova. O ensaio de Gorski apesar de ser complexo de montar e ter uma duração de tempo considerável, foi essencial para inserir no meio científico a ideia de novas possibilidades de determinação direta da resistência à tração das rochas.

Blümel (2000) apresenta uma abordagem inovadora para os ensaios de laboratório na determinação da resistência à tração uniaxial (Figura 2.3). Seu método consiste em uma amostra cilíndrica de geometria especial coberta na parte superior e inferior por dois orifícios de perfuração axial com diferentes diâmetros, onde um campo de tensão de tração unidirecional é criado no corpo de prova. Depois de colocar uma placa de carga (superior) e anel de carga (inferior), a amostra é carregada em um dispositivo de teste padrão para ensaios de compressão. A ruptura ocorre por tração na área entre os dois furos de perfuração sobrepostos.



Figura 2.3 - Modelo para ensaio de tração. Modificado de Blümel (2000)

Os resultados apresentaram valores realistas para a resistência à tração direta das rochas. Entretanto, as dificuldades de confecção dos corpos de prova se fizeram presentes.

Modificando o aparato de Blümel (2000), Plinninguer et al. (2004) desenvolveram um ensaio para determinar a resistência à tração uniaxial em concreto, chamado de MTT (Modified Tension Test), utilizado na construção de túneis em TU Graz, na Áustria, a fim de criar um campo de tensão de tração unidirecional na amostra. Os autores obtiveram ótimos resultados de resistência à tração e monitoramento do pós-pico das cuvas de tensão x deformação.

Utilizando-se da alusão de obter a resistência à tração por meio de um ensaio que seja durável, barato e fácil de adaptação em laboratório, Klanphumusri (2010) inspirado em Blümel (2000) e Plinninguer (2004) desenvolveu um novo dispositivo de carregamento para aplicar tensão de tração ao núcleo de corpos de prova rochosos usinados em formato de *dog bone*. Chamado de CTC (Compression to tension load converter), o dispositivo se mostrou um conversor de carga mais simples que o aparato de Gorski (1993), com uma maior facilidade de instalação. Entretanto corpos de prova que necessitam do torno continuam sendo um fator limitante. O autor obteve ótimos resultados nas amostras de arenito, mármore e calcário, conforme apresentado na Tabela 1.

| Tipo de rocha | Densidade (g/cm³) | Tração direta (MPa) | Ens. Brasileiro (MPa) | Ensaio do Anel (MPa) |
|---------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| PP Arenito | 2,36 ± 0,12 | 6,49 ± 0,22 | 10,68 ± 0,70 | 16,10 ± 3,00 |
| SB Mármore | 2,65 ± 0,08 | 6,33 ± 0,62 | 8,02 ± 0,25 | 20,59 ± 1,24 |
| SB Calcário | 2,81 ± 0,05 | 9,31 ± 0,65 | 10,90 ± 0,19 | 23,18 ± 1,70 |

Tabela 1 - Resumo das resistências à tração direta e indireta. Fonte: Klanphumusri (2010)

Zhao (2011) estudou o pós-pico da curva tensão x deformação através de uma proposta de melhoramento da máquina de ensaio de tração direta. Foi adicionado uma mola no conjunto, conforme a Figura 2.4, a fim de evitar a ruptura repentina do corpo de prova e podendo assim obter uma curva tensão x deformação completa. Chamado de Ensaio de Divisão, os resultados apresentados pelo autor em granitos e arenitos se mostraram consistentes (Tabela 2).



Figura 2.4 - Ensaio de Divisão. Fonte: Zhao (2011)

Tabela 2 - Parâmetros de tração direta de granitos e arenitos. Fonte: Zhao (2011)

| Amostra: G (granito) SR (Arenito) | Tensão de tração (MPa) | Pico da tensão (µɛ) | Módulo de deformação (GPa) |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------|
| G-1 | 2,395 | 618 | 5,78 |
| G-2 | 2,317 | 533 | 5,28 |
| G-3 | 2,69 | 471 | 7,68 |
| Média | 2,467 | 541 | 6,25 |
| SR-1 | 3,512 | 852 | 5,84 |
| SR-2 | 3,122 | 675 | 5,49 |
| SR-3 | 2,939 | 606 | 5,72 |
| Média | 3,191 | 711 | 5,68 |

Unlu & Yilmaz (2014) tambem se propuseram a desenvolver um aparelho de ensaio de tração chamado Push-Pull, que pode ser usado para determinar a resistência à tração direta de amostras de rocha intacta cilíndrica com diâmetros convencionais. Os pesquisadores obtiveram boa correlação entre o ensaio de tração direta e o ensaio de tração Push-Pull, e apesar do sistema necessitar de preparação dos corpos de prova com uma cimentação nas extremidades, o aparato é uma ferramenta prática e confiável para determinar a resistência à tração direta de rochas.

Mais recentemente, a concepção de acoplar uma mandíbula no ensaio de tração direta tem ganhado destaque no ambiente científico. Tufekci et al. (2016) projetaram um novo aparelho com mecanismo de embreagem de mandíbula (Figura 2.5) para determinar a resistência à tração direta de travertinos do Peru em formato de halteres, e compararam os resultados dos ensaios entre tração direta e a resistência à tração indireta obtida pelo ensaio brasileiro (Tabela 3).



Figura 2.5 - Mandíbula proposta por Tufekci (2016)

Demirdag et al. (2019) a fim de contribuir com os estudos de Tufekci et al. (2016), determinaram a resistência à tração de corpos de prova de granitos, em formato *dog bone*, pelo aparato desenvolvido em 2016 e por meio do ensaio brasileiro, comparando os resultados obtidos (Tabela 3).

| Ano | 2016 | 2018 |
|---|------------------|-----------------------|
| Dasha | Transatires | Cronito |
| Rocha | Travertino | Granito |
| Densidade (g/cm ³) | $2,699 \pm 0,01$ | $2,671 \pm 0,009$ |
| Densidade aparente (g/cm ³) | $2,384 \pm 0,04$ | $2,644 \pm 0,004$ |
| Porosidade aparente (%) | $5,1 \pm 1,11$ | $0,\!484 \pm 0,\!019$ |
| Velocidade da onda P (m/s) | 4425 ± 199 | 5215 ± 81 |
| Compressão uniaxial (MPa) | $62,52 \pm 11,8$ | $149,6\pm18,4$ |
| Tração direta (MPa) | $3,02 \pm 0,35$ | $5,27 \pm 1,11$ |
| Ens. Brasileiro (MPa) | $3,64 \pm 0,50$ | $9,54 \pm 0,68$ |

Tabela 3 - Propriedades das rochas. Fonte: Tufecki (2016) e Demidarg et al. (2019)

Os autores observaram que amostras em formato de *dog bone* fornecem o valor preciso da resistência à tração direta das rochas, pois a ruptura ocorre longe o suficiente da região de concentração de alta tensão.

Cacciari (2019) em sua campanha experimental para determinar a influência da quantidade de mica no comportamento mecânico de planos de foliação, apresentou resultados consistentes de resistência à tração direta obtida pelo método POT (Pull-off test) em mármores, granitos vermelhos, granitos brancos e andesitas. Ao comparar seus resultados com ensaios brasileiros, o autor verificou que o POT (Figura 2.6) é uma nova alternativa com vantagens práticas para investigar a resistência à tração de rochas e estruturas geológicas.



Figura 2.6 - Ensaio POT. Fonte: Adaptado de Cacciari (2019).

Komurlu et al. (2016) ao realizarem um estudo de modelagem numérica para determinar o tamanho ideal de corpos de prova de rocha de ensaios de resistência à tração direta em forma de *dog bone*, comentaram que, apesar da comunidade científica ter avançado nessa área nos últimos anos, e que embora o ensaio brasileiro seja difundido em todo o mundo, um novo método de ensaio direto deverá surgir para obter valores confiáveis de resistência à tração e contribuir assim com a mecânica das rochas.

2.4.2 Ensaios indiretos

A técnica mais comum para determinar a resistência à tração de rochas é uma abordagem indireta, que consiste na aplicação de um carregamento compressivo no sistema a fim de induzir uma ruptura provocada por tensões de tração, teoricamente uniformes, atuantes no centro do corpo de prova. Por gerar tensão de tração na amostra por meio de um campo de tensão compressivo, os métodos indiretos são considerados mais fáceis, além de serem mais baratos.

O ensaio indireto mais comum e difundido na mecânica das rochas no mundo é o ensaio brasileiro (Brazilian Tension Test), desenvolvido pelo professor Fernando Lobo Carneiro, em 1943, e reconhecido pela ISRM (International Society for Rock Mechanics) em 1978 como um método oficial para determinar a resistência à tração de rochas.

Ele é executado em um corpo de prova com relação H/D igual a 0,5 abraçado por mordentes que objetivam reduzir a concentração de tensões no contato rocha/aço (Figura 2.7). De acordo com Carneiro (1943) o ensaio consiste basicamente na aplicação de carregamento compressivo ao longo de sua geratriz, fazendo com que a rocha fissure no centro, definindo a força de carregamento. A grande popularidade do ensaio brasileiro se deu por dois motivos principais: amostras de rocha produzidas apenas com a usinagem, ou seja, de fácil preparação, necessitando apenas da carotagem dos blocos no diâmetro desejado; e a possibilidade de realizar o ensaio em máquina de compressão uniaxial não confinada, comum em laboratórios de mecânica de rochas.



Figura 2.7 - Ensaio brasileiro. Adaptado de Aadnoy e Looyeh (2014)

Desde a criação do ensaio brasileiro até os dias atuais, algumas considerações têm sido propostas por pesquisadores. Entre elas, Erarslan & Williams (2012) por meio de ensaios em arenitos e granitos, indentificaram a melhor geometria para os mordentes usados durante o ensaio, de modo a evitar a concentração de tensão no contato do mesmo com o corpo de prova, conforme apresentado na Figura 2.8. O objetivo foi evitar uma ruptura bruta do corpo de prova e alcançar uma melhor distribuição das cargas compressivas na amostra. Desde então a proposta dos autores tem sido aderida na comunidade científica.



Figura 2.8 - Corpo de prova entre os mordentes. Fonte: Erarslan & Williams (2012)

Fairhurst (1964) apud Erarslan & Williams (2012) discutiu pela primeira vez a importante questão da validade do ensaio brasileiro. Ele afirmou que a ruptura pode ocorrer longe do centro do disco de ensaio para cargas aplicadas a pequenos ângulos da área de contato, e indicou que a resistência à tração calculada a partir de um ensaio brasileiro é superior ao valor real da resistência à tração direta.

Hoek e Brown (2018) afirmam que por apresentar complexa distribuição de tensões e sofrer influência das concentrações de tensão nos pontos de carregamento, na melhor das hipóteses, o ensaio brasileiro pode ser considerado como um teste de índice que deve ser calibrado contra ensaios de tração para cada tipo de rocha.

Hobbs (1965) propõe uma geometria diferente dos corpos de prova do ensaio diametral, na qual os discos possuem um formato de anel, ou seja, têm um furo no centro, conforme apresentado na Figura 2.9. O autor realizou ensaios nos arenitos Ormonde e obteve resultados de resistência à tração seis vezes maiores que os do disco sólido, quando submetidos à mesma carga diametral.



