

**LÁZARO CORRÊA MARCELLINO**

**ESTUDO DA MECÂNICA DA FRATURA ASSOCIADA À ALTERABILIDADE EM  
ROCHAS BÁSICAS INTRUSIVAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

Coorientadora: Cibele Clauver de Aguiar

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

M314e  
2020 Marcellino, Lázaro Corrêa, 1991-  
Estudo da mecânica da fratura associada à alterabilidade em  
rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero - MG / Lázaro Corrêa  
Marcellino. – Viçosa, MG, 2020.

1 dissertação eletrônica (95 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Civil, 2020.

Referências bibliográficas: f. 91-95.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.348>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Mecânica de rochas. 2. Rochas - Testes. 3. Rochas  
metamórficas - Quadrilátero Ferrífero (MG). I. Marques,  
Eduardo Antonio Gomes, 1965-. II. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624.15132

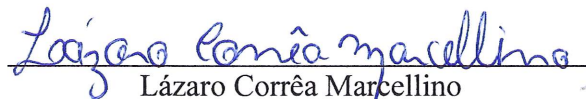
LÁZARO CORRÊA MARCELLINO

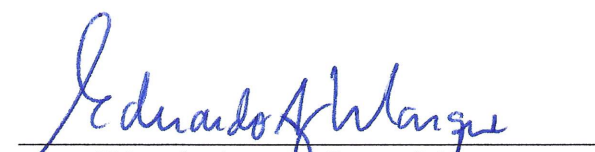
**ESTUDO DA MECÂNICA DA FRATURA ASSOCIADA À ALTERABILIDADE EM  
ROCHAS BÁSICAS INTRUSIVAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 13 de fevereiro de 2020

Assentimento:

  
Lázaro Corrêa Marcellino  
Autor

  
Eduardo Antonio Gomes Marques  
Orientador

*Dedico este trabalho aos  
meus pais, Luiz e Helena, ao  
meu irmão, Helder e ao  
ensino público de qualidade.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir a realização deste trabalho e ter me dado o dom da ciência, aos meus pais e irmão pela ajuda e incentivo. Aos meus familiares, tios e tias que foram essenciais nos auxílios nos momentos de dificuldade, a minha namorada Rafaella por sempre estar ao meu lado, apoiando e incentivando, e não deixando me desanimar.

Aos professores da UFV pelo ensinamento passado durante esse período, especialmente ao professor e amigo Eduardo Antonio Gomes Marques, que apoiou e orientou a realização desta dissertação, servindo sempre como exemplo pessoal e profissional.

A UFV e seus colaboradores pela infraestrutura e prestação de serviço de excelência fornecida, em especial aos técnicos dos laboratórios e equipe de iniciação científica formada pela Carol Crissafe e Eduardo Pereira.

Aos amigos de república que Viçosa me deu Vinícius, Deyson, Carlos, Isaac e Acácio.

As amigas da pós graduação para vida Daniel, Ângelo, Jessé e Carol.

A Vale S.A pela política de incentivo a pesquisa. Especialmente ao Teófilo Aquino.

Ao órgão de fomento a pesquisa Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, que incentivou financeiramente a realização deste trabalho.

## RESUMO

MARCELLINO, Lazaro Corrêa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Estudo da Mecânica da Fratura Associada à Alterabilidade em Rochas Básicas Intrusivas do Quadrilátero Ferrífero - MG.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientadora: Cibele Clauver de Aguiar.

Este trabalho apresenta uma série de resultados dos estudos sobre as rochas metadiabásicas da Mina Tamanduá, localizada no Quadrilátero Ferrífero, MG. As amostras de metadiabásio coletadas em furos de sondagem foram submetidas a teste de resistência de tenacidade à fratura através do ensaio *Cracked Chevron Notched Brazilian Disc* (CCNBD) porém antes de executar os ensaios de tenacidade, as amostras foram submetidas a 20, 50, 85 e 105 ciclos de ciclagem água-estufa afim de avaliar o comportamento da fratura em diversos estágios de alterabilidade e submetidas em ângulos de 0°, 23°, 45°, 90, para avaliar o efeito da carga com relação ao ângulo do *notch* ensaiado. Outras propriedades do metadiabásio também foram obtidas para se avaliar o comportamento mecânico da mesma. Portanto fez ensaio de índices Físicos, análise petrográficas, point load test (PLT), martelo de Schmidt, compressão uniaxial e velocidades de propagação de ondas. A porosidade apresentou um aumento de até 5% do seu valor inicial em algumas amostras e a massa específica apresentou uma diminuição de até 2%. Os valores de propagação de onda apresentaram um valor médio de 4270m/s e foram comparados com os valores encontrados na literatura. Os valores de dureza médio ( $R_{med}$ ) obtidos por meio do ensaio do Martelo de Schmidt, indicaram uma variação grande nos resultados, configurando grande anisotropia na rocha. Os resultados de compressão uniaxial indicaram valor máximo de compressão simples de 55,84 MPa para o metadiabásio e de 96,15 GPa para o módulo de elasticidade. Os ensaios CCNBD realizados para os referidos ciclos de água-estufa em diferentes ângulos indicaram uma diminuição no valor de tenacidade ( $K_C$ ) médio para cada intervalo de ciclagem, sendo os menores valores obtidos no ciclo 105. Aplicando a técnica CID pode-se determinar na face das amostras as zonas que apresentaram maiores valores de deformação e conseqüentemente delimitar a zona do processo de faturamento. Também foi possível observar os desvios angulares gerados pela angulação do *notch*. Por fim, pode-se obter o valor da variação da liberação da energia de deformação ( $G_c$ ) durante o processo de faturamento para cada ciclo água-estufa e para cada ângulo de ensaio.

Palavras-chave: Tenacidade. Ciclagem Água-Estufa. Correlação Digital de Imagem. CCNBD.

## ABSTRACT

MARCELLINO, Lázaro Corrêa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Study of Fracture Mechanics Associated with Alterability in Basic Intrusive Rocks of the Quadrilátero Ferrífero - MG.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-adviser: Cibele Clauver de Aguiar.

This work presents a series of results from studies on metadiabasic rocks from the Tamanduá Mine, located in the Quadrilátero Ferrífero, MG. The metadiabase samples collected in drillholes were submitted to a fracture toughness test using the Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) test, but before performing the toughness tests, the samples were subjected to 20, 50, 85 and 105 cycles of water-greenhouse cycling in order to evaluate the behavior of the fracture in different stages of alterability and submitted at angles of 0°, 23°, 45°, 90, to evaluate the effect of the load in relation to the notch angle tested. Other metadiabase properties were also obtained to evaluate its mechanical behavior. Therefore, he tested Physical indices, petrographic analysis, point load test (PLT), Schmidt's hammer, uniaxial compression and wave propagation speeds. The porosity showed an increase of up to 5% of its initial value in some samples and the specific mass showed a decrease of up to 2%. The wave propagation values presented an average value of 4270 m/s and were compared with the values found in the literature. The mean hardness values ( $R_{med}$ ) obtained by means of the Schmidt's Hammer test, indicated a great variation in the results, configuring great anisotropy in the rock. The uniaxial compression results indicated a maximum value of simple compression of 55,84 MPa for the metadiabase and 96,15 GPa for the elastic modulus. The CCNBD tests carried out for the mentioned water-greenhouse cycles at different angles indicated a decrease in the average tenacity value ( $K_C$ ) for each cycling interval, with the lowest values obtained in cycle 105. Applying the CID technique, it is possible to determine the face of the samples the zones that presented bigger values of deformation and consequently delimiting the zone of the invoicing process. It was also possible to observe the angular deviations generated by the notch angle. Finally, it is possible to obtain the value of the variation of the strain energy release ( $G_c$ ) during the billing process for each water-greenhouse cycle and for each test angle.

Keywords: Toughness. Durability of Rock. Digital Image Correlation. CCNBD.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do triângulo da Mecânica da Fratura .....	16
Figura 2 - Representação do furo elíptico em um plano proposto por Inglis (1913). .....	17
Figura 3 - Representação da fratura plana proposta por Westerggard 1939. ....	21
Figura 4 - Modos fundamentais de propagação da fissura. ....	24
Figura 5 - Modos misto de propagação da fissura. ....	25
Figura 6 - Aplicações de mecânica da fratura de acordo com a ZPF. MFEL - Mecânica da fratura elástica linear, MFEP - Mecânica da fratura elasto-plástica. ....	26
Figura 7 - Fratura com zona de processo de fratura adjacente (ZPF).....	27
Figura 8 – Divisão da ZPF.....	28
Figura 9 - Geometria do ensaio CCNBD a direita mostra o entalhe em V da seção longitudinal interna do disco.....	32
Figura 10 - Faixa válida dos parâmetros geométricos do corpo de prova do ensaio CCNBD. ....	34
Figura 11 - Representação da imagem de referência não deformada para uma imagem deformada mostrando vetor deslocamento do ponto central da imagem após deformação. ....	35
Figura 12 - Discretização dos pixels de uma imagem com as posições e intensidade de cada pixel. ....	36
Figura 13 - Representação do processo de interpolação das intensidades dos pixels (a); representação das intensidades com interpolação bilinear (b); representação das intensidades com interpolação spline cúbica (c). ....	37
Figura 14 - Dificuldade de correspondência em superfície com padrão repetitivo.....	38
Figura 15 - Exemplos de três padrões aleatório aplicados na superfície do corpo de prova ensaiado. ....	38
Figura 16 - Deslocamento do <i>subset</i> após a deformação.....	39
Figura 17 – Aparato experimental para aplicação da técnica CID. ....	41
Figura 18 - Fluxograma com as etapas da pesquisa. ....	44
Figura 19 - Vista parcial do metadiabásio (básica intrusiva) existente na Mina do Tamanduá. ....	45
Figura 20 - Procedimento de corte do entalhe chevron no corpo de prova para CCNBD: (a) primeiro corte; e (b) segundo corte.....	46

Figura 21 - Ensaio de tenacidade à fratura e tenacidade realizado pela prensa cervo-controlada. ....	47
Figura 22 - Preparação dos corpos de prova com um padrão de pontos na superfície para utilização da metodologia CID. ....	48
Figura 23 – Martelo de Schmidt utilizado durante os ensaios esclerométricos. ....	50
Figura 24 - Ilustração do ensaio de compressão uniaxial cíclico, sendo (a) execução do ensaio e (b) corpo de prova rompido após ensaio. ....	51
Figura 25 - Amostras rompidas após ensaio de carga pontual. ....	54
Figura 26 - Lâminas petrográficas com textura inequigranular a) Porfiroblasto de anfibólio com clorita secundária em nicóis descruzados, b) Cristais de quartzo estirados indicando processo deformacional em nicóis cruzados. Bt – Biotita, CrI – Clorita, Anf – Anfibólio, Ept – Epidoto, Qtz – Quartzo, Feld – Feldspato, Ser – Sericita. ....	55
Figura 27 - Lâminas petrográficas do metadiabásio a) Fraturas contornando grãos de quartzo, nicóis descruzados, b) Fraturas contornando grãos de quartzo, nicóis descruzados, nicóis cruzados. CrI – Clorita, Anf – Anfibólio, Ept – Epidoto, Qtz – Quartzo, Feld – Feldspato, Op – Opacos, Frt – Fraturas, Ttn – Titanita. ....	57
Figura 28 - Amostra após ciclagem água-estufa. Da esquerda para direita, a primeira fileira indica ciclo 20, segunda fileira ciclo 50, terceira fileira ciclo 85 e quarta fileira ciclo 105. ....	59
Figura 29 - Gráfico de porosidade aparente no decorrer da ciclagem água estufa. ....	60
Figura 30 - Comparação entre os valores de massa específica seca aparente e ciclagem artificial água-estufa. ....	61
Figura 31 - Comparação entre os valores de massa específica seca aparente e ciclagem artificial água-estufa excluindo os valores do CP 56. ....	62
Figura 32 - Exame qualitativo com a quantidade de amostras afetadas pela ciclagem água estufa. ....	63
Figura 33 - Amostras representando os efeitos do processo ocorridos durante a ciclagem. A) Rachadura; B) Fraturamento; C) Lasqueamento. ....	64
Figura 34 - Comparação dos valores de Onda P para diferentes tipos de rocha incluindo os dados dessa pesquisa. ....	66
Figura 35 - Curva tensão-deformação dos ensaios de compressão uniaxial cíclico. ....	68
Figura 36 -Parâmetros geométricos ( $a_1$ e $a_B$ ) para validação da geometria do ensaio CCNBD. ....	70
Figura 37 - Variação do valor de tenacidade a fratura de acordo com cada ângulo do <i>notch</i> ensaiado e de acordo com cada ciclo de água estufa. ....	75

Figura 38 – Correlação dos valores de tenacidade a fratura de acordo com a porosidade da rocha. .....	76
Figura 39 - Relação dos valores médios de tenacidade a fratura versus ciclagem água-estufa	77
Figura 40 - Ensaio CCNBD realizado para as amostras do ciclo 20. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°. .....	78
Figura 41 - Ensaio CCNBD realizado para as amostras do ciclo 50. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°. .....	79
Figura 42 - Ensaio CCNBD realizado para as amostras do ciclo 85. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°. .....	80
Figura 43 - Ensaio CCNBD realizado para as amostras do ciclo 105. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°. .....	81
Figura 44 – Dados de abertura da trinca versus carregamento obtidos para ciclo 50 em um ângulo de 0°.	82
Figura 45 - Dados de abertura da trinca versus carregamento obtidos para ciclo 20 em um ângulo de 23°.	82
Figura 46 - Dados de abertura da trinca versus carregamento obtidos para ciclo 85 em um ângulo de 45°.	83
Figura 47 - Dados de abertura da trinca versus carregamento, obtidos para ciclo 105 em um ângulo de 90°.	83
Figura 48 – Gráfico de carregamento versus o deslocamento de abertura do <i>notch</i> para os ciclos 20, 50, 85 e 105, em um ângulo de 0°.	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desenvolvimento da ZPF em rochas.....	29
Tabela 2 - Comparação entre os softwares avaliados para análise CID.....	43
Tabela 3 – Porcentagem modal das cinco visadas quantificadas em lâmina petrográficas.....	56
Tabela 4 – valores dos Índices físicos calculados de amostras irregulares do metadiabásio. ...	58
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de (Vp) para o metadiabásio.....	65
Tabela 6 - Resultados dos ensaios realizados com Martelo Schmidt.....	66
Tabela 7 - Valores do módulo de elasticidade (E) e compressão uniaxial máxima. ....	67
Tabela 8 - Quantitativo de amostras ensaiadas utilizando o ensaio CID e CCNBD normal....	69
Tabela 9 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 0 (zero).....	70
Tabela 10 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 20 (vinte). ....	71
Tabela 11 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 50 (cinquenta). ....	72
Tabela 12 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 85 (oitenta e cinco). ....	73
Tabela 13 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 105 (cento e cinco). ....	74
Tabela 14 - Valos de liberação de energia de deformação ( $G_C$ ) em função dos valores obtidos de $K_{IC}$ .....	86

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA LINEAR (MFEL).....	16
2.1.1 Teoria de Griffith.....	17
2.1.2 Teoria da Fratura de Irwin (Modificada de Griffith) .....	19
2.1.3 Fator Intensidade de Tensões.....	20
2.2 MODOS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA.....	23
2.3 ZONA DO PROCESSO DE FRATURAMENTO (ZPF).....	25
2.4 TENACIDADE.....	30
2.4.1 Cracked Chevron Notched Brazilian Disc” (CCNBD) .....	31
2.5 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM (CID).....	34
2.5.1 Introdução.....	34
2.5.2 Conceitos Fundamentais.....	35
2.5.3 Critérios de Correlação.....	38
2.5.4 Aparato Experimental.....	40
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
3.1 SELEÇÃO E COLETA DE AMOSTRAS .....	44
3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	45
3.3 ENSAIO DE ALTERABILIDADE .....	46
3.4 ENSAIO CCNBD .....	46
3.5 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (CID) .....	48
3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	48
3.6.1 Ensaio Petrográfico.....	49

3.6.2	Velocidade de Propagação de Ondas.....	49
3.6.3	Martelo de Schmidt.....	50
3.6.4	Ensaio de Resistência a Compressão Uniaxial.....	50
3.6.5	Ensaio de Índices Físicos.....	51
3.6.6	Ensaio de Resistência à Compressão Puntiforme.....	53
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>54</b>
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	54
4.1.1	Análise Petrográfica.....	54
4.1.2	Índices Físicos.....	57
4.1.3	Ciclagem água-estufa.....	58
4.1.4	Velocidade de Propagação de Ondas.....	65
4.2	MARTELO DE SCHMIDT .....	66
4.3	COMPRESSÃO UNIAXIAL .....	67
4.4	ENSAIO CCNBD .....	68
4.4.1	Geometria das Amostras.....	69
4.4.2	Efeito da Ciclagem na Tenacidade à Fratura ( $K_{IC}$ ) .....	70
4.4.3	Resultados da Técnica de Correlação Digital de Imagem (CID).....	77
4.4.4	Variação da liberação de energia de deformação ( $G_c$ ) .....	86
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>91</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Estudos relacionados à mecânica das rochas, principalmente aqueles relacionados à mecânica das fraturas, são de grande importância em projetos mineração (superficial ou subterrânea) e engenharia civil, tanto em projetos de perfuração e detonação, quanto em fundações para grandes barragens e pilhas de estéril e rejeito. As propriedades intrínsecas de cada rocha dependem de diversos fatores que irão indicar qual será o seu comportamento previsto frente às solicitações mecânicas, sendo que as propriedades que mais se destacam são a composição e estrutura da rocha.

A mecânica da fratura vem somar com a mecânica de rochas nas pesquisas referentes ao entendimento da propagação de uma ou várias trincas em materiais rochosos, uma vez que a mecânica das rochas clássica, por meio de critérios de ruptura, não abrange o processo de fissuramento das rochas. Estes critérios de ruptura modelam bem a deformação de materiais rochosos que apresentam um comportamento elasto-plástico, porém para materiais frágeis, em que uma ou mais trincas estão presentes, esses critérios falham, uma vez que o estado de tensão nas vizinhanças da trinca é alterado significativamente. Os critérios de ruptura não podem prever a direção e a tensão crítica de propagação da trinca no material rochoso (WHITTAKER et al., 1992).

O estudo da mecânica da fratura auxilia no entendimento do processo de iniciação e propagação de trincas sujeitas a uma tensão particular e fornece uma descrição quantitativa e qualitativa da transformação de uma rocha intacta para uma rocha fraturada. Essas trincas podem ser descontinuidades naturais geradas durante um processo tectônico, como o intemperismo, por exemplo, e tectônico. Podem ainda ser geradas pela ação antrópica, por processo de faturamento hidráulico, escavação, perfuração, corte ou detonação. Portanto, trata-se de uma área de estudo importante para as problemáticas que envolvem obras de engenharia envolvendo maciços rochosos (ALBURQUERQUE, 1998).

Devido ao comportamento das rochas a teoria da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) fornece uma abordagem apropriada para prever a resposta da propagação de fraturas em rochas. Um parâmetro fundamental da MFEL é tenacidade à fratura, que descreve bem a mecânica da fratura de acordo com o comportamento elasto-plástico das rochas. A tenacidade à fratura indica a aptidão que determinados materiais rochosos frágeis conseguem resistir à propagação da fratura ocasionadas por esforços de fadiga ou estático. Atribui-se a simbologia  $K_c$  para denominar a tenacidade à fratura (ALIHA, MAHDAVI & AYATOLLAHI, 2018).

A tenacidade à fratura é um parâmetro importante, pois, tem uma gama de aplicações em engenharia de rocha, algumas delas como um parâmetro para classificação de materiais rochosos, como sugeridas pela (ISRM, 2007). Outras aplicações no desmonte de rocha, faturamento hidráulico, fragmentação mecânica, e análise de estabilidade de taludes são sugeridas por diversos autores (ATKINSON, 1982; SCHMIDT e ROSSMANITH, 1983; SUN e OUCHTERLONY, 1986; BACKERS, 2001).

Aliado à obtenção de parâmetros de tenacidade à fratura, recentes estudos a respeito da influência do intemperismo sobre as propriedades mecânicas das rochas e suas discontinuidades tem sido desenvolvidos, como trabalhos de Ruxton & Berry (1957), Deere & Patton (1971), Dearman (1976), Lee & De Freitas (1989), Dobereiner & Porto (1990), Marques et al. (2010), Leão et al. (2017), Marques et al. (2017). Estes estudos da influência climática na alteração das rochas caracterizaram a variação das propriedades mecânicas ao longo de perfis/frentes de alteração desde rocha sã até a extremamente alterada. Entretanto, os trabalhos comumente não abrangem uma avaliação do parâmetro de tenacidade à fratura sob a ação do processo intempérico. Portanto, são necessários novos estudos abordando a mecânica de fratura associada ao processo intempérico das rochas. Na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), esse processo é particularmente importante, na medida em que nele existem uma série de minas nas quais esse processo tem sido observado em escavação taludes rochosos, causando grandes problemas de instabilização dos maciços rochosos.

Nesse contexto, o presente estudo teve por objetivo obter o parâmetro de tenacidade à fratura ( $K_c$ ) em diferentes níveis de alterabilidade, pelo que foram preparados diversos corpos de prova para o ensaio *Cracked Chevron Notched Brazilian Disc* (CCNBD), sugerido pela International Society of Rock Mechanics (ISRM, 2007). Esses corpos de prova foram submetidos a vários ciclos de água-estufa (ciclagem acelerada) para avaliar os efeitos do intemperismo sobre a tenacidade à fratura. Para medir os efeitos das ciclagens nas propriedades de tenacidade da rocha utilizou-se, durante a realização do ensaio CCNBD, técnicas de medição de abertura da trinca utilizando clip gauges, e técnicas utilizando Correlação Digital de Imagem (CID).

