

Jéssica Santana Pereira Nunes

**Estudo experimental da anisotropia da tenacidade à fratura
no modo I de rochas graníticas**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadora: Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Rio de Janeiro
Julho de 2020



Jéssica Santana Pereira Nunes

**Estudo experimental da anisotropia da tenacidade à fratura
no modo I de rochas graníticas**

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

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/PUC-Rio

Antônio Claudio Soares

Escritório de Desenvolvimento/CTC/PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 julho de 2020

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

Jéssica Santana Pereira Nunes

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 2015. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro no semestre 2017.1, atuando na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental e Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Pereira Nunes, Jéssica Santana

Estudo experimental da anisotropia da tenacidade à fratura no modo I de rochas graníticas / Jéssica Santana Pereira Nunes; orientadora: Raquel Quadros Velloso. – 2020.

90 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Rocha granítica. 3. Tenacidade à fratura modo I. 4. Teste CCNBD. 5. Anisotropia. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

A Deus e aos meus amados pais: Tavane e Victor

Agradecimentos

À minha orientadora Raquel Quadros Velloso pelo apoio e orientação dada nesta dissertação, pelo suporte financeiro que viabilizou esta pesquisa e pelos estímulos e paciência durante este processo.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

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

À PUC-Rio pela oportunidade de cursar o Mestrado nesta excelente e renomada instituição que certamente abrirá portas para meu futuro profissional.

Agradeço a Deus pois Ele é meu refúgio e fortaleza e certamente cuidou de mim e me conduziu em todo esse processo do mestrado.

Aos meus pais por sempre me apoiarem, pela educação e amor que me deram. Vocês me deram o maior presente que pude ter que é o dom da vida. Agradeço a minha mãe, Tavane, por sempre se dispor a me ajudar, pela preocupação, pelo amor e educação. Agradeço ao meu pai, Victor, pelos conselhos, apoio e investimento na minha educação.

Aos meus queridos familiares: vovó Gilda por entender minhas ausências, meu irmão Eduardo por sua presença de todos os dias, meus primos por sempre me divertirem com a pureza da criança: Beca e Biel e Léa de Andrade por ser uma ótima madastra e amiga.

À Daniel Jaques, Lázaro, Eduardo Gomes e Márcio Leão pois todos estes ajudaram a fornecer os blocos e amostras para este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas da PUC-Rio: ao Rogério por toda paciência que teve comigo, por me ajudar no preparo das amostras diversas vezes e por estar sempre disposto a prestar seu serviço aos alunos da melhor maneira possível, as vezes ficando até depois de seu expediente para nos auxiliar. Agradeço ao Euclides pela paciência durante o uso da máquina do laboratório, pelas explicações dadas por ele e por seu bom humor de sempre que nos fazia relaxar quando estávamos tensos com nossas pesquisas. Agradeço ao Marques por sempre emprestar de boa vontade seu precioso esquadro de centro que foi essencial para marcação das direções de corte das amostras.

À Shoraia por suas dicas, boa vontade, por ter sido tão prestativa e pela paciência em ajudar com questões práticas no laboratório. Ao Márcio do departamento de Mecânica pelos serviços prestados e por ser tão prestativo.

Aos meus colegas Bruno Pires, Luiz Felipe Braga e Rogério pela ajuda na execução dos furos nos sienogranitos estudados.

Aos meus amigos da PUC por toda ajuda nos estudos durante o primeiro semestre: Miguel Villalobos, Erland González, Mariana Cardoso, Karl Igor, meu muito obrigada, sem vocês não teria chegado aqui e sem vocês teria sido muito mais difícil todo esse processo de estudo e aprendizado da Engenharia Civil. Desejo muito sucesso a todos.

Agradeço pelos diversos momentos de diversão, troca de ideias e experiências com meus amigos: Marcela Strongylis, Thamiris Abdala, Kevin Calvay, Celso Salvador, Miguel Villalobos, Paul Pinedo, Jhonatan Edwar, Rebeca Fernandes, Lizardo Glorioso, Raul Cordova, Erland González e Judith Ramos.

Agradeço em especial pela parceria durante o mestrado das minhas queridas amigas: Thamiris Abdala e Marcela Strongylis.

Agradeço ao meu amigo Kevin Calvay por toda ajuda, parceria e paciência durante a execução da dissertação e por tudo que me ensinou sobre a vida. Sem sua ajuda, não sei se teria conseguido, muito obrigada!

Agradeço pela ajuda na reta final durante a quarentena dos meus queridos amigos: Miguel Villalobos, Raul Cordova, Freddy Robles, Felipe Marcolino, Bárbara Guimarães, Paula Brandão, Victor Mothé, Léa de Andrade, Lorena Abrantes, Luiz Felipe Braga, Bruno Pires, Cristina Kei e Mabi Elu.

Aos meus amigos de fora da PUC que estiveram ao meu lado ao longo desse processo e sempre torceram por mim: Ester Dantas, Paula Brandão, Mabi Elu, Dirlane Silva, Mishell Pavon, Carmen Lúcia e Daniel Carvalho.

À querida Mara Pessanha que me ensinou muito sobre a vida durante nossas sessões, levo comigo muitos aprendizados adquiridos com ela.

Aos colegas do Seja mais: Leandro, Márcia e Bia por terem me proporcionado a oportunidade de ensinar durante as monitorias de matemática.

Ao atendimento das maravilhosas psicólogas e pedagogas da PUC que em momentos de maior estresse e ansiedade me ajudaram a lidar com a dissertação: Fernanda, Elisa, Cláudia e Hellen.

Pela presença dos meus queridos amigos e familiares no dia da minha defesa, totalizando cerca de 35 pessoas, pela agradável surpresa da presença dos queridos missionários Michel Cardinot e Marceu Nantal e pelos vídeos e fotos feitos pela minha amiga Rebeca Fernandes para que eu pudesse me recordar daquele momento tão especial.

Agradeço pelas orações das minhas amigas da célula Joy.

Resumo

Santana Pereira Nunes, Jéssica; Quadros Velloso, Raquel. **Estudo experimental da anisotropia da tenacidade à fratura no modo I de rochas graníticas**. Rio de Janeiro, 2020. 90 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Grande parte dos minerais e conseqüentemente das rochas são anisotrópicas, ou seja, possuem propriedades físicas que mudam com a direção. Neste sentido, este trabalho visa a obtenção de um melhor entendimento do papel da anisotropia nas propriedades das rochas. Para isto, o mesmo pretende avaliar a tenacidade à fratura do sienogranito que foi obtido em uma pedreira da cidade de Cachoeiro de Itapemirim no Espírito Santo. A tenacidade consiste em uma propriedade mecânica intrínseca das rochas, sendo indicativa da resistência à iniciação ou propagação de uma fratura e indica a quantidade de energia que a rocha absorve até que frature. Visando avaliar a anisotropia da tenacidade à fratura no modo I foi realizado o ensaio sugerido pela ISRM (1995), denominado CCNBD (Cracked Chevron Notched Brazilian Disc). Foram testadas vinte e cinco (25) amostras sendo o ensaio realizado em quatro (4) direções diferentes: corrida, contra, trocho e direção aleatória (inclinada). Além deste ensaio foi também realizado o ensaio de tração indireta (ensaio Brasileiro), para fins de caracterização da amostra, sendo este realizado com um total de quinze (15) amostras em três (3) direções diferentes: corrida, contra e trocho. Os ensaios e a preparação de amostras foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM-DEC) e a obtenção dos índices físicos foi processada no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA), ambos localizados na PUC-Rio. Analisando os resultados obtidos para a tenacidade à fratura das rochas graníticas nas diferentes direções de corte foi possível constatar pouca anisotropia na rocha estudada.

Palavras-chave

Rocha granítica, tenacidade à fratura modo I, teste CCNBD, anisotropia

Abstract

Santana Pereira Nunes, Jéssica; Quadros Velloso, Raquel. (Advisor) **Experimental study of anisotropy of mode-I fracture toughness in granitic rock.** Rio de Janeiro, 2020. 90 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A considerable amount of minerals and, subsequently, rocks, are anisotropic, and as such, possess physical properties that vary with direction. Considering this, the present study seeks to obtain a better understanding of the role of anisotropy in the properties of rocks. In this regard, it intends to evaluate the fracture toughness of a syenogranite, obtained from a quarry in the city of Cachoeiro de Itapemirim in the state of Espírito Santo. Fracture toughness consists of an intrinsic mechanical property of rocks and indicates the resistance to the initiation or propagation of a fracture as well as the amount of energy the rock absorbs until its fracture. In order to evaluate mode I fracture toughness anisotropy, the Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) test was conducted, following ISRM (1995). Twenty-five (25) samples were tested considering four (4) different orientations: short transverse, arrester, divider and a random direction (inclined). In addition, the indirect tensile strength test (Brazilian test) was also conducted, in order to characterize the samples. The test was performed on fifteen (15) samples and in three (3) different orientations: short transverse, arrester and divider. The tests and sample preparation were carried out at the Structural and Materials Laboratory (LEM-DEC), and the physical properties were obtained at the Geotechnical and Environmental Laboratory (LGMA), both located at PUC-Rio. Analyzing the results obtained for fracture toughness of granitic rocks in different cutting directions, little anisotropy was found in the studied rock.

Keywords

Granitic rock, mode-I fracture toughness, CCNBD test, anisotropy.

Sumário

Agradecimentos	5
1 Introdução	17
1.1. Objetivos	18
1.2. Justificativa	18
1.3. Estrutura da dissertação	19
2 Revisão bibliográfica	20
2.1. Considerações iniciais	20
2.1.1 Princípios da Mecânica da fratura aplicada a rochas	20
2.1.2 Modo de propagação	20
2.2. Tenacidade	23
2.2.1 Dimensões do entalhe e geometria do corpo de prova	26
2.2.2 Anisotropia do material	27
2.3. Método Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD)	29
2.4. Definições superfícies de corte	33
3 Materiais e métodos	36
3.1. Material experimental	36
3.1.1 Contexto geológico da área	40
3.1.2 Descrição macroscópica das rochas	40
3.1.3 Preparação dos corpos de prova	41
3.2. Metodologia	44
3.2.1 Análise petrográfica	45
3.2.2 Caracterização de índices físicos	46
3.2.3 Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt)	48
3.2.4 Ensaio indireto de resistência à tração (Ensaio Brasileiro)	52
3.2.5 Ensaio de tenacidade à fratura (CCNBD)	57
4 Apresentação e análise dos resultados	65

4.1. Análise Petrográfica	65
4.2. Caracterização de índices físicos	67
4.3. Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt)	70
4.4. Ensaio indireto de resistência à tração (Ensaio Brasileiro)	73
4.5. Ensaio de tenacidade à fratura (CCNBD)	79
5 Conclusões e sugestões	85
5.1. Conclusões	85
5.2. Sugestões	86
6 Referências bibliográficas	87

Lista de figuras

Figura 2.1– Modos de propagação (Albuquerque, 1998)	21
Figura 2.2 – Modos mistos de propagação (Alvarez, 2004).	22
Figura 2.3 – Corpo de prova “CB” (Albuquerque, 1998).	24
Figura 2.4 – Geometria do corpo de prova “CB” (Albuquerque, 1998).	25
Figura 2.5 - Superfícies de corte (Bolonini, 2011).	34
Figura 3.1 - Bloco 01, 02, 03, 04 e 05 com suas direções de fluxo respectivamente	37
Figura 3.2 - Aspecto geral do perfil 1, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019).	37
Figura 3.3 - Aspecto geral do perfil 2, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019)	38
Figura 3.4 - Aspecto geral do perfil 3, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019).	38
Figura 3.5 - Aspecto geral do perfil 4, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019).	39
Figura 3.6 - Aspecto geral do perfil 5, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019).	39
Figura 3.7 - Extração de testemunhos utilizando a perfuratriz da marca Hilti, modelo DD 200	42
Figura 3.8 - Cortadora metalográfica, utilizada para cortar corpos de prova com 54 mm de diâmetro.....	43
Figura 3.9 - Serra de bancada e suporte bipartido para testemunhos com 75 mm de diâmetro	43
Figura 3.10 - Retífica automática de corpos de prova utilizada para facear topo e base de todos os corpos de prova	44

Figura 3.11 - Suporte bipartido confeccionado para auxiliar o faceamento dos corpos de prova CCNBD	44
Figura 3.12 - Microscópio ótico para análise petrográfica	45
Figura 3.13 – a) Dessecador e bomba de vácuo utilizado. b) Sistema montado para medir massa submersa e massa saturada.....	47
Figura 3.14 - Normalização dos valores de recuperação em ângulos selecionados no martelo de Schmidt do tipo L (Aydin, 2008).	50
Figura 3.15 - Martelo de Schmidt, tipo L da marca Proceq	51
Figura 3.16 - Ensaio de Tração Direta (Farias et al., 2018).	52
Figura 3.17 - Representação esquemática da força atuante no ensaio Brasileiro	53
Figura 3.18 - Corpo de prova com tração atuante na região central do diâmetro carregado (Azevedo e Marques, 2002).	53
Figura 3.19 - Ensaio para determinação da resistência à tração indireta (Ensaio Brasileiro).	55
Figura 3.20 – Clip-gauge no corpo de prova	55
Figura 3.21 - Clip-gauge na máquina de ensaio.....	56
Figura 3.22 - Procedimento realizado para a confecção do entalhe chevron para ensaios CCNBD.	58
Figura 3.23 – Geometria corpo de prova ensaio tenacidade à fratura (ISRM, 1995).	59
Figura 3.24 - Faixa geométrica válida para os parâmetros α_1 e $\alpha\beta$ (ISRM, 1978).	61
Figura 3.25 - Ensaio para determinação da tenacidade à fratura do tipo CCNBD	63
Figura 4.1 - Lâmina petrográfica da rocha sã (nicóis descruzados).	66
Figura 4.2 - Lâmina petrográfica da rocha sã (nicóis cruzados).....	66
Figura 4.3 - Médias e faixas de valores de γ_d para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos (Modificado de Jaques, 2019)	69
Figura 4.4 - Variação do índice Q em função do bloco.....	71
Figura 4.5 - Médias e faixas de valores de Q para o sienogranito e outras rochas graníticas (Modificado de Jaques, 2019).	72

Figura 4.6 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção corrida.	73
Figura 4.7 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção contra.	73
Figura 4.8 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção trocho.	74
Figura 4.9 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção inclinada.....	74
Figura 4.10 - Resultados dos ensaios Brasileiros na direção corrida	75
Figura 4.11- Resultados dos ensaios Brasileiros na direção contra	75
Figura 4.12 - Resultados dos ensaios Brasileiros na direção trocho	76
Figura 4.13 – Corpo de prova dividido após ruptura	78
Figura 4.14 - Corpo de prova após ruptura com trinca nítida	78
Figura 4.15 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção corrida	79
Figura 4.16 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção contra	80
Figura 4.17 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção trocho	80
Figura 4.18 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção inclinada.....	81
Figura 4.19 - Escopo da geometria válida para corpos de prova CCNBD.	81
Figura 4.20 - Resultado do ensaio CCNBD em função da direção das superfícies de corte	83

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Tenacidade à Fratura modo I para Corpos de Prova "CCNBD" em MPa $(m)^{\frac{1}{2}}$	31
Tabela 2.2 - Taxas de carregamento e velocidades de ensaios.	31
Tabela 2.3 – Resultado dos ensaios de Erarslan (2018).....	32
Tabela 3.1 - Testes da matriz para simples reconhecimento e descrição do sienogranito quanto à sua coerência (Jaques, 2019).....	41
Tabela 3.2 - Dimensões geométricas padrão do ensaio CCNBD (ISRM, 1995).....	60
Tabela 4.1 - Resumo da caracterização dos índices físicos para as amostras do ensaio Brasileiro	67
Tabela 4.2 - Resumo da caracterização dos índices físicos para as amostras CCNBD.....	68
Tabela 4.3 – Resultados dos valores de porosidade obtidos no presente trabalho, em Almeida (1999) e em Jaques (2019).	70
Tabela 4.4 - Resultados martelo de Schmidt.....	71
Tabela 4.5 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio Brasileiro	76
Tabela 4.6 - Resultados médios dos ensaios Brasileiros obtidos no presente trabalho, em Almeida (1999) e em Jaques (2019).	77
Tabela 4.7 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio CCNBD.....	82
Tabela 4.8 - Resultados médios dos ensaios CCNBD obtidos no presente trabalho e em Almeida (2006).	83
Tabela 4.9 - Resultados médios dos ensaios CCNBD obtidos no presente trabalho e relação $\frac{K_{IC\text{ médio}}}{K_{IC\text{ trocho}}}$	84

Lista de Símbolos e Abreviações

ISRM	<i>International Society of Rock Mechanics</i>
CCNBD	Cracked Chevron Notched Brazilian Disc
CB	Chevron Bending
SR	Short Rod
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
MTS	Máquina de teste hidráulica rígida
UCS	Resistência à compressão uniaxial
K_{IC}	Tenacidade à fratura no modo I de carregamento
θ	Ângulo de inclinação da fissura
CV	Coefficiente de variação
M_w	Massa de vazios
M_{sat}	Massa saturada
M_s	Massa dos constituintes sólidos
M_{sub}	Massa submersa
V	Volume total
V_v	Volume de vazios
V_w	Volume de água
n	Porosidade
ρ_d	Massa específica seca
γ_d	Peso específico seco
g	Aceleração da gravidade
h_c	Profundidade de corte projetada
B	Espessura do corpo de prova
D	Diâmetro do corpo de prova
t	Espessura do corpo de prova medido no centro
R_s	Raio da serra usada para fazer o entalhe no corpo de prova
D_s	Diâmetro da serra usada para fazer o entalhe no corpo de prova
σ_t	Resistência à tração

$P_{m\acute{a}x}$	Força máxima aplicada
$\gamma_{m\acute{i}n}^*$	Valor crítico (mínimo) do fator de intensidade de tensão adimensional
α_0, α_1 e α_B	Dimensões básicas para os parâmetros geométricos do CCNBD
Q	Valor de rebote do martelo de Schmidt

1

Introdução

A mecânica da fratura foi definida por Kanninen (1985) como um tópico da Engenharia fundamentado na Mecânica Aplicada e na Ciência dos Materiais. A importância da mecânica da fratura pode ser notada devido à ampla aplicação na

Engenharia Civil, tais como em operações de desmontes por explosivos, fraturamento hidráulico, fragmentação mecânica, análise da estabilidade de taludes, geofísica, mecânica de terremotos e na energia de extração geotermal, dentre outros.

O principal ponto de estudo da Mecânica da Fratura é o comportamento do material quando contém uma fissura, ou seja, uma trinca. O processo de ruptura do material ocorre pelo crescimento de uma fissura e o uso cada vez mais generalizado da mecânica da fratura se deve ao fato de que esta permite quantificar de uma forma bastante precisa os níveis admissíveis em que um material com trincas pode operar, sem gerar uma possível falha ou ruptura.

A tenacidade à fratura é considerada uma propriedade intrínseca importante da rocha, que indica a magnitude da resistência à fratura ou a capacidade da rocha para resistir à propagação da trinca (Ouchterlony, 1980; Schmidt, 1976). Este parâmetro é o principal da mecânica à fratura.

Diversas metodologias foram sugeridas para determinar a tenacidade à fratura das rochas. Em 1988, a ISRM (*International society of rock mechanics*) propôs duas metodologias para o modo I de propagação: Chevron Bend (CB) e Short Rod (SR). Em 1995, a mesma entidade apresentou o ensaio Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD). Os ensaios sugeridos em 1988 têm uma série de desvantagens práticas tais como, por exemplo, taxas de carregamento muito baixas para iniciar a propagação de fraturas e necessidade de razoáveis quantidades de material rochoso intacto para elaboração dos corpos de prova (CP), além de complicações na sua confecção (Fowell & Xu, 1994).