Figura 2.9 - Orifícios centrais e seus modos de fraturas em discos de rochas. Fonte:Hobbs et al. (1965)

Os resultados dos chamados Ensaios de Anel, são sensíveis às condições de superfície, pois a carga é aplicada diametralmente e a superfície pode ter sido alterada pelo processo de perfuração, o qual tem o potencial de gerar ascensão das fissuras superficiais e fraquezas superficiais que antes da perfuração não eram inerentes à rocha. Klanphumeesri (2010) aponta que a resistência a tração obtida no ensaio de anel são maiores que a obtida no ensaio brasileiro devido ao alto gradiente de tensão ao longo do plano da fissura fabricada na amostra.

Komurlu et al. (2016) torna-se enfático em apontar pontos importantes a serem repensados dos métodos indiretos. Os autores afirmam que o método do anel possui problemas semelhantes ao ensaio brasileiro, ou seja, ainda possuem os problemas das condições de contato da haste com o corpo de prova.

Efimov (2011) apresentou uma maneira indireta de determinar a resistência

à tração das rochas por meio do Ensaio de Flexão de Quatro Pontos. Os ensaios foram realizados em diversos tipos de granitos, e o autor obteve resultados com uma discrepância de 20% dos ensaios brasileiros. A resistência à tração obtida pelo ensaio de flexão estará sujeita ao conhecimento dos módulos de deformabilidade da rocha e da abordagem de critérios de resistências.

Inspirados no trabalho de Efimov (2011), Efe *et al.* (2019) determinaram em mármores a resistência à tração por meio dos métodos de flexão de três e quatro pontos (3PBS e 4PBS, respectivamente) e compararam os resultados com ensaios de tração direta (DTS) adaptados com uma mandíbula (Tufekci et al. 2016), realizados em amostras com formato de halter. Os autores concluíram que o ensaio de quatro pontos forneceu resultados mais próximos do ensaio de tração direta do que o ensaio de três pontos, sendo mais representativo da resistência à tração. (*Figura 2.10*).



Figura 2.10 - Comparação dos resultados de resistência à tração. Adaptado de Efe et al. (2018).

À medida que a relação entre as resistências à compressão e à tração diminui, a determinação da resistência à tração das rochas por meio de métodos indiretos sob carregamento de compressão diametral parece ser uma desvantagem devido à possibilidade de início da fissura na zona de compressão, ou seja, abaixo dos pontos de contato (Fairhurst 1964 e Erarslan e Willians 2012).

Ademais, todos os ensaios de resistência à tração indireta têm discussões importantes sobre a validade dos seus resultados. Embora o método brasileiro seja praticado em todo o mundo, a comunidade científica de mecânica das rochas não ignora suas deficiências, conforme Li et al. 2013, Komurlu et al. 2016 e Brisevac et al. 2015, ressaltam em seus trabalhos.

2.5 Resistência à tração dos granitos

Um conjunto de dados de resistência à tração de granitos e seu método de determinação foi coletado da literatura existente, conforme a

Tabela 4. Os dados agrupados objetivam a comparação dos resultados de tração dos diferentes granitos ensaiados pelo mundo, que estão submetidos a ambientes com histórico de tensões e exposição diferentes. O método de execução, a diferença dos valores de resistência e a composição mineralógica e estrutural da rocha sobressaltam as incertezas mencionadas neste trabalho ao determinar a resistência à tração.

| Autores | Referência | Método | σ _t (MPa) |
|---|---------------|--------------------|-------------------------|
| | | Tração direta | 13,45 |
| Mellor and Hawkes (1971) apud Li e Wong (2013) | Barre | Brasileiro | 14,34 |
| aput Li t Wong (2013) | | Anel | 23,80 |
| Wijk et al. (1977) apud Butenuth (1997) | Bohus | Tração direta | 8,80 |
| Gupta e Rao (1998) | Malanjkhand | Brasileiro | 14,50 |
| Jacobsson (2004) | Meta | Brasileiro | 13,80 |
| Dai et al. (2009) | Laurentian | SCB | 12,80 |
| | Laigographia | Brasileiro | 10,60 |
| | Leicocratic | Flexão de 4 pontos | 13,40 |
| F C | | Brasileiro | 11,20 |
| Elimov (2011) | - | Flexão de 4 pontos | 16,30 |
| | Distita | Brasileiro | 10,40 |
| | Biotite | Flexão de 4 pontos | 11,10 |
| Energlan a Williams (2012) | Drichana | Tração direta | 5,65 |
| Erarsian e winnanis (2012) | DIISUalle | Brasileiro | 13,51 |
| Gurocak et al. (2012) | Elazig/Baskil | Brasileiro | 8,60 |
| Khanlari et al. (2012) | Monzo | Brasileiro | 9,49 |
| Derman e Diederiche (2014) | | Tração direta | 6,30 |
| rerras e Diederichs (2014) | - | Brasileiro | 10,30 |
| Khanlari et al. (2016) | Malayer | Brasileiro | 15,29 |
| Xu e Sun (2018) | Linyi | Brasileiro | 8,12 |
| Jacques (2019) | Sienogranito | Brasileiro | 9,74 |

Tabela 4 - Valores de resistência à tração de granitos obtidos por diversos pesquisadores.

Construção do Equipamento

3.1 Concepção

Com a necessidade do surgimento de um aparato que fosse durável, barato e de fácil utilização em um laboratório de mecânica das rochas convencional, Klanphumusri (2010) desenvolveu um conversor de carga pensando em utilizar as máquinas de carregamento de compressão disponíveis comercialmente. O dispositivo recebeu o nome de conversor de carga de compressão-tração (CTC – Compression to tension load converter).

Ele pode ser utilizado para medir parâmetros elásticos de rocha sob tração uniaxial e compressão da mesma amostra. O ensaio conceitua em aplicar cargas de tração para as extremidades opostas do corpo de prova de rocha e, assim, sujeitando a seção média do corpo de prova à tensão de tração uniaxial.

O CTC foi baseado nos conceitos de tração direta, conforme apresentado no capítulo dois. O aparato foi projetado para ensaiar amostras de rocha em formato *dog bone* com diâmetro das extremidades variando entre 75 a 100 mm. As características do equipamento desenvolvido satisfazem as sugestões estabelecidas na ISRM (1978) para caracterizar tração direta.

No presente trabalho, todas as peças do equipamento de tração direta são de aço inox 304, composto basicamente por ferro, cromo (pelo menos 18%) e níquel (8%), o que garante a alta resistência à oxidação e corrosão, a boa conformabilidade e boa soldabilidade. Foram utilizadas porcas e arruelas galvanizadas. As propriedades mecânicas dos materiais usados para a construção do equipamento estão mencionadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço inox 304.

| Módulo de Young (E) - GPa | 200 |
|----------------------------|-----|
| Limite de escoamento - MPa | 234 |
| Resistência à tração - MPa | 586 |





Figura 3.1 - Conversor de carga compressão-tração (CTC)



Figura 3.2 - (1) Placas de apoio, (2) Corpo de prova, (3) Blocos de transferência de carga, (4) Coluna de aço, (5) Placas de extremidade e (6) Porcas de segurança.

3.2 Conversor de carga: compressão-tração

O design do CTC permite alternar entre as aplicações de tensão de tração e compressão no mesmo corpo de prova durante a colocação na máquina de compressão convencional. Ele também permite determinar os parâmetros de deformabilidade dos mesmos corpos de prova sob tração e compressão, eliminando assim qualquer variabilidade entre as amostras ensaiadas. A Figura 3.3 apresenta o dispositivo preparado para o carregamento de tração.



Figura 3.3 - Equipamento CTC com o corpo de prova posicionado

O equipamento é composto por dois conjuntos de placas de extremidade e placas de apoio feitas de aço inoxidável. Estas placas $(270 \times 110 \times 27 \text{ mm})$ são ligadas entre si por meio de duas colunas de aço de 25 mm de diâmetro e 280 mm de comprimento, conforme os detalhamentos da Figura 3.4 e Figura 3.5.


Figura 3.4- Detalhamento da placa de apoio



Figura 3.5 - Detalhamento da placa de extremidade

A montagem do sistema acontece na seguinte sequência: (1) As placas de extremidades são acopladas nas células de carga, Figura 3.6.a, (2) a placa de apoio superior é adicionada junto ao corpo de prova e em seguida são colocadas as colunas de aço superiores, Figura 3.6.b, (3) as colunas de aço inferiores são encaixadas, Figura 3.6.c, (4) a placa de apoio inferior é adicionada e as roscas com as arruelas são ajustadas de modo a manter o paralelismo do sistem, Figura 3.6.d.









(c) (d) Figura 3.6 - Sequência executiva do ensaio CTC

Para determinar a resistência à tração direta, ao receber o carregamento de compressão, cada placa de extremidade vai exercer uma força na superfície extrema do corpo de prova devido ao deslocamento do bloco de transferência de carga (50 \times 32 x 24 mm), o qual estará sendo empurrado contra as placas de apoio. A carga compressiva em ambas as placas de extremidade é, portanto, transferida através das colunas de aço (Figura 3.7) e do bloco de transferência de carga (Figura 3.8) para a placa de apoio na extremidade oposta. Uma força de tração unidirecional é então induzida na seção intermediária da amostra.



Figura 3.7 - Detalhamento das colunas de aço.



Figura 3.8 - Detalhamento dos blocos de transferência de carga.

Para aplicação da carga de compressão no corpo de prova, deve-se girar os blocos de transferência de carga em torno das colunas de aço em 90 graus, permitindo que ele deslize livremente através da fenda pré-cortada (52×27 mm) nas placas de apoio. Essas placas e as colunas de aço estarão livres de carga aplicada, permitindo que as placas de extremidade pressionem o corpo de prova, fazendo com que a seção intermediária esteja sujeita à aplicação de carga compressiva. A Figura 3.9 mostra as vistas em perspectiva do CTC e a Figura 3.10 mostra o detalhamento das porcas de aço.



Figura 3.9 - Vistas do CTC.



Figura 3.10 - Detalhamento da porca.

Análise Numérica

Anterior à preparação das amostras, uma análise por elementos finitos através do *software* Abaqus foi realizada a fim de encontrar uma geometria ideal para os corpos de prova em formato *dog bone* e halter.

A pesquisa objetivou reduzir as dimensões do corpo de prova em *dog bone* propostas por Klanphumusri (2010), alcançando uma melhor distribuição de tensão de tração ao longo do corpo de prova, e encontrar uma geometria adequada em formato de halter que fosse viável sua confecção mediante as ferramentas disponíveis para o torno do laboratório de estruturas da PUC-Rio.

4.1 Modelagem do corpo de prova

Klanphumusri (2010) propôs o uso de CPs em formato *dog bone* com diâmetros de extremidade de 100 mm e comprimento total de 240 mm. A redução das dimensões do *dog bone* buscou obter um melhoramento do campo de tração no corpo de prova de sienogranitos e uma maior praticidade de confecção das amostras em laboratórios, pois além de diminuir os custos com torno, o volume necessário de rocha para uma campanha experimental torna-se muito inferior àquele com a geometria de Klanphumusri em 2010.

Mediante as dificuldades apresentadas para tornear amostras em *dog bone* no laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio, tornou-se necessário a modelagem numérica de uma geometria que fosse executável com as ferramentas diamantadas disponíveis. Corpos de prova em formato de halter, com redução da seção intermediária, foram analisados.