Além de avaliar os efeitos da ciclagem água-estufa sobre as propriedades de tenacidade, foi avaliado a influência da variação do ângulo da fissura previamente aberta (*Chevron Notch*) em relação à direção de aplicação de carga, de maneira a que seja possível determinar diferentes modos de ruptura, além de avaliar eventuais diferenças nas trajetórias da propagação das fraturas sob diferentes configurações do ensaio.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho teve por objetivo geral determinar os parâmetros de tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) do modo I de ruptura em amostras de um metadiabásio, existente na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), após aplicação de diferentes ciclos de água-estufa, e em diferentes ângulos de inclinação do “*Chrevron Notch*” em relação à direção de aplicação da carga. Como objetivos secundários necessários à integralização do principal, enumera-se:

- 1) Determinar as características físicas e mecânicas do metadiabásio a fim de avaliar seu comportamento mecânico frente a distintos ciclos de durabilidade.
- 2) Caracterizar, por meio de técnicas de Correlação Digital de Imagem (DIC) e utilização de clip-gauges a trajetória de propagação das fraturas bem como sua deformação resultante da aplicação de carga.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema dessa pesquisa em nível de mestrado justifica-se pelas seguintes motivações:

- 1) Verificou-se, que após extensa pesquisa e revisão bibliográfica, que o estudo de tenacidade à fratura para rochas no Brasil, é incipiente.
- 2) Contribuir para o avanço no conhecimento da influência do intemperismo sobre a tenacidade à fratura, e sobre essa propriedade em rochas do QF.
- 3) Avaliar se a técnica de Correlação Digital de Imagem pode contribuir para uma melhoria na obtenção dos parâmetros mecânicos, quando comparada a métodos convencionais que utilizam strain gauges e extensômetros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

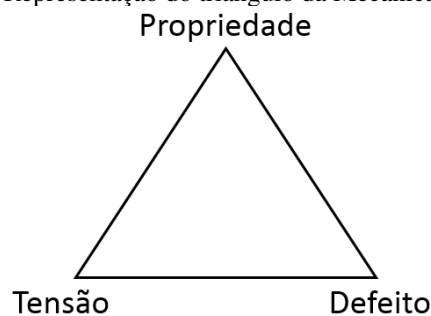
Neste capítulo, são abordados os principais aspectos relacionados à Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL), à caracterização dos ensaios de alterabilidade, abordando aspectos do ensaio “*Crack Chevron Notched Brazilian Disc*” (CCNBD) e da técnica de Correlação Digital de Imagem (CID).

### 2.1 MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA LINEAR (MFEL)

A mecânica da fratura tradicional estuda o comportamento dos materiais à propagação da fratura, contendo defeitos ou trincas sob condições de carregamento encontrado na prática em ensaios de laboratório. Materiais naturais comumente apresentam defeitos em sua estrutura cristalina, especialmente as rochas. Esses defeitos microcristalinos presentes na estrutura do material podem levá-los a diversas falhas catastróficas sob certas condições de tensões.

Para se avaliar o comportamento de um determinado material à fratura, deve-se levar em consideração três aspectos (tensão, defeito e propriedade). Esses três aspectos compõem o chamado triângulo da Mecânica da Fratura (Figura 1), que mostra como deve ser avaliado quanto à possibilidade de propagação de uma fratura. Em um dos vértices estão as tensões atuantes no material, obtidas através da análise dos carregamentos a serem aplicados. No segundo vértice aparecem as propriedades relacionadas à possibilidade de fratura, obtidas experimentalmente (tenacidade). No último vértice são considerados os defeitos existentes na estrutura do material, sejam eles macro ou microscópicos. A partir do conhecimento destes três vértices, é possível avaliar a resistência do material à fratura e a força de crescimento de trinca (MEDINA, 2014).

Figura 1 - Representação do triângulo da Mecânica da Fratura



Fonte: Medina, 2014.

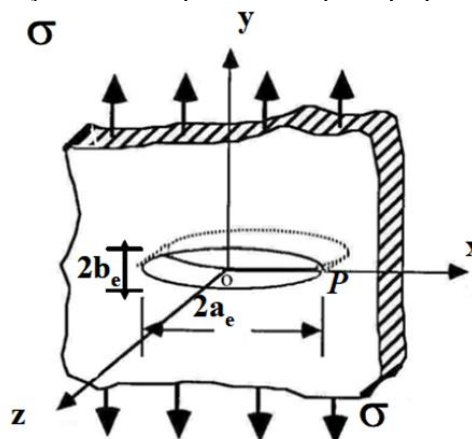
De maneira geral a Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) surgiu em função das limitações na aplicação dos conceitos tradicionais para prever o comportamento dos materiais quanto à presença de descontinuidades internas e superficiais, introduzindo os conceitos de fatores de intensidade e tenacidade à fratura para materiais frágeis.

A MFEL avalia os mecanismos de fratura dos materiais frágeis ou quase-frágeis através do conceito de elasticidade linear. A primeira postulação relativa ao comportamento das fraturas foi apresentada por Inglis (1913). Posteriormente, em 1920, Griffith através de um critério introduziu a MFEL. Um segundo critério, proposto por Irwin em 1948, introduziu um parâmetro chamado de fator de intensidade de tensão, que é um valor crítico a partir do qual a trinca se propaga, denominado de tenacidade à fratura, que será apresentado posteriormente.

### 2.1.1 Teoria de Griffith

Em 1920, Griffith desenvolveu a primeira análise do comportamento à fratura de componentes trincados. Griffith realizou experiências em vidro, assumindo que a fratura ocorre em um material frágil ideal. Griffith baseou-se na análise de Inglis (1913), em que esse autor simulou a configuração de uma placa com um furo elipsóide conforme Figura 2, e mostrou que a tensão aplicada nas extremidades da elipse variava proporcionalmente ao tamanho e raio de maior eixo da elipse, simulando assim, nessa condição, uma fratura mais próxima da realidade, introduzindo o conceito de fator de concentração de tensões na ponta da trinca “k” .

Figura 2 - Representação do furo elíptico em um plano proposto por Inglis (1913).



Fonte: Alvarez, 2004.

Baseado na análise de tensão de Inglis, Griffith (1921) foi estabelecida a relação entre a tensão de fratura e o tamanho da trinca. Esta relação é conhecida como balanço energético de Griffith, sendo o ponto inicial para o desenvolvimento da mecânica da fratura. Além disso,

Griffith explicou qualitativamente por que a resistência à tração dos materiais frágeis era menor que o seu valor teórico e postulou que os materiais frágeis continham defeitos submicroscópicos.

Os defeitos submicroscópicos são muitos pequenos para serem detectados por meios de observação visuais e funcionam como concentradores de tensões, conseqüentemente, a propagação da trinca é causada pela concentração de tensões nas pontas desses defeitos internos do material. De acordo com a concentração de tensões pode-se aumentar a tensão local até um valor maior que o necessário para o rompimento das ligações atômicas. A propagação da trinca pode não ocorrer se a energia fornecida for insuficiente para vencer a resistência à extensão da trinca, resultante da resistência coesiva molecular. Com isso Griffith propôs o conceito energético de que a energia total de uma placa infinita com uma trinca em forma de elipse para se propagar é dada pela Equação 1:

$$U = U_0 + U_E + U_S - W_{ext} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:  $U$  é a energia total da chapa trincada,  $U_0$  é a energia elástica da chapa carregada ainda não trincada (é uma constante),  $U_E$  é a perda de energia de deformação elástica causada pela presença da trinca,  $U_S$  é a variação da energia de superfície causada pela formação de superfícies trincadas (irreversíveis), e  $W_{ext}$  é o trabalho realizado pela força externa, não fazendo parte da energia interna da placa.

Griffith usou a análise de tensão de Inglis e concluiu que o valor absoluto da perda de energia de deformação  $U_E$  pode ser dado pela Equação 2:

$$|U_E| = \frac{\pi \sigma^2 a_t^2}{E'} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que  $\sigma$  é a tensão aplicada ao sólido,  $E'$  é o módulo de elasticidade efetivo,  $a_t$  é a metade do comprimento da trinca.

A energia de superfície elástica  $U_S$  foi admitida por Griffith como sendo:

$$U_S = 4 a_t \gamma_S \quad (\text{Equação 3})$$

Em que  $\gamma_S$  é a energia específica de superfície,  $a_t$  é a metade do comprimento da trinca. Tomando condições de deformações constantes, o trabalho realizado pelas forças externas é zero ( $W_{ext} = 0$ ), reduzindo a Equação 1 a:

$$U = U_0 + \left( -\frac{\pi \sigma^2 a_t^2}{E'} \right) + (4 a_t \gamma_S) - 0 \quad (\text{Equação 4})$$

Como  $U_0$  é constante, logo  $\partial U / \partial a_t < 0$ , e o equilíbrio crítico para iniciar uma fratura ocorre quando  $\partial U / \partial a_t = 0$  (Alvarez, 2004).

Isto é:

$$\frac{\partial}{\partial a_t} \left[ \left( -\frac{\pi \sigma^2 a_t^2}{E'} \right) + (4 a_t \gamma_S) \right] = 0 \quad (\text{Equação 5})$$

Proporcionando que a tensão crítica para o corpo trincado seja:

$$\sigma \sqrt{\pi a_t} = \sqrt{2 E' \gamma_S} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 E' \gamma_S}{\pi a_t}} \quad (\text{Equação 7})$$

Por fim, obtém-se a tensão crítica segundo o critério de Griffith. Se a tensão de tração for maior que a tensão crítica, a fratura se propagará. Entretanto, é importante recordar que as definições obtidas são apenas aplicadas aos sólidos frágeis e dependem das propriedades específicas dos materiais.

### 2.1.2 Teoria da Fratura de Irwin (Modificada de Griffith)

Irwin e seus colaboradores (IRWIN, 1948; IRWIN & KIES, 1952 E 1954; WELLS, 1956) propuseram uma modificação da teoria de Griffith, em que ao invés de se analisar a energia específica de superfície ( $\gamma_S$ ), analisa-se a "velocidade" com que a energia de deformação é transformada em energia de superfície, em função do comprimento da trinca, ou seja a variação da liberação da energia de deformação ( $G_F$ ) durante o processo de faturamento (BORTOLUCCI, 1993).

O parâmetro de "variação da liberação de energia de deformação" ( $G_F$ ) pode ser obtido pelo rearranjo da Equação 7 (MARCHIORI, 1997), que passa a ser:

$$2\gamma_s = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} \quad (\text{Equação 8})$$

O lado direito da equação acima define o parâmetro chamado “variação da liberação de energia de deformação” ( $G_F$ ). Então tem-se que:

$$G_F = \frac{\partial U_E}{\partial a} = - \frac{\sigma^2 \pi a}{E} \quad (\text{Equação 9})$$

Com isso a teoria modificada por Irwin propõe que um determinado material atinge a ruptura quando a variação da liberação de energia de deformação ( $G_F$ ) atinge o valor crítico ( $G_{FC}$ ). Esse valor crítico pode ser determinado em ensaios de materiais em processo de fraturamento usando uma configuração simples de ensaio. O  $G_F$  de um corpo fraturado é determinado em função da sua rigidez, geometria do corpo, das tensões aplicadas e do tamanho da fratura, e comparando-se com o  $G_{FC}$  do material. Com isso, se a variação da liberação de energia for igual ao valor crítico, ou seja  $G_F = G_{FC}$  a ruptura se iniciará. Se a variação da liberação de energia for maior que o valor crítico, ou seja  $G_F > G_{FC}$  a trinca se propagará instavelmente.

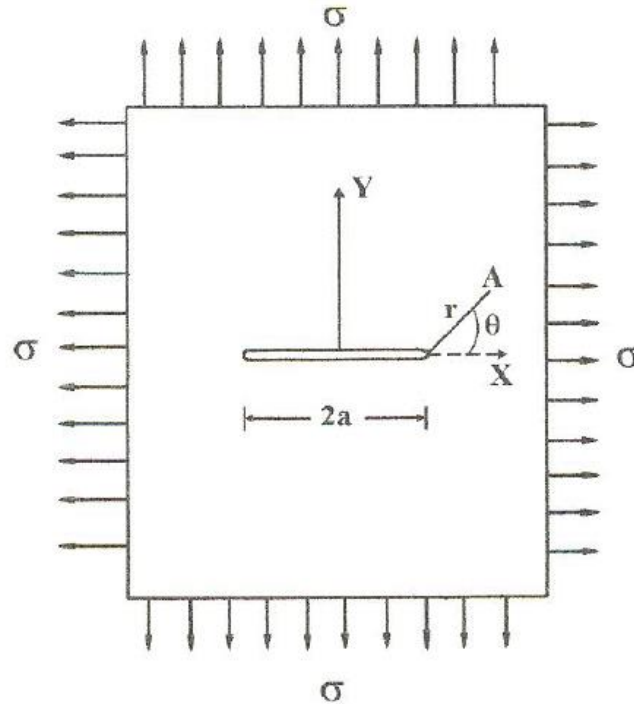
### 2.1.3 Fator Intensidade de Tensões

Em materiais com comportamento utilizando a MFEL uma alternativa para abordar a análise das fraturas é a utilização do fator de intensidade das tensões. As tensões e deslocamentos em materiais cujo comportamento é elástico linear podem ser caracterizados por um único parâmetro conhecido como SIF-K (*stress intensity factor*) ou fator de concentração de tensões. O valor de K é a medida de intensidade de tensão na extremidade de uma fissura ou campo de tensões elásticas na extremidade da fissura (ATKINSON, 1987).

A tenacidade da fratura representa a medida da concentração crítica de tensões representadas por  $K_C$  na extremidade de uma fratura requerida para ser iniciada e/ou ser propagada. O fator de intensidade de tensão depende única e exclusivamente da geometria do corpo de prova, das tensões aplicadas e do tamanho da trinca. Para resolver a questão da determinação das tensões e deformações em corpos de prova fraturados Westergaard em 1939 sugeriu que a fratura deveria deixar de ser elíptica, como proposto por Inglis e passasse a ter uma configuração reta e plana, mais próximo da fratura real, conforme

Figura 3 (MARCHIORI, 1997).

Figura 3 - Representação da fratura plana proposta por Westerggard 1939.



Fonte: Marchiori, 1997.

Para o caso de uma placa infinita, carregada biaxialmente com uma tensão remota ( $\sigma$ ) de tração, e com uma fratura plana de comprimento  $2a$  (

Figura 3), os valores no ponto A, próximo à extremidade da fratura ( $r \ll a$ ), são representados pelas equações (INGRAFFEA, 1977):

$$\sigma_X = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

$$\sigma_Y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{Equação 11})$$

$$\tau_{XY} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que  $r$  é a distância radial em relação a fratura,  $\theta$  é o ângulo entre o eixo da fratura é em relação ao eixo  $x$ , e  $A$  é a metade do comprimento da fratura.

Observa-se que na extremidade da fratura onde  $r=0$  a tensão em  $y$  tem valor infinito, ou seja  $\theta=0$ , tem-se:

$$\sigma_Y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad (\text{Equação 13})$$

Que, se multiplicada por  $\sqrt{\pi}$  nos dois lados, pode ser transformada no chamado fator de intensidade de tensão:

$$K = \sigma_{Y(\theta=0)} \sqrt{2\pi r} = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{Equação 14})$$

O valor de  $\sigma \sqrt{\pi a}$  é constante ao longo do eixo x. Trata-se do fator de intensidade de tensões no modo I ( $K_I$ ), que será explicado posteriormente. Assim  $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ , portanto  $K_I$  é um produto da tensão pela raiz quadrada da abertura da fissura e de  $\pi$ .

Considerando que a ruptura de um material está associada a uma combinação de tensões e deformações, pode-se esperar que a propagação da trinca ocorrerá quando  $K$  atingir ou exceder um valor crítico. Em condições de estado plano de tensão, este valor crítico recebe a denominação de  $K_C$ . Ele corresponde ao valor máximo do fator de intensidade de tensão, em função da espessura do material. Na medida em que se aumenta a espessura do material, atinge-se o estado plano de deformação, e o valor de  $K_C$  torna-se constante. Nesse ponto, o valor de  $K_C$  pode ser considerado uma propriedade do material.

A partir de ensaios de laboratórios normatizados é possível definir a variação da liberação crítica de energia de deformação do material ( $G_C$ ). Sendo assim, o valor crítico da intensidade de tensão, também conhecido como tenacidade à fratura do material, pode ser definido como:

$$K_C = \sqrt{\frac{G_C E}{(1 - \nu^2)}} \quad (\text{Equação 15})$$

Em que:

$K_C$  – Fator de intensidade de tensões.

$E$  – Módulo de elasticidade.

$\nu$  – Coeficiente de Poisson.

A taxa crítica de alívio de energia de deformação geradora de fissura representada por ( $G_C$ ) pode ser expressa pela seguinte expressão:

$$G_C = \frac{K_C^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (\text{Equação 16})$$

A taxa representa a energia necessária para criar uma área de superfície. Griffith estabeleceu valores para que, quando a taxa de alívio de energia de tensão atingir um determinado valor crítico, ocorra a iniciação das fissuras. Para o modo I de carregamento, tem-se:

$$G_I = G_{IC} \quad (\text{Equação 17})$$

Em que  $G_{IC}$  é o valor crítico de alívio de energia de deformação para o modo I de carregamento. O  $G_{IC}$  é um parâmetro constante para um determinado material, estabelecendo sua capacidade de resistência à extensão das fraturas ou fissuras. Em termos de intensidade de tensões, tem-se:

$$K_I = K_{IC} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que  $K_{IC}$  é a tenacidade a fratura no modo I de carregamento.

A condição representada pela equação acima controla a dimensão da fratura, que continuará a se propagar enquanto essa condição for satisfeita, portanto, enquanto a força incidente ( $K_I$ ) para a fratura for maior ou igual à resistência do material ( $K_{IC}$ ), ela irá se propagar e, somente quando for menor, cessará.

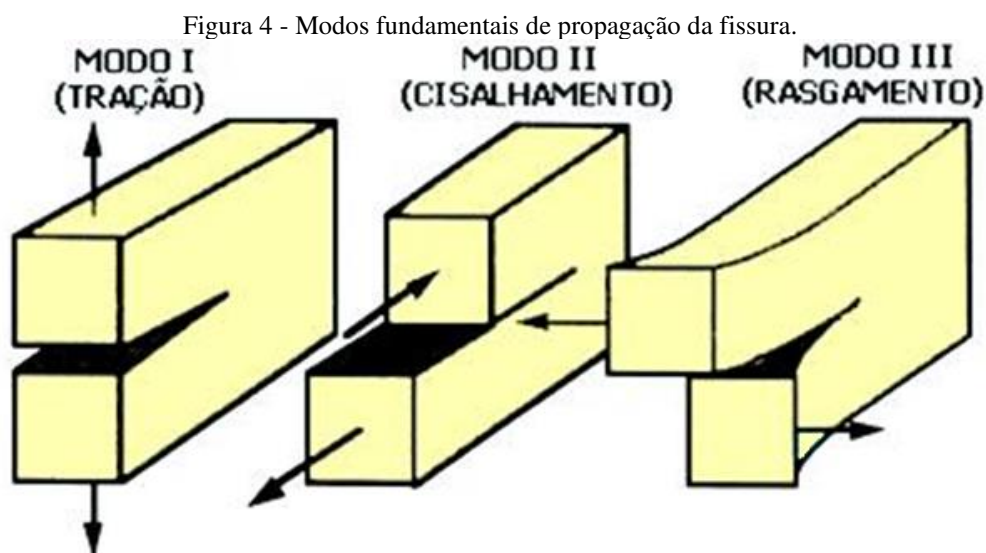
## 2.2 MODOS DE PROPAGAÇÃO DE FRATURA

Em função das diferentes configurações de tensões aplicadas nas extremidades das fissuras são produzidos diferentes modos de deslocamento na ponta da trinca. Em geral, a extremidade da trinca está sujeita a três tipos de tensões: tensão normal, tensão cisalhante no plano, e tensão cisalhante fora do plano, que faz com que os deslocamentos na ponta da trinca ocorram de três modos (Figura 4). De maneira geral e mais explicativa:

O modo I - É o modo de abertura da trinca devido à tensão normal, em que as superfícies da fissura se separam como o deslocamento perpendicular em relação ao plano da fissura.

O modo II – É o modo devido ao cisalhamento no plano, em que as superfícies da fissura se movem uma sobre a outra em sentido perpendicular à frente da fissura. O deslocamento da superfície da fratura está contido no seu próprio plano.

O modo III – Também é um modo cisalhante no qual as superfícies da trinca deslizam uma sobre a outra, mas em sentido paralelo à frente da trinca, fora do plano de cisalhamento.

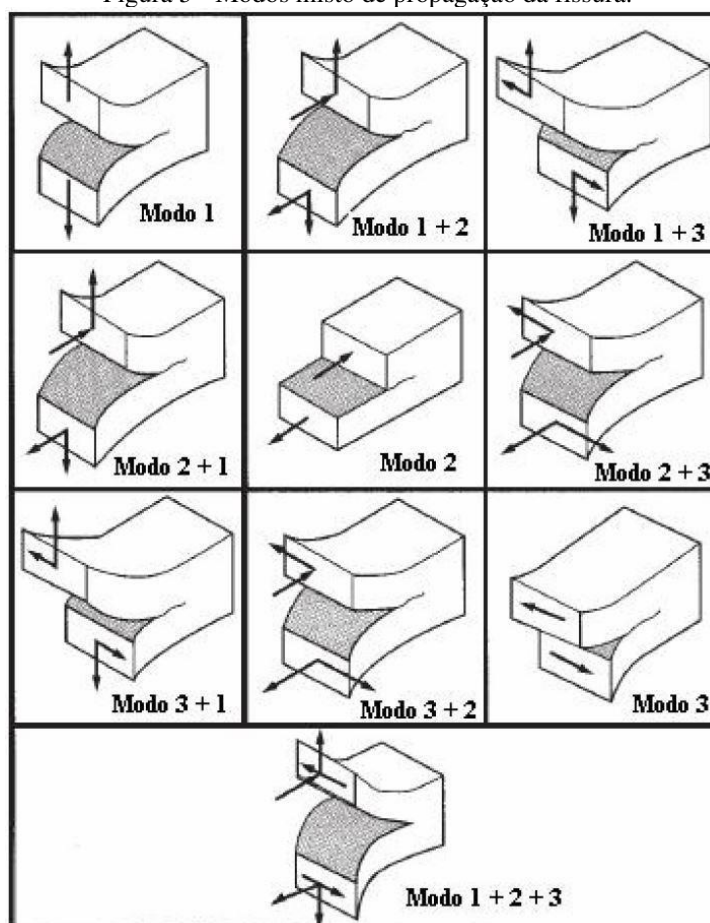


Fonte: Donovan, 2003.