Portanto, esta pesquisa analisa a anisotropia em rochas graníticas utilizando a metodologia CCNBD, visto que esse ensaio é o mais favorável dos sugeridos pela ISRM para determinação do modo I de propagação da fissura.

1.1.

Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a anisotropia da tenacidade à fratura no modo I de um sienogranito. Para tanto, dentre os ensaios de tenacidade existentes, foi executado o do tipo CCNBD (Cracked Circunferential Notched Brazilian Disc), pois este é o mais específico dentre os sugeridos pela ISRM na determinação do modo I de propagação de fissuras.

Para fins de caracterização das amostras foram obtidas algumas propriedades físicas e mecânicas da rocha, sendo abordadas neste trabalho a porosidade, a massa específica seca, o peso específico seco, a tenacidade à fratura no modo I e a resistência à tração.

1.2.

Justificativa

A maioria dos minerais e, conseqüentemente, as rochas em geral, são anisotrópicas, ou seja, possuem propriedades físicas que variam conforme a direção. Segundo Archanjo (2003), mesmo os minerais isotrópicos apresentam pequenas variações na composição química, imperfeições na rede cristalina ou inclusões, que levam a algum tipo de anisotropia, ainda que de fraca intensidade.

O presente estudo apresenta resultados de ensaios de tenacidade à fratura e resistência à tração em diferentes direções de corte, visando ampliar o entendimento das propriedades anisotrópicas das rochas. Segundo Nasseri e Mohanty (2007), alguns estudiosos propuseram correlações entre a anisotropia do granito e diferentes propriedades mecânicas, dentre elas a resistência à tração/compressão, sendo pertinente verificar se existe uma relação entre a resistência à tração e a anisotropia. Na área de desmonte de rochas o conhecimento da direção de corte é amplamente utilizado para melhorar a eficiência do corte da pedra. Este conhecimento é uma boa alternativa para evitar o alto custo das técnicas convencionais de Engenharia Civil atualmente adotadas para trabalhos de estabilização. Nos processos de desmonte a principal característica estudada é a energia necessária para a criação de uma nova superfície e a mesma pode ser medida por ensaios mecânicos. Desta forma, ao estudar o valor da resistência à tração e da

tenacidade à fratura nas diferentes direções de corte é possível obter conhecimento para que os desmontes sejam feitos na direção que requer menos energia para detonação.

No meio acadêmico não foi estudado no nível desejado o comportamento mecânico observado nos processos de fragmentação em rochas graníticas, o que torna a presente pesquisa de elevado interesse científico.

1.3.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, sendo neste primeiro capítulo apresentado o tema fundamental do trabalho, os objetivos, a justificativa do estudo e a localização da área de estudo.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, na qual são abordados tópicos referentes aos principais assuntos da pesquisa.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados no programa experimental, sendo descritos os equipamentos, *setups* e normas utilizadas para a realização dos ensaios.

O capítulo 4 consiste na apresentação e análise dos resultados desenvolvidos na pesquisa.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

O capítulo 6 contém a bibliografia utilizada.

2

Revisão bibliográfica

2.1.

Considerações iniciais

2.1.1 Princípios da Mecânica da fratura aplicada a rochas

O desenvolvimento da Mecânica da fratura é um ramo relativamente novo da ciência dos materiais, que busca combinar estados de tensão e dimensões da fratura, assim como determinar quando a fratura ocorre. O estudo da Mecânica da fratura aplicada às rochas teve início nos anos 1960, sendo definida por Kanninen (1985) como um tópico da Engenharia fundamentado na Mecânica Aplicada e na Ciência dos Materiais. Essa área de conhecimento visa estudar a formação e propagação intencional e controlada de fissuras, além de permitir a previsão da velocidade de crescimento das mesmas. A tenacidade à fratura é o parâmetro básico na Mecânica da fratura e descreve os efeitos de fissuras no material.

Segundo Kaklis *et al.* (2015), a Mecânica da fratura tem sido amplamente utilizada em jateamento, fraturamento hidráulico, fragmentação mecânica, geofísica, terremotos e muitos outros campos da ciência e tecnologia. Este conhecimento pode ser aplicado em muitas áreas da engenharia, incluindo Engenharia Civil e de Mineração, onde perfuração, escavação, explosão e corte de rochas estão intimamente relacionados com a resistência, estabilidade e fratura de materiais e com as estruturas de rochas (Kaklis *et al.*, 2015).

Guo, Aziz e Schmidt (1992) constataram que os princípios da Mecânica da fratura são importantes ferramentas na Engenharia de Rochas, especialmente pelos problemas relacionados à propagação de fissuras, tais como no corte de rocha.

2.1.2 Modo de propagação

Existem três modos principais de propagação das fissuras, sendo os mesmos diferenciados, segundo Ferreira e Hanai (2007), pelos deslocamentos relativos das faces da fissura, produzidos por solicitações externas. Segundo Alvarez (2004), os modos de propagação são caracterizados em função das tensões aplicadas e dos consequentes deslocamentos observados na extremidade da trinca. Segundo

Albuquerque (1998), o modo I de propagação (modo de abertura) ocorre quando as tensões de tração são aplicadas normalmente ao plano da trinca e a mesma é propagada no próprio plano, sendo que o deslocamento da superfície ocorre no plano normal à trinca. Além disso, como pode ser observado na Figura 2.1, os deslocamentos das superfícies são simétricos aos planos xy e xz (Alvarez, 2004). O modo II (modo de escorregamento ou de cisalhamento plano) é o modo deslizante, devido ao cisalhamento, no qual atuam tensões cisalhantes paralelas ao eixo da trinca. Neste modo, as superfícies onde se encontram a trinca se movem uma sobre a outra em um sentido perpendicular à frente da trinca (Alvarez, 2004). No caso, os deslocamentos das superfícies da fratura são simétricos em relação ao plano xy e simétrico-oblíquos em relação ao plano xz e estão contidos no próprio plano. No modo III (modo de rasgamento ou de cisalhamento antiplano) atuam tensões de cisalhamento na direção normal ao maior eixo da trinca. Nesta situação, ocorre o deslizamento de uma superfície da trinca sobre outra superfície no sentido paralelo à frente da trinca, devido ao cisalhamento, ou seja, os deslocamentos das superfícies da fratura são simétrico-oblíquos em relação aos planos xz e xy .

Quanto ao deslocamento, o modo I se desloca apenas no eixo y , o modo II se desloca no eixo x e o modo III se desloca no eixo z , como pode ser observado na Figura 2.1.

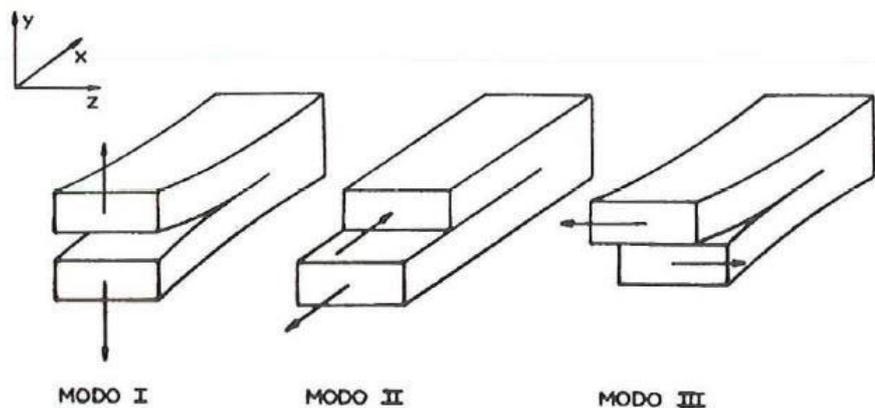


Figura 2.1– Modos de propagação (Albuquerque, 1998).

Em alguns casos, pode ocorrer mais de um modo de propagação, havendo uma combinação, caracterizando os denominados “modos mistos”, que podem ser observados na Figura 2.2. Estas combinações permitem descrever os casos tridimensionais mais gerais de tensões e de campo de deformações locais na ponta da trinca.

A combinação (ou interação) de modos e a intensidade de cada um deles determinará, dentre outros aspectos, a trajetória da fissura até o colapso (Ferreira e Hanai, 2007).

Na prática, o modo I é o mais fácil de se analisar, de produzir experimentalmente os corpos de prova e de se executar no laboratório (Alvarez, 2004).

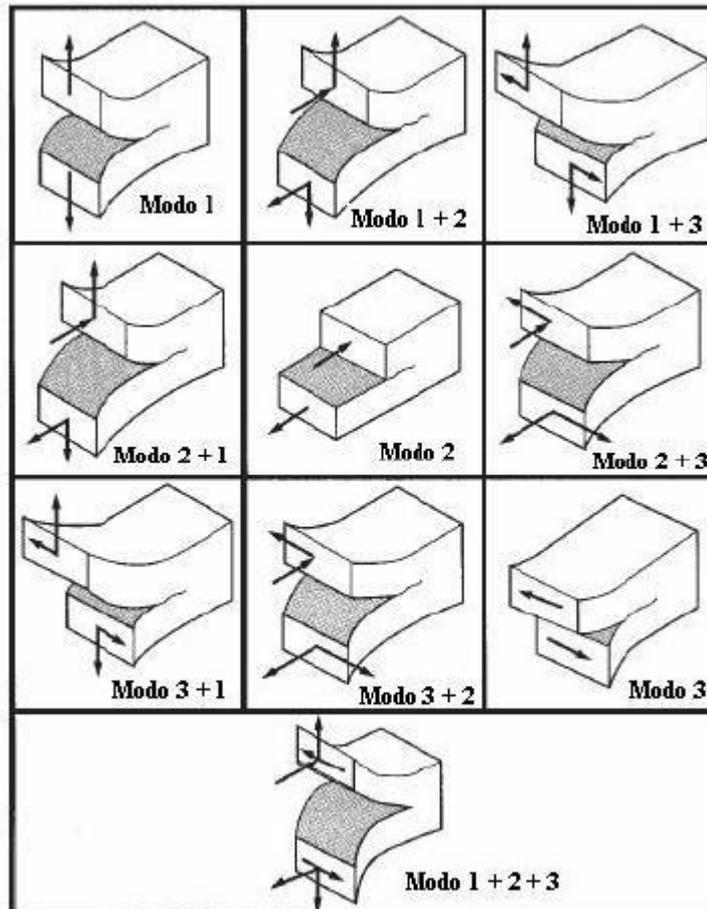


Figura 2.2 – Modos mistos de propagação (Alvarez, 2004).

2.2.

Tenacidade

A tenacidade à fratura consiste numa propriedade mecânica intrínseca da rocha, sendo um parâmetro básico e uma das mais importantes características avaliadas na mecânica das rochas (Prikryl, 2001). Pode ser definida como a resistência à propagação de trincas e é utilizada em diversas áreas, tais como análise de estabilidade, fraturamento hidráulico, fragmentação de rocha por jateamento e sismologia de terremotos (Nasseri e Mohanty, 2007).

Esta propriedade permite medir o trabalho necessário para uma trinca se propagar. Segundo Medina (2015), a tenacidade cresce com a área total sob a curva tensão *versus* deformação, a qual é uma indicação da quantidade de trabalho por unidade de volume que pode ser realizado no material, sem causar a fratura.

Além disso, a tenacidade à fratura está mais intimamente relacionada com a presença de microfissuras e correspondente orientação, do que com relação ao tamanho e orientação do grão.

Segundo Prikryl (2001), esta importante propriedade da rocha é influenciada por diversos fatores, tais como anisotropia do material, efeito de um pré fendilhamento, composição mineral, densidade, porosidade, teor de umidade, estado de alteração devido a intempéries, forma e tamanho das amostras de teste e condições de teste, tais como temperatura e taxa de deformação.

Segundo Schmidt (1976), os primeiros ensaios para avaliar a tenacidade à fratura em rochas foram baseados nas padronizações de materiais metálicos da ASTM-E399, visto que esses métodos apresentaram resultados plausíveis para rochas com comportamento frágil (granitos e calcários, dentre outras). Contudo, as amostras utilizadas nos ensaios tinham geometrias pouco razoáveis e eram necessárias quantidades consideráveis de corpos de prova. Outrossim, segundo Almeida (1999), os ensaios de tenacidade diferem dos ensaios realizados em mecânica, pelo fato de requererem corpos de prova com fissuras bem definidas.

Em 1988, a ISRM constituiu um grupo de trabalho coordenado por F. Ouchterlony e divulgou uma metodologia para determinar a tenacidade à fratura nos ensaios denominados “chevron bend – CB” e “short rod – SR” que, assim como os ensaios posteriormente propostos, podem ser realizados em dois níveis (I ou II).

No nível I, o ensaio é realizado sob controle de carga, enquanto que no nível II é realizado sobre controle de deslocamento da abertura da boca da trinca. A fim de obter as medidas necessárias para cada tipo de nível, o ensaio é realizado utilizando LVDTs para medir o deslocamento no ponto de carregamento e extensômetros do tipo *clip-gauge* para medir a abertura da boca da trinca.

O corpo de prova do ensaio CB consiste de um cilindro longo com um entalhe central em "*chevron*" paralelo ao menor eixo do cilindro. O corpo de prova será submetido a flexão em três pontos, conforme Figura 2.3.

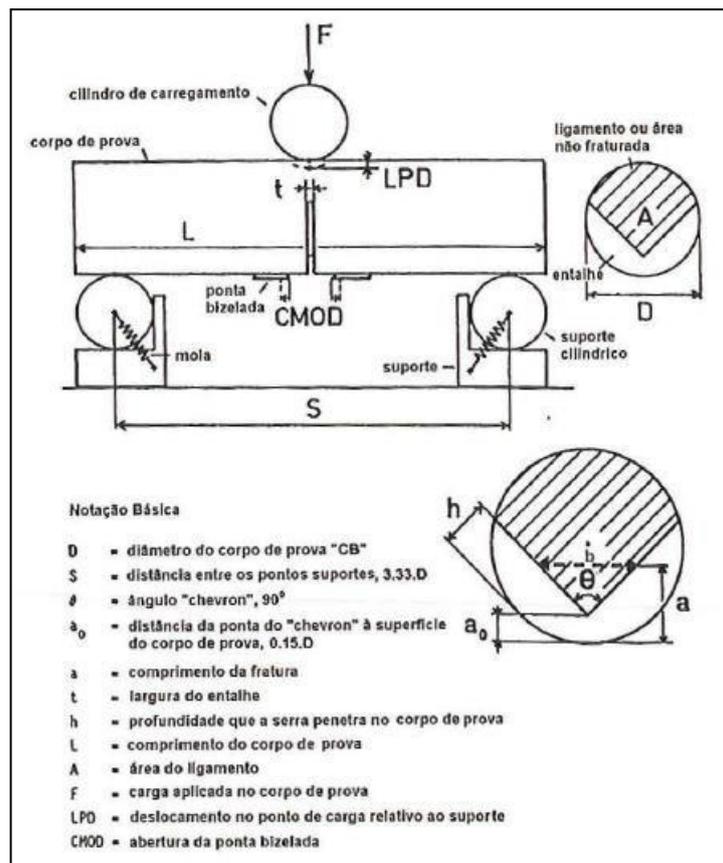


Figura 2.3 – Corpo de prova "CB" (Albuquerque, 1998).

O corpo de prova do ensaio SR consiste de um cilindro curto com entalhe centralizado em forma de "*chevron*" paralelo ao maior eixo (Figura 2.4). Este corpo de prova será submetido a tração através de duas hastes encaixadas em duas placas coladas ao corpo de prova, conforme Figura 2.4.

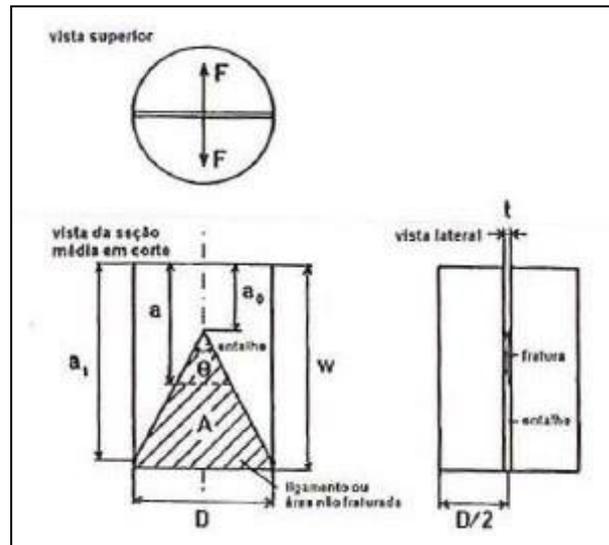


Figura 2.4 – Geometria do corpo de prova “CB” (Albuquerque, 1998).

No caso de materiais frágeis e elástico lineares, a tenacidade à fratura é avaliada na carga máxima, correspondendo ao nível I. Ensaios realizados neste nível são de rápida execução, sendo realizados em no máximo dez segundos. Já no nível II, é possível avaliar a não linearidade e a não elasticidade do material, sendo, portanto, um ensaio mais demorado. Na realização do ensaio no nível II há registro de carga e deslocamento, com valores de carga mais precisos e, conseqüentemente, o ensaio é mais lento, mais caro e de execução mais difícil. Neste nível é possível verificar a carga real que leva o corpo de prova ao ponto de avaliação da tenacidade à fratura.

Em 1995, um terceiro ensaio denominado “Cracked Chevron Notched Brazilian Disc - CCNBD” é proposto pela ISRM, com avaliação da tenacidade à fratura. Neste ensaio, para carregamento no modo puro I, a direção da trinca deve ser exatamente ao longo do diâmetro de carregamento.

Além das metodologias da ISRM, foram desenvolvidas diversas outras metodologias de ensaio, sendo que cada alternativa apresentava preocupação em minimizar ou avaliar o efeito de um determinado parâmetro. Mais recentemente, foram iniciados estudos concentrados na determinação da tenacidade à fratura de rochas brandas.

Segundo Albuquerque (1998), não é possível comparar resultados de diferentes tipos de ensaio e no presente trabalho será utilizada a metodologia denominada como ensaio CCNBD.

O resultado do estudo de Nasser e Mohanty (2007) demonstra claramente a dificuldade de atribuir um único valor à tenacidade da rocha sem o conhecimento das características microestruturais. Isto porque a tenacidade à fratura é grandemente influenciada pelas propriedades microestruturais da rocha. Essas características influenciam o parâmetro da tenacidade à fratura por meio do comprimento das microfissuras e respectivo alinhamento, distribuição de tamanho de grão e os limites de grão-grão, o que contribui para a falta de homogeneidade. Todavia, isso não ocorre caso as rochas sejam perfeitamente isotrópicas e homogêneas.

Outra importante propriedade do material é o fator de intensidade de tensão K , que representa, fundamentalmente, a medida de intensidade de tensão na extremidade da fissura, variando em função da carga aplicada, da geometria da amostra e da fissura.

Quanto à dimensão da concentração crítica de tensões, caracterizada pela tenacidade à fratura, é configurada por K_{Ic} , sendo aplicável na extremidade de uma fissura e demandada para iniciar ou propagar a fratura.