Variou-se a geometria das amostras e uma simulação das aplicações de cargas de tração conforme o ensaio CTC, foi efetuada. Todos os modelos processados buscaram ter um campo de tensão de tração uniformemente distribuído

por intervalos, com valores mínimos nas extremidades de aplicação das cargas e valores máximos no comprimento médio do corpo de prova. Os modelos também objetivaram reduzir a zona crítica de distribuição de tensão cisalhante próxima à extremidade de início da área torneada. Os resultados da análise determinaram a geometria ideal em formato *dog bone* e uma geometria adequada em formato de halter para obtenção da resistência à tração (Figura 4.1 e Figura 4.2).



Figura 4.1 - Dimensões em milímetros da geometria em *dog bone* encontrada por meio do *software* Abaqus.

Figura 4.2 - Dimensões em milímetros da geometria em halter encontrada por meio do *software* Abaqus.

As análises foram realizadas considerando simetria dos eixos e assumindo que a rocha é isotrópica e apresenta comportamento linearmente elástico. Assumiuse módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (v) de 55,35 GPa e 0,32 repectivamente. As Figura 4.3 e Figura 4.4 apresentam a malha de elementos finitos com limites e condições de carregamento para os modelos.





Figura 4.3 - Modelo da malha indicando as condições de contorno e o carregamento aplicado para o *dog bone*.

Figura 4.4 - Modelo da malha indicando as condições de contorno e o carregamento aplicado para o halter.

7,5mm 12,5mm

4.2 Resultados

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 apresentam a distribuição de tensão de tração ao longo do *dog bone* com as dimensões de Klanphumusri (2010) e da geometria proposta (Figura 4.1), respectivamente. É possível verificar que a ruptura do corpo de prova ocorre sob tração na altura do comprimento médio para as duas geometrias. No entanto, há uma maior uniformidade da distribuição da tensão de tração no modelo proposto, pois o campo de tração na altura do comprimento médio está totalmente submetido à mesma faixa de tensão. Quando há uma distribuição não uniforme de tensões na seção transversal, espera-se uma ruptura iniciada de forma irregular nas bordas críticas.



Figura 4.5 - Distribuição de tensão de tração no CP - Geometria Klanphumusri (2010).



Figura 4.6 - Distribuição de tensão de tração - Geometria proposta para o formato dog bone.

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 apresentam a distribuição de tensão cisalhante ao longo do *dog bone* com as dimensões de Klanphumusri (2010) e da geometria proposta (Figura 4.1), respectivamente. É possível verificar que há uma ausência de tensão cisalhante no centro da amostra e uma concentração nas extremidades onde ocorre a aplicação das cargas para as duas geometrias.



Figura 4.7 - Distribuição de tensão cisalhante no CP - Geometria Klanphumusri (2010).



Figura 4.8 - Distribuição de tensão cisalhante - Geometria proposta para o formato dog bone.

Foi visto que, durante a alternância de geometrias, a distribuição de tensões ao longo do comprimento das peças cilíndricas torneadas seguia uma constância, com isso, outros modelos foram analisados para investigar se um menor comprimento das amostras poderia ser usado para considerar as sugestões da relação entre 2,5 a 3,0 de comprimento/diâmetro da ASTM (2008a). Mantendo o diâmetro de 75 mm e diminuindo o comprimento do corpo de prova, os resultados não se mostraram favoráveis, apresentando influência na distribuição de tensões na parte angular das bordas.

Como os mecanismos de iniciação de fissuras são diferentes para os ensaios de tração direta convencional e o método investigado neste estudo, a relação de 2,13 entre comprimento/diâmetro foi considerada aceitável. A ISRM (2007) recomenda o uso de um diâmetro mínimo para os corpos de prova de ensaios de resistência à tração direta, sendo sugerido um diâmetro dez vezes maior que o maior tamanho de grão da rocha.

As distribuições de tensões de tração ao longo do comprimento e da seção transversal da amostra foram plotadas na Figura 4.9 e na Figura 4.10.



Figura 4.9 - Distribuição de tração ao longo do comprimento do dog bone.



Figura 4.10 - Distribuição de tração ao longo da seção média do dog bone.

A Figura 4.11 apresenta a distribuição de tensão de tração ao longo do halter com as dimensões da Figura 4.2. É possível verificar que a ruptura do corpo de prova, assim como no *dog bone*, ocorre sob tração na altura do comprimento médio, onde o campo de tração nesta região está totalmente submetido a mesma faixa de tensão.



Figura 4.11 - Distribuição de tensão de tração - Geometria proposta para o formato de halter.

A Figura 4.12 apresenta a distribuição de tensão cisalhante ao longo halter com as dimensões Figura 4.2. É possível verificar que há uma ausência de tensão cisalhante no centro da amostra e uma concentração nas extremidades onde ocorre a aplicação das cargas e na seção reduzida do corpo de prova. Logo, os modelos previram a ruptura por tensão de tração no centro do corpo de prova, antes que ele rompa por cisalhamento na extremidade ou no início da redução de seção.



Figura 4.12 - Distribuição de tensão cisalhante - Geometria proposta para o formato de halter.

A Figura 4.13 e a Figura 4.14 apresentam a distribuição do fator de intendidade de tensão ao longo do *dog bone* com as dimensões da geometria proposta (Figura 4.1) e ao londo do halter com as dimensões da Figura 4.2, respectivamente. É possível verificar que as componentes estão mais alinhadas e paralelas na geometria em *dog bone*, apontando para uma menor concentração de tensão na redução do diâmtero.



Figura 4.13 – Tensor de tensões para a geometria em formato de *dog bone*.



Figura 4.14 - Tensor de tensões para a geometria em formato de halter.

Conclui-se que através da análise numérica, os corpos de prova com as geometrias apresentadas na Figura 4.1, em formato *dog bone*, e na Figura 4.2, em formato de halter, romperão no centro por tensão sob tração. Os resultados apresentaram tensão de tração pura e uniforme no comprimento médio da amostra ao ser ensaiada sob carga de tração direta. A geometria em formato de *dog bone* é ideal para ser usada no conversor de carga compressão-tração (CTC) por melhor distribuir as tensões nas extremidades do corpo de prova.

Materiais e Métodos

Neste capítulo estão apresentados de forma detalhada os materiais utilizados para a realização da pesquisa e as etapas experimentais, discriminando as normas técnicas seguidas e os equipamentos envolvidos.

50

5.1 Materiais

A pesquisa se desenvolveu em sienogranitos de Cachoeiro de Itapemirim, estado do Espírito Santo, retirados à um raio de 30 Km a partir da sede deste munícipio. As amostras de rocha foram obtidas por meio de duas amostragens. Na primeira, quatro blocos com dimensões aproximadas de 40x20x20 cm foram doados pela pós-graduação de geotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV) (Figura 5.1), e na segunda, buscou-se sete blocos extraídos com dimensões aproximadas de 40x20x15 cm, do mesmo local que Jaques (2019), uma pedreira localizada no munícipio de Cachoeira de Itapemirim, cujo nome e localização não foram mencionados nos trabalhos a pedido dos proprietários (Figura 5.2).



Figura 5.1 - Blocos de sienogranitos doados pela UFV



Figura 5.2 - Blocos de rocha extraídos na pedreira de Cachoriro de Itapemirim -ES

Foram utilizadas amostras de rocha sã que se enquadram no perfil de intemperismo W1, conforme a classificação e descrição de maciços rochosos da ISRM (1978) apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Enquadramento do sienogranito quanto aos níveis de intemperismo.

| Termo | Descrição | GI (Grau de intemperismo) |
|---------------------------------|---|----------------------------------|
| SÃO | Nenhum sinal visível de alteração da matriz; em escala macro as descontinuidades não apresentam descoloração, porém ao microscópio observa-se leve descoloração de biotita. | W1 |
| LEVEMENTE INTEMPERIZADO | Macroscopicamente observa-se descoloração por toda a matriz da rocha e sinais de alteração de feldspatos e biotitas. Esta última apresenta sinais de oxidação. As descontinuidades apresentam descoloração | W2 |
| MODERADAMENT E INTEMPERIZADO | Menos da metade da matriz da rocha está decomposta e, ou, desintegrada à condição de solo. No maciço ocorre rocha sã e materiais muito descoloridos que, juntos, formam um arcabouço descontínuo, heterogêneo e com corestones. | W3 |

| MUITO INTEMPERIZADO | Mais da metade da matriz da rocha está decomposta, alterada, porém não na condição de solos. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo, heterogêneo e com corestones. | W4 |
|--------------------------------|--|----|
| COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO | Toda a matriz da rocha está decomposta mas nem toda ela desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço está, em grande parte, preservada. | W5 |
| SOLO RESIDUAL | Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e da matriz da rocha está destruída. Há grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado. | W6 |

Na rocha sã (classe I), os cristais se mostram preservados, com pequena alteração de biotita para clorita. Algumas microfissuras se fazem presentes, o que é esperado para amostras provenientes de pedreira, onde se usam diversos tipos de desmonte, além do próprio ataque intempérico que já existe naturalmente (Braga, 2020).

Na amostragem 1 (blocos doados pela UFV) as rochas foram provenientes de taludes de corte no entorno da pedreira, com distribuição horizontal e vertical heterogênea dos perfis de intemperismo, conforme apresentado na Figura 5.3. Observa-se nos taludes de corte do local transições abruptas dos níveis de intemperismo com a também presença de camada de solo residual variando a espessura horizontalmente. O material de preenchimento das juntas se mostrou, de acordo com Jaques (2019), ora muito alterado (solo residual) ora fragmentado (possíveis detritos rolados em função do corte do talude).



Figura 5.3 - Aspecto geral do talude de corte

Na amostragem 2 as rochas foram provenientes do material de rejeito da extração de sienogranitos na pedreira. Blocos de rocha com dimensões variadas são destinados para fabricação de pedras brutas com destino à utilização em calçamentos popularmente conhecidos como "pé de moleque". Os materiais da pesquisa foram extraídos desse rejeito pelos funcionários da pedreira, assegurados de que foram provenientes de um mesmo maciço rochoso (Figura 5.4).



Figura 5.4 - Corte dos blocos de sienogranitos na pedreira.

Após serem coletados, os blocos foram transportados de camionete dentro de caixas de madeira com serragem, a fim de evitar o atrito entre eles e consequente surgimento de fissuras. As amostras foram acondicionados no Laboratório de Estruturas da PUC-Rio a fim de cumprir o programa experimental apresentado na Tabela 7.

| Tabela 7 | - Programa | experimental |
|----------|------------|--------------|
|----------|------------|--------------|

| Teste | Equipamentos | Quantidade |
|--------------------------------------|---|------------|
| Índice físico | Dessecador, bomba a vácuo, balança e estufa | 26 |
| Velocidade sônica | Osciloscópio | 9 |
| Martelo de Schmidt | Proceq RockSchmidt | 11 |
| Resistência à compressão uniaxial | Prensa triaxial MTS 815 | 9 |
| Resistência à tração - Brasileiro | Prensa simples MTS 810 | 15 |
| Resistência à tração - CTC | Prensa triaxial MTS 810 | 5 |

5.1.1 Contexto geológico da área

A área de estudo, geomorfologicamente, apresenta diferentes características originadas por eventos tectono-estruturais, tipo litológico e fatores paleoclimáticos. A leste de Cachoeiro de Itapemirim ocorre uma área elevada onde predominam colinas e cristas que evoluíram através da dissecação fluvial de rochas gnáissicas e quartzíticas. A oeste dessa região ocorre um domínio de topografia elevada correspondendo a uma área de predominância de rochas granitóides e gnáissicas com ocorrência de pontões que evoluíram por processos de erosão diferencial e desplacamento concêntricos. Nesta área está localizada a Suíte Intrusiva Santa Angélica, que gera ressaltos topográficos com ocorrência de vales estreitos, fortemente encaixados, e vertentes abruptas, onde ocorrem campos de blocos de rochas e matacões (Vieira, 1997 *apud* Jaques, 2019).