A determinação da tenacidade à fratura do material ( $K_C$ ) é feita a partir de ensaios laboratoriais normatizados que caracterizam cada modo de propagação a partir do tipo de tensão aplicada. Por exemplo, somente tração, desta maneira pode ser obtido a tenacidade da fratura relativa ao modo I, representada por  $K_{IC}$ . Analogamente ao modo I existem as tenacidades dos modos II e III que são respectivamente  $K_{IIIC}$  e  $K_{IIIC}$ .

Entre os três tipos, o modo I é o mais encontrado nas aplicações de engenharia. É também o modo mais fácil de ser analisado e de se reproduzir experimentalmente. Outro fator que faz com que o modo I seja amplamente estudado é que apesar de iniciação de propagação da fissura iniciar nos outros modos, o modo I acaba no final dominando o processo de propagação da fissura. Essa sobreposição de modos é bem comum e são chamados de modo misto (Figura 5). Essas combinações são suficientes para descrever os casos tridimensionais mais gerais de tensões e de campo de deformações, na ponta da fissura (HUDSON & HARRISON, 1997 APUD BACKERS, 2001).

Figura 5 - Modos misto de propagação da fissura.



Fonte: Hudson & Harrison, 1997 apud Backers, 2001.

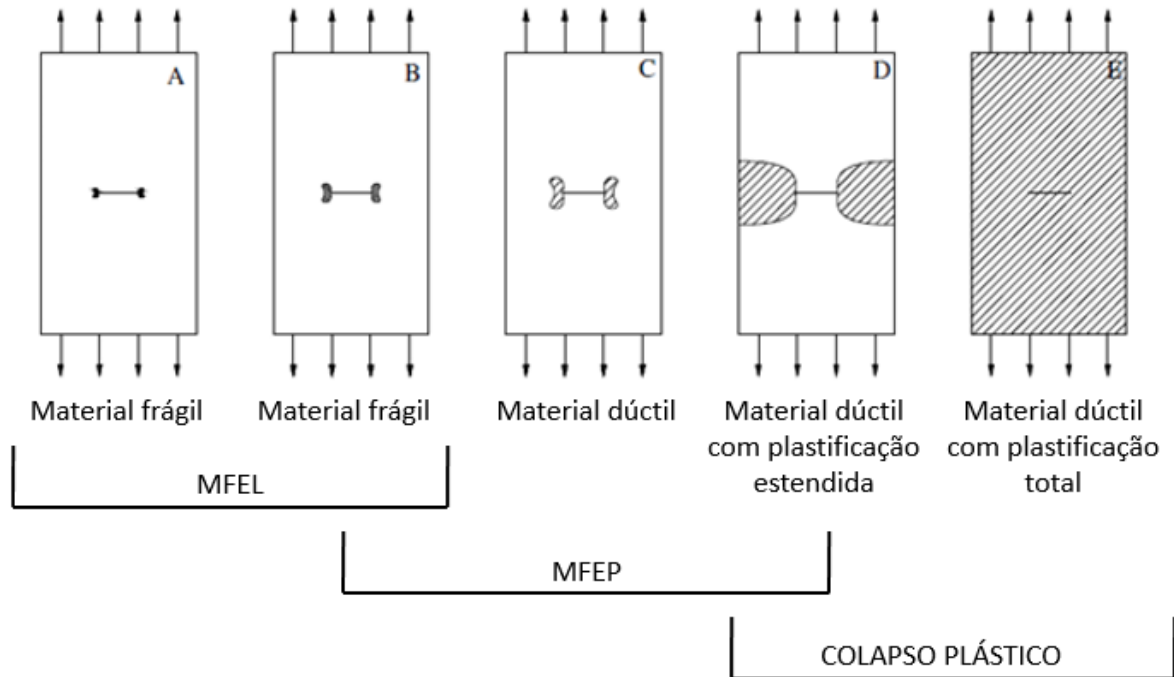
Para a determinação dos fatores críticos de resistência à tensão dos diferentes modos, isto é, tenacidade à fratura  $K_{IC}$ ,  $K_{IIC}$  e  $K_{IIIC}$ , respectivamente, foram desenvolvidos métodos experimentais em laboratório. Os mais usuais são os métodos de teste do Modo I, evidentemente em três métodos sugeridos pelo ISRM: Chevron Bend (CB); Short Rod (SR) e CCNBD (*Cracked Chevron Notched Brazilian Disc*). Existem alguns métodos do Modo II como CSTB (*Cracked Straight Through Brazilian Disc*) que já é mais aceito pela comunidade científica, porém ainda não é normatizado. Existem muito poucos métodos disponíveis que fornecem condições de carregamento do Modo III (BACKERS, 2004).

### 2.3 ZONA DO PROCESSO DE FRATURAMENTO (ZPF)

A Zona do Processo de Fraturamento (ZPF) forma-se quando o material que apresenta uma pré-fissura é submetido a uma determinada tensão e gera uma zona com microfissuras devido ao crescimento das tensões originado pela singularidade ali existente. Enquanto nos

materiais frágeis esta zona não é significativa e não tem influência na iniciação da propagação, nos materiais dúcteis essa zona ganha proporções que influenciam a distribuição de tensões ao longo de uma ZPF, o que leva, nestes materiais, que o dano não ocorra repentinamente de maneira frágil e sim de maneira dúctil, conforme se demonstra na Figura 6 (MARTINS, 1985)

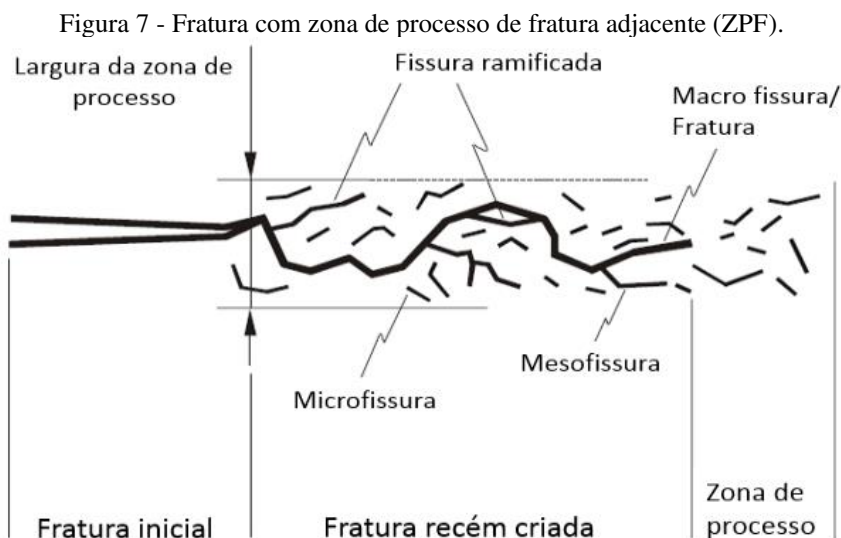
Figura 6 - Aplicações de mecânica da fratura de acordo com a ZPF. MFEL - Mecânica da fratura elástica linear, MFEP - Mecânica da fratura elasto-plástica.



Fonte: Martins 1985.

A ZPF é descrita como uma região localizada na ponta da trinca ou à frente de um entalhe, onde se acumulam danos no material em função da formação e acúmulo de microfissuras, e que deterioram a resistência do mesmo (SILVA, 2017). Essa zona apresenta diversas fissuras em diferentes tamanhos que serão explicadas posteriormente.

A microfissura mede vários milímetros e até decímetros, e também é chamada de fratura. Consiste na separação da zona de processo de fratura principal da circundante, ZPF. Essa zona de processo inclui microfissuras e mesofissuras. Antes do crescimento da fratura principal ocorrem micro/mesofissuras. macro/mesofissuras que se propagam da microfissura são chamadas de fissuras ramificadas (Figura 7). A “zona de processo” é definida como a regiões em estado que não apresenta coesão, em frente à ponta da fratura e ao seu rasgo, onde as microfissuras se juntam para formar a separação principal contínua. A deformação não elástica dentro da ZPF é causada por concentrações de tensão na ponta da fratura, porém esse comportamento da ZPF precisa ser melhor estudado (BACKERS, 2004).



Fonte: Backers, 2004.

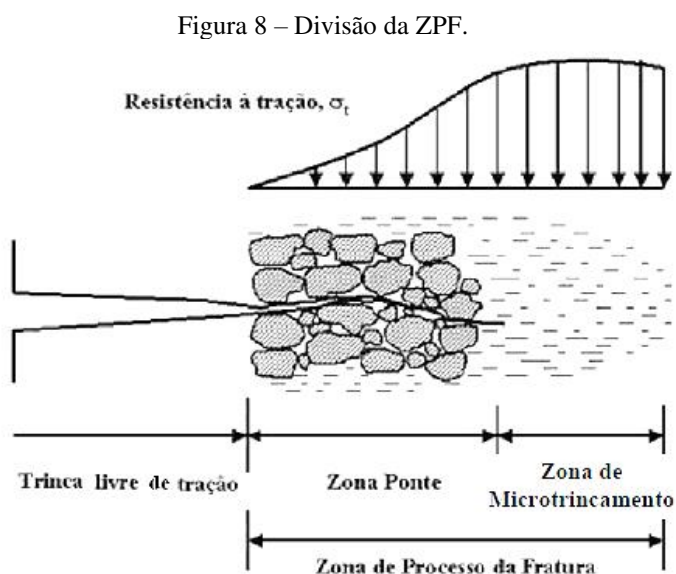
Quanto ao estudo da zona de processo de fratura, a natureza do material é de grande relevância. O comportamento de um material metálico sob tensão acontece de forma que uma pequena região imediatamente adiante da ponta da trinca tem comportamento plástico caracterizando-se como zona plástica. Já em materiais rochosos, esta região caracteriza-se como zona de microfissuras ou ZPF, devido à propagação gradativa da tensão aplicada através da fissuração. A principal diferença entre estas zonas está no fato que em metais, estas são formadas por tensões, enquanto em rochas elas englobam a formação, propagação e interação das microfissuras adjacentes à ponta da trinca.

Numa ZPF o comportamento não elástico à frente de uma ponta de trinca na rocha toma a forma de microfissuras, ao contrário de tensões de cisalhamento excessivas e da zona de processo plástica resultante vista nos metais. Se o tamanho do ZPF for pequeno, a mecânica de fratura elástica linear será aplicada, caso contrário deve-se aplicar a Mecânica da fratura elasto-plástica (DONOVAN, 2003).

O microtrincamento na frente da ponta da trinca e o desenvolvimento subsequente da ZPF são influenciados pela microestrutura ou tamanho do grão da rocha. As relações mínimas entre a menor dimensão do corpo de prova e o tamanho de grão foram sugeridas a fim de obter determinados valores representativos de  $K_{IC}$  medidos. Uma relação mínima de 10:1 é recomendada pela ISRM para os dois métodos de ensaios sugeridos por esta entidade (ISRM, 2007).

Quando uma trinca se desenvolve e propaga nos materiais rochosos, forma-se uma zona de microtrincamento na frente da ponta da trinca na direção da propagação da fratura. Horii,

Hasegawa e Nishino (1987) e Karihaloo e Nallathambi (1989) fizeram pesquisas com o objetivo de estudar a zona do processo de propagação das trincas em concreto, subdividindo-a em: I) trinca livre de tração, II) zona ponte e III) zona de microtrincamento. Estes autores enfatizaram que a resistência à tração da rocha cai para zero na ponta da trinca conforme visto na Figura 8. Esse desenvolvimento da trinca é demonstrado adiante.



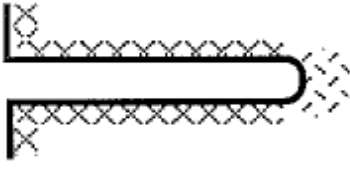
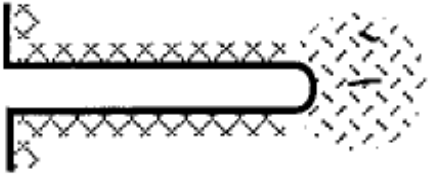
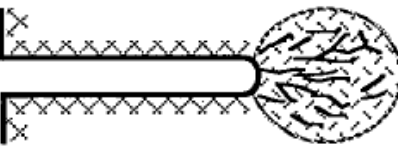
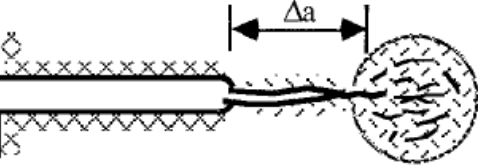
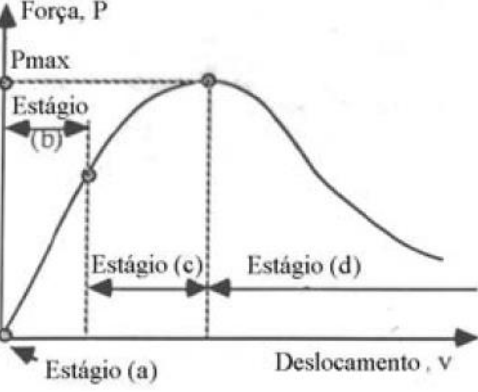
Fonte: Karihaloo e Nallathambi, 1989.

Hoagland, Hahn e Rosenfield (1973) apud Whittaker *et al.*; (1992) propuseram um modelo de quatro estágios para descrever a formação da ZPF em rochas, de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Ouchterlony (1980) e Labuz, Shah e Dowding (1985) indicaram que o tamanho da ZPF aumenta com o aumento do tamanho dos grãos da rocha. Friedman, Handin e Alani (1972), Hoagland, Hahn e Rosenfield (1973) e Barton (1983) relataram que o tamanho da ZPF é cerca de 5 a 10 vezes o tamanho médio dos grãos, como dito anteriormente. Entretanto, observações experimentais em dolomito Stockbridge realizadas por Nolen-Hoeksema e Gordon (1987) mostraram que a ZPF pode-se estender acima de 20 a 40 vezes o diâmetro médio do grão presente na superfície de ruptura.

Huang & Wang (1985) explicaram que, quanto maior a granulometria do material, maior será a quantidade de fissuras nos contatos entre os grãos, e maiores serão as fissuras intergranulares. Nas rochas, as fissuras são desenvolvidas intergranularmente (entre os grãos) e intragranularmente (através dos grãos). A quantidade de energia necessária para se criar uma nova superfície entre grãos, em geral, é menor que a energia necessária para se criar uma superfície através dos grãos. Assim, quanto maior a granulometria, maior o contato entre os

grãos e menor a energia necessária para que a fissura do material se propague (ALMEIDA, 1999).

Tabela 1 - Desenvolvimento da ZPF em rochas.

(a)		<p>Entalhe pré-confeccionado descarregado com um número de microtrincas discretas, naturalmente formadas ou induzidas durante a preparação do entalhe.</p>
(b)		<p>O corpo de prova recebe um baixo nível de carga, no qual é obtida uma curva carga versus deslocamento linear. São poucas as novas microtrincas, muitas das quais estão isoladas e poucas estão interagindo. A densidade das microtrincas é claramente aumentada.</p>
(c)		<p>O corpo de prova recebe um alto nível de carga, no qual é obtida uma curva carga versus deslocamento não linear. É produzido um grande número de novas microtrincas com muitas interações, propagações e iniciações acompanhadas por consideráveis emissões acústicas. A ZPF é completamente desenvolvida, a densidade das microtrincas alcança um nível crítico e a extensão da trinca tende a se iniciar.</p>
(d)		<p>O corpo de prova é descarregado e é observado um amolecimento por dano. Uma trinca macroscópica é estendida pela ligação das microtrincas adjacentes na frente do entalhe, e é observada uma forte emissão acústica. Ao mesmo tempo, uma nova ZPF se desenvolve na frente da ponta da macrotrinca e progressivamente se estende.</p>
(e)		<p>Curva carga-deslocamento típico para um ensaio de fratura em rocha, mostrando diferentes estágios em desenvolvimento da ZPF na frente da ponta da trinca.</p>

## 2.4 TENACIDADE

A tenacidade à fratura é a propriedade mecânica que o material apresenta para absorver e dissipar energia durante o processo de fraturamento. A resistência indicada por ela é apresentada em termos de intensificação de tensões ao avanço da fratura (FERREIRA, 2002). A tenacidade é considerada uma propriedade mecânica intrínseca do material e de fundamental importância como indicativo da resistência à propagação ou iniciação das fraturas (ATKINSON, 1987).

A quantificação da tenacidade à fratura pode ser determinada por ensaios de diversas naturezas, como tração direta e indireta, compressão simples e flexão de vigas. Os primeiros ensaios para avaliar a tenacidade à fratura em rochas tinham como base a metodologia padronizada para materiais metálicos (SCHIMIDT, 1976). Esses ensaios apresentavam resultados aceitáveis, contudo demandavam grandes quantidades de corpos de prova com geometrias complicadas em relação à realidade da mecânica de rochas.

Na década de 80, a ISRM – *International Society for Rock Mechanics* – formou um grupo de trabalho, que apresentou sugestões de dois métodos para determinação da tenacidade (ISRM, 2007), correspondendo aos corpos de prova determinados *Chevron Bend* (CB) e *Short Rod* (SR). Em 1995, a ISRM sugeriu um terceiro ensaio cujo corpo de prova é chamado de *Cracked Chevron Notched Brazilian Disc* (CCNDB). Vale ressaltar que atualmente existe uma série de outros métodos, não reconhecidos pela ISRM, para determinação da tenacidade à fratura de rochas.

Os ensaios sugeridos pela ISRM têm dois níveis. O nível I é realizado sob controle de carga, enquanto o nível II se dá sob controle de deslocamento da abertura da boca da trinca. Em geral, são usados LVDTs para medir o deslocamento no ponto de carregamento, e extensômetros do tipo “*clip gauge*”, para medir a abertura da boca da trinca.

O nível I requer somente o registro da carga máxima sendo de rápida execução, com um tempo máximo de 20 segundos. Considera-se que o ponto de avaliação da tenacidade à fratura ocorre na carga máxima, com o material apresentando um comportamento elástico linear.

As rochas possuem uma zona de processo da fratura na ponta da fissura, por isso o corpo de prova precisa ser suficientemente grande em relação a essa zona, para que a condição de plastificação de pequena escala seja válida. Deste modo a zona terá comportamento elástico linear. O tamanho da zona de processo de fraturas depende do tamanho dos grãos, portanto o valor obtido pelo ensaio de nível I é válido apenas para corpos de prova grandes com granulação

final. Para outros casos, o ensaio de nível I não produz valores válidos, necessitando também a realização de ensaio de nível II.

O nível II requer registro da carga e do deslocamento durante todo o ensaio, sendo mais lento que o nível I. Os valores fornecidos são mais precisos, porém sua realização é mais complicada e tem custo mais alto. Sob condições não ideais, a tenacidade à fratura pode ocorrer antes ou depois da carga máxima, uma vez que a predição dos valores de carga máxima pode ser bastante variável. O nível II considera esses aspectos em sua análise, de maneira que corrige a tenacidade à fratura em função da não linearidade e não elasticidade do material. Outro aspecto importante é que o nível II não sofre influência do tamanho do corpo de prova.

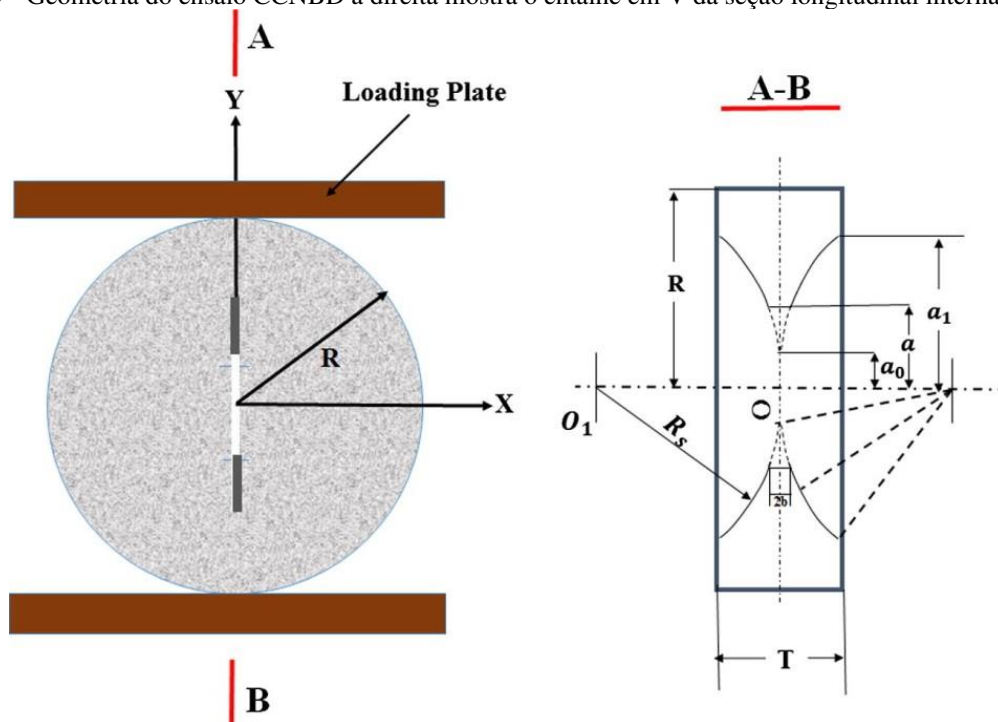
#### **2.4.1 Cracked Chevron Notched Brazilian Disc” (CCNBD)**

O ensaio de disco brasileiro com entalhe Chevron mais conhecido como “*The Cracked Chevron Notched Brazilian Disc*” (CCNBD) foi introduzido em 1995 e atualizado pela ISRM em 2007 para testar o modo de abertura I quanto à tenacidade da fratura em rocha. O método de ensaio foi vigorosamente discutido e debatido, apesar de ser objeto de pesquisa intensa por décadas, possuindo atualmente diversas sugestões para cálculos do ensaio.