Em adição, K_{Ic} é também definido como uma propriedade do material e consiste na tenacidade à fratura no modo I de carregamento. Conceitualmente, K_{Ic} é uma constante e não deve variar com fatores tais como dimensões do corpo, geometria da fissura, taxa de carregamento e condições do ambiente, dentre outros (Whittaker *et al.*, 1992).

2.2.1 Dimensões do entalhe e geometria do corpo de prova

Segundo Whittaker *et al.* (1992), a variação no valor da tenacidade à fratura em função do comprimento da trinca é similar para materiais rochosos e materiais metálicos. A tenacidade no modo I é influenciada pela espessura do corpo de prova e pelo comprimento da trinca. De acordo com a mecânica da fratura de rocha, o fator de intensidade da tensão crítica (K_{Ic}) diminui com o aumento do comprimento da trinca sob uma constante carga aplicada.

Em ensaios realizados por Yi *et al.* (1991), seria possível constatar que o tamanho do corpo de prova não influencia os resultados obtidos no nível II. Por outro lado, no nível I a tenacidade à fratura aumenta juntamente com o aumento do

tamanho do corpo de prova. Após determinado tamanho, a tenacidade à fratura permanece constante.

2.2.2 Anisotropia do material

Ao avaliar o valor da tenacidade à fratura de uma rocha, é possível verificar um valor único em qualquer direção, no caso de materiais homogêneos e isotrópicos, Entretanto, no caso de materiais não homogêneos ou anisotrópicos, o que acontece frequentemente nas rochas mais comuns, pode não haver um valor exclusivo para o parâmetro. Isto posto, na maioria dos casos será possível avaliar a anisotropia da rocha estudada, em particular no ensaio “Cracked Chevron Notched Brazilian Disc - CCNBD”, onde os corpos de prova podem ser ensaiados com entalhes em direções diferentes.

O grau de anisotropia difere para cada litologia, sendo que para as rochas sedimentares (folhelhos, arenitos e calcários) variam com maior grau devido aos planos de acamamento, enquanto que as rochas ígneas não possuem essa propriedade tão acentuada.

Nasseri e Mohanty (2007) concluíram que algumas rochas graníticas, apesar de aparentemente homogêneas, possuem forte anisotropia nas propriedades físico-mecânicas em termos de distribuição de microfissuras e orientação, de forma que os valores de tenacidade à fratura no plano ortogonal refletiram isso. Para os autores, as principais causas da anisotropia são a presença de microfissuras pré-existentes e a natureza da microestrutura do material, representada pelo tamanho, orientação em relação à propagação de fraturas e direção da fratura do teste.

Nasseri e Mohanty (2007) constataram, adicionalmente, que as rochas que possuem microfissuras mais longas e orientadas preferencialmente, como é o caso do granito Bigwood, apresentam maior grau de anisotropia, revelando que a combinação de altas densidade e comprimento das microfissuras é responsável pela redução dos valores de tenacidade à fratura. Além disso, o estudo evidenciou que a tenacidade à fratura é grandemente influenciada pelas propriedades microestruturais da rocha.

Nasseri e Mohanty (2007) sinalizam que existem poucos trabalhos sobre a correlação exata entre a microestrutura e a tenacidade à fratura, especialmente no que diz respeito à anisotropia de tenacidade à fratura. Apesar disso, a correlação

entre as microfissuras em rochas graníticas e a anisotropia de propriedades físico-mecânicas, tais como velocidade sísmica, módulo dinâmico de Young, compressibilidade, resistência à tração e compressão uniaxial, resistência à tração e velocidade de fratura, foi estudada por vários autores, segundo Nasser e Mohanty (2007).

Segundo Almeida (1999), as rochas de origem ígnea exibem fraca anisotropia textural, sendo, portanto, esperado um comportamento anisotrópico até certo ponto discreto. Ainda segundo o autor, a anisotropia presente nas rochas afeta não somente as propriedades de resistência e deformação, mas também os parâmetros de fratura.

No trabalho de Almeida (1999) foram realizados mais de 60 ensaios de resistência à tração nos granitos Utinga e Favela e os respectivos resultados não demonstraram um comportamento compatível com a ideia da existência de uma anisotropia significativa de resistência à tração nas direções ensaiadas, pelo menos ao nível esperado. É previsto que a direção corrida possua menor resistência, seguida da direção contra e por fim pela direção trocho. No caso do Granito Favela ocorreu uma inversão de comportamento de direção, posto que no resultado dos ensaios CCNBD a tenacidade à fratura na direção contra foi a de menor valor, seguida da direção corrida e por fim da direção trocho. Já no Granito Utinga, a tenacidade à fratura nas diferentes direções seguiu a ordem teórica.

Os resultados dos estudos de Prikryl (2001) sugerem que a maioria dos granitos (e provavelmente também outras rochas ígneas) não podem ser considerados materiais isotrópicos contínuos. Esse fato deve ser refletido não apenas nos testes de laboratório dessas rochas, mas também durante o planejamento de grandes estruturas subterrâneas de engenharia.

Prikryl (2001) concluiu que a orientação preferencial dos minerais formadores da rocha influencia diretamente a anisotropia e a resistência. Logo, quanto maior for a orientação dos minerais formadores da rocha, maior será a anisotropia presente na mesma. Assim como Prikryl (2001), outros pesquisadores citados pelo autor constataram que o efeito da orientação dos minerais na resistências das rochas pode ser significativo ou não, dependendo do tipo de rocha que está sendo analisado.

2.3. Método Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD)

Existem inúmeras técnicas para medir a tenacidade à fratura das rochas no modo I, tais como, métodos incluindo radial cracked ring (Shiryaev e Kotkis, 1982), notched semi-circular bend (NSCB) (Chong e Kuruppu, 1984; Lim *et al.*, 1994a; Lim *et al.*, 1994b; Lim *et al.*, 1994c), chevron-notched SCB (Kuruppu, 1997), Brazilian disc (Guo *et al.*, 1993) e cracked straight through Brazilian disk (CSTBD) (Atkinson *et al.*, 1982; Chen *et al.*, 1998b; Fowell e Xu, 1994). A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) também propôs testes de short rod (SR) e chevron bending (CB) em 1988 (Ouchterlony, 1988) e cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) em 1995 (Fowell *et al.*, 1995).

No ensaio CCNBD, o corpo de prova tem forma de um disco brasileiro e a trinca se inicia na ponta do entalhe em V (ou “Chevron”), obtendo um crescimento estável da trinca a partir da ponta do entalhe, antes de alcançar a carga de falha, visto que na medida que esta se abre, o comprimento da frente aumenta, necessitando assim de mais energia para continuar a propagação (Albuquerque, 1998). Devido à geometria do corpo de prova CCNBD ser cilíndrica, o campo de tensão na ponta da trinca concentra altas tensões.

Segundo Kaklis *et al.* (2015), a amostra de CCNBD tem características únicas, tais como: (a) está intimamente relacionada ao teste brasileiro amplamente utilizado para teste de resistência à tração indireta para rochas e concreto; e (b) pode suportar uma carga crítica mais alta do que outros tipos de amostras com tamanho comparável.

Albuquerque (1998) explicou que os corpos de prova são cilíndricos, pois esta forma é um pré-requisito para serem extraídos com mais facilidade, através de brocas diamantadas. No ensaio CCNBD, o corpo de prova pode ser aproveitado da outra metade dos ensaios SR ou CB. Neste ensaio é possível analisar a anisotropia executando o teste em três direções ortogonais entre si.

Segundo Albuquerque (1998), não existe garantia de que o valor da tenacidade à fratura determinado neste método represente uma propriedade do material. Entretanto, pesquisas demonstraram que para muitas rochas frágeis os resultados obtidos são valores reais da propriedade do material (ISRM, 1995). Albuquerque (1998) averiguou que devido ao fato do nível I possuir o cálculo mais direto, necessitando somente da carga máxima e requerendo equipamentos menos

sofisticados para realização do ensaio, será o mais fácil de realizar. Em todo caso, importa dispor de materiais homogêneos, de granulação fina e corpos de prova grandes para que os valores de tenacidade à fratura sejam verdadeiros.

Kuruppu *et al.* (2013) verificaram que devido ao fato das rochas terem baixa resistência à tração, os testes de fratura devem ser submetidos, preferencialmente, a cargas compressivas, de forma que as fraturas por tração sejam induzidas, sendo que o ensaio CCNBD atende a este requisito.

Fowell e Xu (1994) citaram algumas vantagens em usar o ensaio Brasileiro para determinar a tenacidade à fratura, como por exemplo: altas cargas de falha, um dispositivo de carregamento simples e preparação conveniente da amostra. Shetty *et al.* (1985) e Fowell e Xu (1994) usaram a geometria do CCNBD para medir a tenacidade à fratura de cerâmica e rochas, respectivamente.

Erarslan (2018) constatou que as principais comparações feitas entre os métodos sugeridos pela ISRM ocorrem entre os ensaios SR e CB e entre CCNBD e CB. Existe alguma consistência nessas metodologias, mas segundo Eraslan (2018) há uma variação de 20 a 30% para o mesmo tipo de rocha. Este pesquisador também constatou que pesquisas recentes indicaram que os valores de CCNBD são marcadamente menores que outros testes comparáveis.

Na pesquisa de Albuquerque (1998), o ensaio CCNBD apresentou menores resultados de tenacidade à fratura que os ensaios SR e CB. Isso também ocorreu na literatura (Fowell e Xu (1994)). Esses autores plotaram um gráfico com valores médios de diferentes amostras dos ensaios CB e SR (K^{ISRM}) "versus" valores médios dos ensaios CCNBD (K^{CCNBD}) e chegaram na relação: $K^{CCNBD} = 0.05 + 0.88 K^{ISRM}$, ou seja, uma relação que sugere que os valores de tenacidade obtidos dos corpos de prova CCNBD serão aproximadamente 10% menores que os valores obtidos dos corpos de prova CB e SR.

Diversos autores, tais como Atkinson e Meredith (1987), Ouchterlony (1988) e Whittaker *et al.* (1992), apresentaram resultados experimentais da tenacidade à fratura de várias rochas.

Kaklis *et al.* (2015) realizaram seis testes do ensaio CCNBD em mármore. A carga foi aplicada usando uma máquina de teste hidráulica rígida MTS de 1600 kN e uma célula de carga de 500 kN, com uma taxa de carga de 200 N/s. A média da tenacidade à fratura encontrada foi de $0,75 \text{ MPa } m^{1/2}$.

Albuquerque (1998) realizou ensaios de SR, CB e CCNBD em amostras de arenitos, basaltos e granitos sob controle de carga. Todos os ensaios foram executados em uma máquina servocontrolada com capacidade de carga máxima de 2.700 kN (MTS 815) e com uma célula de carga de 50 kN. Essa pesquisa foi executada com 15 ensaios CCNBD para as três rochas ensaiadas, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.1. e a taxa de carregamento é dada na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Tenacidade à Fratura modo I para Corpos de Prova "CCNBD" em MPa $(m)^{\frac{1}{2}}$.

CP	ARENITO	BASALTO	GRANITO
1	1.10	1.67	1.57
2	1.12	1.70	1.41
3	1.10	2.17	1.30
4	1.16	1.86	1.33
5	1.21	1.97	1.35
media	1.14	1.87	1.40
desvio p	0.05	0.20	0.11

Tabela 2.2 - Taxas de carregamento e velocidades de ensaios.

ENSAIO	NÍVEL I - taxa de carregamento (kN/s)			NÍVEL II - velocidade de ensaio (mm/min)		
	ARENITO	BASALTO	GRANITO	ARENITO	BASALTO	GRANITO
"CB"	0.40	0.60	0.60	0.04	0.04	0.05
"SR"	0.23	0.30	0.40	0.15	0.15	0.16
"CCNBD"	1.00	1.50	1.35	-	-	-

Analisando os valores obtidos por Albuquerque (1998) e comparando com os valores da literatura, é possível concluir que os valores da tenacidade à fratura e do desvio padrão estão dentro do esperado. Apesar do valor de desvio padrão ser aparentemente alto, o mesmo é razoável por se tratar de materiais rochosos.

Erarslan (2018) realizou um estudo para determinar a tenacidade à fratura no modo I com amostras de tufo utilizando os ensaios CCNBD e SR. O ensaio CCNBD apresentou vantagens em termos de preparação da amostra e consistência da carga de falha. Outros benefícios notáveis do método CCNBD sobre o método SR, em termos de precisão, são a maior capacidade de carga e os resultados consistentes para cada teste.

O ensaio CCNBD realizado por Erarslan (2018) foi executado com seis amostras sob teste de controle de carga. A fim de fornecer condições de carregamento no modo I, as amostras foram colocadas sob as placas com zero ângulo de inclinação da fissura ($\theta = 0^\circ$). Para seguir a sugestão da norma ISRM, a taxa de carregamento escolhida foi de 9 kN/s, para causar falha dentro de 20 segundos. Os resultados comprovaram que os valores de tenacidade à fratura fornecidos pelo método SR foram maiores do que os obtidos pelo método CCNBD. Entretanto, foi constatado que as cargas de falha máxima para amostras CCNBD foram maiores que as amostras SR. A tenacidade à fratura de amostras de tufo obtidas dos espécimes do CCNBD foi considerada mais precisa em comparação com os resultados obtidos pelo método SR. Os resultados se encontram na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resultado dos ensaios de Erarslan (2018).

Rock type	P_{max} (kN) SR	K_{Ic} (SR) (MPa \sqrt{m})	P_{max} (kN) CCNBD	K_{Ic} (CCNBD) (MPa \sqrt{m})
Tuff-1	1.0	2.02	5.25	1.38
Tuff-1	0.99	2.01	5.1	1.34
Tuff-1	1.3	2.63	6.18	1.63
Tuff-1	0.85	1.72	5.87	1.55
Average	1.03	2.1	5.6	1.48
Tuff-2	1.10	2.23	4.68	1.21
Tuff-2	1.07	2.18	6.47	1.68
Tuff-2	1.12	2.26	6.35	1.64
Tuff-2	1.05	2.12	7.10	1.83
Average	1.08	2.19	6.15	1.59

Diversos trabalhos utilizaram os ensaios sugeridos pela ISRM para determinação da tenacidade à fratura de rochas do modo I, dentre eles: Ingraffea *et al.* (1984) em calcário e granito, Swan e Alm (1982) e Sun e Ouchterlony (1986) em granito, Stripa, Gunsallus e Kulhawy (1984) em arenito, Ouchterlony (1987) em granito e mármore, Shetty *et al.* (1985) e Fowell e Xu (1994) sobre cerâmica e rochas, e Backers *et al.* (2003) em arenito.

Nasseri e Mohanty (2007) realizaram estudo a partir de testes padrões, tais como o ensaio Cracked Chevron Notch Brazilian Disc (CCNBD) em granitos do

tipo *Laurentian*, *Barre*, *Stanstead* e *Bigwood*. Foram realizados ensaios ao longo de seis diferentes direções. Os resultados do ensaio CCNBD para os grãos relativamente finos e granito *Laurentiano* homogêneo foram entre 1,33 a 1,76MPa $m^{0,5}$ ao longo dos diferentes planos, enquanto que para o granito *Bigwood* limite inferior foi de 0,71 MPa $m^{0,5}$. No teste, o granito do tipo *Laurentiano* possui o menor comprimento de microfissuras e também a maior tenacidade média à fratura, enquanto que o granito do tipo *Stanstead* possui a menor tenacidade.

Nasseri e Mohanty (2007) constataram que uma fratura que se propaga em ângulos retos com o maior conjunto de planos de fraqueza obteve o maior valor de tenacidade à fratura. Tais fraturas, em contraste com a fratura que se propaga paralelamente às fraquezas dominantes, foram caracterizadas por um aumento de rugosidade, segmentação e maior deflexão.

2.4. Definições superfícies de corte

A designação dessas superfícies é comum e muito conhecida entre os profissionais da área de desmonte, recebendo a seguinte nomenclatura:

*“Para demarcar o local e sentido do furo, examina-se o matacão, procurando-se através da observação dos cristais da rocha definir os três planos de corte. O melhor plano de corte é a **corrida**, que é o sentido em que a rocha tem seus cristais predispostos; existe um segundo plano, chamado apenas de **segundo**, cuja dificuldade de corte é um pouco maior relativamente à corrida; o **terceiro** plano, o de corte mais difícil, é chamado de **trincante**.”*

Caruso & Braga (1991)

A quantidade de planos preferenciais varia conforme o tipo de rocha. Segundo Stellin (2007), algumas rochas metamórficas, tais como o gnaisse, apresentam três superfícies preferenciais de corte, enquanto que outras, tais como os mármore, por exemplo, não apresentam os três planos. Por outro lado, as rochas sedimentares possuem apenas uma superfície preferencial, que coincide com o plano de sedimentação. Já as rochas magmáticas também possuem três planos de corte.

No caso de um gnaisse, a xistosidade proveniente da orientação paralela de minerais representa uma descontinuidade bem marcada, enquanto que em rochas ígneas, tais como o granito, a escolha das superfícies de corte é mais complexa,

devido a isotropia do material e ao fato deste tipo de rocha, em muitos casos, não exibir claramente orientações minerais.

As superfícies de corte, que são ortogonais entre si, são **corrida**, **contra** e **trocho**. Segundo de Almeida (1999), a superfície **principal** ou **corrida** corresponde à superfície principal de fraqueza da rocha, sendo a mais indicada para o corte. No campo, a mesma é identificada através do alinhamento preferencial de minerais que, no caso de granitos, corresponde ao fluxo magmático ou a uma leve xistosidade e, quase sempre, é determinado pela orientação de feldspatos, quartzo e/ou biotita. Esses planos podem apresentar foliações, laminações ou fraturas, sendo, portanto, planos mais fáceis para corte. Segundo Godoy *et al.* (2002), esta direção pode apresentar uma lineação mineral mais penetrativa sub-vertical paralela a um dos cortes. A superfície **secundária** (“segundo”) ou **contra** é uma superfície perpendicular à principal. Caso a rocha seja cortada conforme esta superfície, o corte será mais árduo que o realizado na superfície principal. Contudo, existem casos no qual esta direção tem se mostrado com menor resistência ao corte, como é o caso dos granitos com “granulometria” grosseira. Segundo Godoy *et al.* (2002), a direção **contra** pode apresentar uma lineação mineral menos penetrativa. A superfície **terciária**, **trincante** ou **trocho** é perpendicular às outras duas, sendo o corte nesta superfície muito mais difícil. Segundo Godoy *et al.* (2002), esta superfície pode apresentar uma família de microfissuras sub-horizontais provocadas por alívio de tensão. É possível observar as superfícies de corte na Figura 2.5, obtida do trabalho de Bolonini (2011).

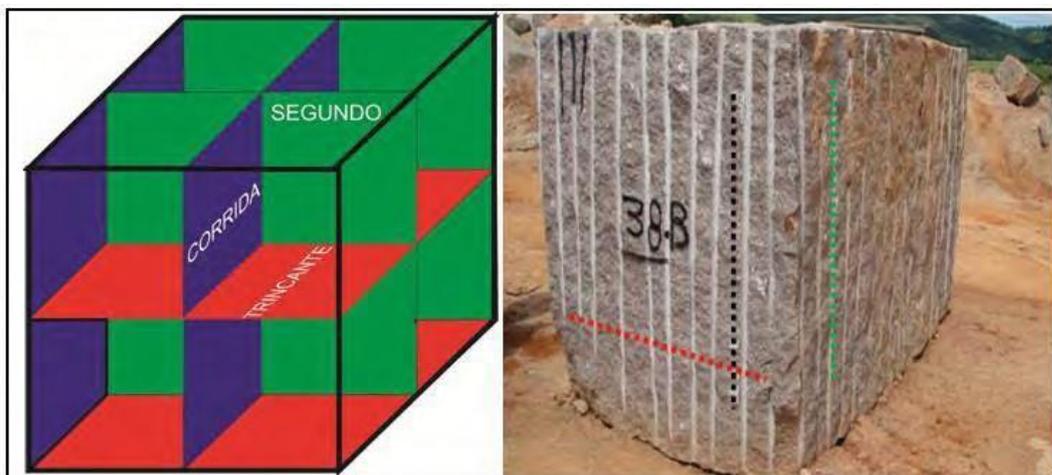


Figura 2.5 - Superfícies de corte (Bolonini, 2011).