Figura 5.5 - Localização da pedreira de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Fonte: Google earth (2020) e Mapa Geológico do estado do ES (CPRM).

As amostras de estudo foram provenientes de uma região inserida no contexto geotectônico do Orógeno Araçuaí, no domínio da Suíte Intrusiva Santa Angélica e no Complexo Paraíba do Sul, composto por unidades metamórficas como metassedimentos e metavulcanossedimentares de idade neoproterozóica (Vieira e Menezes, 2015), resultado do evento colisional do Brasiliano.

Os blocos foram coletados da Suíte Intrusiva Santa Angélica, caracterizada

como um complexo intrusivo de idade paleozoica, pós-colisional, gerado após o fim do Ciclo Orogênico, compostas por uma grande variedade composicional de rochas intrusivas, desde ácidas até básicas, formadas em ambiente de intra-placa. Estes maciços possuem em comum forma circular a elíptica e são representados por granitos, dioritos, monzonitos, quartzo-monzonitos, gabros e etc.

5.1.2 Descrição macroscópica das rochas

Ao receber batidas do martelo, os sienogranitos apresentaram sons de forma clara, aguda e melodiosa. O brilho dos minerais estava visivelmente preservado (Figura 5.6) e com ausência de descoloração, grãos extremamente embricados e uma matriz rochosa resistente ao golpe do martelo, soltando milimétricas lascas. As amostram apresentaram cor esbranquiçadas a cinzas, holocristalinas, leucocráticas, equigranulares com granulação fina a média. Possuem textura fanerítica, sem aspectos de alteração visíveis, e sem foliação aparente.



Figura 5.6 - Aspecto ao olho nu dos minerais na amostra de rocha

Os sienogranitos são compostos por quartzo incolor, com hábito granular, cristais anédricos e granulação fina (até 1 mm); plagioclásio de cor natural cinza, hábito tabular, cristais subédricos de granulação fina a média, chegando até 2 mm; biotita preta, hábito lamelar, granulação fina, sendo a fase máfica da rocha e feldspato potássico de cor clara, cristais subédricos a euédricos, granulação fina a média, podendo chegar até 4 mm.

5.1.3 Descrição microscópica das rochas

Jaques (2019) e Braga (2020) realizaram análises petrográficas no granito de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Por meio do modal obtido na descrição de lâminas, os autores comprovaram que a rocha de estudo é um sienogranito, baseado no sistema de classificação de Le Matrie et al. (2002). Pela interpretação dos resultados foi possível detalhar os aspectos texturais, conforme apresentado na Tabela 8

| Mineral | (%) | Mineral | (%) |
|--------------|-----|-----------------|-----|
| Quartzo | 17 | Minerais opacos | 1 |
| Plagioclásio | 17 | Zircão | 1 |
| Microclina | 49 | Carbonato | 1 |
| Biotita | 8 | Muscovita | 2 |
| Apatita | 1 | Sericita | 2 |
| Clorita | 1 | | |

Tabela 8 - Modal de composição mineralógica do sienogranito, em %.

De acordo com Jaques (2019), a rocha sã (Figura 5.7) apresenta um maciço composto basicamente por plagioclásio e microclina que estão se alterando para sericita, muscovita e carbonatos (somente cristais de plagioclásio); ocorre algum preenchimento de fraturas e espaços de cristais de plagioclásio e microclina por carbonatos; alguns cristais de feldspato se alteram para sericita e de biotita para clorita; o intemperismo produziu poucas e pequenas fraturas que, por vezes, encontram-se preenchidas por sericita e carbonato.



Figura 5.7- Fotos ao microscópio petrográfico, com aumento de 5 x a nicois cruzado e descruzados do perfil de intemperismo W1. Fonte: Jaques (2019).

Braga (2020) caracteriza a rocha levemente alterada (Figura 5.8) com a mesma composição mineralógica básica, dada por plagioclásio, quartzo, biotita e feldspato potássico (microclina). O plagioclásio, quartzo, biotita e microclina apresentam as mesmas características básicas descritas na rocha sã. Com pequenas diferenças principalmente no mineral de plagioclásio. Os cristais de plagioclásio se apresentam mais atacados pelo intemperismo, alguns intensamente fissurados e alterando para sericita. Cristais de microclina também sofrem mais com a alteração. No geral, o sienogranito levemente alterado apresenta-se um pouco mais fissurado, com os contatos entre os cristais mais realçados, indicando uma maior abertura. Além disso, algumas amostras estão percoladas por óxido de ferro, se concentrando principalmente nas fissuras intragranulares e contato entre os cristais.



Figura 5.8 - Fotos ao microscópio petrográfico, com aumento de 5 x a nicois cruzado e descruzados do perfil de intemperismo W2. Fonte: Jaques (2019).

Contudo, sabe-se que a resistência à tração é mais suscetível a quebra de ligações intergranulares, logo ela tende a ser menor quanto maior for o grau de intemperismo da rocha, pois o surgimento de microfissuras por corrosão sob tensão diminui a capacidade de resistência (Eppes et al. 2018).

5.1.4 Preparação dos corpos de prova

Com os blocos de rocha devidamente enumerados e armazenados no Laboratório de Estruturas da PUC-Rio, a preparação dos corpos de prova pôde ser iniciada. Como primeira etapa, realizou-se a extração das amostras cilíndricas com diâmetros de 54 mm (ensaio de compressão uniaxial e brasileiro) e 75 mm (ensaio de tração direta) através do equipamento de perfuração diamantada da marca Hilti, perfuratriz modelo DD 200, com uso de coroas diamantadas de diâmetros internos de 54 mm e 75 mm (Figura 5.9).



Figura 5.9- Perfuração dos blocos de rocha

Na segunda etapa, os testemunhos obtidos da etapa 1 (Figura 5.10) receberam cortes em sua base e topo a fim de chegarem às dimensões sugeridas pela ISRM de seu respectivo ensaio. Em virtude do diâmetro, foi necessária a utilização de duas serras de bancada. A primeira da marca Arotec, cortadora metalográfica modelo Arocor 80, foi utilizada para o corte de testemunhos com 54 mm de diâmetro (Figura 5.11), e a segunda da marca Coretest, modelo RCSS-415 Radial Core Slab Saw, para os corpos de prova extraídos com 75 mm (Figura 5.12).



Figura 5.10 - Testemunhos de rocha após perfuração



Figura 5.11 - Cortadora metalográfica Arotec



Figura 5.12 – Cortadora Coretest

Na terceira etapa, para os corpos de prova cilíndricos foi realizado o acabamento final dos corpos de prova, faceando topo e base na Retífica Automática para Corpo de Provas da marca Setor Indústria, modelo SET 1000 (Figura 5.13), a fim de garantir que as superfícies estivessem lisas, livres de ondulações e paralelas conforme especificado na ISRM (2007), (Figura 5.14).



Figura 5.13 - Retífica automática de corpos de prova



Figura 5.14 - Corpos de prova retificados

Para os corpos de prova do ensaio de tração direta um torno da marca Nardini, modelo MS 205, usando disco com pontas diamantadas do tipo fresa de rebaixo, com raio na extremidade, foi utilizado para obter o formato de halter estabelecido na modelagem numérica (Figura 5.15). Os CPs possuem diâmetro em ambas as extremidades de 75 mm e comprimento total de 160 mm, o diâmetro da seção intermediária aumenta de 36 mm no centro para 40 mm (Figura 5.16).



Figura 5.15 – Torno e detalhe do disco diamantado.



Figura 5.16 - Corpo de prova em formato de halter.

5.2 Metodologia

5.2.1 Caracterização de índices físicos

Os índices físicos representam propriedades físicas da rocha exclusivamente dependentes da sua composição mineral e da sua estrutura e que são facilmente obtidos a partir de simples ensaios padronizados para quantificar a matriz rochosa. Seu conhecimento é fundamental para a elaboração de projetos de engenharia que interna ou externamente submeterão a rocha à novas condições ambientais, tendo em vista que estas propriedades influenciarão diretamente o seu comportamento mecânico (Jaques, 2019).

Um exemplo da importância de determinação dos índices físicos é a influência significativa da presença de poros no comportamento mecânico do material rochoso, mesmo um pequeno volume de poros pode alterar a resistência do material e aumentar sua deformabilidade.

Caracterizar a rocha com relação aos seus índices físicos significa tentar entender o comportamento da rocha e não do maciço rochoso (onde há interação da rocha com as descontinuidades). Neste sentido, a caracterização dos índices físicos do sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim teve como objetivo obter o peso específico seco (γ_d), a massa específica seca (ρ_d) e a porosidade (n).

Para a realização da caracterização, foi seguido os procedimentos descritos na ISRM (1979b).

Os corpos de prova foram imersos em água deionizada 48 horas antes do início de qualquer procedimento. Utilizou-se um dessecador de 250 mm em plástico e uma bomba de vácuo do modelo 132 da marca Prismatec para saturar os corpos de prova, cuja pressão não ultrapassou 800 Pa (6 torr), com deslocamento de 2,9 m² e 48 lpm (Figura 5.17).



Figura 5.17 - Sistema de saturação dos corpos de prova. Em destaque os CPs imersos em água deionizada.

Para medir as massas submersa, saturada e seca, foi montado um sistema com duas balanças de precisão, ambas da marca Ohaus (Figura 5.18). A primeira, modelo Adventurer Pro AV8101P, com precisão de uma casa decimal, continha um gancho na parte inferior acoplado à ele uma rede em arame confeccionada na PUC-Rio para medir a massa submersa. A segunda foi utilizada para medir as massas saturada e seca, modelo Adventurer ARD110, com precisão de duas casas decimais.



Figura 5.18 - Sistema de balanças para medir os pesos saturados, secos e submersos dos CPs.

Após medir as massas submersa e saturada, os corpos de prova foram colocados na estufa da marca Nova Ética por um período de 24 horas à temperatura de 105°C. Em seguida, foram medidas as massas secas. Com as três medidas obtidas (massa submersa, massa saturada e massa seca), através das equações apresentadas no Apêndice I¹, foi possível encontrar os índices físicos desejados.

5.2.2 Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt)

Utilizou-se o Martelo de Schmidt do tipo L, da marca Proceq (Figura 5.19). Foram realizados ensaios em corpos de prova com formato cilíndrico, diâmetro e altura aproximados de 54mm e 135mm, respectivamente. Realizou-se pelo menos 20 impactos sobre o corpo-de-prova, sempre assegurando que as amostras estivessem bem apoiadas em uma base rígida para não sofrerem interferência de vibrações e ressaltos durante a aplicação do êmbolo do martelo. Além disso, foi respeitado um distanciamento mínimo, de igual diâmetro da cabeça do martelo, entre os pontos de aplicação.



Figura 5.19 - Ensaio esclerométrico. Corpo de prova apoiado em uma base rígida.

¹ Apêndice I traz as equações de índices físicos utilizadas para caracterização das rochas.