Como dito anteriormente este ensaio destina-se a medir a tenacidade à fratura de materiais rochosos, dada pelo fator  $K_{IC}$ . O principal uso dessa propriedade é para a classificação e caracterização da rocha intacta em relação à sua resistência à propagação de fraturas. Outros usos importantes são como índices para os processos de fragmentação de rochas, como esmagamento e perfuração de túneis, ou na análise de fraturamento hidráulico ou fraturas e estabilidade relacionadas ao uso de explosivos.

O ensaio consiste em preparar o corpo de prova em forma de disco (semelhante ao disco utilizado no ensaio de tração indireta, ensaio Brasileiro, ou Lobo-Carneiro), no qual é feito um entalhe em “*chevron*”, através dois cortes com uma serra circular em ambos os lados do disco, ao longo do mesmo plano de corte diametral, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Geometria do ensaio CCNBD a direita mostra o entalhe em V da seção longitudinal interna do disco.



Fonte: Behraftar et al., 2017.

As dimensões geométricas dos corpos de prova devem ser convertidas em parâmetros adimensionais com relação ao raio do corpo de prova ( $R$ ) como se demonstra nas equações a seguir.

$$a_0 = \frac{a_0}{R}, \quad a_1 = \frac{a_1}{R}, \quad a_b = \frac{T}{R}, \quad a_s = \frac{R_s}{R} \quad (\text{Equação 19})$$

Em que:

$a_0$  é o comprimento adimensional do entalhe inicial;

$a_1$  é o comprimento adimensional da trinca na face do corpo de prova;

$a_b$  é largura adimensional da trinca;

$a_s$  é o raio adimensional da serra do corpo de prova CCNBD; e

$T$  é a espessura do corpo de prova mostrado na figura anterior.

Para posicionar o entalhe em “chevron” paralelo à aplicação da carga, deve ser utilizado um esquadro pequeno. A propagação da trinca inicia-se na ponta do entalhe em “chevron” e se propaga radialmente na direção externa do corpo de prova até o ponto onde a tenacidade à fratura é avaliada. O ensaio é feito sob controle de carga e requer somente o registro da carga

máxima. Além disto, a ISRM (2007) sugere que a variação da velocidade de carregamento deve ser tal que a ruptura deve ocorrer dentro de, no máximo, 20 segundos após o início do ensaio.

A tenacidade à fratura deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{T\sqrt{D}} \times Y_{min} \quad (\text{Equação 20})$$

Em que  $Y_{min}$  é o valor mínimo do fator de intensidade de tensão para o corpo de prova, que é determinado em função das dimensões geométricas do corpo de prova conforme a seguinte equação:

$$Y_{min} = ue^{va_1} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que  $u$  e  $v$  são valores constantes tabelados determinados em função de  $\alpha_0$  e  $\alpha_t$ .

Para efetuar o ensaio em diferentes diâmetros ( $D$ ) deve-se fazer o cálculo do diâmetro mínimo ( $D_{min}$ ) correspondente, de acordo com seguinte formula:

$$D_{min} = 8,88 + 1,4722 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^{-2} \quad (\text{Equação 22})$$

Em que  $\sigma_t$  é a resistência à tração das amostras.

Para fazer o entalhe no corpo de prova as dimensões do raio da serra ( $R_s$ ) e a profundidade do corte ( $h_c$ ), podem ser calculadas pelas expressões e relações apresentadas a seguir.

$$a_s = \frac{R_s}{R} = \sqrt{a_0^2 + (a_1^2 - a_0^2 + a_b^2/4)^2} \div a_b^2 \quad (\text{Equação 23})$$

$$h_c = \left( a_s - \sqrt{(a_s^2 - a_1^2)} \right) R = \left( a_s^2 - \sqrt{(a_s^2 - a_0^2)} \right) R + B/2 \quad (\text{Equação 24})$$

$$a_0 = \sqrt{a_s^2 - \left( \sqrt{a_s^2 - a_1^2} + a_b/2 \right)^2} \quad (\text{Equação 25})$$

$$a_1 = \sqrt{a_s^2 - \left( \sqrt{a_s^2 - a_0^2} + a_b/2 \right)^2} \quad (\text{Equação 26})$$

$$a_b = 2 \left( \sqrt{a_s^2 - a_0^2} - \sqrt{a_s^2 - a_1^2} \right) \quad (\text{Equação 27})$$

Por fim os corpos de prova devem satisfazer às condições descritas abaixo e devem estar dentro da faixa de valores válidas na Figura 10:

$$a_1 \geq a_b/a_b$$

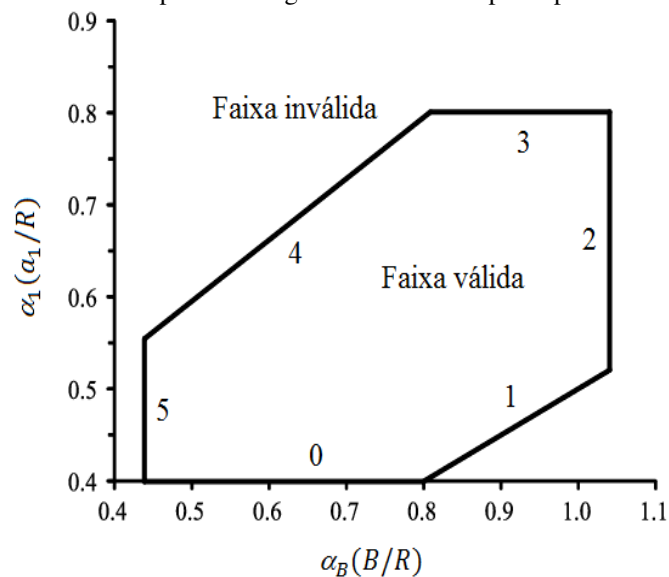
$$a_b \leq 1,04$$

$$a_1 \leq 0,8$$

$$a_b \geq 1,1729$$

$$a_b \geq 0,44$$

Figura 10 - Faixa válida dos parâmetros geométricos do corpo de prova do ensaio CCNBD.



Fonte: ISRM, 2007.

## 2.5 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM (CID)

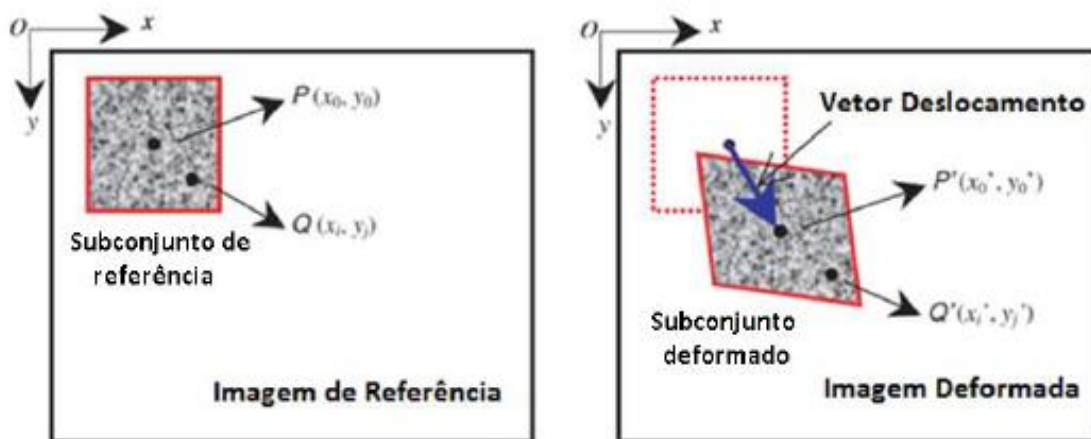
### 2.5.1 Introdução

A Correlação Digital de Imagem (CID) é uma técnica ótica de análise experimental de deformações cuja aplicabilidade tem sofrido um desenvolvimento acentuado nas últimas décadas, pois é um sistema de medição não destrutivo e possui uma ampla variedade de aplicação. O método consiste basicamente na técnica de comparação de imagens digitais que

são obtidas antes, durante e após a deformação do corpo de prova que será objeto de estudo (MOREIRA, 2015).

A partir desse conjunto de imagens obtidos durante o ensaio mecânico é utilizado um software que estabelece regiões da imagem não deformada e regiões da imagem deformada. Uma vez selecionado um ponto na imagem inicial, fp a sua nova posição na imagem deformada, através de um algoritmo de correlação. Com base na diferença entre as posições de um dado ponto material nas imagens inicial e final calcula-se o deslocamento sofrido por esse ponto (Figura 11). Estendendo esse procedimento a múltiplos pontos na superfície de um corpo em deformação, é possível determinar uma aproximação ao campo de deslocamentos sofridos em determinada amostra com determinado incremento de tensão (BELEZA, 2017).

Figura 11 - Representação da imagem de referência não deformada para uma imagem deformada mostrando vetor deslocamento do ponto central da imagem após deformação.



Fonte: Korber, 2010.

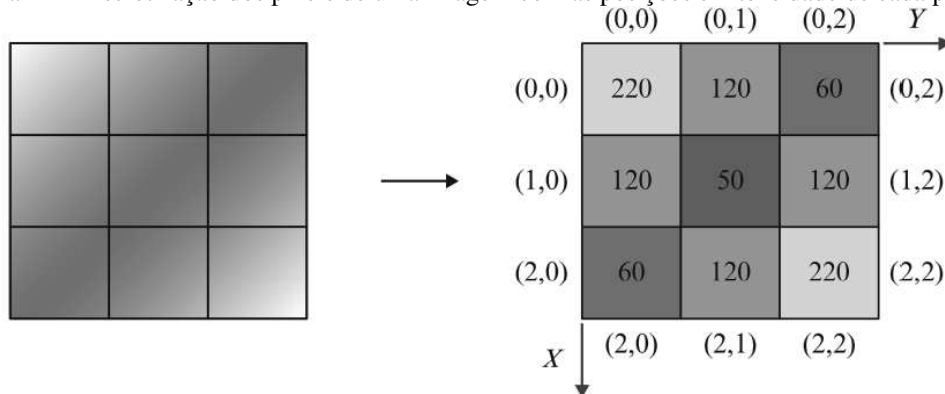
A aquisição de imagens pode ser feita com uma câmera digital relativamente comum, uma vez que com a tecnologia atual é possível obter uma câmera fotográfica com boa qualidade a um preço razoável. Também deve ser utilizado um refletor de led para iluminação do corpo de prova durante a aquisição de imagens para garantir uma melhor precisão e correção de distorção da iluminação.

Neste capítulo serão apresentados os princípios de funcionamento do método em 2D nas quais foram realizadas as medições de deformações utilizando a técnica CID.

## 2.5.2 Conceitos Fundamentais

A base de funcionamento do método de Correlação Digital de Imagem (CID) são as imagens digitais. Essas imagens são utilizadas por algoritmos que discretizam os elementos unitários das imagens (pixels). A cada pixel vai ser então associada uma posição  $(x, y)$  e um valor de intensidade  $f(x, y)$ , considerando a imagem como se fosse uma função bidimensional (Figura 12). A ideia fundamental deste método é extrair de cada imagem a matriz de intensidade de um bloco de  $N \times N$  pixels e procurar essas intensidades na imagem seguinte após a deformação.

Figura 12 - Discretização dos pixels de uma imagem com as posições e intensidade de cada pixel.



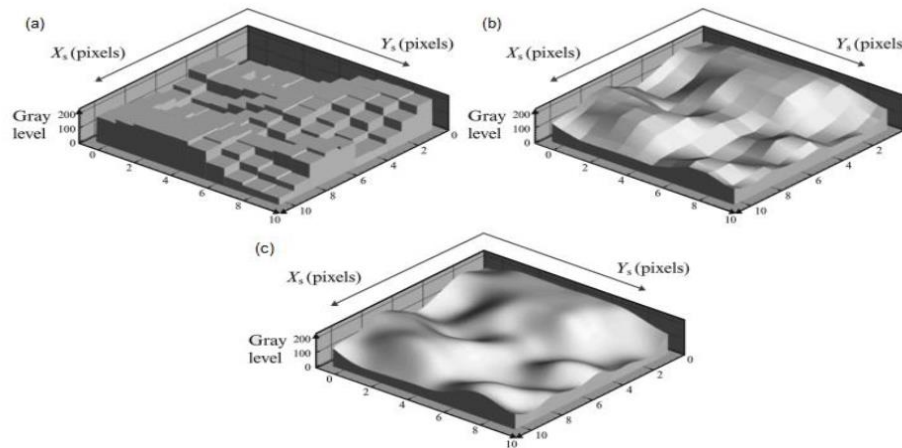
Fonte: Sutton, 2008.

As intensidades de cada pixel são definidas com base numa escala. Por exemplo, considerando uma imagem monocromática, numa escala representada por 8 bits existem  $2^8$  combinações possíveis de cores. Ou seja, a escala varia em níveis de cor cinza (*gray level*) de 0 (preto) a 255 (branco), bastando por isso uma matriz para a definir. Já num formato de imagem RGB (*Red-Green-Blue*), são necessárias três matrizes para definir a intensidade de um único pixel, sendo que cada uma delas define cada uma das três cores: vermelho, verde e azul. A combinação das três matrizes corresponde a uma intensidade que define uma cor. Evidentemente, imagens monocromáticas exigem menos cálculos computacionais. Por esta razão alguns softwares só aceitam imagens monocromáticas e outros fazem a conversão de imagens coloridas para monocromáticas, antes de iniciar a análise da imagem. (SUTTON, 2008).

Para fazer a correlação das imagens digitais pixel a pixel o método CID utiliza um algoritmo vai fazer a correlação entre o movimento de um bloco de uma imagem para a outra com o deslocamento da superfície do corpo de prova, sendo que a resolução de uma imagem é um pixel, o algoritmo só vai detectar movimentos de um conjunto inteiro de pixels. Ou seja, a

forma de representação discreta das intensidades dos pixels não é a mais correta para o grau de precisão que este método exige (YONEYAMA, 2009). Para corrigir esse problema é feita uma interpolação das intensidades dos pixels, como mostrado na Figura 13, em que é feita uma representação tridimensional das intensidades dos pixels de um dado bloco.

Figura 13 - Representação do processo de interpolação das intensidades dos pixels (a); representação das intensidades com interpolação bilinear (b); representação das intensidades com interpolação spline cúbica (c).



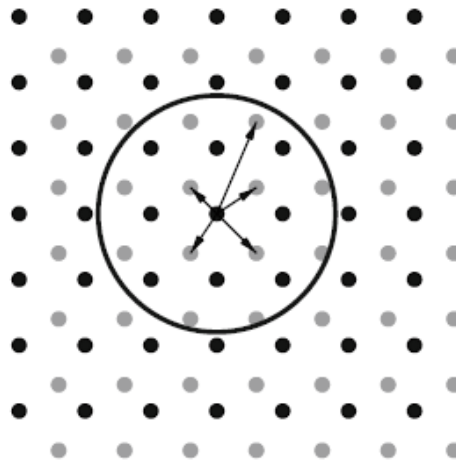
Fonte: Sutton, 2008 apud Beleza, 2017.

Apesar do algoritmo de interpolação das intensidades dos pixels melhorar a precisão do método, ainda se tem um outro problema que é denominado de Problema de Correspondência, pois podem haver várias correspondências de pixel de mesma intensidade de um bloco de uma imagem pra outra. Percebe-se assim que se houver um padrão de pixel repetitivos (

Figura 14), pode haver mais do que uma correspondência na correlação das imagens, causando assim uma falta de correlação em que os deslocamentos medidos de uma imagem para outra não são confiáveis.

Para resolução do Problema de Correspondência, é recomendado a utilização de um padrão aleatório (*speckle*), que poderá ser aplicado artificialmente com tinta, na superfície do corpo de prova que será deformado. A tinta tem que aderir à superfície dos corpos de prova e se deformar com ele sem interferir nas propriedades mecânicas do material em estudo.

Figura 14 - Dificuldade de correspondência em superfície com padrão repetitivo.



Fonte: Sutton, 2008.

Desta forma, toda a superfície possui informação suficiente para se realizar um processo de correspondência. Note-se, no entanto, que a qualidade do *speckle* pode ter grande influência na precisão das medições a efetuar. Desde logo, quanto menor o diâmetro dos grãos que compõem o padrão, melhor a resolução espacial (LAGATU & LAFARIE-FRENOT, 2004).

Figura 15 - Exemplos de três padrões aleatório aplicados na superfície do corpo de prova ensaiado.



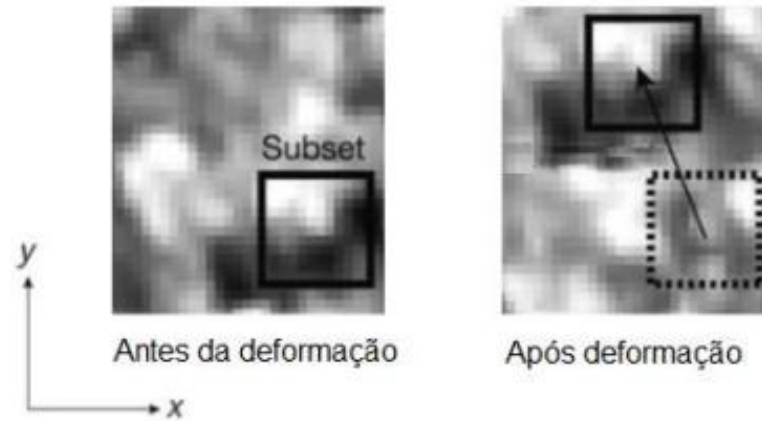
Fonte: Pan *et.al*, 2008.

### 2.5.3 Critérios de Correlação

De acordo com os conceitos explanados anteriormente é possível entender como é que o algoritmo faz a correspondência de blocos na Região de Interesse assinalada. Obtendo a matriz de intensidades do bloco selecionado, o algoritmo vai analisar outras matrizes de intensidade na imagem seguinte até encontrar uma semelhança entre elas. A comparação entre matrizes de intensidades dos pixels faz-se com recurso a uma dada função-custo na qual ela

seleciona um conjunto de pixel (*Subset*) na imagem inicial e final. Após essa correspondência calcula-se o deslocamento ocorrido durante o processo de deformação.

Figura 16 - Deslocamento do *subset* após a deformação.



Fonte: Yoneyama, 2009

São várias as funções-custo existentes que se podem aplicar no algoritmo de correlação, sendo que as mais utilizadas são: a *Normalized Cross Correlation* (NCC), a *Sum of Squared Differences* (SSD) e *Normalized Sum of Squared Differences* (NSSD) (SHREIER et al., 2009), mostradas nas equações a seguir:

$$NCC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} g_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} g_{ij}}} \quad (\text{Equação 28})$$

$$SSD = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_{ij} - f_{ij})^2 \quad (\text{Equação 29})$$

$$NSSD = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} g_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij}^2} g_{ij} - f_{ij} \right)^2 \quad (\text{Equação 30})$$

Em que  $f_{ij}$  e  $g_{ij}$  representam as intensidades dos pixels nos blocos inicial e atual.

Uma melhor correspondência entre os blocos encontra-se na região que minimiza uma destas funções-custo. Após o algoritmo encontrar o bloco correspondente de uma imagem para outra é possível determinar o campo de deslocamento e posteriormente através de derivação é possível obter o campo de deformação.

Através do campo de deslocamentos é possível determinar o alongamento relativo ( $\lambda$ ) do objeto:

$$\lambda = \frac{l}{l_0} \quad (\text{Equação 31})$$

Em que  $l$  e  $l_0$  são o comprimento final e o comprimento inicial, respectivamente. A partir do alongamento relativo, é possível obter vários tipos de deformação linear ou extensão como a extensão nominal ( $\varepsilon$ ), a extensão verdadeira ou logarítmica ( $e$ ), a extensão de Lagrange ( $E$ ) e a extensão de Euler ( $E^*$ ) que são dadas pelas seguintes equações:

$$\varepsilon = \lambda - 1 \quad (\text{Equação 32})$$

$$e = \ln(\lambda) \quad (\text{Equação 33})$$

$$E = \frac{1}{2} (\lambda^2 - 1) \quad (\text{Equação 34})$$

$$E^* = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (\text{Equação 35})$$

O método de correspondência de blocos até agora referido apenas admite translações do bloco de uma imagem para a outra. No entanto, um corpo pode sofrer tração, compressão, corte ou rotação, o que significa que um bloco inicialmente quadrado pode assumir uma outra forma depois da deformação. Isto quer dizer que pode existir não correlação, não sendo obtida uma correta correspondência. Aliás, estudos revelam que a não correlação é bastante significativa mesmo para rotações pequenas (SCHREIER et al., 2009).

Para solucionar as dificuldades inerentes ao processo de não correlação devido a forma, criou-se uma série de algoritmos que diferem entre si pela metodologia, destacando – se entre eles três: Método de Newton-Raphson, Método dos Gradientes e Lucas-Kanade. Ambos são métodos que corrigem o processo de alteração de forma através de uma abordagem iterativa para determinação da posição do *subset* e introduzem uma função de forma associada à transformação de uma geometria inicial, e mesmo que ocorra mudança substanciais da forma devida à deformação, seja possível a correlação dos *subsets* inicial e final.