Para encontrar as superfícies de corte com mais facilidade é recomendável procurar as denominadas “mesas” de cada plano, onde uma “mesa” seria uma vista frontal da superfície de corte. A “*mesa da corrida*” é o plano de fraqueza principal da rocha, com superfície mais regular (mais lisa) do que as outras duas, e onde os minerais podem ser observados na maior área, ou seja, no maior comprimento e maior largura. A “*mesa do contra*” apresenta os minerais de acordo com o maior comprimento e espessura. Por fim, a “*mesa de trocho*” tende a ter a superfície mais irregular e com maiores ondulações, apresentando os minerais de acordo com a maior espessura e largura.

3

Materiais e métodos

3.1.

Material experimental

O presente estudo foi realizado a partir de cinco blocos de rocha sã retirados de pedreiras da região do município de Cachoeiro de Itapemirim, localizado no sul do Espírito Santo, conforme anteriormente mencionada no capítulo 1. Os blocos e respectivos furos podem ser vistos na Figura 3.1.

Os blocos foram retirados, com o auxílio dos funcionários da pedreira, dos perfis 1 a 5 (ver Figura 3.2 a Figura 3.6), nos quais ocorrem pelo menos cinco níveis de intemperismo. Nos perfis 1, 2 e 5 o intemperismo está distribuído de maneira heterogênea, horizontalmente e verticalmente. Os blocos foram transportados e acondicionados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio e posteriormente foi escolhido em quais direções de corte (corrida, contra, trocho ou inclinada) seriam perfurados.

Durante a execução do trabalho, houve dificuldade de identificar as direções de fluxo, visto que a rocha não apresentava um bandamento ou xistosidade que deixassem nítida a orientação. Desta forma, foi solicitada a orientação do geólogo Wilmar Tenório de Barros da Fundação Instituto de Geotécnica (GeoRio).



Figura 3.1 - Bloco 01, 02, 03, 04 e 05 com suas direções de fluxo respectivamente.



Figura 3.2 - Aspecto geral do perfil 1, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019).

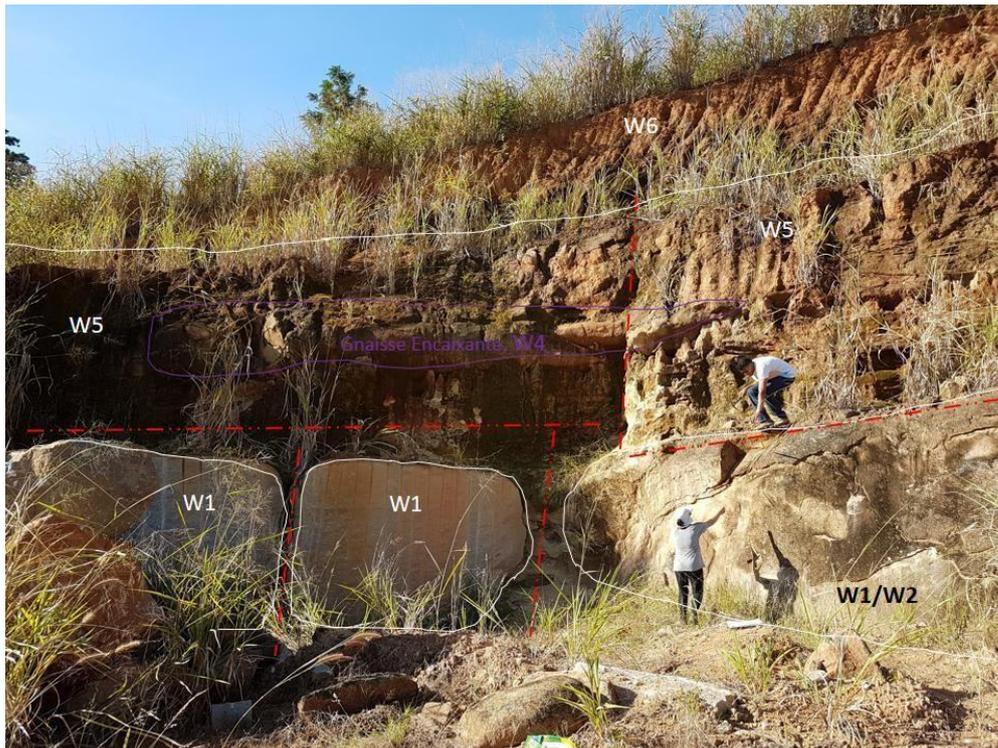


Figura 3.5 - Aspecto geral do perfil 4, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das discontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019).



Figura 3.6 - Aspecto geral do perfil 5, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das discontinuidades (linha vermelha) (Jaques, 2019).

3.1.1 Contexto geológico da área

O município de Cachoeiro de Itapemirim está localizado no sul do Espírito Santo que, geotectonicamente, pertence ao Orógeno Araçuaí, compreendendo uma área dominada por rochas graníticas e metamórficas que bordejam a margem sudeste do Cráton São Francisco (Almeida, 1977). Segundo Jaques (2019), a maior parte das rochas da área estão presentes na Suíte Santa Angélica e no Complexo Paraíba do Sul. Os cinco perfis existentes em Cachoeiro de Itapemirim se distribuem da seguinte forma: perfis 1, 2 e 3 no domínio da Suíte Intrusiva Santa Angélica, e perfis 4 e 5 nas bordas de contato entre a suíte Santa Angélica e o Complexo Paraíba do Sul. Alguns eventos formaram diferentes características geomorfológicas na área de estudo, tais como, por exempli, eventos tectono-estruturais, tipo litológico e fatores paleoclimáticos (Jaques, 2019).

A Suíte Intrusiva Santa Angélica é de idade paleozoica e estágio tectônico pós-orogênico, abrangendo os Maciços Santa Angélica, Castelo, Alto Chapéu, o Diorito Concordia e o Granito Morro do Côco (Vieira e Menezes, 2015). Essas rochas compreendem maciços com formas circulares a elípticas que formam uma associação complexa de rochas intrusivas (granitos porfiríticos, titanita granitos, sienogranitos, granodioritos, leucogranitos, monzogranitos, quartzomonzogranitos, dioritos, gabros e noritos) e zonas de mistura magmática, migmatitos de borda e charnockitos (Vieira, 1997).

É observada a leste de Cachoeiro de Itapemirim uma área elevada onde predominam colinas e cristas que evoluíram através da dissecação fluvial de rochas gnáissicas e quartzíticas. A oeste dessa região existe uma área de predominância de rochas granitoides e gnáissicas. 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).

3.1.2 Descrição macroscópica das rochas

Todos os blocos utilizados nessa pesquisa são granitos provenientes do município de Cachoeiro de Itapemirim, localizado no sul do Espírito Santo,

conforme mencionado anteriormente. Segundo Irfan e Dearman (1978) é importante conhecer algumas propriedades petrográficas da rocha, tais como a composição mineral e os produtos de intemperismo, a estrutura e a textura dos grãos minerais, os tipos e quantidades de microfissuras, os tipos de preenchimento das microfissuras e a anisotropia, se existente.

A rocha estudada é sã, com nenhum sinal visível de alteração da matriz. Em escala macro, as descontinuidades não apresentam descoloração, porém ao microscópio foi observada leve descoloração de biotita. Algumas das principais características da rocha estão descritas na Tabela 3.1 abaixo:

Tabela 3.1 - Testes da matriz para simples reconhecimento e descrição do sienogranito quanto à sua coerência (Jaques, 2019).

	Som do martelo	Aspecto dos minerais	Estado dos grãos	Fragilidade da Matriz
W1	Claro, agudo e melodioso	Brilho preservado; sem descoloração.	Extremamente embriçados.	Com muita dificuldade solta lascas milimétricas ao golpe do martelo; testemunhos recuperáveis por extrator.

3.1.3 Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova foi realizada em três etapas: extração de testemunhos, corte dos corpos de prova e acabamento final. Estas fases foram realizadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. Após identificar a direção de fluxo, foram definidos em quais blocos seriam extraídos os testemunhos cilíndricos e a direção dos mesmos (corrida, contra, trocho e inclinada), sendo utilizado o sistema de perfuração diamantado de alta resistência da marca Hilti, perfuratriz modelo DD 200 e coroas diamantadas com diâmetros internos de 54 mm e 75 mm (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Extração de testemunhos utilizando a perfuratriz da marca Hilti, modelo DD 200.

Posteriormente, os testemunhos foram cortados obedecendo às sugestões da ISRM para os ensaios. A fim de executar os cortes dos testemunhos, foram utilizadas duas serras de bancada, devido aos diferentes diâmetros dos ensaios. Para execução das amostras referentes ao ensaio Brasileiro, com diâmetro de 54 mm, foi utilizada a cortadora da marca Arotec (cortadora metalográfica modelo Arocor 80, Figura 3.8). Para os corpos de prova do ensaio de tenacidade CCNBD com diâmetro de 75 mm, foi utilizada a serra de bancada da marca Coretest, modelo RCSS-415 Radial Core Slab Saw (Figura 3.9). Para evitar acidentes nesta serra é necessário o uso de um suporte para segurar o testemunho, que tem espessura muito pequena (30 mm). Este suporte foi confeccionado pelo Laboratório de Mecânica da PUC-Rio, sendo bipartido e feito com teflon (Figura 3.11).



Figura 3.8 - Cortadora metalográfica, utilizada para cortar corpos de prova com 54 mm de diâmetro.



Figura 3.9 - Serra de bancada e suporte bipartido para testemunhos com 75 mm de diâmetro.

Na terceira fase, foi necessário facear os corpos de prova. Para isso foi utilizada a Retífica Automática para Corpo de Provas da marca Setor Indústria, modelo SET 1000, para facear topo e base dos testemunhos (Figura 3.10); e para facear os corpos de prova do ensaio CCNBD foi necessária a confecção de um suporte, visto que a espessura destes é muito pequena e o testemunho não ficava fixo na máquina, impossibilitando o faceamento. Por esta razão, foi confeccionado no Laboratório de Mecânica da PUC-Rio um suporte cilíndrico bipartido em teflon (Figura 3.11). Após facear, as superfícies do disco da amostra de corte devem estar lisas e planas e não devem sair da perpendicularidade ao eixo do disco em mais de 0,25 mm a cada 10 mm, segundo a ISRM (1995).



Figura 3.10 - Retífica automática de corpos de prova utilizada para facear topo e base de todos os corpos de prova.

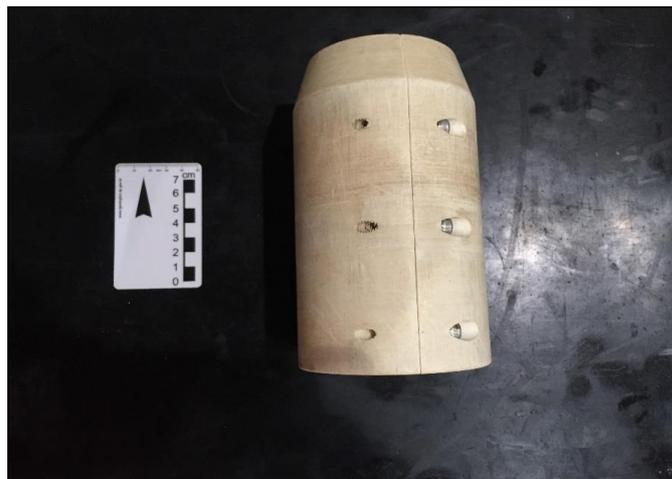


Figura 3.11 - Suporte bipartido confeccionado para auxiliar o faceamento dos corpos de prova CCNBD.

3.2.

Metodologia

A metodologia utilizada envolve as seguintes etapas: análise petrográfica, caracterização dos índices físicos, ensaio esclerométrico e determinação da resistência à tração e da resistência da tenacidade à fratura da rocha. Todos os ensaios foram realizados com o uso de amostras secas naturalmente ao ar, sendo executados nos laboratórios de Estruturas e Materiais e de Geotecnia e Meio

Ambiente, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC- Rio.

3.2.1 Análise petrográfica

Para executar a análise petrográfica da rocha estudada foram utilizadas amostras de mão, enviadas para o laboratório de laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e para o Museu Nacional (UFRJ), de forma a que fossem confeccionadas lâminas petrográficas, de rocha sã.

As lâminas foram examinadas com o uso do microscópio óptico de luz polarizada, modelo CX31, da marca Olympus, com câmera (SC-30) acoplada para geração de imagens através do *software* analySIS getIT, no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio (Figura 3.12).



Figura 3.12 - Microscópio óptico para análise petrográfica.

3.2.2 Caracterização de índices físicos

A presença de poros no material rochoso diminui a resistência e aumenta a deformabilidade, demonstrando, portanto, a importância da quantificação da porosidade das rochas. A maioria das rochas tem densidades de grãos semelhantes e, assim sendo, tem valores de porosidade e densidade seca que são altamente correlacionados, sendo que uma rocha de baixa densidade é geralmente altamente porosa. A fim de estimar o conteúdo volumétrico dos poros é necessário utilizar técnicas experimentais, visto que técnicas microscópicas não fornecem uma estimativa suficientemente precisa do conteúdo.

Neste tópico, será descrito como foram obtidos os valores de porosidade, massa específica seca e peso específico seco, a partir dos valores de massa submersa, massa seca e massa saturada, com base na norma de referência ISRM (1979): *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake Durability Index Properties*. Todas as amostras foram caracterizadas. Na primeira etapa, foi utilizado um dessecador de 250 mm em plástico, uma bomba de vácuo do modelo 132 da marca Primatec, com deslocamento de 2,9 m³ e 48 lpm (Figura 3.13a). Cada amostra foi saturada por imersão em água destilada no dessecador, conectado a uma bomba de vácuo, sendo submetida a uma pressão de no máximo 800 Pa (6 torr). Após cerca de uma hora, quando as amostras já estavam saturadas, a bomba foi desligada e as amostras foram pesadas na balança de precisão da marca Ohaus, modelo Adventurer ARD110, com precisão de duas casas decimais, também utilizada para medir a massa seca, correspondente à massa saturada.

Para medir a massa submersa, foi montado um sistema com duas balanças de precisão, ambas da marca Ohaus, modelo Adventurer Pro AV8101P, com precisão de uma casa decimal (Figura 3.11b). A primeira continha um gancho na parte inferior que era ligada a uma rede em arames. Cada amostra foi, então, colocada nesta rede e a massa submersa foi medida.



Figura 3.13 – a) Dessecador e bomba de vácuo utilizado. b) Sistema montado para medir massa submersa e massa saturada.

A massa de sólidos de uma amostra, ou massa seca, é definida como a massa de equilíbrio da amostra após secagem em estufa a uma temperatura de 105°C. A estufa utilizada foi da marca Nova Ética. É necessário um forno de secagem ventilado, controlado termostaticamente, capaz de manter esta temperatura de 105°C com precisão de 3°C durante um período mínimo de 24 horas. Uma amostra deve ser considerada seca quando determinações sucessivas da massa a intervalos de quatro horas produzam valores que diferem em menos de 0,1% da massa da amostra, segundo a norma ISRM (1979). O corpo de prova não deve levar água no intervalo entre a secagem e a determinação de massa.

Os seguintes termos e símbolos serão usados para denotar as massas e os volumes de constituintes da rocha, ao calcular propriedades físicas como porosidade ou densidade:

$$M_w = M_{sat} - M_s \quad (\text{eq. 3.1})$$

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (\text{eq. 3.2})$$

$$V_v = V_w = \frac{M_w}{\rho_w} \quad (\text{eq. 3.3})$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (\text{eq. 3.4})$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (\text{eq. 3.5})$$

$$\gamma_d = \rho_d \times g \quad (\text{eq. 3.6})$$

M_w : massa de vazios;

M_{sat} : massa saturada;

M_s : massa dos constituintes sólidos;

M_{sub} : massa submersa;

V : volume total;

$V_v = V_w$: volume de vazios;

V_w : volume de água;

n : porosidade;

ρ_d : massa específica seca;

γ_d : peso específico seco;

g : aceleração da gravidade;

Vale ressaltar que não foi considerada a perda de água superficial (poros superficiais) quando medida a massa saturada.

3.2.3 Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt)

O ensaio esclerométrico foi idealizado pelo engenheiro suíço Ernst Schmidt, em 1948, razão pela qual é também conhecido como “esclerômetro Schmidt”, correspondendo a um dos mais antigos métodos não destrutivos, ainda muito utilizado (Neville, 1997). Os martelos de Schmidt estão disponíveis em diferentes faixas de energia, sendo que a energia de impacto do martelo rebote determina o alcance de aplicabilidade. Esses aspectos devem ser levados em consideração na escolha do martelo.

Este ensaio é utilizado para verificar o valor da dureza superficial do maciço rochoso, tanto no laboratório quanto no campo, sendo o método mais adequado para rochas com resistência à compressão uniaxial variando entre 1 e 100 MPa. O

método foi normatizado pela *International Society of Rock Mechanics* (ISRM, 1978) e pela *American Society for Testing and Materials* ASTM D5873 (2000). Segundo De Castro (2009), o equipamento é leve, fácil de ser transportado e manuseado, de operação simples, relativamente barato, e fornece uma grande quantidade de dados rapidamente.

O ensaio consiste num martelo controlado por uma mola que desliza por um pistão, sendo executado da seguinte maneira: o esclerômetro é posicionado perpendicularmente à superfície, a mola localizada dentro do equipamento é comprimida e uma massa é lançada contra o êmbolo. Neste processo, parte da energia é absorvida pela superfície por deformação elástica e parte é transformada em energia. O martelo fornece automaticamente, em visor digital, o valor de rebote (Q), a partir do quociente da velocidade de impacto e da velocidade de rebote.

A norma ISRM (1978) recomenda efetuar cerca de vinte medições em cada superfície de interesse. O ensaio pode ser encerrado quando, após dez medidas subsequentes, houver diferimento em apenas quatro. A aplicação do martelo deve ser realizada com uma distância de pelo menos um diâmetro do êmbolo. Caso não haja espaço suficiente para retirar todas as medições na mesma superfície, é possível utilizar as outras faces do bloco, desde que todas as medições sejam retiradas do mesmo eixo. Segundo Aydin (2008), nenhuma medição deve ser retirada, mesmo que seja muito abaixo ou acima da média, visto que essas medidas visam refletir a heterogeneidade da amostra. Além disso, Aydin (2008) sugere que as dimensões dos blocos testados em campo devem ser registradas.

A partir dos valores obtidos no ensaio, é calculada a média das observações para obtenção do valor de rebote (Q). Durante o disparo, a energia é absorvida pela superfície ensaiada e quanto maior a resistência da superfície menor será a deformação e maior o ricochete (reflexo do corpo). Segundo Aydin (2008), a não ser que a direção do impacto do martelo permaneça aproximadamente perpendicular à superfície testada, existe o risco de deslizamento por atrito da ponta do êmbolo, remoção do material por lascamento e transferência parcial de energia para o martelo. Além disso, a posição do esclerômetro em relação à vertical também tem influência sobre o valor do índice esclerométrico, em função da ação da gravidade. Aydin (2008) sugere que um dispositivo de medição de ângulo mecânico ou digital seja fornecido como acessório pelos fabricantes dos martelos Schmidt.