O valor do rebote (Q) do martelo é calculado automaticamente a partir do quociente da velocidade de impacto e da velocidade de rebote após o pistão, que é carregado por uma mola, e liberado quando a haste do martelo é pressionada contra a superfície. O equipamento é digital e fornece já corrigido o valor Q em relação à posição em que foi usado o martelo (vertical ou horizontal).

Aydin (2009) sugere três correlações derivadas de estudos de variações de alterações em granitos encontradas na literatura para obter o valor da resistência à compressão uniaxial. Utilizou-se a correlação descrita na Eq. 5.1:

$$UCS = 1,45e^{0,07Q} \tag{5.1}$$

Onde:

UCS – Resistência à compressão uniaxial;

Q – Valor de rebote do martelo de Schmidt.

5.2.3 Ensaio de velocidade de propagação de ondas

O ensaio para determinar a velocidade acústica é um método bastante utilizado para caracterização do material. De acordo com Azevedo e Marques (2002), a velocidade com que uma onda se propaga através da rocha depende exclusivamente de propriedades elásticas e de sua densidade. A estrutura microcristalina do material pode alterar significativamente a velocidade da onda, em particular, as ondas V_p (longitudinais ou compressionais) e V_s (transversais ou de cisalhamento).

As ondas P são chamadas primárias porque são as primeiras que podem ser observadas em um sismograma. Este tipo de onda provoca uma deformação uniaxial na direção de propagação da onda, ou seja, provoca a compressão e a expansão da rocha (Figura 5.20.a). Já as ondas S apresentam velocidades menores que as ondas P e, por isso, seu registro em um sismograma ocorre sempre algum tempo depois do registro da onda P. Neste tipo de onda as partículas vibram em uma direção perpendicular à de propagação da onda (Figura 5.20.b), (Castro, 2013).



Figura 5.20 - Deformações elásticas e movimentos de partículas associadas à passagem de ondas de corpo: (A) onda P e (B) onda S. Fonte: Castro (2013).

A maior ou menor velocidade com que uma onda longitudinal emitida atravessará um sólido tem íntima relação com a sua composição e estrutura. Observa-se na prática do ensaio que a presença de fissuras interfere nas medições das ondas, diminuindo sua velocidade. Portanto, por meio do ensaio de velocidade de propagação de ondas é possível tirar relações de propriedades mecânicas do material como grau de fissuramento, módulo de elasticidade dinâmico e porosidade.

O equipamento utilizado foi o osciloscópio da Tektronix, modelo TDS 3012C (Figura 5.21). A calibração dos transdutores foi realizada a fim de determinar o tempo de trânsito (microssegundos), e assim poder colocá-los nas faces superior e inferior do corpo de prova utilizando melado para obter maior aderência. Conforme pode ser visto na imagem, um suporte metálico foi montado a fim de imprimir um pequeno carregamento na amostra garantindo assim estabilidade do sistema. Os transdutores também foram cuidadosamente alinhados para criar um eixo acústico.



Figura 5.21 - Ensaio de velocidade de onda no osciloscópio.

O ensaio consiste na emissão de ondas em corpos de prova cilíndricos por meio de um cristal piezoelétrico (quartzo ou turmalina) acoplado em uma extremidade da rocha e por um cristal receptor de ondas na outra extremidade. O tempo efetivamente gasto pela onda para percorrer apenas a amostra é igual ao tempo observado no osciloscópio diminuído do tempo do sistema ou tempo de atraso.

O software *Autolab* 6.0, da empresa *New England Research, Inc* (NER), forneceu ao final do ensaio os valores das ondas longitudinais e de duas ondas cisalhantes polarizadas ortogonalmente entre si ($S_1 e S_2$). A dispersão dos valores medidos entre a onda S mais rápida contra a onda S mais lenta resulta na possibilidade de cálculo do grau de anisotropia da rocha, de acordo com a Eq.5.2.

$$\frac{VS_{rápida} - VS_{lenta}}{VS_{média}} x100$$
(5.2)

5.2.4 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial (também conhecido como compressão simples ou compressão não confinada) é um dos principais ensaios de carregamento realizados sobre rochas a fim de identificar a resistência à compressão simples.

67

Atualmente é um dos ensaios mais comuns para determinar os parâmetros de deformabilidade da rocha (Módulo de Young e Coeficiente de Poisson) e devido à sua grande utilização é considerado um parâmetro de caracterização do material.

Conforme apresentado na Figura 5.22, o ensaio consiste basicamente na aplicação de carga compressiva em corpos de prova cilíndricos, que são comprimidos paralelamente ao eixo longitudinal. A ruptura dos corpos de prova geralmente ocorre por fraturas e sob a forma de fratura axial, lascamento, fratura de cisalhamento simples ou múltiplas fraturas.



Figura 5.22 - Representação esquemática do ensaio de compressão simples e da força atuante.

Os ensaios seguiram as especificações da ISRM (1979a). Foram utilizados corpos de prova em formato de cilindro (Figura 5.23), com diâmetro NX (54mm) e altura de 135mm, mantendo a relação de 2,0 a 2,5 entre altura e diâmetro.



Figura 5.23 - Corpos de prova do ensaio de compressão simples.

A fim de evitar a ruptura abrupta e um colapso estrutural violento do corpo de prova, optou-se em utilizar uma máquina de ensaio mais rígida para manter a taxa de deformação constante com a diminuição da reação da amostra. Assim, para execução dos ensaios foi utilizada a máquina universal da marca MTS, modelo 815 com garras hidráulicas e capacidade de carga compressional de 4600 kN (Figura 5.24). A prensa é controlada pelo software MTS TestSuiteTM Multipurpose Elite (MPE) da marca MTS.



Figura 5.24 - Máquina de ensaio MTS 815.

A deformação axial e circunferencial do material foi medida por extensômetros acoplados ao corpo de prova. Para a deformação axial utilizou-se o extensômetro MTS 632.90F-12 e para a deformação circunferencial utilizou-se o extensômetro MTS 632.92H-03.

A aquisição de dados da instrumentação foi realizada pelo software MTS FlexTest (TM) 60, versão 6.0A6388. Força e deslocamento do equipamento foram controlados através do módulo 1, pelo sistema MX-1615B, enquanto os extensômetros foram controlados através do módulo 2, sistema MX440B.

Uma membrana termo-retrátil foi acoplada ao corpo de prova a fim de evitar o estilhaço de rocha ao romper o corpo de prova.



Figura 5.25 - Corpo de prova com extensômetros circunferencial e axial acoplados.

Um conjunto composto pela amostra e os extensômetros axial e circunferencial (Figura 5.25) é colocado no pedestal. A célula de carga foi aproximada do conjunto até encostar-se no cap superior. O controle do ensaio foi feito por deslocamento do extensômetro, de modo a se obter um melhor controle da ruptura dos corpos de prova. Com todos os controles ativados, uma sequência de procedimentos foi instaurada:

 Início do ensaio com controle de deformação axial com taxa de 0,00005 mm/mm/s, até atingir 50 % de ruptura do material;

- Mantendo-se o mesmo controle de deformação axial, fez o

descarregamento até 10% do valor de ruptura;

- Ao atingir o mínimo, nova aplicação do carregamento com manutenção da taxa de deformação axial inicial;

- Ao atingir 60% da ruptura, o controle é alterado para controle circunferencial, com taxa de 0,0015 mm/s, e mantido até a ruptura total do material.

A duração média dos ensaios foi de 12 minutos. A resistência à compressão simples da rocha foi obtida conforme a Eq. 5.3, correspondente à carga axial no momento da ruptura da amostra (P) dividido pela área da amostra (A₀).

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \tag{5.3}$$

Onde:

 σc – Resistência à compressão simples;

P – Força aplicada à amostra durante a ruptura.

Durante o ensaio uniaxial foi realizado a aquisição dos dados de tensão axial, deformação axial e deformação circunferencial ao longo do tempo para determinação dos parâmetros de deformabilidade.



Figura 5.26 – Fendilhamento no corpo de prova rompido após ensaio de compressão simples.

5.2.5 Ensaio indireto de resistência à tração (ens. Brasileiro)

As dificuldades associadas à realização de ensaio direto para determinar a resistência à tração de rochas, consolidaram no meio científico o Ensaio Brasileiro como o método mais popular para determinar de maneira indireta esta propriedade mecânica. O método criado por Carneiro (1943) ganhou abrangência por ser executado em equipamento de ensaio de compressão convencional e usar corpos de prova cilíndricos, de fácil usinagem.

Conforme apresentado na Figura 5.27, o Ensaio Brasileiro consiste na aplicação de um carregamento de compressão diametral através de mordentes nas amostras de rochas, segundo duas geratrizes opostas de sua extensão. Ao carregar o corpo de prova, a rocha torna-se elíptica e, devido a isso, uma tensão de tração surge no meio da amostra. Na ruptura, o material eventualmente se dividirá em duas partes.



Figura 5.27 - Representação esquemática do ensaio brasileiro e da força atuante.

Os ensaios seguiram as especificações da ISRM (1978). Foram utilizados 15 (quinze) corpos de prova em formato de disco (Figura 5.28), com diâmetro mínimo de 54 mm e espessura de 27 mm, sendo o diâmetro pelo menos 10 vezes o maior diâmetro do grão e a relação de 0,50 entre espessura e diâmetro.


Figura 5.28 - Corpos de prova em formato de disco.

Foi utilizada a máquina de ensaios universais da marca MTS, modelo 810 com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN (Figura 5.29). A prensa é controlada pelo software MTS TestSuiteTM Multipurpose Elite (MPE) da marca MTS.



Figura 5.29 - Máquina de ensaio MTS 810.

Dois mordentes curvos de aço, superior e inferior, ligados por dois pinos guias (ISRM 1978) e acrescentados por uma rótula na superfície superior criaram um suporte para receber a amostra e formarem um conjunto de ensaio a ser acoplado no pedestal (Figura 5.30).



Figura 5.30 - Conjunto de ensaio (mordentes, CP e rótula).

A célula de carga foi aproximada do conjunto até encostar-se no cap superior. Uma carga de compressão uniaxial foi aplicada e transmitida a amostra de maneira a comprimí-la diametralmente à uma taxa constante de carregamento de 200 N/s, conforme recomendado pela ISRM (1978). Durante o ensaio foi realizado a aquisição, ao longo do tempo, da carga aplicada (P), assim, por meio deste dado e da área de aplicação da carga, obtém-se a resistência à tração (σ_t) correspondente a carga de ruptura da amostra de acordo com a teoria da elasticidade, conforme a Eq. 5.4:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} = 0,636 \frac{P}{dt} \tag{5.4}$$

Onde:

d – diâmetro do corpo de prova; t – espessura do corpo de prova.

Os ensaios não foram instrumentados, os dados coletados foram do atuador: força axial aplicada, tempo e deslocamento axial. É razoável esperar que sob tensão uniaxial, a fissura se inicie preferencialmente a partir das pontas das microfissuras, seguindo perpendicularmente à direção da tensão de tração principal. Logo, a fratura resultante se propaga em um plano normal para à direção de carregamento (Figura 5.31).



Figura 5.31 - Corpos de prova rompidos após ensaio.

Notabiliza-se que a carga (P) para o cálculo da Eq. 5.4 é referente à primeira fissura, pois rupturas secundárias são produzidas quando o carregamento é mantido, muitas vezes por imperfeições do corpo de prova ou pelas condições de execução do ensaio.