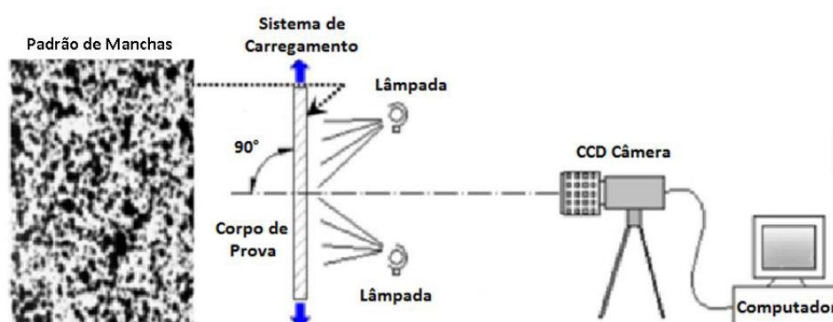
#### 2.5.4 Aparato Experimental

Para aplicação da técnica CID, é de extrema importância uma minuciosa montagem e organização do aparato experimental que inclui: Corpos de prova com a face pintada com um padrão aleatório, fonte de luz e câmera digital de boa resolução, que compõem os parâmetros externos. Os parâmetros internos estão relacionados ao processo interativo, destacando-se para o uso de softwares com algoritmos e uso das funções-custo, como explicado anteriormente.

### ***Resolução da câmera***

Deve-se levar em consideração a resolução da câmera com o tamanho da área que se pretende analisar e a distância entre a câmera e o objeto. Deve haver um compromisso entre estes parâmetros, e se o objeto a analisar for de grandes dimensões deve ser considerada a utilização de mais do que uma câmera para não comprometer os resultados obtidos.

Figura 17 – Aparato experimental para aplicação da técnica CID.



Fonte: Castro, 2017.

### ***Padrão estocástico***

Este parâmetro é extremamente importante neste método, pois é ele que vai garantir que cada zona da superfície a ser analisada é única, garantindo assim o processo de correspondência.

Os padrões podem assumir várias formas e vários diâmetros de grão e, por isso o tamanho de bloco deve ser considerado em conjunto com as dimensões do bloco, como referido anteriormente. Por exemplo, se o padrão não estiver regularmente distribuído e o bloco for demasiado pequeno, poderá haver várias correspondências para esse mesmo bloco originando um fenómeno de não correlação.

Geralmente o padrão é aplicado na superfície do corpo de prova por tinta spray. Primeiro cria-se uma superfície que servirá de background, utiliza-se geralmente uma tinta de spray

comum de cor branca. Após aplicação da tinta branca espera-se o tempo de secagem da tinta, e após secagem aplica-se com spray preto a uma certa distância para gerar um padrão aleatório.

### ***Iluminação***

A utilização de iluminação artificial, geralmente feita com algum tipo de refletor a led, de preferência, torna-se um fator importante porque as mudanças de brilho de uma imagem vão afetar as intensidades dos pixels, e, se essas alterações forem significativas poderão influenciar os resultados obtidos. Existem funções-custo que contabilizam essas mudanças através de transformações fotométricas. No entanto é aconselhável utilizar iluminação artificial para garantir maior estabilidade nas condições experimentais, pode-se usar de um a dois refletores para uma correta iluminação evitando áreas sombreadas ou com menor contraste entre os pixels (CASTRO,2017).

### ***Frequência de Aquisição***

A frequência de aquisição de fotografias é um parâmetro que deve ser analisado juntamente com as condições de velocidade do ensaio e da deformação que o objeto sofre, e deve ser analisada para que se obtenham os dados suficientes, de acordo com a quantidade de “Frames por Segundo” que a máquina fotográfica captura. Contudo não é necessária uma análise de uma grande quantidade de fotografias, que conseqüentemente poderá aumentar excessivamente o tempo de análise computacional, pois o processamento é lento.

### ***Software CID***

Os softwares utilizados para análise CID são comercializados por várias empresas, porém esses programas apresentam um custo muito elevado para sua aquisição. Entretanto, há softwares livres completos que permitem analisar os resultados.

Beleza (2017) fez uma análise comparativa de seis software de CID, indicando as vantagens e as desvantagens de cada um. Os seis programas apresentados foram analisados de acordo com 7 parâmetros principais: instalação, carregamento de imagens, funcionamento, modificação da análise, rapidez da análise no computador, apresentação de resultados e outras funcionalidades. Esta análise foi realizada previamente aos ensaios experimentais e por essa razão foram considerados os parâmetros inerentes à técnica CID.

De acordo com as caracterizações feitas dos 7 programas em relação aos parâmetros acima mencionados, foi feita uma tabela resumo para ajudar a perceber os programas cuja utilização seria mais vantajosa, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação entre os softwares avaliados para análise CID.

		Parâmetros							
		Instalação	Carregamento de Imagens	Funcionamento	Modificação da Análise	Rapidez da Análise	Apresentação de resultados	Outras Funcionalidades	Classificação Geral
Softwares de análise CID	Gom Correlate	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○
	Ncorr	○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○	○	○○○○	○○○○	○○○○
	OpenCV	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Moiré Software	○○○○	○○	○○	○○○	○○○○	○○○	○○○○	○○○
	CIAS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Algoritmo Matlab	○○	○○○	○○○	○	○○○○	○○○	NA	○○
NA – Não se aplica ○ – Ruim ○○ - Insuficiente ○○○ - Razoável ○○○○ - Bom ○○○○○ - Excelente									

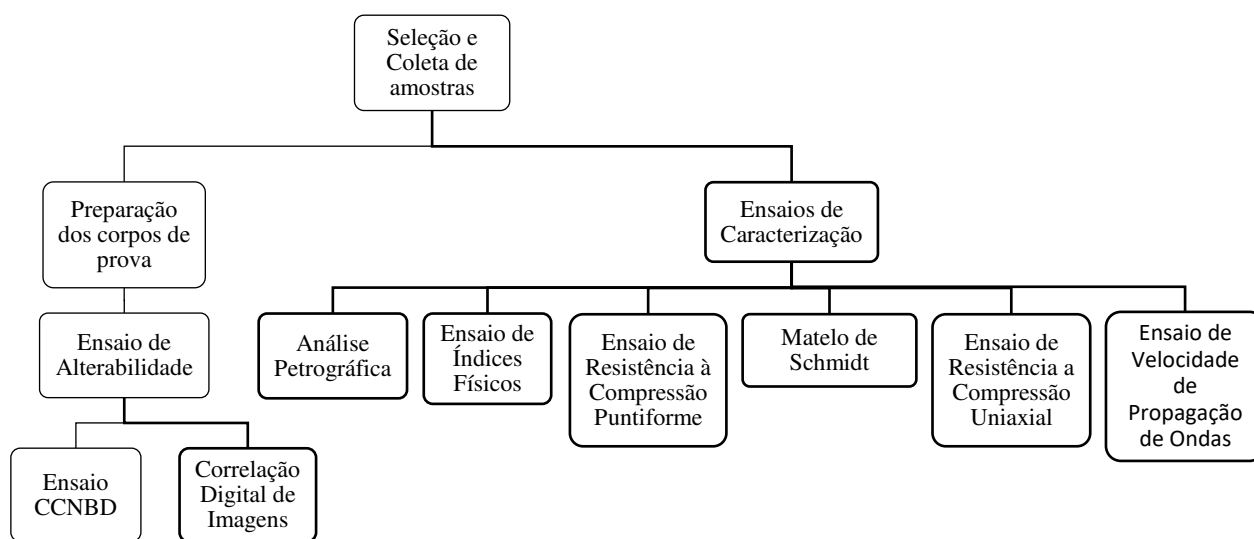
Fonte: Modificado de Beleza, 2017.

Pela Tabela 2 é possível perceber que o software mais bem classificado é o Gom Correlate, seguido do NCorr. Por essa razão optou-se por utilizar o Gom Correlate pela sua qualidade, simplicidade e facilidade de interação.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo aborda as etapas realizadas para alcançar os objetivos desta pesquisa. Estas etapas podem ser visualizadas no fluxograma a seguir (Figura 18).

Figura 18 - Fluxograma com as etapas da pesquisa.

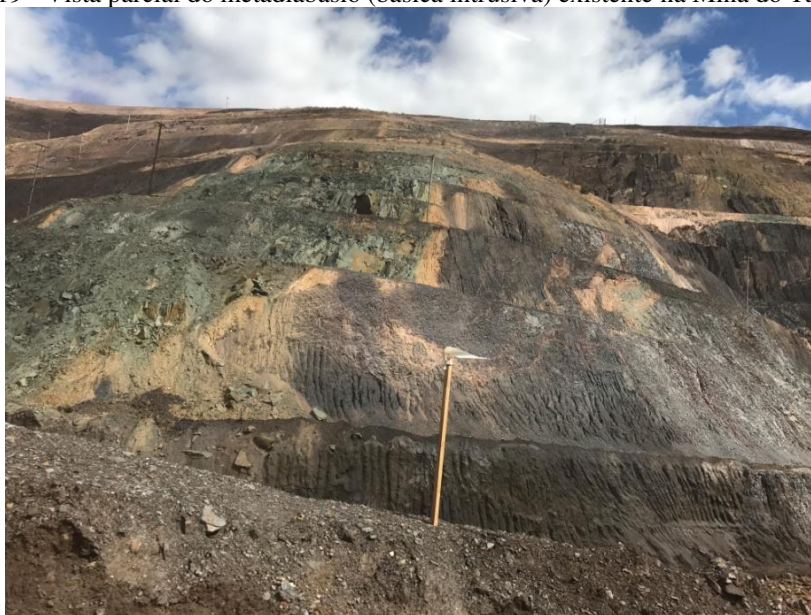


Fonte: Autor, 2020.

### 3.1 SELEÇÃO E COLETA DE AMOSTRAS

A seleção do litotipo a ser estudado nesta pesquisa foi feita com base na doação por empresas de mineração no estado de Minas Gerais. Nesse sentido, optou-se por utilizar amostras de metadiabásio, litotipo de ocorrência restrita na região do Quadrilátero Ferrífero (QF). Foram coletadas amostras de metadiabásio em uma mina a céu aberto (Mina do Tamanduá), pertencente à mineradora VALE S. A., localizada no município de Nova Lima, em Minas Gerais. Um total de 20 (vinte) amostras foram disponibilizadas pela mineradora na forma de testemunhos de sondagem. As amostras encontravam-se com grau de intemperismo de W2 (Figura 19).

Figura 19 - Vista parcial do metadiabásio (básica intrusiva) existente na Mina do Tamanduá.



Fonte: Perim & Cerrato, 2018

### 3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

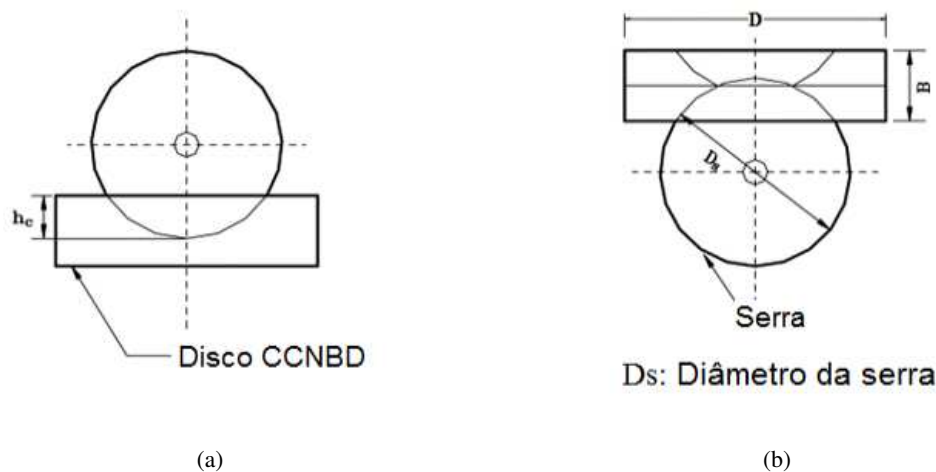
No total foram preparados 66 (sessenta e seis) corpos de prova (CPs) para o ensaio de CCNBD, conforme as normas da ISRM (2007). As amostras que foram preparadas são de sondagens rotativas da Mina Tamanduá, as mesmas aparentemente apresentavam um mesmo grau de intemperismo (W2), porém para determinar se todas as amostras pertenciam a essa mesma classificação fez ensaios de caracterização físicos e mecânicos.

Os testemunhos de sondagem foram cortados no Laboratório de Mecânica de Rochas da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na forma de discos de aproximadamente 63,0 mm de diâmetro ( $D$ ) e 20,7 a 22,8 mm de espessura ( $B$ ). Os discos foram faceados na retificadora do Laboratório de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) a fim de manter o paralelismo entre as faces inferior e superior, bem como geratriz.

Posteriormente, foi feito o entalhe *chevron* através de um disco diamantado com diâmetro externo ( $D_s$ ) de 50,0 mm e 1,20 mm de espessura, de acordo com as recomendações da ISRM (2007). A lâmina perfurou o corpo de prova em uma profundidade ( $h_c$ ) em torno de 12,85 mm e depois este foi virado e perfurado pelo outro lado, de modo que as dimensões geométricas permanecessem dentro da tolerância permitida, conforme a Figura 20. O diâmetro ( $2a_1$ ) do entalhe nos corpos de prova foi de aproximadamente 43,7 mm.

Após a confecção do entalhe, os CPs foram lavados e, em seguida, secos em estufa por 24 horas como sugere a ISRM (2007).

Figura 20 - Procedimento de corte do entalhe chevron no corpo de prova para CCNBD: (a) primeiro corte; e (b) segundo corte.



Fonte: ISRM, 2007.

### 3.3 ENSAIO DE ALTERABILIDADE

Após a confecção dos discos de rocha com o entalhe *chevron*, estes foram submetidos ao ensaio de alterabilidade, de acordo com o proposto pela ASTM- D5313 (*Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions*), mas com algumas modificações, descritas a seguir.

Foram realizados um total de 105 ciclos nos corpos de prova com o auxílio do dessecador à vácuo e estufa. As amostras foram colocadas no dessecador à vácuo e cobertas com água por aproximadamente  $4 \pm 1$  horas em temperatura controlada de  $23 \pm 2$  °C, até que estivessem totalmente saturadas. Após verificação da saturação completa das amostras, estas foram levadas à estufa para secagem por  $15 \pm 1$  horas em uma temperatura de  $100 \pm 5$  °C. Após a secagem esperou-se  $60 \pm 5$  minutos para iniciar o próximo ciclo. Alternaram-se os ciclos de modo que amostras foram selecionadas após 0, 20, 50, 85 e 105 ciclos para realização do ensaio CCNBD.

### 3.4 ENSAIO CCNBD

Para determinação da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) e a variação da liberação crítica de energia de deformação ( $G_{IC}$ ) no modo I de rochas intactas, a ISRM recomenda a utilização do CCNBD (*Determining Mode I Fracture Toughness: Suggested Method Using Cracked Chevron Noched Brazilian Disc (CCNBD) Specimens* – ISRM, 2007), descritos anteriormente.

Esses ensaios foram realizados em duas etapas, uma no Laboratório de Geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), utilizando os métodos convencionais do ensaio CCNBD com medições de deformação de abertura do *notch*, e outra parte dos ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da UFV.

No primeiro grupo de ensaios, para medição das deformações de abertura do *notch*, utilizou-se *clip gauges* da marca MTS que foram acoplados na borda do mesmo; já no segundo grupo de ensaios, para medição das deformações, utilizou-se a técnica CID. Cabe ressaltar que anteriormente essas amostras passaram por diversos ensaios de ciclagem água-estufa.

O equipamento utilizado para a realização dos carregamentos foi uma prensa servo-controlada (Figura 21), na qual o corpo de prova foi colocado com uma inclinação de 0°, 23°, 45°, e 90°, entre o prato da máquina e o entalhe. A exatidão do ângulo de inclinação foi feita com o auxílio de um transferidor. A taxa de carregamento utilizada foi de 0,1 N/s.

O ensaio foi realizado sob controle da taxa de carregamento, de modo que a ruptura ocorresse em, no máximo, 20 segundos após o início do ensaio e requerendo somente o registro da carga máxima. As taxas de carregamento utilizadas foram estimadas em amostras teste para medir a força de carregamento necessária antes de iniciar os ensaios a serem considerados na análise.

Foi registrada apenas a carga máxima no corpo de prova, procurando-se manter um erro em torno de  $\pm 1,0\%$ .

Figura 21 - Ensaio de tenacidade à fratura e tenacidade realizado pela prensa servo-controlada.



Fonte: Autor, 2020

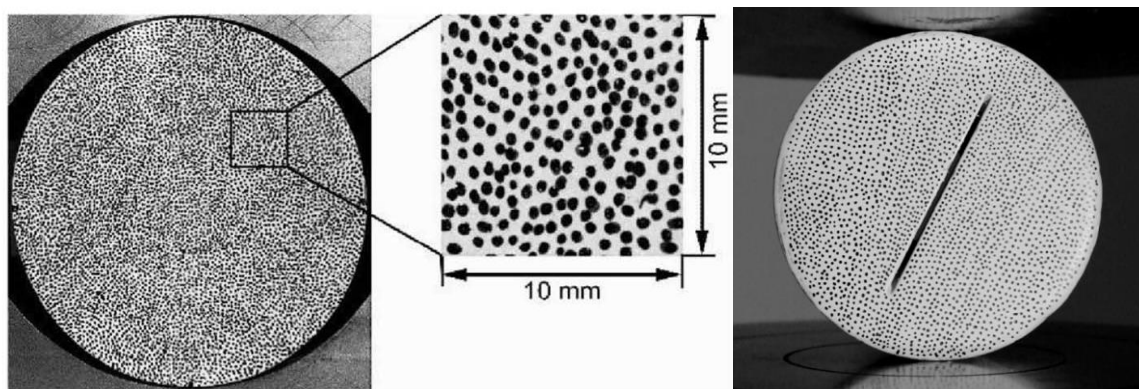
### 3.5 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (CID)

A metodologia de correlação digital de imagens foi utilizada para as taxas de deformação nos corpos de prova do ensaio CCNBD. Seguiu-se a metodologia usada por Patel e Martin (2018), aceita pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Após as amostras preparadas para o ensaio CCNBD terem sido submetidas aos ensaios de ciclagem água estufa, preparou-se os corpos de prova para a técnica CID.

Primeiramente lixou-se a face dos corpos de prova, depois de lixados aplicou-se uma tinta spray de cor branca em uma face do corpo de prova. Após aplicação da tinta branca e secagem da mesma uma criou-se um padrão de pontos de coloração preta e testado a superfície no *software* GOM CORRELATE 2018 (Figura 22), para analisar se o padrão foi reconhecido ou não.

Figura 22 - Preparação dos corpos de prova com um padrão de pontos na superfície para utilização da metodologia CID.



Fonte: Beleza, 2007 e Autor, 2020.

Montou-se um aparato para realizar esta metodologia, consistindo de uma câmera com uma resolução de 1080p, apoiada em um tripé a uma distância máxima de 50 cm do corpo de prova e uma fonte de luz LED para iluminação correta durante a filmagem.

Posteriormente, foi aplicada uma compressão diametral no corpo de prova iniciando a filmagem do método CID simultaneamente. Após ruptura, os dados da filmagem e do carregamento da prensa foram tratados no GOM CORRELATE 2018 para obtenção dos parâmetros de deformação do *notch*.

### 3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A caracterização das amostras coletadas foi realizada em diversas etapas através da petrografia, da medida de resistência à compressão puntiforme e de resistência à compressão uniaxial, dos índices físicos e do martelo Schmidt (esclerometria). Todos os ensaios foram realizados conforme as sugestões da ISRM (2007 e 2014). Cabe ressaltar que esses ensaios foram realizados para definir se as amostras apresentavam um mesmo grau de intemperismo (W2).

### **3.6.1 Ensaio Petrográfico**

As lâminas petrográficas foram confeccionadas a partir de amostras de mão do metadiabásio no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Foram produzidas um total de 02 lâminas petrográficas, confeccionadas para tentar determinar o grau de alteração inicial e a mineralogia da rocha. Como visualmente não se observou nenhuma foliação bem marcada, executou-se a laminação sem uma orientação prévia.

A análise e descrição das lâminas foram realizadas com o auxílio de um microscópio petrográfico com luz polarizada da marca ZEISS.

### **3.6.2 Velocidade de Propagação de Ondas**

O ensaio de velocidade de propagação de ondas não é destrutivo, e por este motivo utilizou-se as mesmas amostras ensaiadas no ensaio de resistência à compressão uniaxial. Foram analisados 5 (cinco) corpos de prova com diâmetro de 46 mm e comprimento de 110 a 120 mm aproximadamente.

O equipamento de teste ultrassônico utilizado foi da marca Pundit Lab do fabricante Proceq, do Laboratório de Mecânica de Rochas da UFV. Primeiramente foi feita a calibração do equipamento com o auxílio de uma barra de calibração, de modo que esta apresentasse um valor de tempo de trânsito em microssegundos ( $\mu_s$ ) conhecido. Posteriormente, dois transdutores foram colocados cada um em uma face do corpo de prova, e como acoplante utilizou-se vaselina para melhorar a aderência entre a amostra e o transdutor evitando a perda de sinal.

Através do tempo de trânsito medido e do comprimento do corpo de prova (dado de entrada) o software fornece a velocidade de onda compressional,  $V_p$ , como dado de saída. A partir da velocidade de onda P foi possível identificar o grau de alteração dos corpos de prova.

### 3.6.3 Martelo de Schmidt

O ensaio Esclerométrico foi utilizado para obtenção da dureza dos corpos de prova através da média dos valores de rebote medidos (Q) em laboratório. Para realizar este ensaio utilizou-se um Martelo de Schmidt conforme recomendações da ISRM (2014) (Figura 23). O Esclerômetro de Schmidt utilizado foi do tipo L, da Proceq, conhecido como Silver Schmidt. Foram analisados 5 (cinco) corpos de prova com aproximadamente 46 mm de diâmetro e 110 à 120 mm de comprimento.

Os rebotes com o Martelo de Schmidt foram realizados em pontos equidistantes em cada corpo de prova, distribuídos radialmente. Quando os corpos de prova apresentavam descontinuidades, variou-se os rebotes em relação à direção das descontinuidades.