Desta forma, caso o martelo não esteja na posição horizontal, o índice esclerométrico obtido deve ser corrigido com a utilização de curvas de correção fornecidas pelo fabricante e estipuladas pela ISRM (1978), desde que seja conhecido o ângulo com a horizontal no momento do ensaio. Algumas sugestões de curvas foram obtidas por Basu e Aydin (2004) e podem ser observadas na Figura 3.14. Os ângulos positivo e negativo são referentes ao sentido horário e ao sentido anti-horário do martelo, respectivamente.

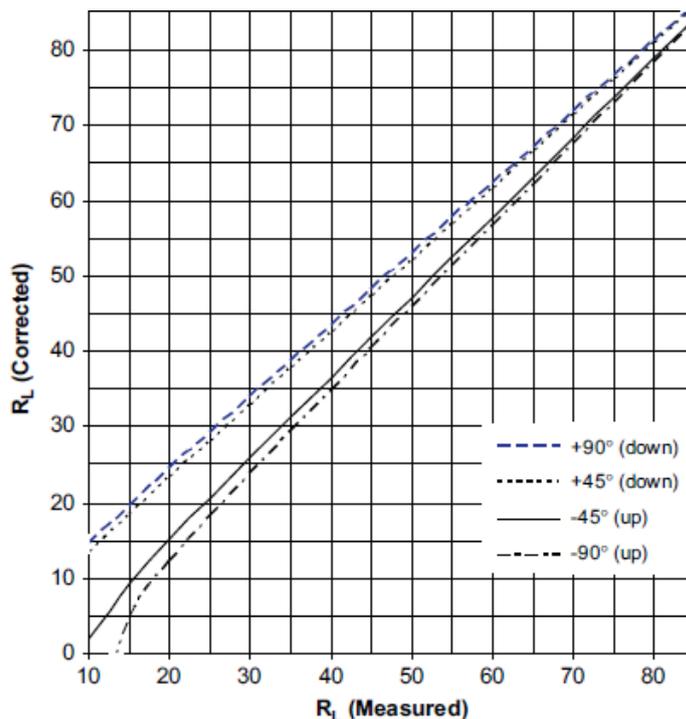


Figura 3.14 - Normalização dos valores de recuperação em ângulos selecionados no martelo de Schmidt do tipo L (Aydin, 2008).

O manuseio do equipamento e a escolha dos pontos onde o martelo será utilizado deve ser feito com cautela, devido ao fato do aparelho ser sensível. Caso o choque ocorra em um mineral, o índice esclerométrico será elevado, por outro lado, se o choque ocorrer em cima de um vazio, o índice será baixo. Em rochas que contém planos de anisotropia, tais como rochas laminadas e xistosas, exemplificadas pelo xisto, ardósia e filito, o valor do rebote tende a ser menor. No caso de peças isoladas, estas devem ser afixadas ou apoiadas em estruturas que permitam maior rigidez ao elemento, pois movimentações podem reduzir o índice esclerométrico (Castro, 2009).

Existem dois tipos de esclerômetros: tipo N e tipo L. Segundo Aydin (2008), ambos devem ser utilizados com cautela quando a resistência à compressão uniaxial (UCS) do material rochoso estiver fora da faixa de 20 a 150 MPa, onde a sensibilidade diminui e a dispersão de dados aumenta. Aydin (2008) também afirma que o martelo tipo N é menos sensível a superfícies irregulares e, em caso de uso do esclerômetro no campo, este deve ser utilizado. Por outro lado, o martelo tipo L tem maior sensibilidade na faixa mais baixa e fornece melhores resultados ao ser utilizado em rochas fracas, porosas e intemperizadas. Ao utilizar diferentes tipos de martelo, será necessário ter atenção com os resultados, pois estes podem não estar prontamente correlacionados.

No presente trabalho, foi realizado ensaio esclerométrico em todos os blocos, antes de serem retirados os corpos de prova, sendo utilizado o Martelo de Schmidt do tipo L, da marca Proceq (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Martelo de Schmidt, tipo L da marca Proceq.

A partir do valor de rebote (Q) é possível calcular a resistência à compressão uniaxial, por meio das correlações encontradas na literatura. Neste estudo foi utilizada a equação 3.7, sugerida por Aydin (2009).

$$UCS = 1.45 e^{0,07Q} \quad (\text{eq. 3.7})$$

Onde:

UCS – resistência à compressão uniaxial;

Q – valor de rebote do martelo de Schmidt.

3.2.4 Ensaio indireto de resistência à tração (Ensaio Brasileiro)

A resistência à tração da matriz rochosa pode ser medida de forma direta ou indireta. O ensaio de tração direta (Figura 3.16) é utilizado com menos frequência, visto que apresenta maior dificuldade na realização, devido, principalmente, ao acoplamento da garra e à manutenção da “axialidade” do carregamento.



Figura 3.16 - Ensaio de Tração Direta (Farias et al., 2018).

Assim sendo, foram desenvolvidos ensaios indiretos de tração, sendo o mais conhecido o ensaio Brasileiro, também denominado compressão diametral (Figura 3.17). Este ensaio consiste em aplicar compressão diametral, ao longo da geratriz do corpo de prova, através de mordentes, e o uso de uma taxa de carregamento constante (Figura 3.17 e Figura 3.18). A função do mordente é a de reduzir a concentração de tensões no contato rocha/aço. A ruptura do corpo de prova ocorre em forma de tração, atuante na região central do diâmetro carregado, com a obtenção da resistência à tração, como pode ser visto na Figura 3.18.

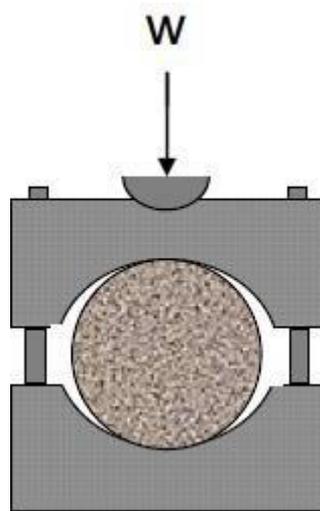


Figura 3.17 - Representação esquemática da força atuante no ensaio Brasileiro.

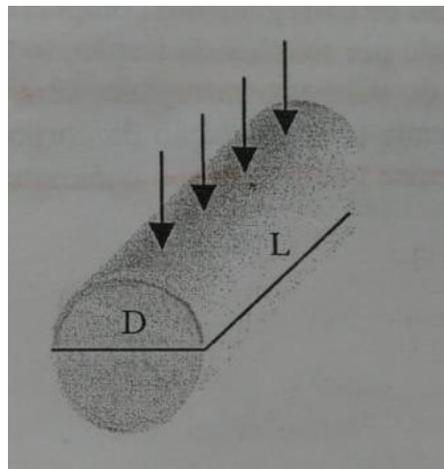


Figura 3.18 - Corpo de prova com tração atuante na região central do diâmetro carregado (Azevedo e Marques, 2002).

O ensaio Brasileiro apresenta diversas facilidades, tais como, por exemplo, simplicidade de execução e de preparação dos corpos de prova, adaptação em máquinas de ensaio de compressão e custo baixo em relação aos ensaios de tração direta.

Este ensaio possui um plano de ruptura que é imposto por condições próprias, de forma que a ruptura ocorra num estado de tensão mais acentuadamente biaxial do que uniaxial e, além disso, a superfície de ruptura pode não ser a de menor resistência. Neste sentido, segundo o critério de ruptura de Griffith, a relação no centro do disco da rocha entre as tensões de compressão e de tração deve ser igual a 3, ou seja:

$$\sigma_c \geq 3 \sigma_t \rightarrow \sigma_1 \geq 3 \sigma_3 \quad (\text{eq. 3.8})$$

em que:

$$\sigma_c = \sigma_1 = \textit{tensão de compressão}$$

$$\sigma_t = \sigma_3 = \textit{tensão de tração}$$

Assim sendo, a tensão de compressão não pode ser maior do que três vezes a tensão de tração. Desta forma, é possível justificar valores de resistência à tração superiores aos valores obtidos em ensaios de tração direta.

O teste foi realizado na máquina de ensaios universais da marca MTS, modelo 810 com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN, no laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (Figura 3.19). A prensa presente na máquina é controlada pelo software MTS TestSuite™ Multipurpose Elite (MPE) da marca MTS. Nos ensaios, foi utilizado *clip-gauge* (Figura 3.20 e Figura 3.21) da marca MTS modelo 632.028-20, a fim de controlar a abertura da trinca, e foram coletados os dados do atuador: força axial aplicada, tempo, deslocamento axial e deslocamento do *clip-gauge*. Todos os ensaios Brasileiros foram realizados com uso de extensômetros do tipo *clip-gauge*, no qual houve controle da abertura da boca da fissura e, portanto, foi possível uma melhor aquisição de dados, de forma que o ensaio foi executado no nível II. O *clip-gauge* utilizado foi da marca MTS, modelo 632.028-20.



Figura 3.19 - Ensaio para determinação da resistência à tração indireta (Ensaio Brasileiro).



Figura 3.20 – Clip-gauge no corpo de prova.



Figura 3.21 - Clip-gauge na máquina de ensaio.

A norma da ISRM sugere que a taxa aplicada constantemente na amostra seja de 200 N/s, de forma que a ruptura ocorra entre 15 e 30 segundos. Entretanto, foi aplicada uma taxa de 0,0025 mm/min, com o objetivo de executar o ensaio com controle de deslocamento e não controle de carga, como também recomenda a norma, visto que o gráfico obtido com controle de deslocamento fornece mais informações sobre o material estudado.

Durante a execução do ensaio houve a aquisição da carga uniaxial aplicada ao longo do tempo, permitindo calcular a resistência à tração, utilizando a fórmula abaixo:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi d t} = \frac{0,636 P}{d t} \quad (\text{eq. 3.9})$$

Onde:

σ_t : resistência à tração (MPa);

P: carga máxima em kN;

d: diâmetro do corpo de prova (m);

t: espessura do corpo de prova medido no centro (m).

A ruptura ocorre ao longo do diâmetro do disco no plano paralelo ao carregamento.

3.2.5 Ensaio de tenacidade à fratura (CCNBD)

Segundo Azevedo e Marques (2006), a tenacidade à fratura determina a energia requerida para a propagação de uma fissura, tendo como principal função classificar e caracterizar uma rocha intacta com relação a resistência à propagação de fissuras. Essa propriedade também é importante como um índice de propagação da rocha e na análise de fratura e estabilidade hidráulica ou explosiva.

O método utilizado no presente trabalho, segundo sugestão da ISRM (1995), para o cálculo da tenacidade à fratura no modo I, é o CCNBD (Cracked Chevron Notched Brazilian Disc), no qual é utilizado um corpo de prova com um entalhe V (ou “*chevron*”).

Para realização do ensaio escolhido, primeiramente é necessária a execução do entalhe. Este induz a propagação de trincas na ponta do alinhamento V e processa a fissura radialmente para fora, de forma estável, até o ponto em que a tenacidade à fratura é avaliada, sendo este ponto o de carga máxima.

O entalhe *chevron* foi confeccionado no Laboratório de Mecânica da PUC-Rio, com uso da Fresadora com Variador Digital da marca Diplomat (Figura 3.22), seguindo as orientações da ISRM (1995), com utilização de uma serra diamantada de 52 mm de diâmetro e água limpa para resfriamento.



Figura 3.22 - Procedimento realizado para a confecção do entalhe chevron para ensaios CCNBD.

Primeiramente, cabe marcar em ambos os lados da amostra a orientação na qual será feita o entalhe, com uma caneta a prova d'água e com auxílio do esquadro de centro, para garantir o devido posicionamento no centro da amostra, sendo que a largura do entalhe não deve exceder 1,5 mm.

Segundo a ISRM (1995), o entalhe deve ser realizado com dois cortes, um de cada lado da amostra, ao longo do eixo de rotação do disco, no mesmo plano de corte diametral. Antes de cada corte, uma verificação deve ser feita para garantir o exato posicionamento no centro da superfície do disco, tanto na vertical quanto na horizontal. Isto pode ser produzido encostando o diamante na marca central previamente entalhada na superfície do disco. A linha central e a linha de corte não devem ter uma distância maior do que 0,5 mm. A linha do eixo central do disco deve coincidir com o plano rotativo da roda diamantada, o que garantirá a perpendicularidade do plano de corte em relação às superfícies do disco.

O primeiro corte é produzido movendo o disco em direção à roda giratória, até a profundidade de corte projetada (h_c). Após o primeiro corte, a amostra, em conjunto com o acessório, é removida do torno de fixação e virada 180°, com a outra superfície do disco voltada para o disco diamantado. Após o alinhamento do centro e as verificações de perpendicularidade do plano de corte terem sido

$$\alpha_B = \frac{B}{R} \quad (\text{eq. 3.12})$$

$$\alpha_s = \frac{D_s}{D} = \frac{R_s}{R} \quad (\text{eq. 3.13})$$

Onde:

B: espessura do corpo de prova;

R_s : raio da serra usada para fazer o entalhe no corpo de prova;

D_s : diâmetro da serra usada para fazer o entalhe no corpo de prova;

As medidas α_0 e α_1 estão assinaladas na Figura 3.23.

As dimensões geométricas sugeridas pela ISRM (1978) estão contidas na Tabela 3.2, abaixo:

Tabela 3.2 - Dimensões geométricas padrão do ensaio CCNBD (ISRM, 1995).

Descrições	Valores	Expressões Adimensionais
Diâmetro D (mm)	75.0	
Espessura B (mm)	30.0	$\alpha_B = B/R = 0.80$
Comprimento Inicial α_0 (mm)	9.89	$\alpha_0 = \alpha_0/R = 0.2637$
Comprimento final α_1 (mm)	24.37	$\alpha_1 = \alpha_1/R = 0.65$
Diâmetro da serra D_s (mm)	52.0	$\alpha_s = D_s/D = 0.6933$
Profundidade de corte h_c (mm)	16.95	
Y_{\min} (adimensional)	0.84	
α_m (mm)	19.31	$\alpha_m = \alpha_m/R = 0.5149$

Outras combinações de dimensões da amostra são possíveis, mas para ter um teste válido a ISRM (1995) sugere que as dimensões α_1 e α_B devem satisfazer a algumas restrições, que são mostradas na Figura 3.24.

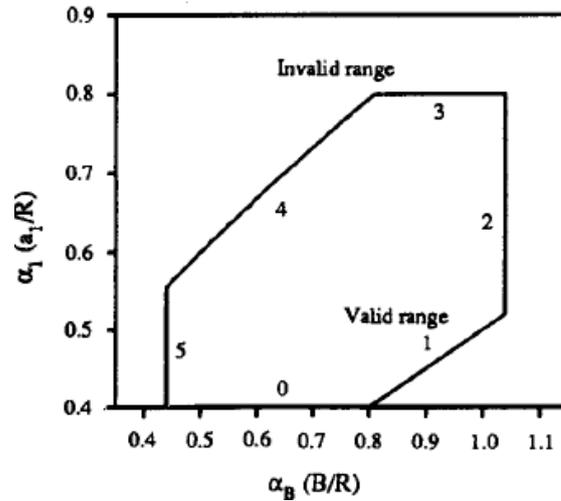


Figura 3.24 - Faixa geométrica válida para os parâmetros α_1 e α_B (ISRM, 1978).

Além disso, as amostras precisam satisfazer às seguintes condições para que os testes sejam válidos:

$$0,4 \leq \alpha_1 \leq 0,8 \quad (\text{eq. 3.14})$$

$$\alpha_1 \geq \frac{\alpha_B}{2} \quad (\text{eq. 3.15})$$

$$0,44 \leq \alpha_B \leq 1,04 \quad (\text{eq. 3.16})$$

$$\alpha_B \geq 1,1729 \alpha_1^{1,6666} \quad (\text{eq. 3.17})$$

Onde α_0 , α_1 e α_B são as três dimensões básicas para os parâmetros geométricos do CCNBD. Outras dimensões podem ser calculadas a partir das relações abaixo:

$$\alpha = \frac{R_s}{R} = \sqrt{\alpha^2 + \frac{(\alpha^2 - \alpha^3 + \alpha^{\frac{B}{R}})^2}{\alpha_B^2}} \quad (\text{eq. 3.18})$$

$$h_c = (\alpha_s - \sqrt{\alpha^2 - \alpha^2}) R = (\alpha_s - \sqrt{\alpha^2 - \alpha^2}) R + \frac{B}{2} \quad (\text{eq. 3.19})$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\alpha_s^2 - (\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2} + \alpha_2)^2} \quad (\text{eq. 3.20})$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha_s^2 - (\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2} + \alpha_2)^2} \quad (\text{eq. 3.21})$$

$$\alpha_B = 2 (\sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2} - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2}) \quad (\text{eq. 3.22})$$

Caso as medidas da amostra não atendam aos requisitos geométricos válidos, descritos anteriormente, estas devem ser descartadas.

Após execução do entalhe e verificação da geometria, a amostra está pronta para ser ensaiada. A máquina utilizada para ensaio deve estar suficientemente capacitada para suportar a carga de pico requerida e precisa ser calibrada em intervalos regulares.

A calibração da célula de carga deve ser verificada em intervalos regulares e o equipamento de medição do deslocamento deve ser calibrado antes de cada série de ensaios. Antes de pôr a amostra na máquina é necessário afastar as placas de carga superior e inferior, de forma que quando a placa de carga inferior for colocada na posição zero não haja choque entre as placas.

Para execução do ensaio, a amostra deve ser cuidadosamente instalada na máquina de teste, de modo que o sistema de transferência de carga seja alinhado corretamente e que o plano da trinca esteja perpendicular às placas de carregamento. É necessário ajustar a máquina em um valor pré-determinado de carga máxima, para evitar danos ao equipamento.

Os ensaios foram executados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. Foi utilizado o equipamento de ensaios universais da marca MTS, modelo 810, com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN.

Para realizar o ensaio é necessário colocar a amostra centrada no equipamento e duas cunhas em ambos os lados do disco, a fim de prevenir que o mesmo role ou saia do local previamente estabelecido. Segundo a ISRM (1995), devem ser

colocados dois transdutores LVDTs perpendicularmente às bases superior e inferior do equipamento, juntamente com dois suportes magnéticos, sendo que os LVDTs devem estar localizados o mais próximo possível do ponto de carregamento. Na pesquisa não foi possível colocar os suportes magnéticos, sendo confeccionado um conjunto de duas hastes com suportes em acrílico para posicionar os LVDTs (Figura 3.25). Os dois LVDTs utilizados são da marca HBM, modelo TYP WI 5 mm.



Figura 3.25 - Ensaio para determinação da tenacidade à fratura do tipo CCNBD.

O ensaio CCNBD foi realizado com extensômetros do tipo *clip-gauge*, com controle da abertura da boca da fissura e melhor aquisição de dados, de forma que a execução ocorre no nível II. O *clip-gauge* utilizado foi da marca MTS, modelo 632.028-20.

Quando um ensaio é feito com *clip-gauge*, após o rompimento há um controle pelo extensômetro, através da abertura da trinca, de forma que nas curvas é possível analisar o comportamento do material após a ruptura. Entretanto, existem algumas desvantagens no uso do *clip-gauge*, tais como, por exemplo, os corpos de prova necessitam de uma preparação mais elaborada para a instalação dos *clips-gauges* e os ensaios são mais demorados, visando registrar o pós-pico dos ensaios.