Em síntese, os valores apresentados no ensaio brasileiro não representam fielmente a resistência à tração dos materiais, motivo esse de grandes discussões em seus quase 80 anos de existência. De acordo com Komurlu et al. (2016) a imposição de uma superfície de ruptura nem sempre representará a de menor resistência, entretanto os resultados do Ensaio Brasileiro ainda assim apresentam valores consistentes e em geral, um pouco maiores que os valores de tração direta.

5.2.6 Ensaio CTC (Tração direta)

Conforme apresentado na Figura 5.32, o ensaio consiste basicamente na aplicação de carga compressiva nas placas de extremidade do dispositivo CTC, controladas por uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/min. Devido à disposição do aparato, a carga compressiva é convertida em carga de tração aplicada pelas placas de apoio no corpo de prova. Os resultados são esforços de tração no centro da amostra. Foram ensaiados 5 (cinco) corpos de prova em formato de halter conforme geometria apresentada na seção 4.



Figura 5.32 - Dispositivo CTC.

Foi utilizada a máquina de ensaios universais da marca MTS, modelo 810 com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN. A prensa é controlada pelo software MTS TestSuiteTM Multipurpose Elite (MPE) da marca MTS. Foi medido o deslocamento linear da placa de apoio por meio de um transdutor (LVDT) da marca HBM Typ:WI/5mm.

A duração média dos ensaios foi de 3 (três) minutos. A resistência à tração da rocha foi obtida de forma direta conforme a Eq. 5.5, correspondente à carga axial no momento da ruptura da amostra (P) dividido pela área da seção transversal onde ocorreu a ruptura (A), ou seja, seção intermediária.

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \tag{5.5}$$

Onde:

 σ_t - resistência à tração.

Apresentação e discussão dos resultados

A seguir apresenta-se uma discussão dos resultados obtidos através dos ensaios realizados no sienogranito, conforme metodologias apresentadas na seção 5.2. Optou-se em dividir os resultados em duas etapas de amostragens da campanha experimental, onde a primeira delas se refere às amostras doadas pela UFV, resultantes de 3 (três) blocos de rocha denominados de: B1, B2 e B3. A segunda é referente as amostras coletadas na pedreira de Cachoeiro de Itapemirim-ES em outubro de 2020, resultantes em 5 blocos de rochas denominados de: B4, B5, B6, B7 e B8. Este capítulo está dividido na apresentação dos resultados dos ensaios geomecânicos: propriedades índice e propriedades de resistência.

6.1 Caracterização de índices físicos

No presente trabalho foram determinados a porosidade, massa específica seca e peso específico seco de todos os corpos de prova ensaiados. A metodologia está indicada na seção 5.2.1. Estes três índices físicos definem as relações básicas das rochas, e a Tabela 9 apresenta um resumo com as médias dos resultados obtidos.

| Índices Físicos | Estatística | Amostragem 1 | Amostragem 2 |
|--|-------------|--------------|--------------|
| $ ho_{ m d} (m g/cm^3)^1$ | Média | 2,62 | 2,61 |
| | CV (%) | 0,70 | 0,98 |
| n (%) ² | Média | 1,54 | 0,90 |
| | CV (%) | 25,73 | 15,38 |
| $\gamma_{ m d} ({ m kN/m^3})^3$ | Média | 25,68 | 25,59 |
| | CV (%) | 0,70 | 0,98 |
| ¹ Massa específica seca; ² Porosidade; ³ Peso específico seco | | | |

Tabela 9 - Valores de índices físicos avaliados para o sienogranito.

77

Ações recorrentes durante o tempo geológico resultam na deformação, fissuras e rotura das rochas, como consequência surgem e/ou desenvolvem vazios/defeitos no meio contínuo formado pelos mineirais constituintes da matriz rochosa. Neste trabalho entende-se por vazios a soma dos poros intergranulares, intraganulares e as microfissuras da rocha, sendo os dois primeiros associados à gênese da rocha enquanto o terceiro, além dos processos de gênese, pode advir também da evolução geológico-mecânica do material ao longo do tempo.

A quantidade de vazios é avaliada pela porosidade (n), que é a razão entre o volume de vazios de uma amostra de rocha e o seu volume total. Normalmente expressa em porcentagem, Chiossi (2013) aponta que valores baixos de porosidade encontra-se abaixo dos 5%. O sienogranito por ser caracterizado como rocha ígnea, formada pelo resfriamento do magma ainda dentro da crosta em grandes profundidades, apresentou porosidades baixas, resultados consistentes com a literatura, onde normalmente encontra-se a relação de decrescimo desse índice físico a medida que aumenta-se a profundidade.

Em geral granitos não apresentam altas porosidades, estando abaixo de 1,5% quando não há indícios de sinais de intemperismo. Por ser altamente variável, acredita-se que a variação da porosidade da amostragem 1 para a amostragem 2 tenha ocorrido por se encaixar entre uma possível transição do grau de intemperismo, onde as amostras de rocha doadas pela UFV estariam entre W1 e W2. Logo, as ações intempéricas, mesmo que mínimas, já se mostraram suficientes para aumentar em 67% os valores de porosidade quando comparada às amostras buscadas em Cachoeiro.

A Figura 6.1 apresenta os valores de porosidade encontrados em granitos com perfil de intemperismo W1. Observa-se que independente da localização de extração da amostra, neste e nos demais trabalhos, há uma variação de 19% da porosidade para granitos W1, se mostrando consistente ainda que exposta as rochas com condições de clima e ambiente diferentes.



Figura 6.1 - Médias de valores de porosidade para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos.

A massa específica seca e consequentemente o peso específico seco do sienogranito se mostraram dentro dos resultados encontrados na literatura, conforme indicado na Figura 6.2. O coeficiente de variação do peso específico seco deste e dos demais trabalhos, manteve-se em 2,12%, apontando para um índice físico menos sensível às mudanças de clima e ambiente. Contudo, vale ressaltar que pequenas variações desse índice podem influenciar grandes mudanças na porosidade e em outras propriedades do sienogranito, conforme discutiremos posteriormente.



Figura 6.2 - Médias de valores do peso específico seco para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos.

6.2 Propriedades índices

Algumas propriedades das rochas têm uma importância particular no planeamento, execução e custo dos projetos de engenharia civil. O conhecimento das propriedades índice, que podem ser avaliadas a partir de ensaios em laboratório ou no campo, possibilita a obtenção de uma estimativa inicial do comportamento mecânico da rocha a partir de comparação e ou correlação de seus valores com aqueles das propriedades que governam a resistência e deformabilidade do material.

Amplamente utlizadas, são difundidas na mecânica das rochas devido à facilidade em sua obtenção, fazendo o uso de equipamentos portáteis, de leitura dinâmica, baixo custo e refletindo, mesmo que indiretamente, a estrutura, a composição e a trama da rocha, servindo para quantificar, portanto, sua matriz. Para o sienogranito foram avaliados a velocidade de propagação de ondas e o valor Q do rebote do martelo de Schmidt.

6.2.1 Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt)

O ensaio de esclerometria deve ser realizado em rochas estáveis, de modo que não haja movimentação durante o impacto do martelo. Os ensaios foram realizados em 11 (onze) corpos de prova cilíndricos com o martelo de Schmidt a 90° da superfície da rocha, aproximadamente 30 (trinta) leituras foram realizadas em cada corpo de prova, descartando duas leituras em cada uma das extremidades do espaço amostral, perfazendo assim, um total de 26 (vinte e seis) leituras (Aydin, 2008).

A Tabela 10 apresenta os resultados médios do rebote do martelo (Q) e da resistência à compressão obtidos através da curva da literatura proposta por Aydin (2009). Observa-se por meio de revisão bibliográfica que há uma concordância de resultados com os dados dos ensaios de Jaques (2019) e Braga (2020), autores que também realizaram suas pesquisas no sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim. A boa aproximação se deve ao fato da curva da literatura ter sido calibrada utilizando granitos, que possui os mesmos minerais essenciais da rocha estudada.

| Resistência | Estatística | Amostragem 1 | Amostragem 2 |
|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Qmédio | Média | 57,6 | 56,7 |
| | CV (%) | 5,1 | 4,5 |
| UCS | Média | 83,5 | 77,7 |
| (MPa) | CV (%) | 0,2 | 17,7 |

Tabela 10 - Resultados do ensaio de Martelo de Schimdt.

6.2.2 Ensaio de velocidade de propagação de ondas

Os valores da velocidade de propagação de ondas em rochas tem íntima relação com a sua composição e estrutura, sendo utilizada como uma propriedade índice da mineralogia, microfissuras e poros, consequentemente das propriedades elásticas da matriz rochosa.

Foram realizados 9 (nove) ensaios para a determinação das velocidades de ondas ($V_p \ e \ V_s$), 4 (quatro) referentes à primeiro amostragem da campanha experimental e 5 (cinco) à segunda amostragem. Os corpos de prova ensaiados possuíam formato cilíndrico, e foram preparados para o ensaio de compressão uniaxial, com dimensões aproximadas de 54 mm de diâmetro e 135 mm de comprimento. A Tabela 11 apresenta os valores médios obtidos.

| Onda | Estatística | Amostragem 1 | Amostragem 2 |
|------------------------|-------------|--------------|--------------|
| | Média | 4658,6 | 4728,4 |
| v p (m/s) | CV (%) | 0,2 | 2,2 |
| VS1 (m/s) | Média | 5086,6 | 5013,5 |
| | CV (%) | 0,2 | 5,5 |
| VS2 (m/s) | Média | 5183,6 | 5065,6 |
| | CV (%) | 0,4 | 5,6 |
| Grau de anisotropia | Média | 1,9 | 1,1 |
| (%) | CV (%) | 10,1 | 56,9 |

Tabela 11 - Resultados do ensaio de velocidade de propação de ondas.

Os resultados vão de encontro às médias dos valores de ondas V_p encontrados na literatura para rochas graníticas com grau de intemperismo W1, conforme apresentado na Figura 6.3.



Figura 6.3 - Médias de valores de onda P para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos.

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados de Jaques (2019), observa-se que os valores encontrados da velocidade de onda V_p da amostragem 1 (blocos doados pela UFV) apontam para uma possível transição do grau de intemperismo da rocha, estando muito próximo dos valores das ondas determinadas para as rochas levemente alteradas (Figura 6.4).



Figura 6.4 - Comparação dos resultados obtidos com o de Jaques (2019).

Existe uma relação clara entre a porosidade, o grau de fissuramento e a velocidade de propagação de ondas, apesar de ser considerada pequena, a variação da velocidade no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** corrobora com a a lteração da porosidade relatada na seção 6.2, onde possivelmente a ação leve do intemperismo na matriz rochosa tenha influenciado no aumento de vazios.

O fato de algumas amostras apresentarem variação da velocidade de onda (V_p) ainda que muito baixa, indica a presença de percolação de óxido de ferro, que

lhe dá a cor mais laranja (Figura 6.5). Este óxido de ferro se concentra principalmente nas fissuras e no contato entre os cristais, assim ao invés de espaços vazios nas fissuras ou nos poros, há óxido de ferro, resultando no aumento dos valores da velocidade de propagação de onda longitudinal.



Figura 6.5 - Sienogranito apresentando leve coloração alaranjada a olho nu.

Também foram registradas para cada amostra, duas ondas cisalhantes polarizadas ortogonalmente entre si (chamadas aqui de $S_1 e S_2$). Por meio dos dados coletados foi possível analisar o grau de anisotropia das amostras, ondernando a Vs mais rápida em relação à Vs mais lenta, conforme indicado na seção 5.2.3. A Figura 6.6 representa o diagrama de dispersão dos dados medidos.