Durante o ensaio, centralizou-se os corpos de prova em uma base de aço de alta resistência em V que deixava a amostra imóvel. Por fim, os rebotes foram realizados sempre perpendicularmente à superfície dos corpos de prova e na vertical para baixo.

Figura 23 – Martelo de Schmidt utilizado durante os ensaios esclerométricos.



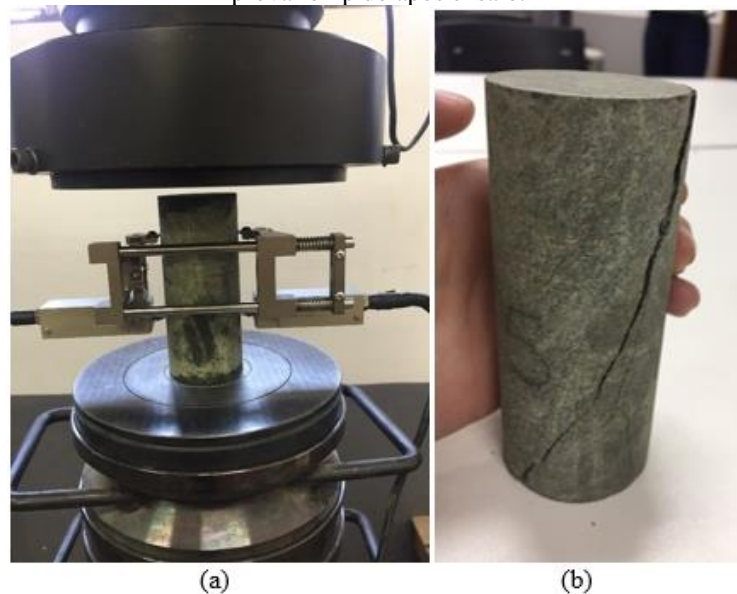
Fonte: Autor,2020.

### 3.6.4 Ensaio de Resistência a Compressão Uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram executados com ciclos de carregamento e descarregamento, em prensa servo controlada, com taxa de carregamento constante. A medida das deformações axiais foi realizada com auxílio de Transformadores Diferenciais Lineares Variáveis (LVDT). Os 5 (cinco) corpos de prova ensaiados eram cilíndricos, sendo a relação altura/diâmetro média igual a 2,5.

Inicialmente, aplicou-se sobre o corpo de prova uma pressão correspondente a 40 % da resistência à compressão da amostra (baseado em conhecimento prévio obtido em ensaio teste). Atingido esse valor, procedia-se o descarregamento (carga reduzida a praticamente zero), completando um ciclo de carga e descarga. O procedimento foi repetido para as cargas de 40%, 50% e 60% da resistência à compressão da amostra. Posteriormente, a amostra foi levada à ruptura sem a realização da medida de deformação, evitando-se assim danificar os LVDTs. A Figura 24 apresenta o corpo de prova n° 5 durante a realização do ensaio e após a ruptura.

Figura 24 - Ilustração do ensaio de compressão uniaxial cíclico, sendo (a) execução do ensaio e (b) corpo de prova rompido após ensaio.



Fonte: Autor, 2020.

O módulo de elasticidade médio ( $E$ ) de cada ensaio foi medido a partir da curva tensão-deformação, para as fases de carregamento que sucederam ao descarregamento, de acordo com a (Equação 36).

$$E = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\varepsilon_a} \quad (\text{Equação 36})$$

Em que  $\Delta\sigma_c$  é a variação de tensão em MPa e  $\Delta\varepsilon_a$  é a deformação axial correspondente, expressa em porcentagem.

### 3.6.5 Ensaio de Índices Físicos

A caracterização dos índices físicos das amostras do metadiabásio foi feita conforme norma sugerida pela ISRM (2007): *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake Durability Index Properties*.

Este ensaio foi realizado a fim de obter a massa específica, a capacidade de absorção e a porosidade aparente de 10 (dez) fragmentos de rocha com geometria irregular e massa variando entre 50 e 60 g. As etapas realizadas neste ensaio foram as seguintes:

1. Saturou-se os corpos de prova com água destilada com o auxílio de um dessecador à vácuo, a uma pressão máxima de 800 Pa (6 torr).
2. A massa submersa foi medida.
3. A massa saturada foi medida.
4. Os corpos de prova foram colocados na estufa por um período de 24 (vinte e quatro) horas à temperatura de 105°C.
5. As massas secas dos corpos de prova foram medidas.

Através da massa seca, submersa e saturada e segundo a sugestão da ISRM (2007) pode-se calcular os índices físicos desejados:

$$M_w = M_{sat} - M_s \quad (\text{Equação 37})$$

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (\text{Equação 38})$$

$$V_v = V_w = \frac{M_w}{\rho_w} \quad (\text{Equação 39})$$

$$V_s = V - V_v \quad (\text{Equação 40})$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (\text{Equação 41})$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{Equação 42})$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (\text{Equação 43})$$

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (\text{Equação 44})$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_w \rho_w}{V} \quad (\text{Equação 45})$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g \quad (\text{Equação 46})$$

$$\gamma_s = \rho_s g \quad (\text{Equação 47})$$

$$\gamma_s = \rho_s g$$

(Equação 48)

Em que:

$M_w$  – 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;

$\rho_w$  – massa específica da água;

$V_s$  – volume dos constituintes sólidos;

$n$  – porosidade;

$e$  – índice de vazios;

$\rho_d$  – massa específica seca;

$\gamma_d$  – peso específico seco;

$g$  – aceleração da gravidade;

$\rho_{sat}$  – massa específica saturada;

$\gamma_{sat}$  – peso específico saturado;

$\rho_s$  – massa específica dos constituintes sólidos;

$\gamma_s$  – peso específico dos constituintes sólidos.

### 3.6.6 Ensaio de Resistência à Compressão Puntiforme

O ensaio de resistência à compressão puntiforme ou *Point Load Test* é um método que tem como finalidade a medição da resistência das rochas através de ensaios compressivos utilizando ponteiros cônicos.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas da UFV segundo as normas da ISRM (2007). Utilizou-se no total 10 (dez) corpos de prova com entalhe *chevron* de aproximadamente 63 mm de diâmetro e 21,50 a 29,0 mm de comprimento. Estes foram submetidos a uma compressão axial de carga pontual. O ensaio de *Point Load* foi somente validado quando se verificou que a ruptura na amostra ocorreu pelos dois planos perpendiculares à direção de carregamento (Figura 25). Caso contrário, descartou-se a amostra e realizou-se um novo ensaio.

Figura 25 - Amostras rompidas após ensaio de carga pontual.



Fonte: Autor, 2020.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo faz-se a apresentação dos resultados obtidos na realização dos ensaios. Os ensaios iniciais aqui discutidos buscaram primeiramente caracterizar os corpos de prova de modo auxiliar aos ensaios CCNBD que são o foco dessa dissertação. Portanto os resultados apresentados seguirão a seguinte ordem: ensaios de caracterização física, ensaios mecânicos convencionais e ensaio CCNBD utilizando metodologia CID e Clip-Gauge.

### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização buscaram determinar as propriedades físicas das rochas como: Análise petrografia para definição da mineralogia presente na rocha; Índices físicos como porosidade, densidade, absorção, dentre outros.

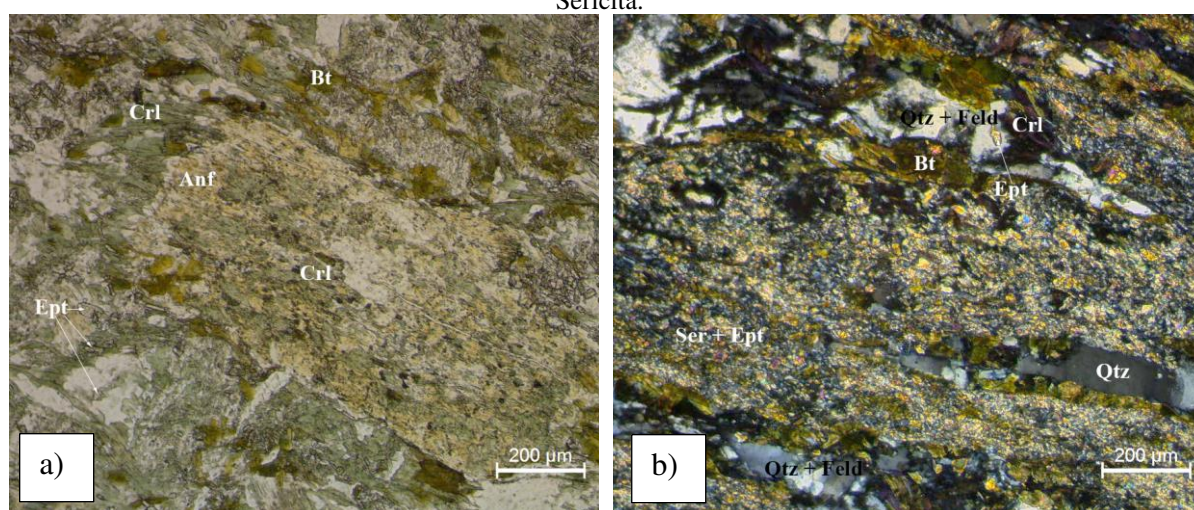
#### 4.1.1 Análise Petrográfica

Com base na mineralogia encontrada nas lâminas delgadas, a rocha foi classificada como metadiabásio. A rocha é composta por minerais essenciais como: Cloritas (Mg-Clorita, Mg-Fe Clorita e Fe-Mg Clorita), Biotita, Feldspato (Plagioclásio), Quartzo, Anfibólio

(possivelmente actinolita) e Epidoto. Apresenta minerais acessórios como minerais opacos e titanita, e minerais secundários derivados da alteração, que são: Clorita, Sericita e Carbonato.

Nos aspectos texturais a rocha é inequigranular com uma matriz de granulação variando de fina a média (cristais menores que 0,1 mm até 2 mm), com profiroblastos de até 4 mm. A forma dos cristais varia de xenoblástica a idioblástica, e a maior parte dos contatos entre grãos é interlobado. Em algumas porções existem concentrações de feldspatos e quartzo que apresentam contatos serrilhados e poligonais entre si, além de exibirem extinção ondulante e formação de novos grãos, indicando assim que a rocha passou por um processo deformacional. Nestas porções também existem alguns cristais de quartzo estirados e alguns cristais de feldspato que aparentemente preservam o aspecto ígneo, estes possuem uma granulação um pouco maior que a matriz da rocha, alcançando até 2 mm, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Lâminas petrográficas com textura inequigranular a) Porfiroblasto de anfibólio com clorita secundária em nicóis descruzados, b) Cristais de quartzo estirados indicando processo deformacional em nicóis cruzados. Bt – Biotita, Crl – Clorita, Anf – Anfibólio, Ept – Epidoto, Qtz – Quartzo, Feld – Feldspato, Ser – Sericita.



Fonte: Autor, 2020.

Nos aspectos estruturais o metadiabásio apresenta uma foliação metamórfica (xistosidade), essa foliação não é muito evidenciada macroscopicamente e só foi possível sua confirmação através das lâminas petrográficas. A foliação metamórfica incipiente é marcada pelos filossilicatos e uma assembleia mineral composta por (clorita + actinolita + epidoto + sericita + plagioclásio) que indica que a rocha sofreu um processo metamórfico até no início da fácies xisto verde. Além disso, existem cristais que indicam que a rocha passou por um processo deformacional, indicado por cristais de quartzo e feldspato com extinção ondulante. Ocorre também a formação de subgrãos e alguns cristais de quartzo estirados (Figura 26b).

Do ponto de vista genético da rocha pode-se observar que minerais primários foram alterados para minerais secundários como sericita e carbonatos, porém preservando a sua forma original, indicando a ocorrência de algum processo hidrotermal derivado do metamorfismo da rocha. Isso é evidenciado pelo aspecto esquelético de alguns grãos, como nos minerais de plagioclásio, anfibólio e biotita. Esses minerais, em conjunto com as cloritas compõem majoritariamente a rocha, como demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Porcentagem modal das cinco visadas quantificadas em lâmina petrográficas.

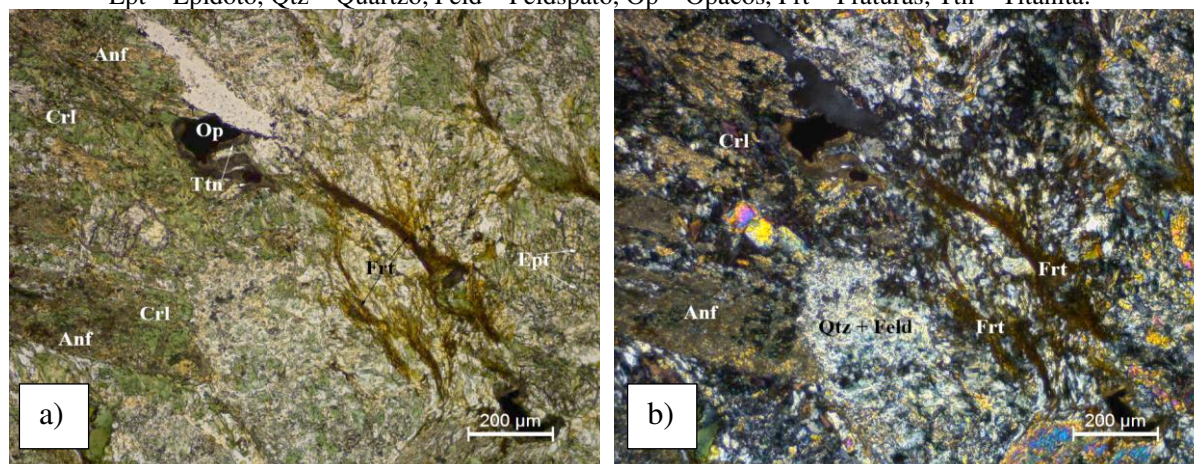
<b>Minerais</b>	<b>Visada 1</b>	<b>Visada 2</b>	<b>Visada 3</b>	<b>Visada 4</b>	<b>Visada 5</b>	<b>Média</b>
<b>Quartzo</b>	5	5	5	5	5	5
<b>Feldspato</b>	10	10	10	15	15	12
<b>Clorita</b>	40	33	25	29	25	30
<b>Epidoto</b>	3	4	4	4	4	4
<b>Anfibólio</b>	5	20	25	10	20	16
<b>Biotita</b>	5	5	4	10	5	6
<b>Minerais Opacos</b>	2	1	2	1	2	2
<b>Titanita</b>	2	1	2	1	2	2
<b>Sericita</b>	26	20	18	25	21	21
<b>Carbonato</b>	2	1	5	0	1	2

Fonte: Autor 2020.

O processo de hidrotermalismo está presente nas alterações dos feldspatos para sericitas, porém alguns cristais estão saussuritizados, se alterando para sericita, carbonatos e epidoto, e tanto na matriz como nos porfiroblastos ambos estão intensamente alterados. O anfibólio possivelmente é a actinolita e está se alterando para cloritas, principalmente (Mg-Fe e Fe-Mg cloritas) e carbonato. Os cristais de biotita também estão se alterando para cloritas e apresentam uma forma esquelética.

Nos aspectos de alteração pelo processo intempérico, pode-se identificar a presença de fraturas bem localizadas na matriz da rocha. Essas fraturas apresentam uma pequena extensão (400  $\mu\text{m}$ ) e em sua grande maioria estão paralelas à foliação ocorrendo mais raramente a 45 graus de direção da foliação. Outro aspecto que foi possível ser identificado foi a ocorrência de fraturas contornando alguns grãos minerais de quartzo e preenchidas por alteração de alguns óxidos e argilominerais, como mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Lâminas petrográficas do metadiabásio a) Fraturas contornando grãos de quartzo, nicóis descruzados, b) Fraturas contornando grãos de quartzo, nicóis descruzados, nicóis cruzados. CrI – Clorita, Anf – Anfibólio, Ept – Epidoto, Qtz – Quartzo, Feld – Feldspato, Op – Opacos, Frt – Fraturas, Ttn – Titanita.



Fonte: Autor, 2020.

Portanto devido aos aspectos descritos, pode-se determinar que ela se encontra em um estado levemente intemperizado, apesar dessa definição ser um tanto quanto difícil macroscopicamente. Quando o metadiabásio é analisado em lâmina é possível observar as alterações minerais, sejam ela causadas por hidrotermalismo ou por intemperismo, alterações essas que são marcadas pela grande quantidade de cloritas e sericitas geradas pelo processo de hidrotermalismo, observado em lâmina, que faz com que a matriz da rocha já não tenha a mesma resistência de uma rocha sã.

#### 4.1.2 Índices Físicos

Neste trabalho, os índices físicos considerados para efeitos das medições nos ensaios de ciclagem água-estufa foram porosidade, massa específica seca e peso específico seco. Esses índices definem as relações básicas da rocha que reflete no seu comportamento mecânico. A capacidade de absorção só foi utilizada na caracterização do primeiro ensaio como observado na Tabela 4.

Os índices físicos iniciais foram caracterizados inicialmente utilizando 10 amostras irregulares do metadiabásio, com esse ensaio foi possível a caracterização da massa específica seca, massa específica saturada e porosidade e absorção, como mostrado na Tabela 4. A seguir, são apresentados os resultados das porosidades e dos pesos específicos obtidos em função das propriedades do estado inicial do metadiabásio. A Tabela 4 apresenta um resumo com as médias dos resultados dos ensaios realizados em amostras de rocha antes da ciclagem água-estufa.

Tabela 4 – valores dos Índices físicos calculados de amostras irregulares do metadiabásio.

Índices Físicos						
Peso (g)			Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		Porosidade (%)	Absorção (%)
Seca	MSS*	Submerso	Seco	Saturado		
777.74	789.51	514.76	2,83	2,87	4.28	1.51

\*Massa Saturada Superfície Seca

Fonte: Autor, 2020.

A porosidade obtida para a caracterização da metadiabásio foi ligeiramente superior aos valores encontrados por Trckova et al. (2002), que obtiveram porosidade entre 1,68% e 3,51% para um tipo de rocha semelhante. Rezende et al. (2015) encontraram seus índices físicos para amostras de rochas mais intemperizadas, o que pode explicar os resultados ligeiramente diferentes, indicando assim um grau de alteração maior do que esperado.

O resultado da massa específica aparente seca obtida para a metadiabásio (2,83 g/cm<sup>3</sup>) está em linha com os valores encontrados por Lama & Vitukuri (1978), que determinaram uma faixa de valores de 2,80 a 3,10 g/cm<sup>3</sup>, para um metadiabásio também alterado, com grau de alteração W2.

Santiago (2008) determinou os índices físicos para o mesmo tipo de rocha, porém com dois graus de alteração diferentes, W2 e W3. Para o grau de alteração W2, ele obteve um valor de massa específica seca 3,02 g/cm<sup>3</sup>, massa específica saturada 3,03 g/cm<sup>3</sup>, porosidade aparente 1,08% e absorção aparente (0,36%), para o grau de alteração W3, ele encontrou valores de massa específica seca de 2,67 g/cm<sup>3</sup>, massa específica saturada 2,77 g/cm<sup>3</sup>, porosidade aparente 9,90% e absorção aparente (3,72%).

Portanto pode-se concluir que as amostras aqui ensaiadas estão dentro do valor esperado para o metadiabásio, e confirmam que a rocha inicialmente apresenta um grau de alteração levemente alterado (W2).

#### 4.1.3 Ciclagem água-estufa

Os resultados de ciclagem foram executados de acordo com a norma ASTM - D5313, uma vez que todas as normas brasileiras para esse tipo de ensaio foram descontinuadas.

No total foram feitos 105 ciclos de alteração água-estufa. A cada 5 ciclos efetuou-se a caracterização dos índices físicos de porosidade aparente e massa específica seca aparente.

No decorrer do ensaio de ciclagem notou-se que alguns corpos de prova, à medida em que foram submetidos aos ciclos de imersão em água e secagem em estufa começaram a apresentar fissuras e lascas nas bordas dos corpos de prova, como mostrado na Figura 28. Desta forma para efeitos de esclarecimento fez uma análise qualitativa das amostras durante os ciclos, quantificando a quantidade de fissuras e lasqueamento que foram surgindo de acordo a ciclagem, cujos resultados serão mostrados adiante.

Dos aspectos visuais é possível observar uma leve descoloração das amostras com o avanço da ciclagem água-estufa, como mostrado a Figura 28.

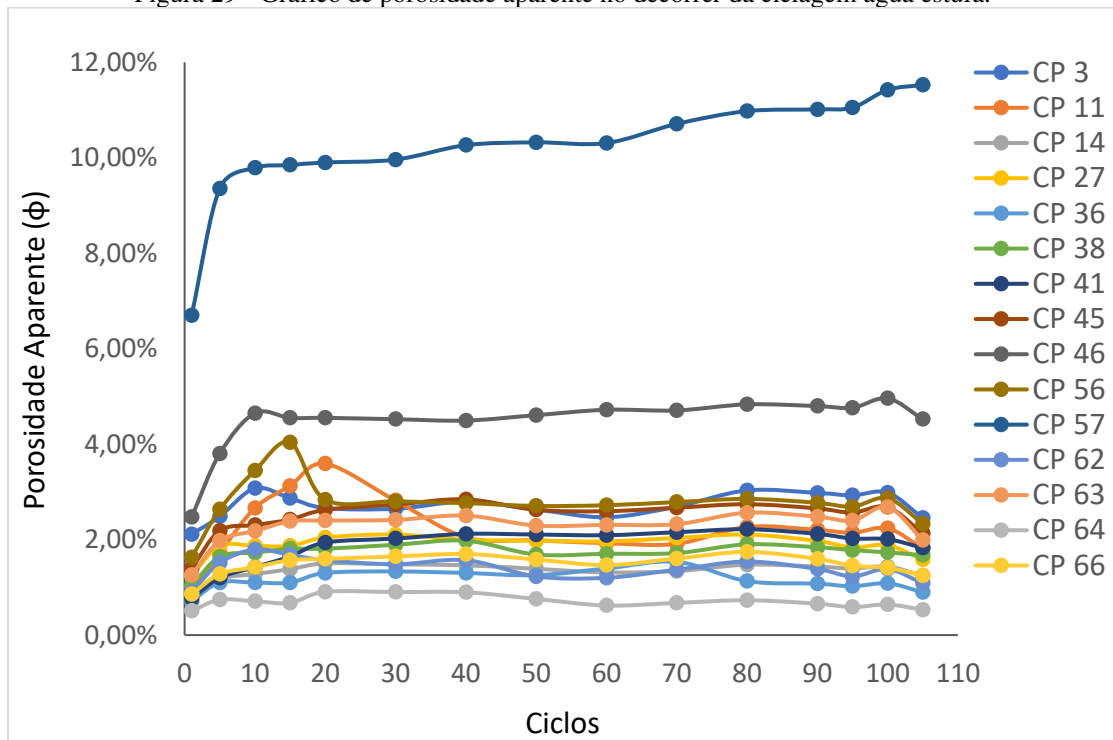
Figura 28 - Amostra após ciclagem água-estufa. Da esquerda para direita, a primeira fileira indica ciclo 20, segunda fileira ciclo 50, terceira fileira ciclo 85 e quarta fileira ciclo 105.