O *software* MTS TestSuite™ Multipurpose Elite (MPE), da empresa MTS, é responsável por controlar a prensa presente na máquina. A aquisição de dados da instrumentação foi executada pelo *software* CATMAN Easy AP, da empresa HBM.

Força e deslocamento do equipamento foram controlados através do módulo 1, pelo sistema MX-1615B, e os LVDTs foram controlados através do módulo 2, sistema MX-440B.

O histórico de carga deve ser registrado e o teste deve ser executado até que a amostra falhe. A taxa média de carregamento durante o ensaio não deve ser inferior a $0,25 \frac{MPa\sqrt{m}}{sec}$, ou tal que a falha ocorra em menos de 20 segundos. A taxa utilizada no ensaio foi de 0,0025 mm/min.

Os resultados serão considerados inválidos e será realizado um novo ensaio caso a fissura se desvie do plano simétrico de trinca, definido pelo plano do entalhe, em mais de 0,05 D (3,75 mm) até 0,5 D (37,5 mm), a partir do centro da superfície do disco.

A tenacidade à fratura da amostra deve ser calculada seguindo a fórmula:

$$K = \frac{P_{m\acute{a}x}}{B \sqrt{D}} \gamma^* \quad (\text{eq. 3.23})$$

onde:

$P_{m\acute{a}x}$: força máxima aplicada;

B : espessura do corpo de prova;

D : diâmetro do corpo de prova;

γ^* : valor crítico (mínimo) do fator de intensidade de tensão adimensional para a amostra;

γ^* : determinado pelas dimensões da geometria da amostra (α_0, α_1 e α_B), sendo calculado pela fórmula abaixo:

$$\gamma^* = u e^{v\alpha_1} \quad (\text{eq. 3.24})$$

onde:

u e v são constantes determinadas por α_0 e α_B .

Os valores das constantes u e v podem ser determinadas pela tabela apresentada na ISRM (1995). Se os valores de u e v não estiverem na tabela, basta fazer interpolação.

4

Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na presente pesquisa.

4.1.

Análise Petrográfica

A partir da interpretação das lâminas foi possível descrever os aspectos texturais e estruturais do sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim. Foi constatado que a rocha estudada é composta por minerais como plagioclásio, quartzo, feldspato potássico (microclina) e biotita. O quartzo é um mineral incolor com cor de interferência baixa e cristais anédricos, o plagioclásio também é incolor com cor de interferência cinza e hábito prismático. Os cristais de microclina possuem características similares ao plagioclásio, entretanto tendem a ter uma granulação mais grossa. A biotita possui cor marrom, cristais subédricos e hábito lamelar, sendo alterada para clorita. Alguns cristais de plagioclásio e microclina estão se alterando para sericita, muscovita e carbonatos (somente cristais de plagioclásio). É possível notar um maior fissuramento nos cristais de plagioclásio, ocorrendo algum preenchimento de fraturas e espaços de cristais de plagioclásio e microclina por carbonatos, e de biotita para clorita. Cabe observar nas Figura 4.1 e 4.2 a rocha sã, com nicóis descruzados e cruzados, respectivamente.

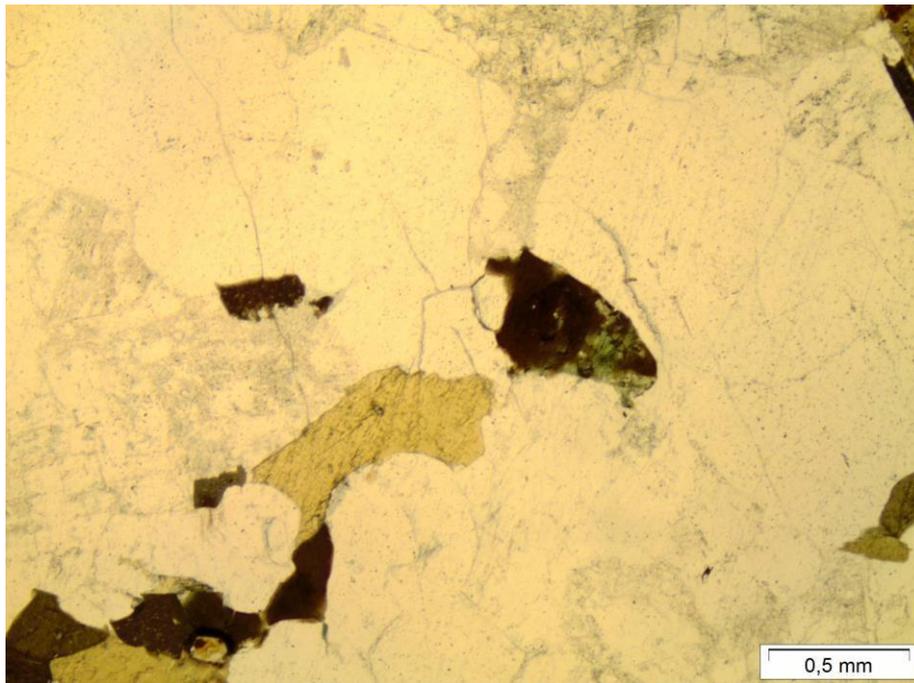


Figura 4.1 - Lâmina petrográfica da rocha sã (nicóis descruzados).

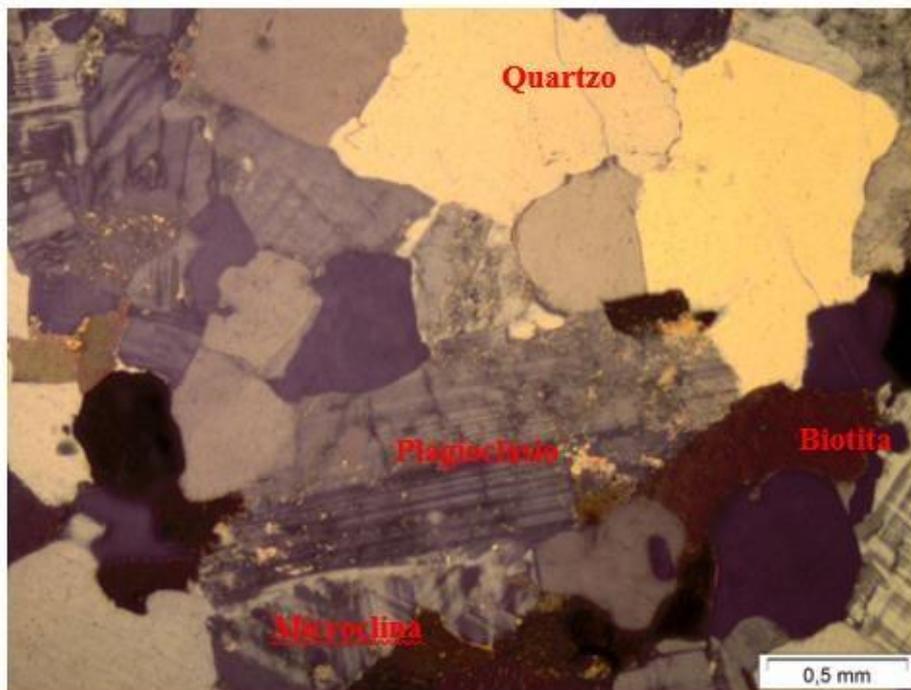


Figura 4.2 - Lâmina petrográfica da rocha sã (nicóis cruzados).

4.2.

Caracterização de índices físicos

Os índices físicos analisados foram porosidade, massa específica seca e peso específico seco, visto que estes definem as relações básicas da rocha. Todos os corpos de prova ensaiados foram previamente caracterizados.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2, a seguir, são apresentados, respectivamente, para o ensaio Brasileiro e para o ensaio CCNBD, os resultados da porosidade, massa específica seca e peso específico seco para cada amostra, além da média de cada parâmetro e o coeficiente de variação correspondente.

Tabela 4.1 - Resumo da caracterização dos índices físicos para as amostras do ensaio Brasileiro.

Amostra	Porosidade (n)	Massa específica seca (ρ_d)	Peso específico seco (γ_d)
	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	$\rho_d = \frac{M_s}{V}$	$\gamma_d = \rho_d \times g$
Unidade	%	g/cm ³	kN/m ³
COR 101	1,21	2,60	25,53
COR 102	0,96	2,62	25,68
COR 501	1,36	2,59	25,45
COR 502	1,31	2,59	25,38
Média	1,21	2,60	25,51
Coefficiente de variação (%) corrida	14,82	0,51	0,51
CON 101	1,21	2,60	25,54
CON 301	1,18	2,61	25,62
CON 303	1,18	2,61	25,65
CON 304	1,11	2,61	25,65
CON 305	1,13	2,61	25,57
Média	1,16	2,61	25,60
Coefficiente de variação (%) contra	3,64	0,20	0,20
TRO 301	1,10	2,60	25,54
TRO 302	1,06	2,62	25,67
TRO 303	1,01	2,61	25,65
TRO 304	1,11	2,61	25,60
TRO 305	1,03	2,61	25,60
TRO 307	1,32	2,60	25,52
Média	1,10	2,61	25,60
Coefficiente de variação (%) troço	10,16	0,23	0,23
Média final	1,16	2,61	25,57

Em geral, rochas ígneas e metamórficas apresentam porosidades baixas quando comparadas com rochas sedimentares. Na Tabela 4.1 é possível verificar que a porosidade das rochas ígneas foi de fato baixa, sendo o valor médio de 1,16%, e que a média do peso específico seco das rochas foi de 25,57 kN/m³.

Dentre os três parâmetros, aquele que apresenta um maior coeficiente de variação é a porosidade, com 14,82% para a amostra corrida e 10,16% para a amostra trocho.

Tabela 4.2 - Resumo da caracterização dos índices físicos para as amostras CCNBD.

Amostra	Porosidade (n)	Massa específica seca (ρ_d)	Peso específico seco (γ_d)
	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	$\rho_d = \frac{M_d}{V}$	$\gamma_d = \rho_d \times g$
Unidade	%	g/cm ³	kN/m ³
COR 101	0,98	2,71	26,60
COR 402	1,19	2,64	25,86
COR 404	1,14	2,57	25,19
COR 405	1,30	2,63	25,79
COR 406	1,08	2,62	25,69
COR 407	1,26	2,62	25,69
Média	1,16	2,63	25,80
Coefficiente de variação (%) corrida	10,08	1,77	1,77
CON 102	1,07	2,64	25,86
CON 301	1,16	2,64	25,86
CON 302	1,08	2,63	25,83
CON 303	1,24	2,63	25,80
CON 306	0,94	2,64	25,87
Média	1,10	2,63	25,84
Coefficiente de variação (%) contra	10,11	0,12	0,12
TRO 401	1,34	2,62	25,67
TRO 402	1,27	2,62	25,67
TRO 404	1,20	2,62	25,71
TRO 405	1,21	2,62	25,69
TRO 407	1,25	2,62	25,72
TRO 408	1,14	2,63	25,84
Média	1,24	2,62	25,72
Coefficiente de variação (%) trocho	5,66	0,24	0,24
INC 201	0,94	2,65	25,99
INC 202	1,08	2,65	25,96
INC 203	0,98	2,62	25,69
INC 204	1,15	2,66	26,05
INC 205	1,22	2,64	25,89
INC 206	0,93	2,64	25,87
INC 207	1,14	2,63	25,82
INC 208	1,04	2,63	25,79
Média	1,06	2,64	25,88
Coefficiente de variação (%) inclinada	9,90	0,45	0,45
Média	1,13	2,64	25,82

Pode ser verificado na Tabela 4.2 que a porosidade média foi de 1,13% e a média do peso específico seco das rochas foi de 25,82 kN/m³. É possível observar que os valores mais elevados de coeficiente de variação são os de porosidade, com 10,08% na amostra corrida e 10,11% na amostra contra.

Na Figura 4.3, a seguir, são apresentados os valores de massa específica seca do presente trabalho e de outras pesquisas feitas com granito. Os estudos dos autores Khanlari *et al.* (2012) e de Basu *et al.* (2009) foram executados com granitos do Irã e do Brasil (interior do Estado de São Paulo), ambos de regiões de clima tropical. Os trabalhos de Braga *et al.* (2002) utilizaram granitos do Porto, Portugal, e os de Khanlari e Naseri (2016) foram realizados em granitos da Malásia. Os resultados destes trabalhos podem ser observados na Figura 4.3.

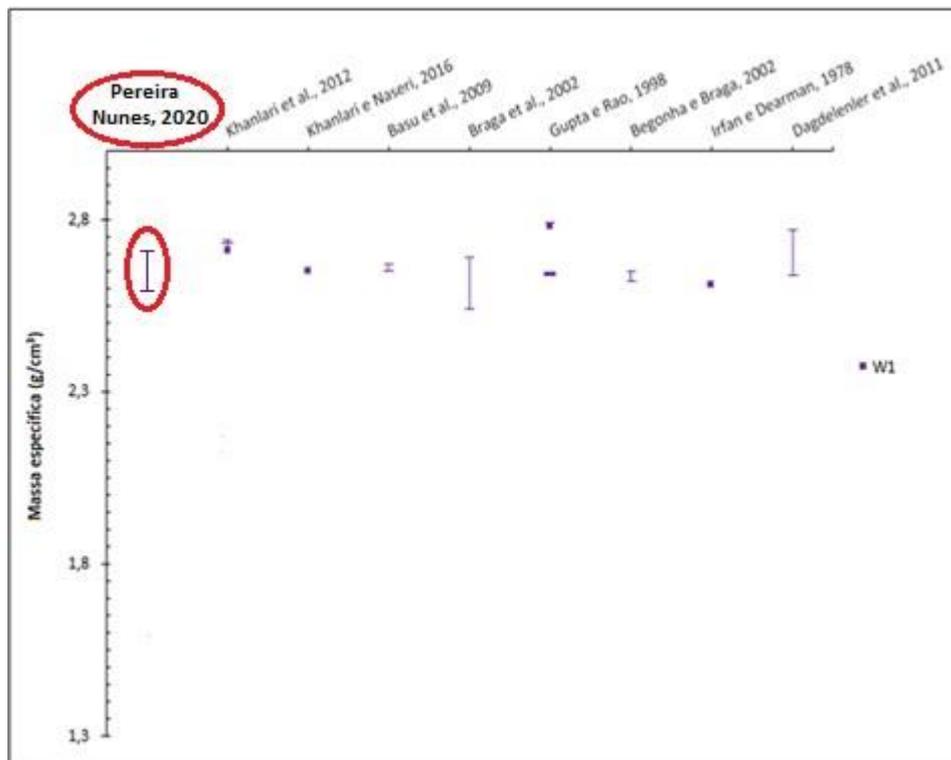


Figura 4.3 - Médias e faixas de valores de γ_d para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos (Modificado de Jaques, 2019).

Os valores de massa específica seca deste trabalho (variando entre 2,59 g/cm³ e 2,71 g/cm³) estão próximos aos resultados de outros estudos pelo mundo, em clima tropical e temperado, conforme demonstrado na Figura 4.3.

Na tabela 4.3, a seguir, são apresentados os valores de porosidade do presente trabalho e de outras pesquisas realizadas com granito.

Tabela 4.3 – Resultados dos valores de porosidade obtidos no presente trabalho, em Almeida (1999) e em Jaques (2019).

Direção superfície de corte	Pereira Nunes (2020) Sienogranito Porosidade (%) amostras Brasileiro	Pereira Nunes (2020) Sienogranito Porosidade (%) amostras Tenacidade	Almeida (1999) Granito Favela Porosidade (%)	Almeida (1999) Granito Utinga Porosidade (%)	Jaques (2019) Sienogranito Porosidade (%)
Corrida	1,21	1,16	0,73	0,84	0,80
Contra	1,16	1,10	0,79	0,71	
Trocho	1,10	1,24	0,77	0,83	
Inclinada	---	1,06	---	---	

Analisando a Tabela 4.3, é possível notar que a porosidade da rocha do presente trabalho é um pouco maior que as observadas nos demais resultados.

4.3.

Ensaio esclerométrico (Martelo de Schmidt)

O ensaio esclerométrico foi realizado com o martelo de Schmidt a 90° da superfície da rocha, com 20 (vinte) leituras para cada bloco. A seguir, na Tabela 4.4 e na Figura 4.4, são apresentados os resultados obtidos nestes ensaios e as respectivas resistências à compressão uniaxial estimadas pelo método de cálculo sugerido por Aydin (2009), a partir de correlações encontradas na literatura, como pode ser visto na equação 3.7.

Tabela 4.4 - Resultados martelo de Schmidt.

Martelo de Schmidt					
Bloco 01	Bloco 02	Bloco 03	Bloco 04	Bloco 05	
64,00	66,00	63,00	55,50	47,50	
21,00	43,00	68,00	65,00	44,00	
73,50	62,50	48,50	68,50	62,50	
53,00	56,00	45,00	39,00	57,00	
54,00	42,50	62,00	55,00	44,00	
64,00	62,00	46,50	60,00	36,00	
61,50	38,00	58,50	62,00	58,00	
77,50	54,50	40,50	46,00	48,00	
81,00	74,00	44,50	51,00	61,50	
82,50	54,50	54,00	47,50	58,00	
61,50	53,00	49,50	64,50	42,50	
44,00	63,50	68,50	61,50	61,50	
35,50	73,50	62,00	59,00	48,50	
56,50	54,00	56,50	70,50	58,50	
56,50	59,50	62,50	60,50	56,00	
57,50	66,00	31,00	69,00	58,00	
59,50	54,50	52,00	46,00	28,00	
49,50	43,00	42,50	79,50	48,50	
47,00	47,00	65,50	83,50	66,50	
41,50	29,50	39,00	79,00	47,00	
Média	57,05	54,83	52,98	61,13	51,58
Desvio padrão	15,24	11,69	10,70	11,92	9,80
CV (%)	26,71	21,32	20,20	19,50	19,00
UCS	78,65	67,31	59,13	104,62	53,61

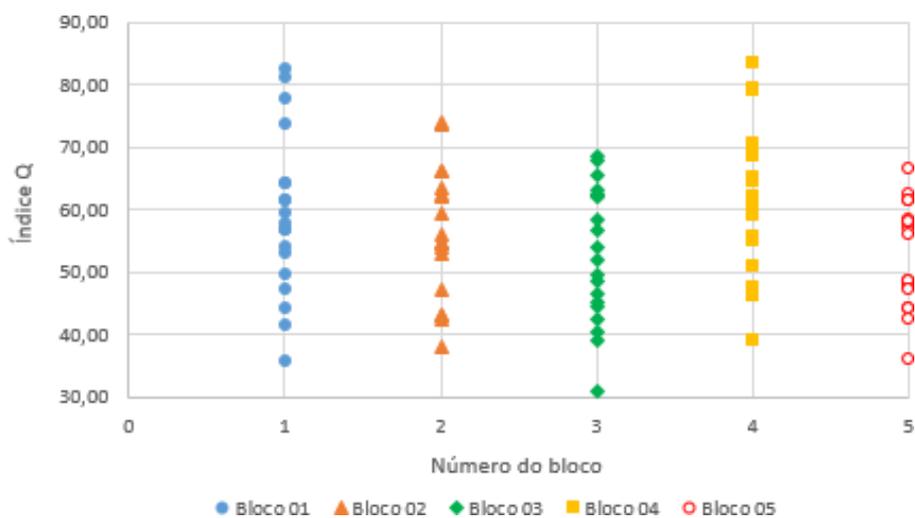


Figura 4.4 - Variação do índice Q em função do bloco.