Figura 6.6 - Variação da onda S maior em função da onda S menor.

Nota-se que de um modo geral, o grau de anisotropia entre os dados foi menor que 2%, confirmando que os sineogranitos podem ser considerados rochas isotrópicas.

6.3 Propriedades geomecânicas

As propriedades geomecânicas descrevem as variações de resistência e deformação do material rochoso em condições naturais, pelo tempo geológico, e sob solicitação externa, quando o rearranjo do campo de tensões obriga a rocha a uma resposta mecânica em termos de sua capacidade de suporte. Sempre que possível em projetos de engenharia, estas propriedades devem ser analisadas em sua totalidade, abrangendo uma investigação sobre a rocha intacta, as descontinuidades e o maciço rochoso (Jaques, 2019).

Para o sienogranito foram avaliados a resistência à compressão uniaxial, os módulos de deformabilidades e a resistência à tração, pelos métodos direto e indireto, este último configurando-se como principal objetivo da pesquisa.

6.3.1 Ensaio de resistência à compressão uniaxial

Os valores de resistência à compressão uniaxial (σ_c) obtidos em testes padronizados pela ISRM (2007) para o sienogranito, bem como suas variações (número da amostragem e os respectivos módulos de deformabilidade), estão informados na Tabela 12. Foram ensaiados 8 (oito) corpos de prova, sendo 3 (três) da amostragem 1 e 5 (cinco) da amostragem 2.

| Parâmetro | Estatística | Amostragem 1 | Amostragem 2 |
|-----------|-------------|--------------|--------------|
| UCS | Máx | 126,7 | 152,7 |
| | Mín | 94,0 | 142,6 |
| (MPa) | Média | 109,1 | 147,6 |
| | CV (%) | 15,1 | 2,9 |
| E (MPa) | Máx | 53,2 | 61,5 |
| | Mín | 42,3 | 58,7 |
| | Média | 48,7 | 60,6 |
| | CV (%) | 11,8 | 1,8 |
| Poisson | Máx | 0,4 | 0,5 |
| | Mín | 0,4 | 0,3 |
| | Média | 0,4 | 0,4 |
| | CV (%) | 4,2 | 25,4 |

Tabela 12 - Resultados do ensaio de compressão simples.

O comportamento tensão x deformação é classificado por Goodman (1989) a partir do que acontece quando o carregamento aplicado supera a resistência de pico (tensão máxima que uma rocha pode suportar em certas condições de carregamento) do material.

A Figura 6.7 ilustra as curvas tensão x deformação do sienogranito de toda a campanha experimental. De acordo com as curvas, pode-se afirmar que o sienogranito apresenta um comportamento frágil quando está na condição sã, onde a fratura implica em uma perda quase instantânea da resistência da rocha através de um plano sem nenhuma ou com pouca deformação plástica.



Figura 6.7 - Curvas tensão x deformação.

Comparando os resultados obtidos com os dados de Jaques (2019), (Figura 6-8), observa-se que a amostragem 1 apresenta valores de resistência à compressão medianos aos perfis de intemperismo W1 e W2, ressaltando as evidências levantadas neste trabalho de que as amostras de rocha dessa etapa da campanha experimental se encontram em uma fase de transição da classificação do GI.



Figura 6-8 - Comparação dos resultados obtidos com o de Jaques (2019).

Apesar de apresentarem um comportamento muito similar ao de rocha sã, apenas uma capa de alteração da cor do material, em geral provocada pelo óxido de ferro, é suficiente para iniciar a transição do grau de alteração dessas regiões. Como à resistência a compressão uniaxial é fortemente influenciada pelo grau de intemperismo, o decréscimo de 13,5 % da amostragem 2 para a 1 é um forte indicativo da atuação do intemperismo na rocha.

Jaques (2019) aborda que uma das possíveis causas da sensibilidade da resistência à compressão uniaxial para o intemperismo teria relação com a textura da rocha (tamanho dos grãos), nas quais rochas equigranulares (como os sienogranitos) seriam controladas pelos minerais menos resistentes, onde o quartzo (mais resistente) pressionaria os minerais menos resistentes (plagioclásio alterado), fraturando-os e rompendo a matriz rochosa. Uma outra causa seria a presença de microfissuras do material, que apesar do pouco aumento em sua quantidade, tamanho e abertura, seria suficiente para controlar o comportamento mecânico da rocha, que ao sofrer ações intempéricas, perde considerável resistência.

As deformações ortogonais do material ocorrem de modo proporcional no campo elástico, sendo verificada pela razão entre deformação lateral e longitudinal. Essa proporcionalidade recebe o nome de coeficiente de Poisson (v), constante elástica dos materiais que se comportam isotropicamente. O comportamento deformacional dos sienogranitos se mostraram coerentes com os valores registrados na literatura para outros granitos, demonstrando que o coeficiente de Poisson é muito sensível às deformações axiais quando comparadas com as deformações circunferenciais, que são muito baixas.

6.3.2 Ensaio de resistência à tração indireta (brasileiro)

Os valores de resistência à tração (σ_t) obtidos em ensaios brasileiros padronizados pela ISRM (1978), para o sienogranito, bem como suas variações e indicação da amostragem estão informados na Tabela 13. Foram ensaiados 15 (quinze) corpos de prova, sendo 5 (cinco) da amostragem 1 e 10 (dez) da amostragem 2.

| Resistência | Estatística | Amostragem 1 | Amostragem 2 |
|----------------------------|-------------|--------------|--------------|
| σt (MPa) | Máx | 11,6 | 15,1 |
| | Mín | 5,9 | 7,9 |
| | Média | 8,8 | 9,9 |
| | CV (%) | 22,9 | 21,6 |
| $\sigma_t / \sigma_c (\%)$ | média | 8,0 | 6,7 |

Tabela 13 - Resultados do ensaio brasileiro.

A relação σ_t/σ_c para o sienogranito variou aproximadamente 8% para a amostragem 1 e 6,7% para a amostragem 2, demonstrando que, apesar de haver na engenharia uma expectativa empírica de que a resistência à tração corresponda, em média, a aproximadamente 10,0 % da resistência à compressão uniaxial, é recomendável que este valor de consenso seja utilizado apenas para estimativa inicial da propriedade, não devendo este dado ser adotado como parâmetro de projeto, tendo em vista a sua considerável variação. Considerando apenas a média dos valores para a relação σ_t/σ_c , o sienogranito se aproxima deste valor médio, com o valor de σ_t correspondendo a, aproximadamente, 8,77MPa e 9,87MPa de σ_c .

Ademais, os valores da resistência à tração obtidos pelo ensaio brasileiro vão de encontro aos dados de Jaques (2019) e Braga (2020) que tambem ensaiaram o sienogranito de Cachoeiro, o que corrobora para a validade dos dados e a boa execução dos ensaios. Observa-se que essa propriedade pouco sensibiliza para a transição do grau de intemperismo da amostragem 1 quando comparados os valores entre os resultados das diferentes amostragens, apresentando resistências à tração próximas.

6.3.3 Ensaio de resistência à tração direta (CTC)

Os valores de resistência a tração (σ_t) obtidos por meio do ensaio de tração direta (CTC) para o sienogranito, bem como suas variações e indicação da amostragem da campanha experimental estão informados na Tabela 14. Foram ensaiados 5 (cinco) corpos de prova, sendo 2 (dois) da amostragem 1 e 3 (três) da amostragem 2.

| Resistência | Estatística | Amostragem 1 | Amostragem 2 |
|-------------|-------------|--------------|--------------|
| σt (MPa) | Máx | 6,38 | 8,56 |
| | Mín | 5,78 | 8,31 |
| | Média | 6,08 | 8,44 |
| | CV (%) | 7,05 | 1,92 |

Tabela 14 - Resultados do ensaio de tração direta.

Conforme esperado, a resistência à tração obtida pelo ensaio CTC apresentou valores menores que aqueles obtidas pelo ensaio brasileiro. Observa-se que a resistência à tração direta, apesar de pouco sensível, indicou a transição do grau de intemperismo entre as amostragens, apresentando uma variação pequena entre a amostragem 1 e a amostragem 2.

A Figura 6.9 apresenta as deformações obtidas por meio de um LVDT apoiado na placa de extremidade. Observa-se que os corpos de prova da amostragem 2 apresentaram uma maior resistência, logo, foi necessário um maior deslocamento das placas para rompe-los. Os resultados se mostraram em consonância com o esperado.



Figura 6.9 - Gráfico tensão de tração x deformação

As Figura 6.10, Figura 6.11, Figura 6.12 apresentam o plano de ruptura no centro dos corpos de prova, corroborando com o previsto na modelagem numérica.



Figura 6.10 - Corpos de prova bipartidos após ensaio.





Figura 6.11 - Ruptura no centro do CP - Amostragem 1.

Figura 6.12 - Ruptura no centro do CP - Amostragem 2.

O corpo de prova denominado B7CP05 da amostragem 2, foi o primeiro a ser ensaiado e a superfície de ruptura está representada na Figura 6.13. Observa-se que o elemento rompeu por tração na extremidade de redução do diâmetro do halter ao invés de romper na seção intermediária do corpo de prova, conforme indicado pela modelagem numérica.



Figura 6.13 - Ruptura inesperada do CP05.

Na tentativa de entender o que pode ter ocorrido, duas hipóteses foram levantadas após uma análise do plano de ruptura. A primeira seria o não paralelismo de ambos os lados do sistema (CTC + célula de carga + Corpo de prova) ocasionado durante sua montagem. Foi observado, após o primeiro ensaio, que o mínimo ajuste das porcas fornece excentricidade as placas de apoio à medida que elas são apertadas. Logo, um carregamento excêntrico foi aplicado ao corpo de prova o levando a ruptura. A segunda hipótese seria a presença de uma microfissura, que apesar do pouco aumento em sua quantidade, tamanho e abertura, seria suficiente para controlar o comportamento mecânico da rocha. Vale ressaltar que uma hipótese não anula a outra.

A excentricidade ocasionada pelo ajuste das porcas é justificada pela impossibilidade de utilizar os blocos de transferência de carga no sistema devido a uma falha na confecção do diâmetro do furo do mesmo, que foi entregue pela oficina maior que o desejado. Logo, estes blocos foram substituídos no sistema por um conjunto de porcas + arruelas (Figura 6.14).



Porcas substituindo o bloco de transferência de < carga

> Porcas substituindo o bloco de transferência de carga

Figura 6.14- Indicação no sistema da substituição dos blocos pelas porcas.

Ademais, os resultados da resistência à tração obtidos pelo ensaio direto vão de encontro ao esperado, apresentando valores inferiores aos ensaios indiretos por não induzir um plano de ruptura na amostra.

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

7.1 Conclusões

A determinação da resistência à tração das rochas de maneira direta utilizando o conversor de carga compressão-tração (CTC) apresentou resultados consistentes com o esperado pela teoria de mecânica de rochas.

92

O equipamento de tração foi projetado, desenhado e desenvolvido satisfatoriamente, possibilitando a realização de ensaios de tração a fim de se obter o parâmetro de resistência de forma mais realista. Com os resultados obtidos e apresentados nesta pesquisa, conclui-se que o equipamento está validado para ser utilizado no estudo da resistência à tração direta em rochas.