Fonte: Autor, 2020.

Para confecção dos gráficos de caracterização dos índices físicos dos corpos de prova CCNBD só foram consideradas as amostras do ciclo 105. Esses corpos de prova foram selecionados pois são os únicos submetidos a uma intensidade maior de ciclagem, resultando assim em uma maior quantidade de medidas de porosidade aparente e massa específica aparente seca. Esses resultados são apresentados nas Figura 29 e Figura 30.

Figura 29 - Gráfico de porosidade aparente no decorrer da ciclagem água estufa.



Fonte: Autor, 2020.

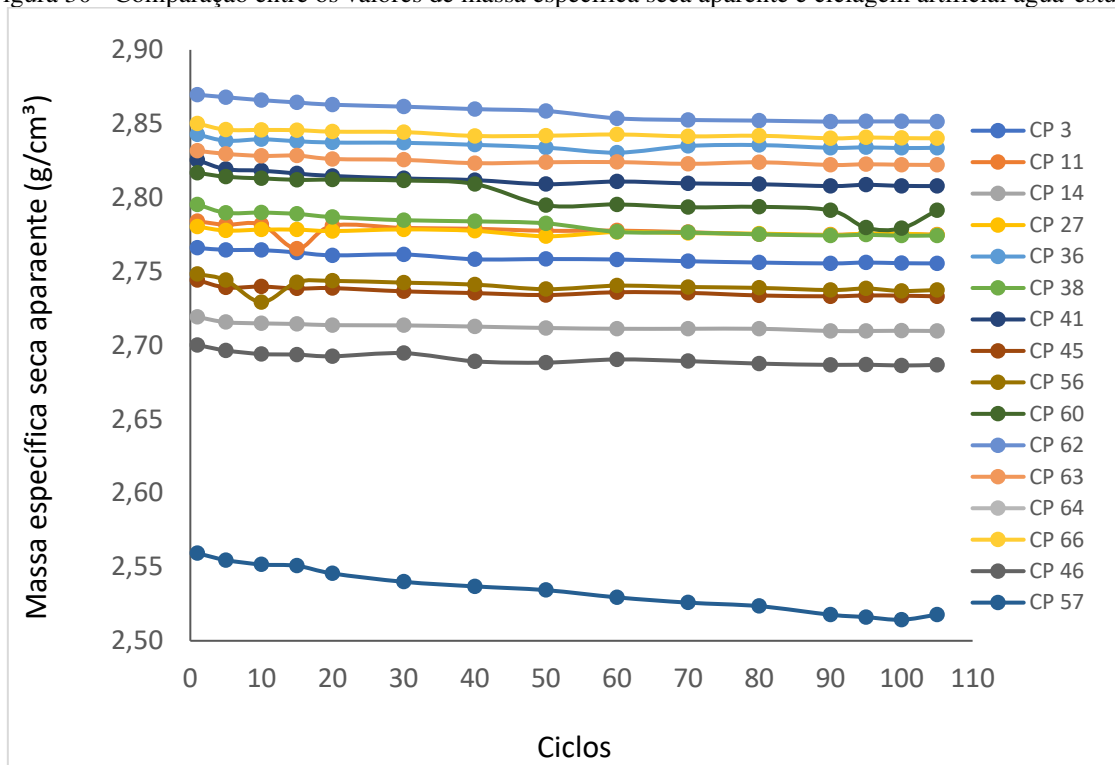
De acordo com Figura 29 pode-se observar que inicialmente até o ciclo 10 as amostras apresentaram um aumento considerável de porosidade, de aproximadamente 1%. Após os 10 primeiros ciclos iniciais é possível observar um pequeno decréscimo e posterior estabilização do valor de porosidade, que se mantém quase que constante até o ciclo 100.

As amostras que se apresentaram mais discrepantes do restante foram os CPs 46 e 57, ambos apresentaram um valor de porosidade bem acima do esperado, o que indica uma matriz mais porosa da rocha, indicando que os mesmos apresentavam um maior grau de alteração da rocha desde primeira ciclagem.

Analisando o contexto geral as amostras apresentaram um pequeno aumento da porosidade quando comparado com os valores iniciais obtidos para cada amostra. Portanto foi possível observar um aumento de porosidade aparente entre 0,1% (mínimo) a 4,18% (máximo) ao fim da ciclagem.

Analisando-se os resultados de massa específica seca aparente, pode-se observar um comportamento inverso dos valores de porosidade aparente seca, o que era esperado (Figura 30). Porém como o comportamento do CP 57 é anômalo ao conjunto de amostras, optou-se por sua exclusão do gráfico para melhor interpretá-lo, como mostrado na Figura 31.

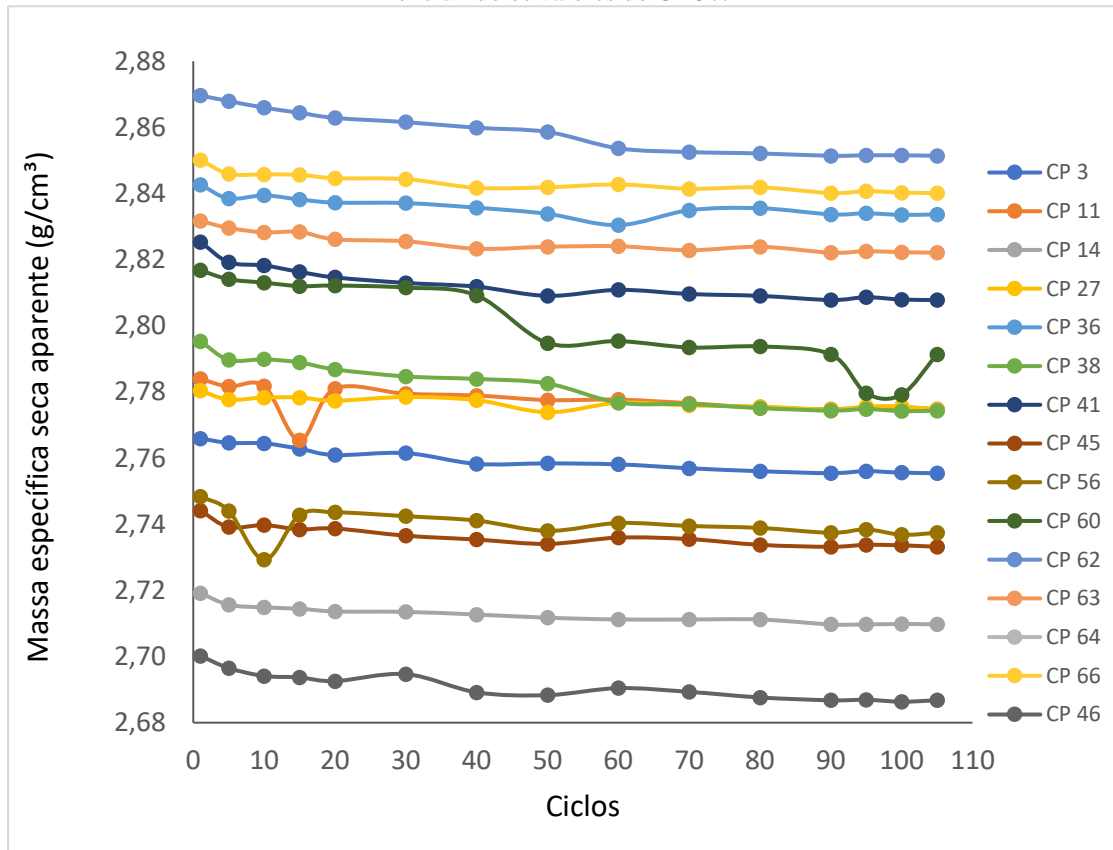
Figura 30 - Comparação entre os valores de massa específica seca aparente e ciclagem artificial água-estufa



Fonte: Autor, 2020.

Na Figura 31 é possível observar o comportamento da massa específica seca aparente no decorrer dos ensaios de ciclagem. Conforme é observado os níveis de alterabilidade expresso nos ciclos imprimem uma pequena diminuição do valor da massa específica seca aparente, chegando ao final do ciclo com uma variação de até 2% do valor inicial de massa específica seca.

Figura 31 - Comparação entre os valores de massa específica seca aparente e ciclagem artificial água-estufa excluindo os valores do CP 57.



Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se a Figura 31, é possível observar uma maior variação da massa específica seca nos 10 primeiros ciclos, isto também ocorre para os valores de porosidade, como dito anteriormente. Santiago (2008) obteve um comportamento semelhante para amostras para ambos os ensaios, porém não determinou o que causa tal comportamento.

Suspeita-se que tal comportamento ocorra devido à abertura de microfissuras nos ciclos iniciais, uma vez que antes essas não estavam interconectadas, e que no decorrer da ciclagem eles foram se abrindo conferindo assim um aumento da porosidade e consequentemente uma diminuição da densidade. De qualquer forma, deve-se ressaltar que a execução dos 105 ciclos de ciclagem alterou de forma substancial as propriedades físicas do metadiabásio, principalmente os valores de tenacidades a fratura.

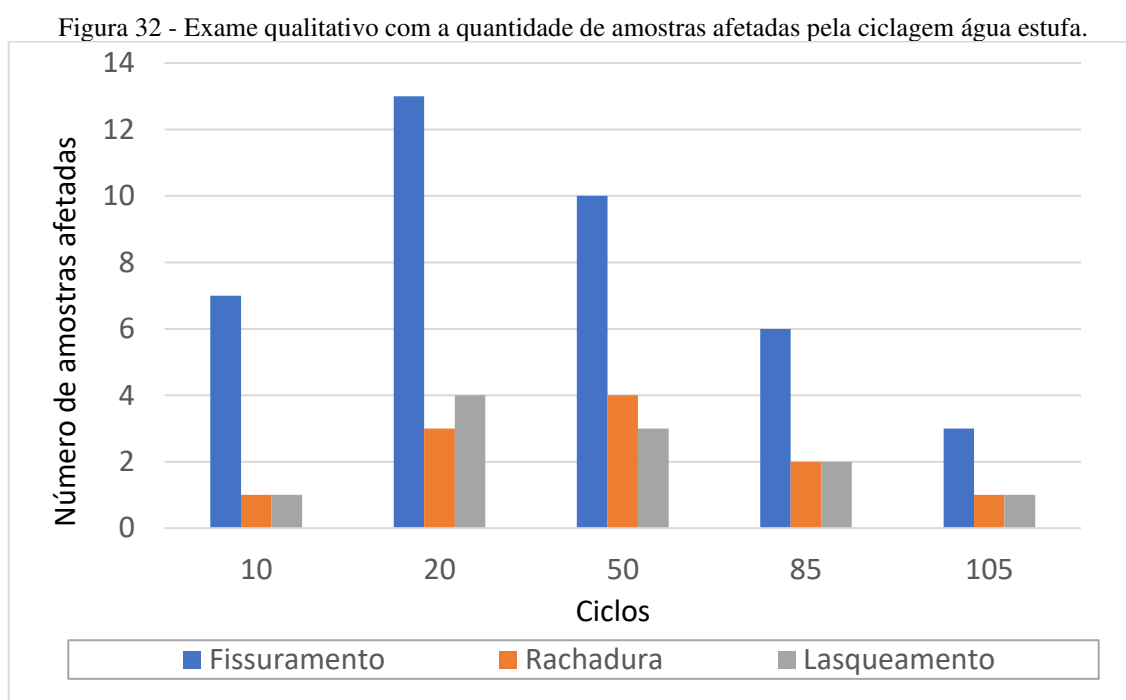
#### 4.1.3.1 Análise Qualitativa

Na análise qualitativa observou-se o comportamento das amostras resistentes à alteração quando submetidos aos ciclos de água-estufa. Desta forma, a ação intempérica é acelerada, permitindo caracterizar o comportamento dos materiais ensaiados ao longo do tempo.

Para efeito de esclarecimento, os termos a seguir foram empregados para caracterizar o ocorrido nas amostras ensaiadas, de acordo com a norma NBR 12696/1992 que, mesmo tendo sido descontinuada, utilizou-se algumas informações dela.

- Fissuramento – Formação de descontinuidades em uma face do agregado;
- Rachadura – Extensão da fissuração por mais de uma dimensão do fragmento;
- Lasqueamento – Partição do fragmento através de rachaduras.

Através deste ensaio pode-se perceber tanto as alterações visuais como físicas das amostras. A seguir na Figura 32 são mostrados os resultados deste ensaio para as rochas estudadas.



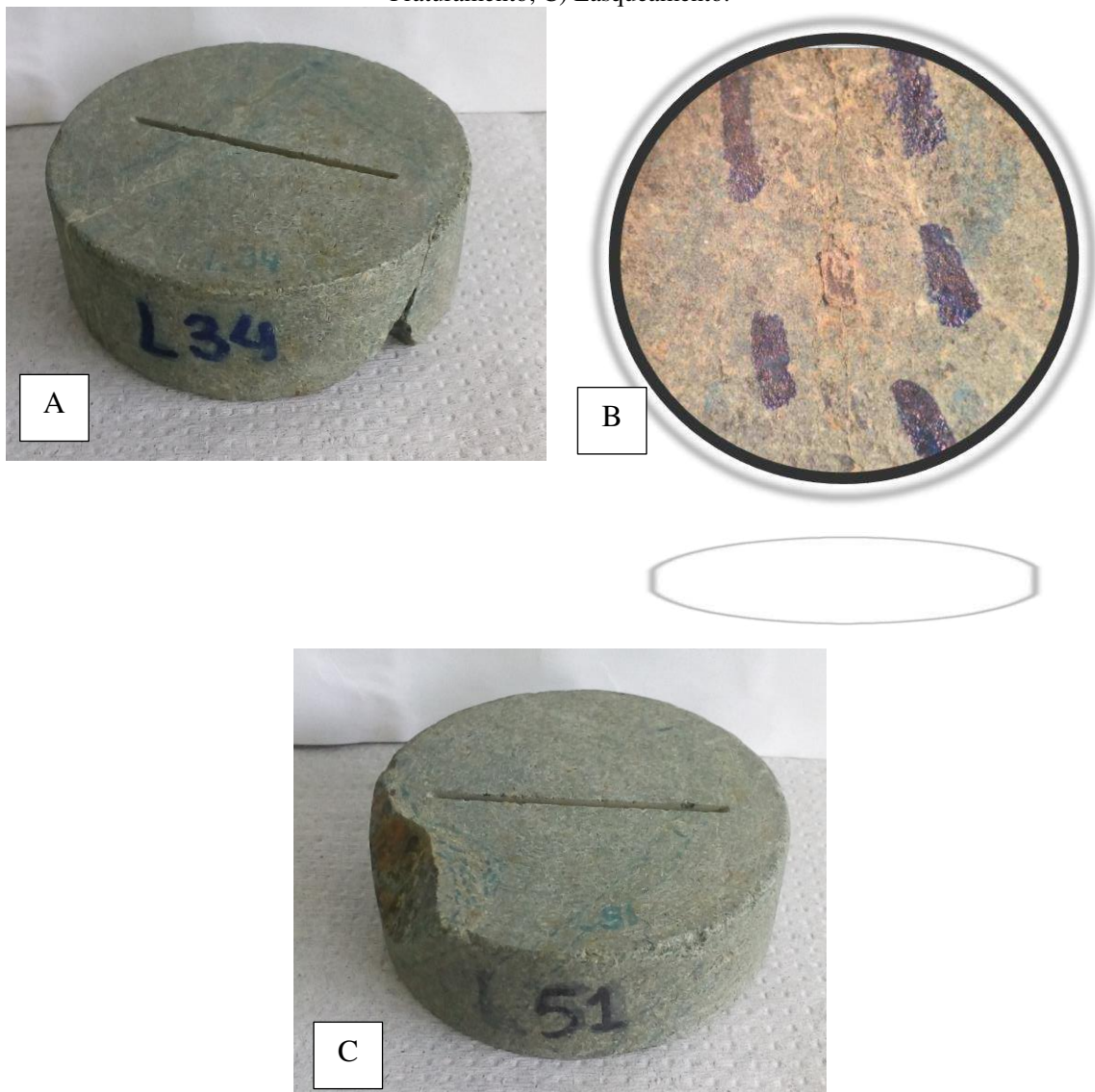
Fonte: Autor, 2020.

De acordo com a Figura 32 é possível observar um predomínio do processo de fissuramento desde os ciclos iniciais, sendo assim o processo mais expressivo do ponto de vista de intemperismo físico. O fissuramento ocorre de forma mais efetiva no ciclo 20 onde se tem maior valor de amostras afetadas por tal processo, reduzindo-se a partir daí.

O processo de rachadura e lasqueamento das amostras se assemelha ao processo de fissuramento, porém ocorre de forma menos intensa. O processo de rachadura apresenta uma maior intensidade no ciclo 50 onde se percebe uma maior frequência de rachaduras das amostras. O lasqueamento ocorre de forma mais intensa nos ciclos 20 e se torna menos expressivo nos ciclos finais. Esse comportamento também é observado nos outros processos descritos acima.

Acredita-se que esse processo ocorra assim como no campo, respeitando uma sequência. Primeiramente acontece a fissuração, que evolui para rachadura e por fim, acontece o lasqueamento e/ou desintegração. A seguir são apresentados exemplos dos processos de fissuramento, rachadura e lasqueamento que ocorrem nas amostras.

Figura 33 - Amostras representando os efeitos do processo ocorridos durante a ciclagem. A) Rachadura; B) Fraturamento; C) Lasqueamento.



#### 4.1.4 Velocidade de Propagação de Ondas

Os dados obtidos nos ensaios de velocidade de propagação de ondas ( $V_p$ ) dos 5 corpos de prova se encontram na Tabela 5. Com a velocidade média do som na rocha, obteve-se o valor de 4270 m/s, e um desvio padrão de 436 m/s.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de ( $V_p$ ) para o metadiabásio.

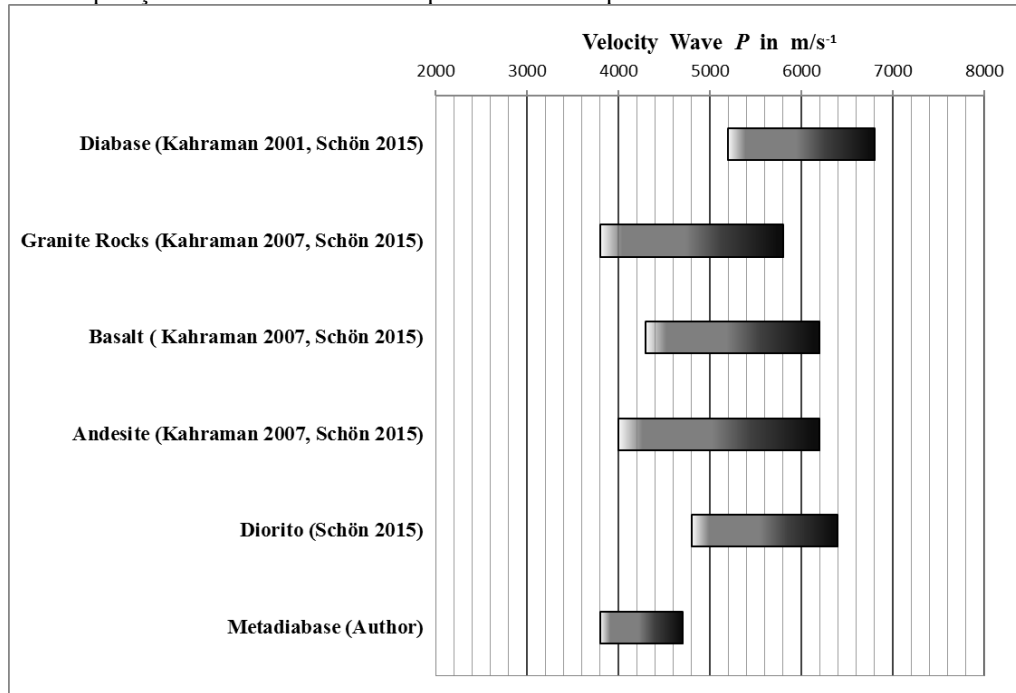
Corpos de Prova	$V_p$ (m/s)
1	4760
2	4728
3	4040
4	3947
5	3878

Fonte: Autor, 2020.

Kahraman (2007) e Schon (2015), em seu estudo de velocidade de propagação de Ondas-P em vários tipos de rocha obteve valores entre 5200 m/s a 6800 m/s para o diabásio. Nesta pesquisa os valores obtidos, mostrados na Tabela 5, esses valores estão entre 3800 e 4760 m/s para o tipo de rocha semelhante, porém com metamorfismo atuante. Os resultados compilados por Kahraman (2001, 2007) e Schön (2015) para vários tipos de rochas ígneas e metamórficas são mostrados na Figura 34, bem como a comparação com os valores encontrados nesta pesquisa.

Portanto de acordo com a Figura 34 e os valores obtidos e comparados com a literatura pode-se avaliar que o metadiabásio, por ter passado por um processo de metamorfismo, alteração hidrotermal e leve intemperismo, apresenta uma redução das suas características em relação a propagação de Ondas P, em comparação com os valores da literatura.