É possível perceber na Figura 4.4 que existe uma significativa variação dos valores de rebote obtidos a partir do martelo de Schmidt, sendo que esta variação

ocorre em todos os blocos analisados. Esta magnitude de variação é esperada, pois eventualmente o martelo pode ser pressionado em um vazio da rocha, de forma a obter valores mais baixos, ou pode ser pressionado sobre um mineral, resultando um valor mais alto. Observando que os valores de coeficiente de variação são similares, é possível ratificar que a variação presente no valor de rebote Q é compatível com o teste.

Pode ser percebido que os valores das médias do martelo de Schmidt de cada bloco são similares, em torno de 50 ou de 60, o que era esperado, pois são medições do mesmo material. Na Figura 4.5, a seguir, são apresentados os valores de rebote Q do presente trabalho e de outras pesquisas feitas com granito.

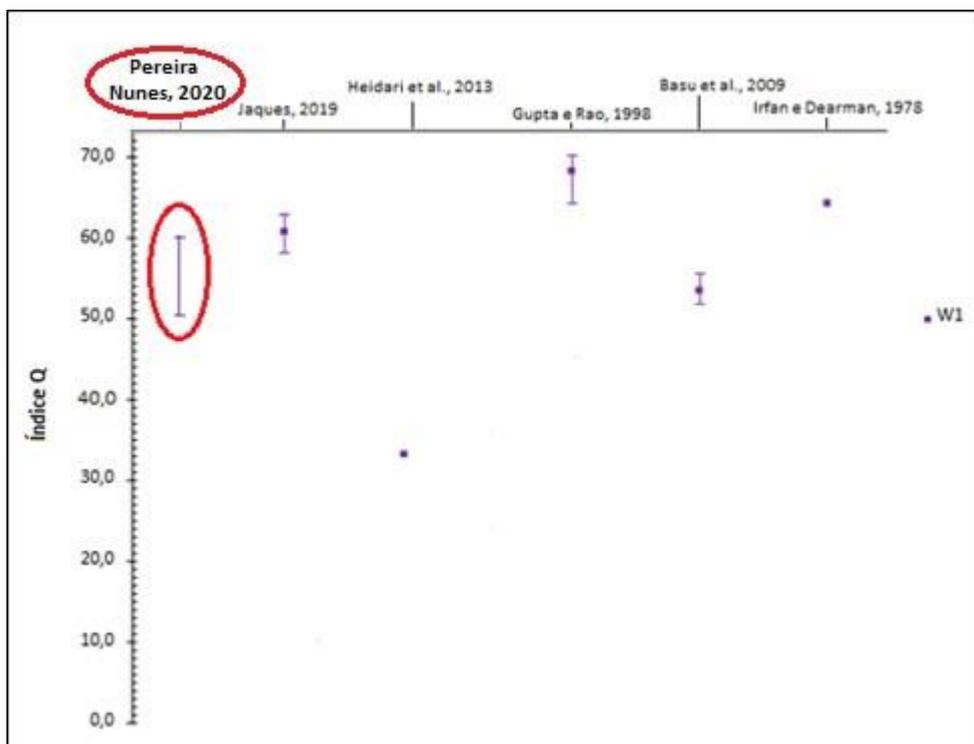


Figura 4.5 - Médias e faixas de valores de Q para o sienogranito e outras rochas graníticas (Modificado de Jaques, 2019).

A comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com outros estudos da literatura (Figura 4.5) permite observar que os valores medidos estão adequados.

4.4.**Ensaio indireto de resistência à tração (Ensaio Brasileiro)**

Foram realizados 15 (quinze) ensaios Brasileiros, sendo 4 (quatro) corpos de prova na direção corrida, 5 (cinco) na direção contra e 6 (seis) na direção troço.

Nas Figura 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 são apresentados corpos de prova que foram ensaiados nas direções corrida, contra, troço e inclinada, respectivamente.



Figura 4.6 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção corrida.



Figura 4.7 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção contra.



Figura 4.8 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção troço.



Figura 4.9 - Corpo de prova utilizado no ensaio Brasileiro na direção inclinada.

Na Figura 4.10 são apresentados os gráficos de resistência à tração em função do deslocamento (medido pelo *clip-gauge*) da amostra corrida, gerados pelo ensaio Brasileiro.

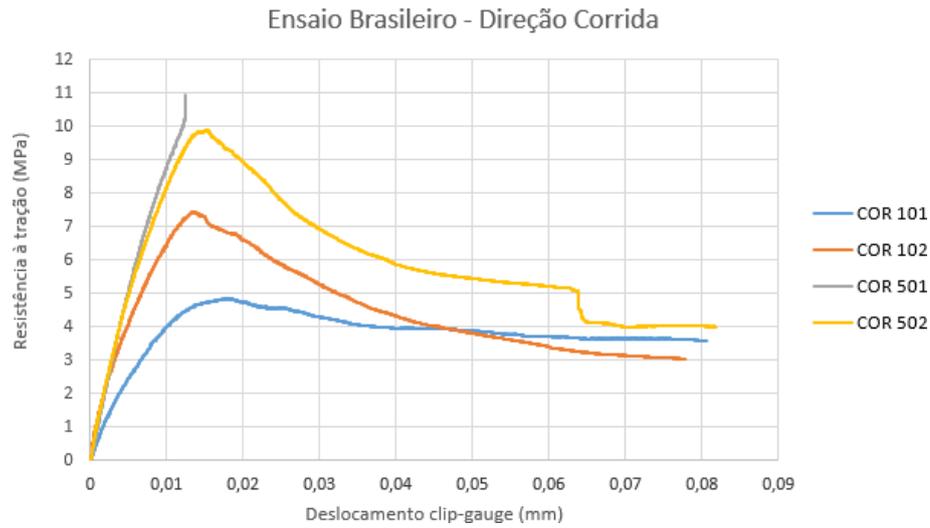


Figura 4.10 - Resultados dos ensaios Brasileiros na direção corrida.

Na Figura 4.11 são apresentados os gráficos de resistência à tração em função do deslocamento (medido pelo *clip-gauge*) da amostra contra, gerados pelo ensaio Brasileiro.

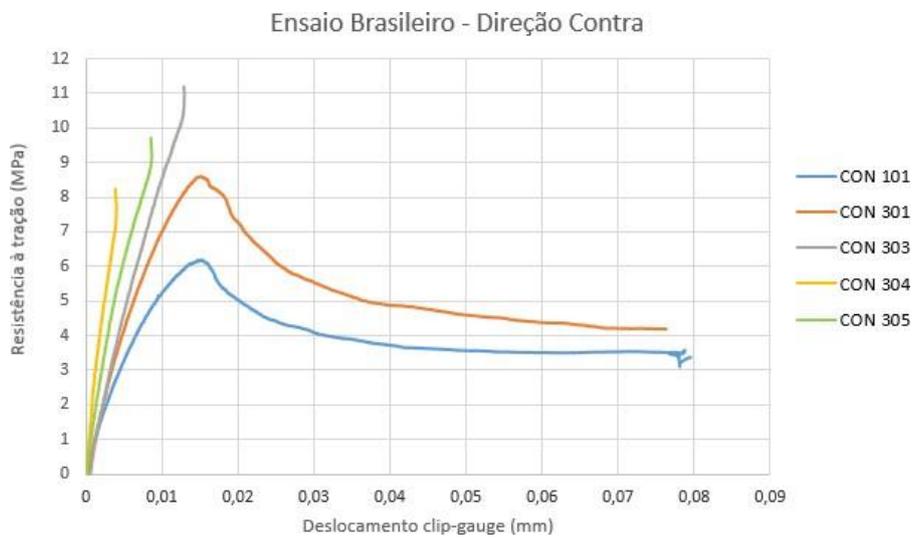


Figura 4.11- Resultados dos ensaios Brasileiros na direção contra.

Na Figura 4.12 são apresentados os gráficos de resistência à tração em função do deslocamento (medido pelo *clip-gauge*) da amostra trocho, gerados pelo ensaio Brasileiro.

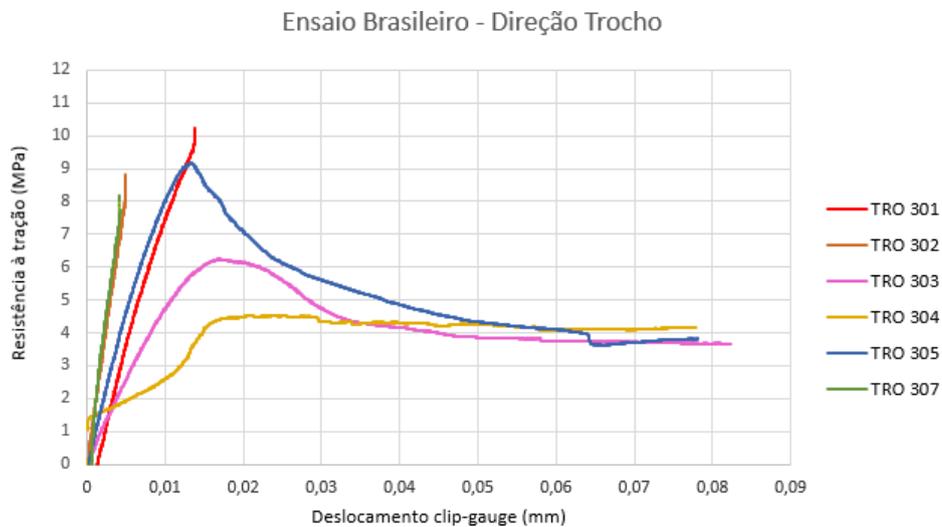


Figura 4.12 - Resultados dos ensaios Brasileiros na direção trocho.

Um resumo dos resultados obtidos nos ensaios Brasileiro está apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio Brasileiro.

	RESUMO	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
CORRIDA	COR 101	4,86	6,21	32,68
	COR 102	7,45		
	COR 501	10,93		
	COR 502	9,89		
	Média	8,28		
CONTRA	CON 101	6,19	4,25	21,10
	CON 301	8,60		
	CON 303	11,20		
	CON 304	8,24		
	CON 305	9,71		
Média	8,79			
TROCHO	TRO 301	10,22	4,80	26,62
	TRO 302	8,82		
	TRO 303	6,28		
	TRO 304	4,53		
	TRO 305	9,16		
	TRO 307	8,20		
Média	7,87			

Ao observar as Figura 4.10, 4.11 e 4.12 é possível verificar que todas as direções de corte possuem uma relevante variação no valor de pico da resistência à tração. Apesar disto, as informações apresentadas na Tabela 4.5 demonstram que os valores da resistência à tração média obtidos nas direções corrida, contra e trocho são muito similares, o que indica que há pouca anisotropia nesta rocha. Analisando o valor do CV (%) é possível perceber que ocorre uma significativa variação nos valores de resistência à tração dentro de uma mesma direção.

Na Tabela 4.6, a seguir, são apresentados os valores de resistência à tração do presente trabalho e de outras pesquisas feitas com granito. Almeida (1999) realizou ensaios Brasileiros nas três direções de corte para determinar a resistência à tração de granitos na cidade do Rio de Janeiro e Jaques (2019) realizou ensaios Brasileiros em apenas uma direção de corte utilizando granitos do Espírito Santo, da região do município de Cachoeiro de Itapemirim.

Tabela 4.6 - Resultados médios dos ensaios Brasileiros obtidos no presente trabalho, em Almeida (1999) e em Jaques (2019).

Direção superfície de corte	Pereira Nunes (2020) Sienogranito σ_t (MPa)	Almeida (1999) Granito Favela σ_t (MPa)	Almeida (1999) Granito Utinga σ_t (MPa)	Jaques (2019) Sienogranito σ_t (MPa)
Corrida	8,3	8,0	6,3	9,7
Contra	8,8	8,4	5,7	
Trocho	7,9	7,4	7,3	

Na Tabela 4.6, é possível verificar que os resultados médios obtidos no presente trabalho foram muito semelhantes aos resultados encontrados por Almeida (1999) na rocha granito Favela e por Jaques (2019) no sienogranito. Segundo Almeida (1999), a direção corrida corresponde à superfície principal de fraqueza da rocha e a direção trocho representa a superfície que possui um corte mais difícil, ou seja, é esperado que a direção corrida apresente a menor resistência à tração e a direção trocho a maior resistência à tração. Além disso, cabe observar que, diferentemente do que sugere a literatura, tanto no presente trabalho, quanto no granito Favela (Almeida, 1999), a direção trocho possui a menor resistência à tração dentre as direções de corte, seguido da direção corrida e posteriormente da direção contra. No caso do granito Utinga (Almeida, 1999) a direção trocho possui a maior resistência à tração, conforme esperado, entretanto a direção corrida não é a de menor resistência à tração.

Nas Figura 4.13 e 4.14 são apresentados corpos de prova após serem ensaiados. Na Figura 4.13 é observado o corpo de prova dividido após a ruptura e na Figura 4.14 está disposta a trinca após o rompimento da amostra.



Figura 4.13 – Corpo de prova dividido após ruptura.



Figura 4.14 - Corpo de prova após ruptura com trinca nítida.

4.5.

Ensaio de tenacidade à fratura (CCNBD)

Foram realizados 25 (vinte e cinco) ensaios CCNBD, sendo 6 (seis) corpos de prova na direção corrida, 5 (cinco) na direção contra, 6 (seis) na direção trocho e 8 (oito) na direção qualquer (inclinada).

Na Figura 4.15 são apresentados os gráficos de força em função do deslocamento (medido pelo *clip-gauge*) da amostra corrida, gerados pelo ensaio CCNBD.

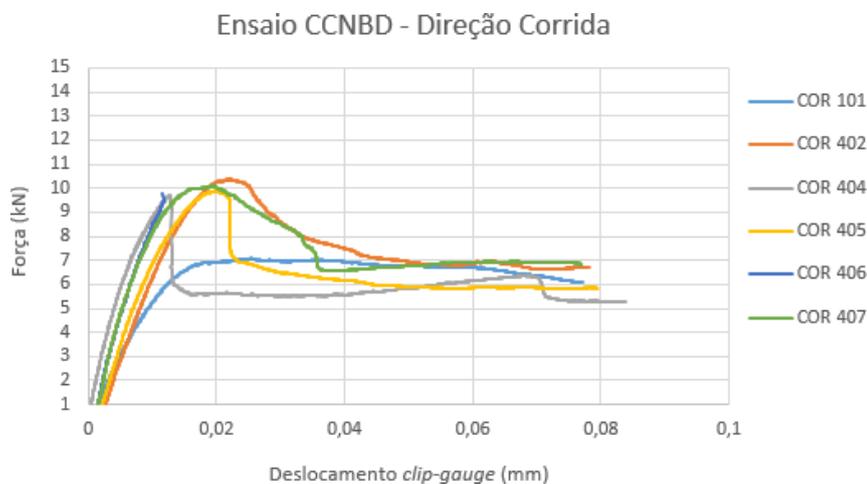


Figura 4.15 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção corrida.

Na Figura 4.16 são apresentados os gráficos de força em função do deslocamento (medido pelo *clip-gauge*) da amostra contra, gerados pelo ensaio CCNBD.

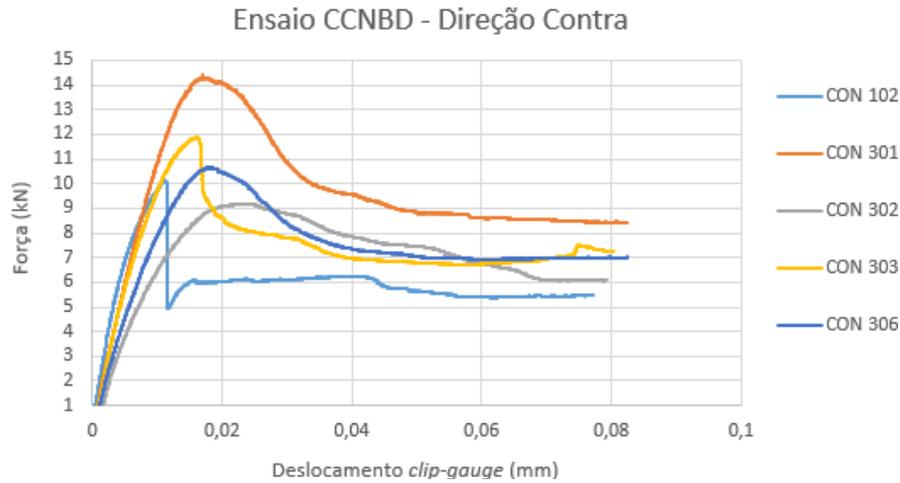


Figura 4.16 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção contra.

Na Figura 4.17 são apresentados os gráficos de força em função do deslocamento (medido pelo *clip-gauge*) da amostra trocho, gerados pelo ensaio CCNBD.

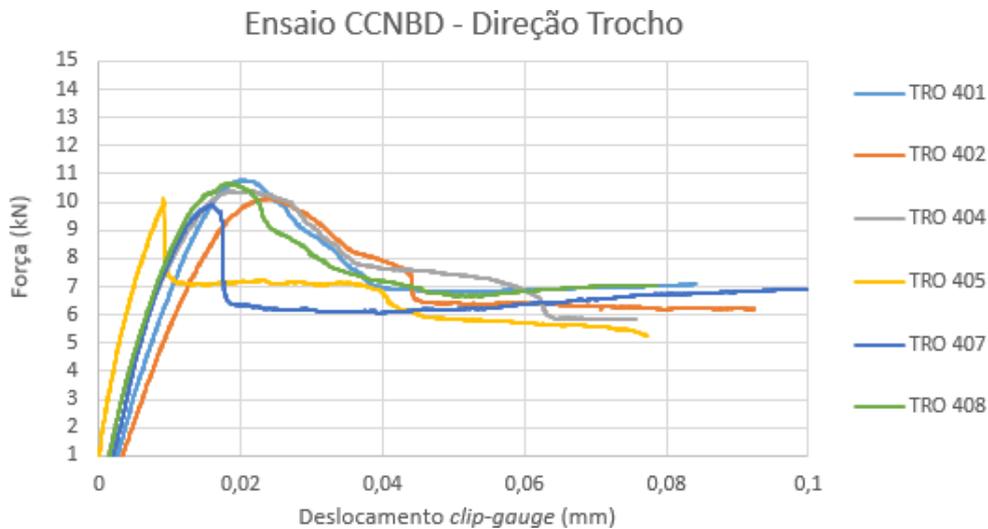


Figura 4.17 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção trocho.

Na Figura 4.18 são apresentados os gráficos de força em função do deslocamento (medido pelo *clip-gauge*) da amostra inclinada, gerados pelo ensaio CCNBD.

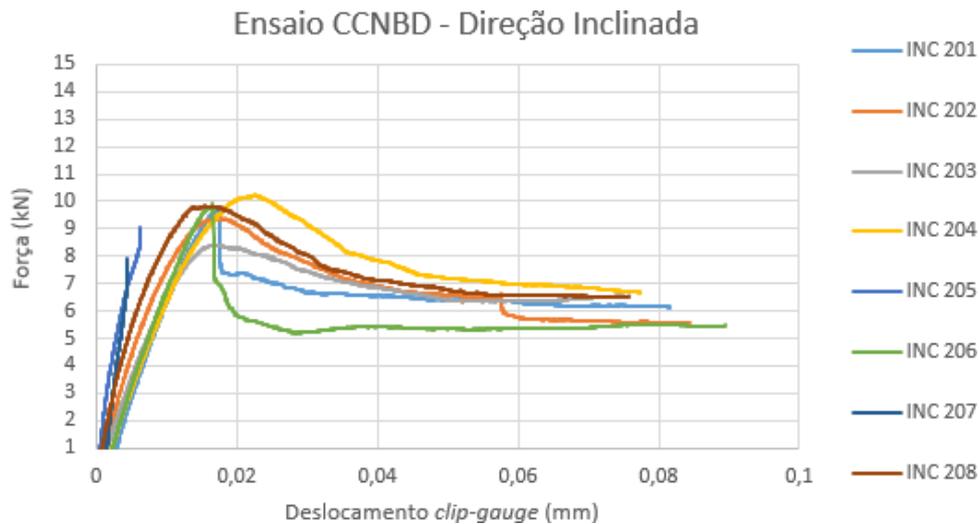


Figura 4.18 - Resultados dos ensaios CCNBD na direção inclinada.