A Tabela 15 apresenta a comparação dos resultados das resistências à tração obtidas pelos ensaios brasileiros e tração direta utilizando o CTC. Observa-se que a resistência fornecida pelo conversor de carga é menor que aquela obtida pelo método indireto, corroborando com a teoria de que os ensaios indiretos, apesar de fácil execução, distanciam os resultados da verdadeira resistência à tração da rocha.

| Ensaio | Amostragem 1 | Amostragem 2 |
|-----------------|----------------------|--------------------|
| Brasileiro | 8,77 | 9,87 |
| СТС | 6,08 | 8,44 |
| Os valores apro | esentados são as méd | ias dos resultados |
| b Î | as amostragens em N | /Pa. |

Tabela 15 - Comparação dos resultados de resistência à tração.

Atenta-se ao fato de que o aparato recebe influência do operador no momento de ajuste do corpo de prova. Cabe ao operador centralizar a amostra no conversor de carga e garantir o paralelismo do equipamento ao ser acoplado na máquina de ensaio universal.

Apesar de depender de dispositivos manuais, os resultados obtidos pelos ensaios de tração direta são de grande relevância para a mecânica de rochas,

possibilitando aos laboratórios a adaptar o dispositivo de fácil confecção e manuseio nas máquinas universais de compressão.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuros trabalhos, recomenda-se:

- Realizar ensaios de tração direta no equipamento CTC em outros tipos de rochas (sedimentares, metamórficas e etc.) e com diferentes graus de intemperismo;
- Comparar os resultados dos ensaios de CTC com outros métodos (Ensaio de Anel, flexão de quatro pontos, Luong, Push-Pull, etc.) a fim de estabelecer possíveis correlações;
- Determinar os parâmetros elásticos da rocha quando estão submetidos a uma carga de tração pura;
- Estender a utilização do equipamento para determinar a tenacidade à fratura.
- 5) Determinar a resistência à tração em corpos de prova com formato *dog bone*, conforme geometria sugerida nesse trabalho.

Referências Bibliográficas

AADNOY, B., LOOYEH, R. Mecânica de rochas aplicada: perfuração e projetos de poços. 1ª ed. Rio de Janeiro, editora Elsevier. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2936-08: Standard test method for direct tensile strength of intact rock core specimens. ASTM International, West Conshohocken, 2008a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5873: Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method. West Conshohocken, 2014.

AYDIN, A. **The ISRM Suggested Methods for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 43, p. 627-634, 2009.

AZEVEDO, I. C. D., MARQUES, E. A. G. **Introdução à Mecânica das Rochas**. Editora UFV. p. 363. 2002.

BLÜMEL, M. New laboratory test techniques for rock mechanical tests (Improved Procedures for Laboratory Rock testing). DGGT (ed.): Proceedings of the EUROCK 2000 Symposium, Aachen. p. 27.-31. 2000.

BRACE, W.F. **Brittle Fracture of Rocks**. Proceedings of the International Conference on State of Stress in the Earth's Crust. Elsevier, New York. p. 111–174. 1964.

BRAGA, L. F. Q. F. **Estudo de alteração de rochas graníticas por ciclos de temperatura**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. p.87. 2020.

BRIŠEVAC, Z., KUJUNDŽI'C, T., CAJI'C, S. Current Cognition of Rock Tensile Strength Testing By Brazilian Test. The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. p. 101–114. 2015.

CACCIARI, P. P. A coupled **TRS-DFN-DEM** approach to assess the role of rock foliation on the stability of shallow tunnels in discontinuous rock masses. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo. P. 202. 2019.

CARNEIRO, F.L.L.B. A new method to determine the tensile strength of concrete. Proc. of the 5th meeting of the Brazilian Association for Technical Rules. p. 126–129. 1943.

CARREÑO, L. V. G., OCHOA, C. A., FUENTES, H. A., JIMÉNEZ, J. M. C., CARRILLO, Z. H. C. Estimacion de propiedades mecanicas de roca utilizando

inteligencia artificial. Disponível em <https://go-gale.ez370.periodicos.capes. gov.br/ps/i.do?id=GALE%7CA337815618&v=2.1&u=capes&it=r&p=AONE&s w=w> Acessado em: novembro de 2020.

CASTRO, A. P. O. Estudo do comportamento elástico apresentado por diferentes tipos de rochas sedimentares. Monografia. Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2013.

CHIOSSI, N. Geologia de Engenharia. 3ª Ed. Editora: Oficina de textos. 2013.

DAI, F., XIA, K.W., TANG, L. **Rate dependence of the flexural tensile strength of Laurentian granite**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. v. 47. p. 469–475. 2010.

DERMIDAG, S., TUFEKI, K., SENGÜN, N., EFE, T., ALTINDAG, R. **Determination of the Direct Tensile Strength of Granite Rock by Using a New Dumbbell Shape and its Relationship with Brazilian Tensile Strength.** IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. v. 21. 2019.

EFE, T., SENGÜN, N., DEMIRDAG, S., TUFEKCI, K., ALTINDAG, R. Effect of **Sample Dimension on Three and Four Points Bending Tests of Fine Crystalline Marble and its Relationship with Direct Tensile Strength**. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. v. 21. 2019.

EFIMOV, V. P. Determination of Tensile Strength by the Measured Rock Bending Strength. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. v. 47, n. 5. p. 580-586. 2011.

EPPES, M. C., HANCOCK, G. S., CHEN, X., AREY, J., DEWERS, T., HUETTENMOSER, S. KIESSLING, F., MOSER, N., TANNU, B., WEISERBS, WHITTEN, J. Rates of subcritical cracking and long-term rock erosion. The geological society of america. v. 46. 2018.

ERARSLAN, N., WILLIAMS, D.J. Investigating the Effect of Cyclic Loading on the Indirect Tensile Strength of Rocks. Rock Mech Rock Eng. v. 45. p. 327–340. 2012.

FAIRHURST, C. On the Validity of the Brazilian Test for Brittle Materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. v. 1. p. 535–546. 1964.

GOODMAN, R.E. Introduction to Rock Mechanics. John Wiley and Sons, New York. 1989.

GORSKI, P. B., Tensile Testing Apparatus. 1993. U.S. Patent Nº 5.193,396.

GRIFFITH, AA. The fenomena of rupture and flow in solids. Philosophical transactions of the Royal Society of London. v. 221, n. 2. p. 98-163. 1920.

HOBBS, D. W. An assessment of a technique for determining the tensile

strength of rock. British Journal of Applied Physics. v. 16. p. 259. 1965.

HOEK, E. Fracture of anisotropic rock. J S Afr Inst Min Metall. v. 64, n.10. p. 501–518. 1964.

HOEK, E., BROWN, T. **Practical estimates of rock mass strength**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. v. 34, n. 8. p. 1165–1186. 1997.

HOEK, E., BROWN, T. **The Hoek e Brown failure criterion and GSI**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Ed. 2018.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. **Suggested methods for determining tensile strength of rock materials**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. v. 15, n. 3. p. 99–103. 1978.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability or rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 16, n. 2, p. 135-140, 1979a.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. 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, v. 16, n. 2, p. 141-156, 1979b.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Ankara, Turkey, p. 628. 2007.

JAQUES, D. S. Caracterização morfológica, mineralógica e geomecânica de perfis de intemperismo de rochas graníticas em clima tropical. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. p. 130. 2019.

JAEGER, J. C., COOK, N. W. Fundamentals of Rock Mechanic. Chapman and Hall. Londres. p. 169-173. 1979.

KLANPHUMEESRI, S. **Direct Tension Testing Of Rock Specimens**. Master of Engineering Thesis. Suranaree University of Technology. 2010.

KOMURLU, E., KESIMAL, A., DEMIR, S. An Experimental and Numerical Study on Determination of Indirect (Splitting) Tensile Strength of Rocks under Various Load Apparatus. Can Geo Journal. v. 53. p. 360–372. 2016.

LE MAITRE, R. W (ed.). **Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 236 p.

LI, D., WONG, L. N. Y. The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. Rock Mech Rock Eng. v. 46. p. 269–

287.2013.

LUONG, M. P., **Direct Tensile and Direct Shear Strengths of Fontainebleau Sandstone**. Key Questions in Rock Mechanics, P. A. Cundall, R. L. Sterling, and A. M. Starfield, Eds., Balkema, Rotterdam. Holanda. p. 237–246. 1988.

PERRAS, M. A., DIEDERICHS, M. S. A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing. Geotech Geol Eng. v. 32. p. 525–546. 2014.

PLINNINGER, J.R., THOMEE, B., WOLSKI, K. The modified test (MTT): evaluation and testing experiences with a new and simple direct tension test. Proc. the EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium. p. 545-548. 2004.

SJÖBERG, J. Análise de large scale rock slopes. Tese de Doutorado. Lulea University of Technology, Divisão of Rock Mechanics, Lulea, Suécia. 1999.

TUFEKI, K., DERMIDAG, S., SENGÜN, N., AKBAY, D. A new design test apparatus for determining direct tensile strength of rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future – Ulusay et al. (Eds). Londres. 2016.

UNLU T, YILMAZ O. A new method developed for determining direct tensile strength of intact rock Materials. ROCKMEC'2014-XIth Regional Rock Mechanics Symposium, p. 97–106. Afyonkarahisar, Turquia. 2014

UNLU T, YILMAZ O. Development of a New Push–Pull Direct Tensile Strength Testing Apparatus (PPTA). Geotechnical Testing Journal. v. 37. 2014.

VIEIRA V. S. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Cachoeiro do Itapemirim, Folha SF.24-V-A. Escala 1:250.000. Brasília: DNPM/CPRM, p. 99. 1997.

VIEIRA V. S.; MENEZES, R.G. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais. Belo Horizonte: CPRM, p. 289. 2015.

ZACARIAS, C. M. **Classificação de maciços rochosos da mina do córrego do meio aplicada às operações de perfuração**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2003.

ZHAO, Z. A New Direct Tension Machine and its Application. Advanced Materials Research. v. 250-253. p. 1448-1451. 2011

Apêndice I – Equações de Índices Físicos

Determinados peso saturado, peso submerso e peso seco das amostras de rochas, por meio das equações abaixo é possível determinar os principais índices físicos do material.

Apêndice II

$$M_w = M_{sat} - M_s \tag{A.1}$$

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \tag{A.2}$$

$$V_{\nu} = V_{w} = \frac{M_{w}}{\rho_{w}} \tag{A.3}$$

$$V_s = V - V_v \tag{A.4}$$

$$n = \frac{V_v}{V} x 100 \tag{A.5}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{A.6}$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \tag{A.7}$$

$$\gamma_d = \rho_d g \tag{A.8}$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_w \rho_w}{V} \tag{A.9}$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat}g \tag{A.10}$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \tag{A.11}$$

$$\gamma_s = \rho_s g \tag{A.12}$$

Onde:

| M_w – massa de vazios; |
|---|
| M_{sat} – massa saturada; |
| M_s – massa dos constituintes sólidos; |
| <i>M_{sub}</i> – massa submersa; |
| V – volume total; |
| $V_w = V_v$ – volume de vazios; |
| ρ_w – massa específica da água; |
| V_s – volume dos constituintes sólidos; |
| n - porosidade; |
| e – índice de vazios; |
| ρ_d – massa específica seca; |
| γ_d – peso específico seco; |
| g – aceleração da gravidade; |
| ρ_{sat} – massa específica saturada; |
| γ_{sat} – peso específico saturado; |
| ρ_s – massa específica dos constituintes sólidos; |
| γ_s – peso específico dos constituintes sólidos. |