Conforme descrito no item 3.2.5, para que os testes sejam válidos é necessário que os corpos de prova satisfaçam quatro condições, descritas nas equações 3.28a a 3.33, segundo a ISRM, 1995. Para verificar essas condições, é preciso plotar um gráfico com os parâmetros geométricos básicos do CCNBD (α_1 e α_B) e comparar com os limites estabelecidos no item 3.2.5. (Figura 4.19). Após analisar o gráfico foi identificado que todos os corpos de prova possuíam geometrias válidas.

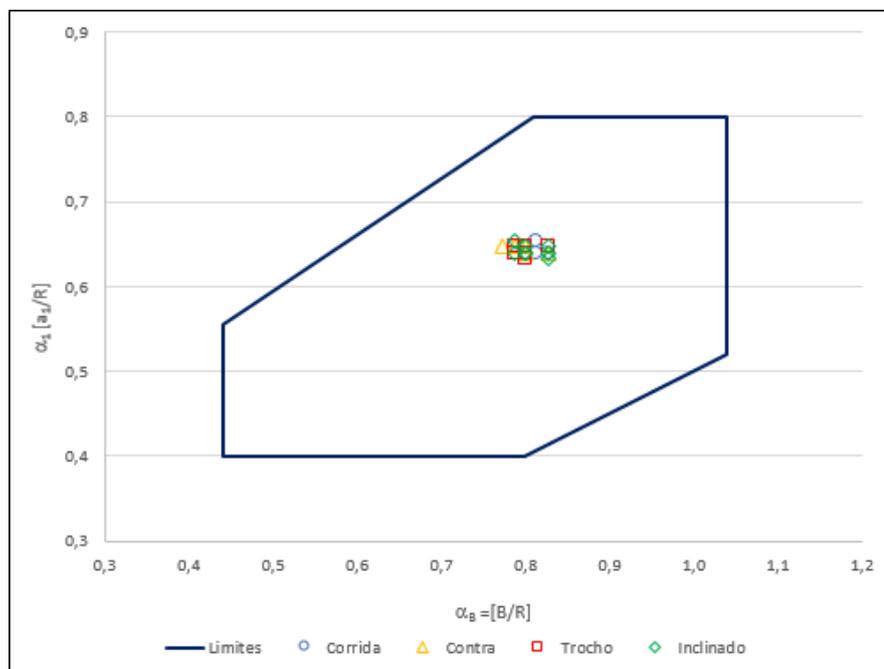


Figura 4.19 - Escopo da geometria válida para corpos de prova CCNBD.

Um resumo dos resultados obtidos nos ensaios CCNBD é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio CCNBD.

	RESUMO	$K_{Ic} (MPa \times m^{0,5})$	Desvio Padrão	CV (%)
CORRIDA	COR 101	0,73	0,12	12,41
	COR 402	1,05		
	COR 404	1,01		
	COR 405	1,02		
	COR 406	1,01		
	COR 407	1,02		
	Média	0,98		
CONTRA	CON 102	1,05	0,17	15,08
	CON 301	1,39		
	CON 302	0,94		
	CON 303	1,19		
	CON 306	1,08		
	Média	1,13		
TROCHO	TRO 401	1,08	0,03	3,23
	TRO 402	1,05		
	TRO 404	1,08		
	TRO 405	1,03		
	TRO 407	1,01		
	TRO 408	1,10		
	Média	1,06		
INCLINADA	INC 201	1,01	0,10	10,39
	INC 202	0,92		
	INC 203	0,85		
	INC 204	1,06		
	INC 205	0,91		
	INC 206	0,97		
	INC 207	0,76		
	INC 208	0,99		
Média	0,93			

Ao observar as Figura 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 é possível verificar que todas as direções de corte possuem reduzida variação no valor de pico da resistência à tração. Na Tabela 4.7 cabe observar que os valores da resistência à tração média obtidas nas direções corrida, contra, trocho e inclinada são muito similares, o que indica que há pouca anisotropia nesta rocha. É possível verificar que o valor do coeficiente de variação (CV) na direção trocho é significativamente menor do que nas demais direções.

Na Figura 4.20 os resultados obtidos são apresentados em função da direção das superfícies de corte (corrida, contra, trocho e inclinada).

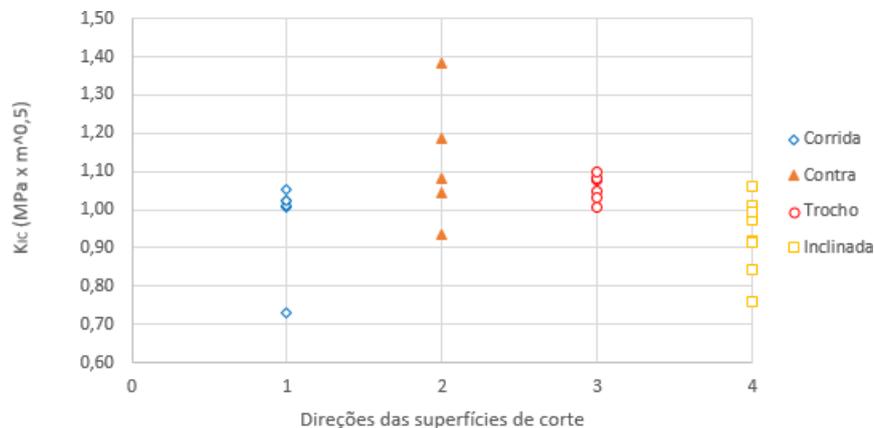


Figura 4.20 - Resultado do ensaio CCNBD em função da direção das superfícies de corte.

Cabe notar na Figura 4.20 que uma amostra da direção corrida está fora do padrão, com K_{Ic} ($0,73 \text{ MPa} \times \text{m}^{0,5}$). Os resultados das amostras contra e inclinada apresentam maior dispersão, enquanto as amostras trocho possuem reduzida dispersão quando comparada com as demais direções. É possível observar que a variação dos valores de tenacidade à fratura nas direções corrida e inclinada são similares. Apesar dessas diferenças entre as direções, todas tiveram valores de tenacidade bem próximos, indicando pouca anisotropia.

Na Tabela 4.8, a seguir, são apresentados os valores médios de tenacidade à fratura do presente trabalho e de outras pesquisas feitas com granito. Almeida (2006) realizou ensaios CCNBD para determinar a tenacidade à fratura nas três direções de corte, utilizando granitos da cidade do Rio de Janeiro. Por serem rochas semelhantes, a comparação dos resultados obtidos é válida (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Resultados médios dos ensaios CCNBD obtidos no presente trabalho e em Almeida (2006).

Direção superfície de corte	Pereira Nunes (2020) Sienogranito $K_{ICmédio}$	Almeida (2006) Granito Favela $K_{ICmédio}$	Almeida (2006) Granito Utinga $K_{ICmédio}$
Corrida	0,97	0,97	0,60
Contra	1,13	0,90	0,73
Trocho	1,06	1,16	0,82
Inclinada	0,93	---	---

Ao comparar os resultados é possível observar que os valores de tenacidade à fratura do presente trabalho são similares aos valores de tenacidade à fratura do granito Favela do trabalho de Almeida (2006). Cabe constatar que o granito Utinga (Almeida, 2006) possui valores de tenacidade à fratura menores que o do granito Favela (Almeida, 2006) e do sienogranito ensaiado no presente trabalho.

Nas amostras de granito Favela (Almeida, 2006), a direção contra (2) aparece como a de menor resistência, sendo seguida pela corrida (1) e depois pela direção trocho (3), não coincidindo com a ordem esperada pelos estudos de desmonte. Já nas amostras de granito Utinga (Almeida, 2006) os resultados seguiram o comportamento esperado, ou seja, a resistência em $\sigma_{t1} < \sigma_{t2} < \sigma_{t3}$. No presente trabalho, assim como verificado no granito Favela (Almeida, 2006), os valores obtidos não coincidiram com a ordem esperada.

Na Tabela 4.9, a seguir, são apresentados os valores médios de tenacidade à fratura do presente trabalho, seguido da relação do $\frac{K_{IC \text{ médio}}}{K_{IC \text{ trocho}}}$.

Tabela 4.9 - Resultados médios dos ensaios CCNBD obtidos no presente trabalho e relação $\frac{K_{IC \text{ médio}}}{K_{IC \text{ trocho}}}$.

Direção superfície de corte	$K_{IC \text{ médio}}$	$\frac{K_{IC \text{ médio}}}{K_{IC \text{ trocho}}}$
Corrida	0,97	0,92
Contra	1,13	1,07
Trocho	1,06	1,00
Inclinada	0,93	0,88

A partir da relação $\frac{K_{IC \text{ médio}}}{K_{IC \text{ trocho}}}$ é possível analisar de forma mais precisa a anisotropia da rocha. Foi constatado que os valores desta relação na direção de corte corrida, contra e inclinada são próximos a 1,00, o que ratifica que há pouca anisotropia na rocha estudada.

5

Conclusões e sugestões

5.1.

Conclusões

Este trabalho tem como principal objetivo a aquisição de um melhor entendimento a respeito da existência da anisotropia na propriedade da tenacidade à fratura nas rochas graníticas. Em adição, também procura avaliar as relações da tenacidade com as propriedades físicas e mecânicas das rochas. Tendo em vista a caracterização das amostras, foram obtidas as seguintes propriedades físicas e mecânicas: porosidade, massa específica seca, peso específico seco, tenacidade à fratura no modo I e resistência à tração. Nos ensaios, foram avaliadas a tenacidade à fratura do sienogranito a partir de 5 (cinco) blocos de rocha são retirados de pedreiras da região do município de Cachoeiro de Itapemirim, localizado no sul do Espírito Santo. Visando avaliar a anisotropia da tenacidade à fratura no modo I, foi utilizada a mais favorável metodologia sugerida pela ISRM (1995), denominada CCNBD (Cracked Circunferential Notched Brazilian Disc). Foram testadas 25 (vinte e cinco) amostras, sendo o ensaio realizado em 4 (quatro) direções diferentes: contra, corrida, trocho e direção aleatória (inclinada). Além disso, foi realizado o ensaio de tração indireta (ensaio Brasileiro), sendo este realizado com um total de 15 (quinze) amostras em 3 (três) direções diferentes: contra, corrida e trocho.

Na caracterização dos índices físicos, foi possível notar que a porosidade do sienogranito utilizado neste estudo é baixa (entre 0,93% e 1,34%), conforme esperado, e corroborando Paraguassú *et al.* (2014), que afirma que a porosidade do granito é menor que 3%. Quanto aos resultados obtidos na determinação da massa específica (entre 2,59 g/cm³ e 2,71g/cm³), foram semelhantes aos observados por Khanlari *et al.* (2012), Khanlari et Naseri (2016), Basu *et al.* (2009), Braga *et al.* (2002), Gupta e Rao (1998), Begonha e Braga (2002), Irfan e Dearman (1978) e Dagdelember *et al.* (2011).

Os ensaios Brasileiros apresentaram valores dentro da ordem de grandeza esperada. Os resultados obtidos da resistência à tração das rochas graníticas estudadas foram semelhantes aos valores encontrados por Almeida (1999) no

granito Favela e Jaques (2019) no sienogranito, sendo semelhantes nas diferentes direções de corte, de forma que a ideia de um comportamento anisotrópico relacionado à resistência à tração dos granitos investigados não se confirmou.

Os resultados obtidos para a tenacidade à fratura das rochas graníticas foram semelhantes aos valores encontrados por Almeida (1999) no granito Favela, nas diferentes direções de corte, de forma que a ideia de um comportamento anisotrópico relacionado à propagação de fratura dos granitos investigados não se consolidou.

A metodologia do ensaio CCNBD, sugerida pela ISRM (1995), demonstrou adequação, não havendo maiores dificuldades, tanto para a preparação, quanto para a execução e interpretação das medições. Os resultados obtidos no martelo de Schmidt, e consequentemente para a resistência à compressão uniaxial (UCS) estimada, foram semelhantes aos resultados de Jaques (2019) e Basu *et al.* (2009).

5.2.

Sugestões

O estudo experimental apresentado nesta Dissertação não teve a pretensão de encerrar o tema abordado, portanto é possível recomendar as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Aplicar os testes empregados neste documento em outros tipos de rochas, tais como, por exemplo, ígneas, sedimentares e metamórficas;
- Aplicar o ensaio CCNBD na determinação da tenacidade à fratura no modo misto;
- Relacionar os efeitos observados na tenacidade à fratura do ensaio CCNBD a diferentes ensaios.

6

Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, M. Determinação da tenacidade à fratura em rochas brasileiras. **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

ALMEIDA, F. F. O. Cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, 1977.

ALMEIDA, L. C. R. Estudo Experimental da anisotropia de resistência de rochas graníticas e sua aplicação a processos de desmonte. **Dissertação de Mestrado**. Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ, p. 116, 1999.

, L. C. R.; VARGAS, E. DO A.; DE FIGUEIREDO, R. P. Mechanical characterization of rock splitting planes in granitic rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 43, n. 7, p. 1139–1145, 2006.

ALVAREZ, H. I. P. Ensaio não convencionais para determinação da tenacidade à fratura em rochas: análise e comparação. **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 13-15, 2004.

AMINZADEH, A.; FAHIMIFAR, A.; MORTEZA, N. On Brazilian disk test for mixed-mode I/II fracture toughness experiments of anisotropic rocks. **Elsevier**, 2019.

ARCHANJO, C. Anisotropia de suscetibilidade magnética aplicada às rochas ígneas máficas intrusivas. **Tese de doutorado**. Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 3, 2003.

AYDIN, A. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. p. 2, 2008.

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

BASU, A.; CELESTINO, T. B.; BORTOLUCCI, A. A. Evaluation of rock mechanical behaviors under uniaxial compression with reference to assessed weathering grades. **Rock Mech Rock Engng**, v. 42, 2009.

BEGONHA, A.; BRAGA, M. A. S. Weathering of Oporto Granite: Geotechnical and Physical Properties. **Catena**, v. 49, 2002.

BOLONINI, T. M. Geologia e potencialidade do granito “Vermelho Capão Bonito” (Sudoeste do Estado de São Paulo) como rocha ornamental. **Dissertação de Mestrado**. Departamento de Geologia, Universidade Estadual Paulista, 2011.

BRAGA, M. A. S.; PAQUET, H.; BEGONHA, A. Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization. **Catena**, v. 49, 2002.

CASTRO, E. Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, cap. 4, p. 45-50, 2009.

CARUSO, L. G. & BRAGA, T. O. Granitos e Mármoreos do Estado de São Paulo – IN Principais Depósitos Minerais do Brasil - DNPM - CPRM, Brasília, p. 399-409, 1991.

CHEN, C. S. Characterization of deformability, strength, and fracturing of anisotropic rocks using Brazilian tests. **University of Colorado**. p. 4; 5; 25; 26; 37-39, 1996.

DAGDELENLER, G.; SEZER, E. A.; GOKCEOGLU, C. Some non-linear models to predict the weathering degrees of a granitic rock from physical and mechanical parameters. **Expert Systems with Applications**, v. 38, 2011.

DAI, F. Dynamic Tensile, Flexural and Fracture Tests of Anisotropic Barre Granite. **University of Toronto**, 2010.

ERARSLAN, N. The importance of testing method to evaluate the most representative mode I fracture toughness value of brittle rocks. MedCrave, 2018.

FARIAS, L. Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto. **M.FAP - Consultoria**. 2018.

FERREIRA, L. E. T.; HANAI, J. B. Mecânica da Fratura. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência dos Materiais. 1ed. São Paulo: **IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto**, 2007.

GONZÁLES DE VALLEJO, L. I.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. Ingeniería geológica. Prentice Hall, Madrid, p. 715, 2002.

GUO, H.; AZIZ, N. I.; SCHMIDT, L. C. Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test. **Elsevier**. 1992.

GUPTA, A. S.; RAO, K. S. Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. **Bull. Eng. Geol. Env.**, v. 57, 1998.

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 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, 1979.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 25, p. 71-96, 1988.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. Suggested methods for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched brazilian disc (CCNBD) specimens. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 32, p. 57-64, 1995.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008.

IRFAN, T. Y.; DEARMAN, W. Engineering Classification and Index Properties of a Weathered Granite. **International Association of Engineering Geology**, n. 17, 1978.

JAQUES, D. Caracterização morfológica, mineralógica e geomecânica de perfis de intemperismo de rochas graníticas em clima tropical. **Tese de doutorado**, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2019.

KANNINEN, M. F.; POPELAR, C. H. **Advanced Fracture Mechanics**. New York, USA: Oxford University Press, 1985.

KAKLIS, K. *et al.* Determination of Fracture Loads for Mode I Fracture Toughness Calculations for CCNBD Marble Specimens by Acoustic Emission Signals. **University of Kentucky**, Lexington, KY, 2015.

KHANLARI, G. R.; HEIDARI, M.; MOMENI, A. A. Assessment of weathering processes effect on engineering properties of Alvand granitic rocks (west of Iran), based on weathering indices. **Environ Earth Sciences**, v. 67, 2012.

KHANLARI, G. R.; NASERI, F. Investigation of physical deterioration of Malayer granitic rocks using a new weathering coefficient (Kr4). **Environ Earth Sciences**, v. 75, 2016.

KURUPPU, M. D.; OBARA, Y.; AYATOLLAHI, M. R.; CHONG, K. P.; FUNATSU, T. ISRM - Suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013.

LOBATO, K. Simulação física e numérica de problemas de estabilidade de poços. **Dissertação de Mestrado**, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2009.

LUMB, P. Engineering properties of fresh and decomposed igneous rocks from Hong Kong. **Engineering Geology**, v. 19, 1983.

MEDINA, J. A. H. Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica. **Tese de Doutorado**, 2015.

NASSERI, M. H. B. & MOHANTY, B. Fracture toughness anisotropy in granitic rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. Trad. Salvador e Giammusso. 2. ed. São Paulo: **PINI**, 1997.

OUCHTERLONY, F. *Compliance measurements on notched rock cores in bending*. Stockolm: Swedish Detonic Research Foundation. Report DS, 1980.

PARAGUASSÚ, A *et al.* Indústria da pedra: da extração à aplicação final. Departamento de geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, **Universidade de São Paulo**, São Carlos, p. 77, 2014.

PIRES, B. Estudo experimental da tenacidade de rochas gnáissicas para diferentes graus de alteração. **Dissertação de Mestrado**, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2018.

PRIKRYL, R. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001.

SCHMIDT, R. A. Fracture toughness testing of limestone. *Experimental Mechanics*, Esaton, v. 16, p. 161-167, 1976.

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.

WHITTAKER, B. N.; SING, R. N. & SUN, G. *Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, 1992.

YI, X.; SUN, Z.; OUCHTERLONY, F. & STEPHANSSON, O. Fracture toughness of kallax gabbro and specimen size effecte. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract**, 1991.