Figura 34 - Comparação dos valores de Onda P para diferentes tipos de rocha incluindo os dados dessa pesquisa.



Fonte: Autor, 2020.

## 4.2 Martelo de Schmidt

Durante o ensaio do Martelo de Schmidt é essencial que o corpo de prova (CP) esteja estável, por isso o mesmo foi colocado em um berço de metal e foram feitas de 20 a 22 medidas em 5 corpos de prova conforme Tabela 6. Essas medidas foram realizadas sempre a 90° da superfície com a rocha. Os valores de Q foram obtidos através da correlação de (Winkler & Mattheus, 2014)

Tabela 6 - Resultados dos ensaios realizados com Martelo Schmidt.

CP	Número de determinações	Dureza de Schmidt Média (Rmed)	Correção de Q
1	22	59,6	68,21
2	20	59,4	68,01
3	22	52,0	60,60
4	20	44,4	53,00
5	22	31,3	39,89

Fonte: Autor, 2020.

Os resultados dos ensaios de dureza obtidos com Martelo de Schmidt. A partir do conjunto de dados apresentado, obteve-se uma Dureza de Schmidt (R) média de 49.3 MPa correspondente valores médios observados em cada uma das 5 amostras. Esses resultados

apresentaram um desvio padrão 11,8 R. Os valores Q foram calculados através da correlação de (Winkler & Mattheus, 2014), para os valores de correlação obteve-se 57,94 Q e desvio padrão anterior. O desvio padrão das amostras apresentam um alto valor o que pode ser explicado pela dificuldade de se determinar a foliação da rocha macroscopicamente, uma vez que só foi possível observar a foliação do metadiabásio em lâmina e isso pode ter causado certa variação nos dados.

### 4.3 Compressão Uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram feitos com a finalidade de se obter os parâmetros elásticos da rocha. Para essa finalidade as curvas de tensão-deformação dos ensaios foram feitas seguindo ciclos de carregamento e descarregamentos até atingir 40%, 50% e 60% da compressão máxima da rocha. Os valores de compressão máxima ( $\sigma_a$ ) e módulo de elasticidade (E), são apresentados na Tabela 7 e na Figura 35.

Tabela 7 - Valores do módulo de elasticidade (E) e compressão uniaxial máxima.

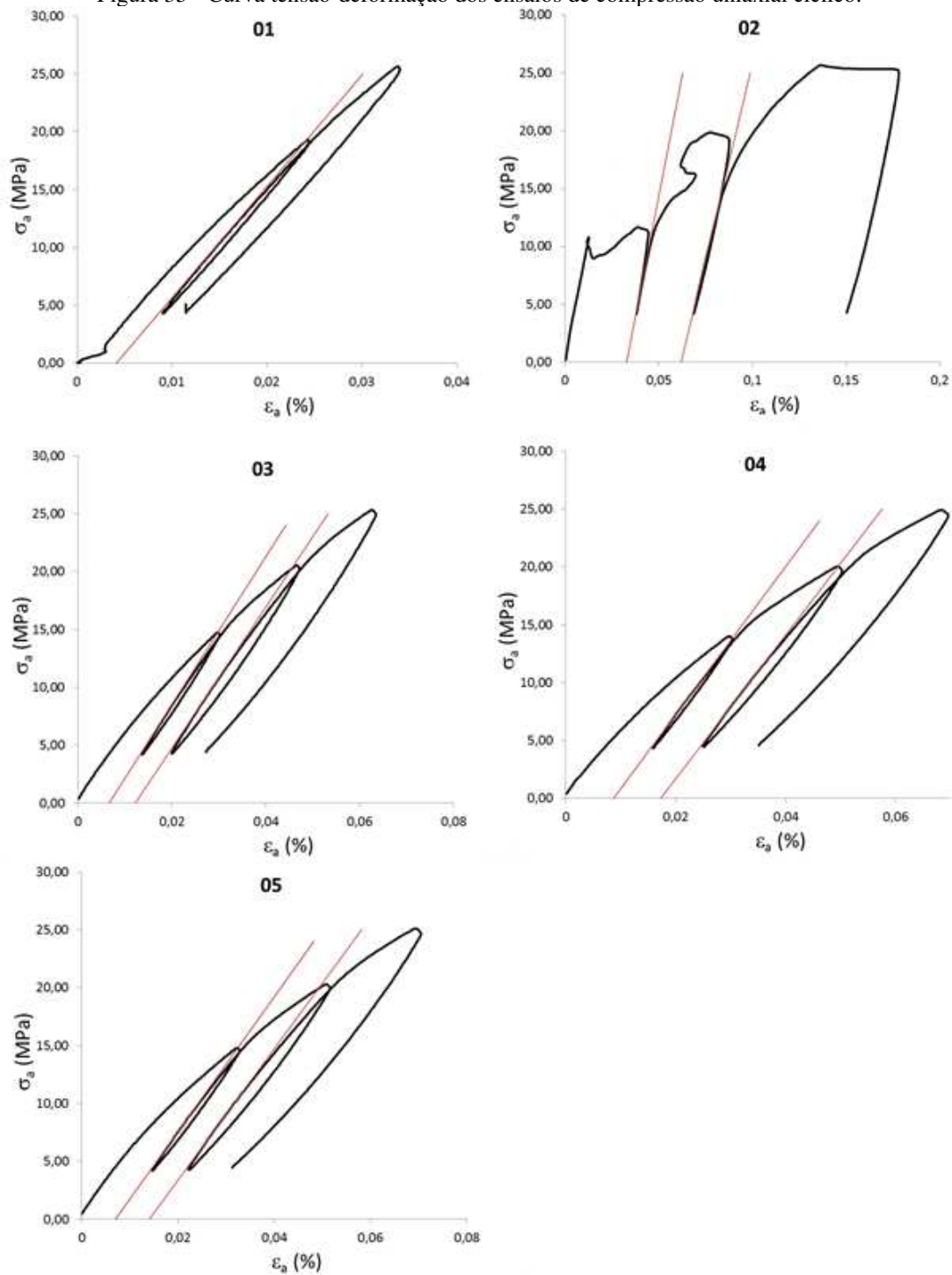
CP	E (GPa)	qu (MPa)
01	96,15	55,84
02	75,66	49,03
03	62,37	45,91
04	63,06	40,38
05	56,44	45,62

Fonte: Autor, 2020.

Para os valores de modulo de elasticidade obteve-se uma média 70,93 GPa, com desvio padrão de 15,20 GPa. Os resultados de resistência à compressão máxima (qu), por sua vez, forneceram uma média de 47,4 MPa, e um desvio padrão de 5,67 MPa. O metadiabásio apresentou uma certa variabilidade dos valores de compressão e módulo, isso se deve ao fato de que a rocha apresenta certa anisotropia e os corpos de prova podem denotar leves diferenças no grau de intemperismo, mas nada significativo.

Os valores de módulo de elasticidade foram utilizados como parâmetro para o cálculo de taxa crítica de alívio de energia de deformação ( $G_c$ ) como demonstrado na (Equação 18).

Figura 35 - Curva tensão-deformação dos ensaios de compressão uniaxial cíclico.



Fonte: Autor, 2020.

#### 4.4 Ensaio CCNBD

Foram realizados 64 (sessenta e quatro) ensaios para determinação da tenacidade à fratura utilizando os corpos de prova em forma de disco, conforme o ensaio brasileiro e entalhe em Chevron. Separou-se do total, 9 (nove) corpos de prova para serem ensaiados com medição

da abertura da trinca, denominado de *crack mouth opening disc* (CMOD) utilizando-se *clip-gauge*. Os corpos de prova restante foram ensaiados com aplicação da técnica de correlação digital de imagem (CID) com intuito de verificar a aplicação da técnica para o ensaio, uma vez que na literatura são poucos relatos dessa aplicação para os ensaios CCNBD. O quantitativo de amostras ensaiadas é mostrado na Figura 1e na Tabela 8.

Tabela 8 - Quantitativo de amostras ensaiadas utilizando o ensaio CID e CCNBD normal

Ângulo	Ciclo 20	Ciclo 50	Ciclo 85	Ciclo 105	Total
0	3	2	3	3	11
23	3	3	2	2	10
45	3	3	3	3	12
90	3	3	3	3	12
					<b>55</b>

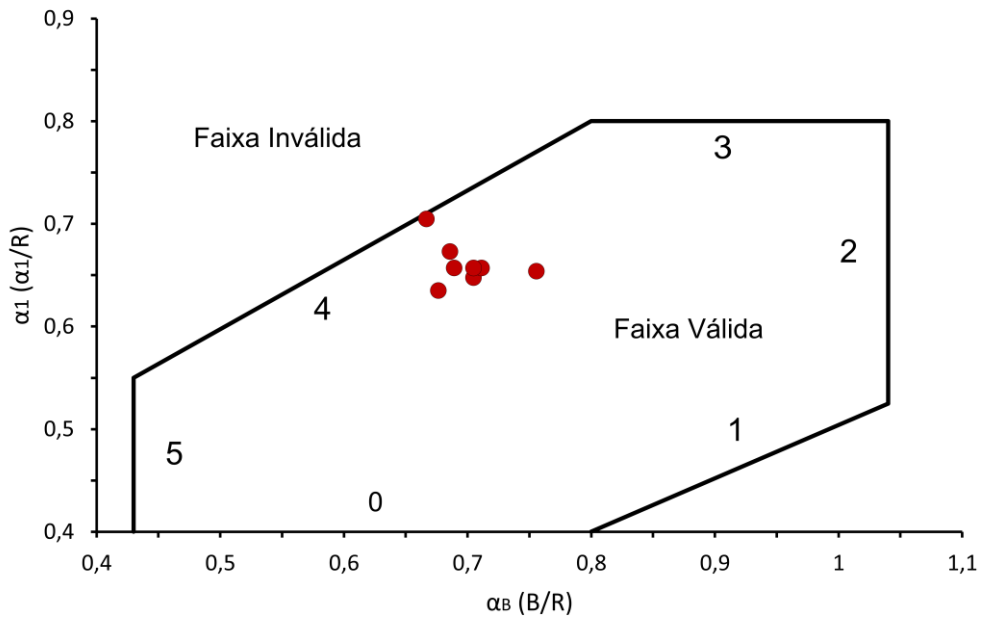
Fonte: Autor, 2020.

#### 4.4.1 Geometria das Amostras

Para a realização do ensaio CCNBD, as amostras foram preparadas conforme sugerido pela ISRM (2007). Sendo assim foram feitas as medidas geométricas de todos corpos de prova, bem como seus parâmetros adimensionais, para validação da geometria dos ensaios.

Como mencionado no item 2.4.1 do capítulo 2 do presente trabalho, para que os testes sejam validos é necessário que os corpos de prova satisfaçam 6 (seis) condições descritas nas equações 25 a 27 (ISRM, 2007). O gráfico da Figura 36 mostra os limites gerados pelas equações mencionadas e são plotados dois dos três parâmetros geométricos básicos do CCNDB ( $\alpha_1$  e  $\alpha_B$ ) de cada corpo de prova. Dessa maneira, foi possível identificar que todos os corpos de prova tinham geometrias válidas.

Figura 36 -Parâmetros geométricos ( $a_1$  e  $a_B$ ) para validação da geometria do ensaio CCNBD.



Fonte: Autor, 2020.

#### 4.4.2 Efeito da Ciclagem na Tenacidade à Fratura ( $K_{IC}$ )

Após validação dos corpos de prova fez-se os cálculos de tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) no modo I e no modo II para os diferentes ângulos inclinação do entalhe Chevron e para diferentes ciclos de água estufa. Os valores de tenacidade calculados são mostrados da Tabela 9 à Tabela 12 e foram calculados de acordo com Wang et al. (2012).

Tabela 9 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 0 (zero).

CICLO 0 <sup>1</sup>							
AMOSTRA	$\theta$	$F_{max}$ (kN)	u	v	Ymin*	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$K_{IC(Médio)}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
RB01	0°	5,508	0,2770	1,7655	0,9426	0,967	<b>1,003</b>
RB03		5,680	0,3015	1,6888	0,9600	1,039	
RB06	30°	5,318	0,2782	1,7759	0,9536	0,953	<b>0,924</b>
RB07		5,089	0,2766	1,7751	0,9475	0,894	
RB13	45°	8,844	0,2720	1,7728	0,9303	1,470	<b>1,327</b>
RB15		7,167	0,2716	1,7723	0,9286	1,184	
RB21	90°	8,101	0,2747	1,7745	0,9406	1,393	<b>1,442</b>
RB24		8,730	0,2743	1,7743	0,9391	1,491	

Fonte: Autor, 2020.

$\theta$  - Ângulo entre eixo da fratura e direção de incremento  
 $F_{max}$  - Carga máxima  
 $u$  e  $v$  - Constantes tabeladas  
 $Y^*_{min}$  - Valor mínimo do fator de intensidade de tensão adimensional  
 $K_{IC}$  - Tenacidade à fratura no modo I  
<sup>1</sup>Valores retirados de (Perim e Cerrato, 2018)

De acordo com os dados da Tabela 9, retirados de Perim e Cerrato (2018) pode-se observar uma pequena variação nos valores tenacidade. As amostras com o entalhe posicionado a 90° apresentaram o maior valor de variação dos dados, sendo a diferença entre o maior e menor de 0,518 MPa.m<sup>1/2</sup>. O valor médio total de todas as medidas de tenacidade do ciclo foi de 1,165 MPa.m<sup>1/2</sup>.

Comparando com os dados da literatura, Pires (2016) obteve uma variação nos valores de tenacidade à fratura de 0.210 MPa.m<sup>1/2</sup> para rocha gnáissica sã em uma angulação de ensaio a 90°. Aliha e Ayatollahi (2014) realizaram uma série de 22 ensaios de tenacidade a fratura em mármore e encontraram uma variação nos valores de 0,574 MPa.m<sup>1/2</sup>.

Vale ressaltar que nessas amostras foram encontradas poucas ou quase nenhuma fratura preexistente.

Tabela 10 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 20 (vinte).

CICLO 20							
AMOSTRA	$\theta$	$F_{max}$ (kN)	$u$	$v$	$Y_{min}^*$	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$K_{IC(Médio)}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
RMB02	0°	3,262	0,3052	1,6844	0,9280	0,531	<b>0,777</b>
RMB15		6,173	0,3048	1,6708	0,9739	1,024	
RMB01	23°	6,388	0,3054	1,6810	0,9722	1,080	<b>1,124<sup>2</sup></b>
RMB23		6,193	0,3040	1,6931	0,9101	1,011	
RMB42		5,548	0,3179	1,7089	1,0262	1,065	
RMB08	45°	8,224	0,2996	1,6977	0,9293	1,384	<b>1,231</b>
RMB35		7,267	0,3004	1,6543	0,8861	1,078	
RMB17	90°	1,954	0,3015	1,6888	0,9295	0,324	<b>0,459</b>
RMB59		7,287	0,3173	0,5566	0,4607	0,594	

Fonte: Autor, 2020.

$\theta$  - Ângulo entre eixo da fratura e direção de incremento  
 $F_{max}$  - Carga máxima  
 $u$  e  $v$  - Constantes tabeladas  
 $Y^*_{min}$  - Valor mínimo do fator de intensidade de tensão adimensional  
<sup>2</sup> $K_{IIC}$  - Tenacidade à fratura no modo II

Na Tabela 10 os valores obtidos de tenacidade à fratura tiveram uma maior variação entre o menor e o maior valor de  $0,772 \text{ MPa.m}^{1/2}$ . O valor médio total do ciclo foi de  $0,899 \text{ MPa.m}^{1/2}$ . Cabe ressaltar que nesse ciclo foi onde ocorreu o maior fissuramento das amostras, como demonstrado na Figura 32, portanto nesse ciclo as amostras selecionadas para realizar os ensaios continham mais fraturas que as demais.

Exposto isto, pode-se observar os valores de baixa tenacidade apresentados pelas amostras RMB17 e RMB02. Essas amostras apresentavam fraturas na matriz da rocha paralelas à direção de carregamento, o que pode ter ocasionado um valor mais baixo de força máxima aplicada, refletindo assim em um menor valor de tenacidade. Cabe ressaltar que as amostras não foram descartadas, pois a quantidade de corpos de prova eram limitadas e o fissuramento como visto na Figura 32 ocorreu em todos os ciclos, indicando assim ser um dado importante a ser considerado.

Tabela 11 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 50 (cinquenta).

CICLO 50							
AMOSTRA	$\theta$	$F_{\max}$ (kN)	u	v	$Y_{\min}^*$	$K_{IC}$ ( $\text{MPa.m}^{1/2}$ )	$K_{IC(\text{Médio})}$ ( $\text{MPa.m}^{1/2}$ )
RMB26	$0^\circ$	7,209	0,3068	1,7106	0,9090	1,226	<b>1,137</b>
RMB32		5,841	0,3085	1,7055	0,9723	1,048	
RMB30	$23^\circ$	6,271	0,3158	1,7157	1,0186	1,218	<b>1,135<sup>2</sup></b>
RMB54		5,509	0,3222	1,7073	1,0221	1,053	
RMB06	$45^\circ$	7,052	0,3201	1,6996	1,0379	1,332	<b>1,435</b>
RMB37		8,244	0,3159	1,7079	1,0025	1,539	
RMB07	$90^\circ$	4,884	0,3165	1,6738	0,9919	0,814	<b>0,852</b>
RMB65		4,747	0,3176	1,6942	1,0483	0,889	

Fonte: Autor, 2020.

$\theta$  - Ângulo entre eixo da fratura e direção de incremento

$F_{\max}$  - Carga máxima

u e v - Constantes tabeladas

$Y_{\min}^*$  - Valor mínimo do fator de intensidade de tensão adimensional

<sup>2</sup> $K_{IIC}$  - Tenacidade à fratura no modo II

No ciclo 50, os valores de tenacidade à fratura tiveram uma variação entre o menor e o maior valor médio de  $0,583 \text{ MPa.m}^{1/2}$ . O valor médio total do ciclo foi de  $1,136 \text{ MPa.m}^{1/2}$ , um pouco maior que o ciclo anterior e pouco menor que o ciclo 0. Nesse ciclo os menores valores de tenacidade à fratura foram obtidos no ângulo de  $90^\circ$  assim como no ciclo anterior, porém as fissuras geradas durante a ciclagem estavam paralelas à direção de carregamento e

perpendiculares a direção do *notch*, o que pode ter contribuído para uma diminuição do valor de tenacidade nesse ângulo.

Tabela 12 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 85 (oitenta e cinco).

CICLO 85							
AMOSTRA	$\theta$	$F_{max}$ (kN)	u	v	Ymin*	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$K_{IC(M\u00e9dio)}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
RMB10	0°	8,263	0,3123	1,6992	1,0067	1,506	<b>1,041</b>
RMB12		2,833	0,3147	1,7098	1,0848	0,575	
RMB21	23°	8,381	0,3100	1,6923	0,9428	1,405	<b>1,341<sup>2</sup></b>
RMB61		7,423	0,3132	1,6895	0,9763	1,278	
RMB18	45°	6,603	0,3185	1,7131	1,0652	1,334	<b>0,933</b>
RMB19		2,794	0,3133	1,7102	1,0177	0,532	
RMB04	90°	1,368	0,3085	1,6671	1,0310	0,236	<b>0,623</b>
RMB25		5,743	0,3149	1,6850	1,0107	1,010	

Fonte: Autor, 2020.

$\theta$  - Ângulo entre eixo da fratura e direção de incremento

$F_{max}$  - Carga máxima

u e v - Constantes tabeladas

Y\*<sub>min</sub> - Valor mínimo do fator de intensidade de tensão adimensional

<sup>2</sup>K<sub>IIC</sub> - Tenacidade à fratura no modo II

Como observado na Tabela 12, os valores de tenacidade à fratura tiveram uma variação entre o menor e o maior valor médio de 0,718 MPa.m<sup>1/2</sup>. O valor médio total do ciclo foi de 0,987 MPa.m<sup>1/2</sup> valor esse de tenacidade um pouco menor que os ciclos anteriores. Os menores valores nesse ciclo estão relacionados às fissuras surgidas durante e ciclagem e principalmente a leve alteração da matriz rochosa.

De acordo com a Tabela 13, os valores médios obtidos de tenacidade a fratura tiveram uma variação entre o menor e o maior valor médio de 0,515 MPa.m<sup>1/2</sup>. O valor médio total do ciclo foi de 0,720 MPa.m<sup>1/2</sup> valor esse de tenacidade apresenta-se um valor menor do que nos ciclos anteriores, o que era esperado. Os menores valores nesse ciclo estão relacionados as fissuras surgidas durante e ciclagem e principalmente ao grau alteração da matriz rochosa maior que no ciclo anterior, indicado pela queda no valor de tenacidade a fratura em todos os ângulos ensaiados.

Tabela 13 - Valores obtidos da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para diferentes ângulos no ciclo 105 (cento e cinco).

CICLO 105							
AMOSTRA	$\theta$	$F_{max}$ (kN)	u	v	$Y_{min}^*$	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$K_{IC(M\u00e9dio)}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
RMB03	0°	2,657	0,3114	1,7040	1,0017	0,489	<b>0,672</b>
RMB56		4,786	0,3182	1,7030	0,9742	0,856	
RMB11	23°	5,196	0,3072	1,6715	0,9462	0,834	<b>0,672<sup>2</sup></b>
RMB45		2,950	0,3160	1,6959	0,9630	0,510	
RMB62	45°	5,685	0,3139	1,6880	1,0095	1,007	<b>0,782</b>
RMB63		3,008	0,3145	1,7083	0,9930	0,556	
RMB36	90°	6,427	0,3084	1,7210	0,9822	1,215	<b>1,187</b>
RMB66		6,701	0,3126	1,6976	0,9589	1,158	

Fonte: Autor, 2020.

 $\theta$  - Ângulo entre eixo da fratura e direção de incremento $F_{max}$  - Carga máxima

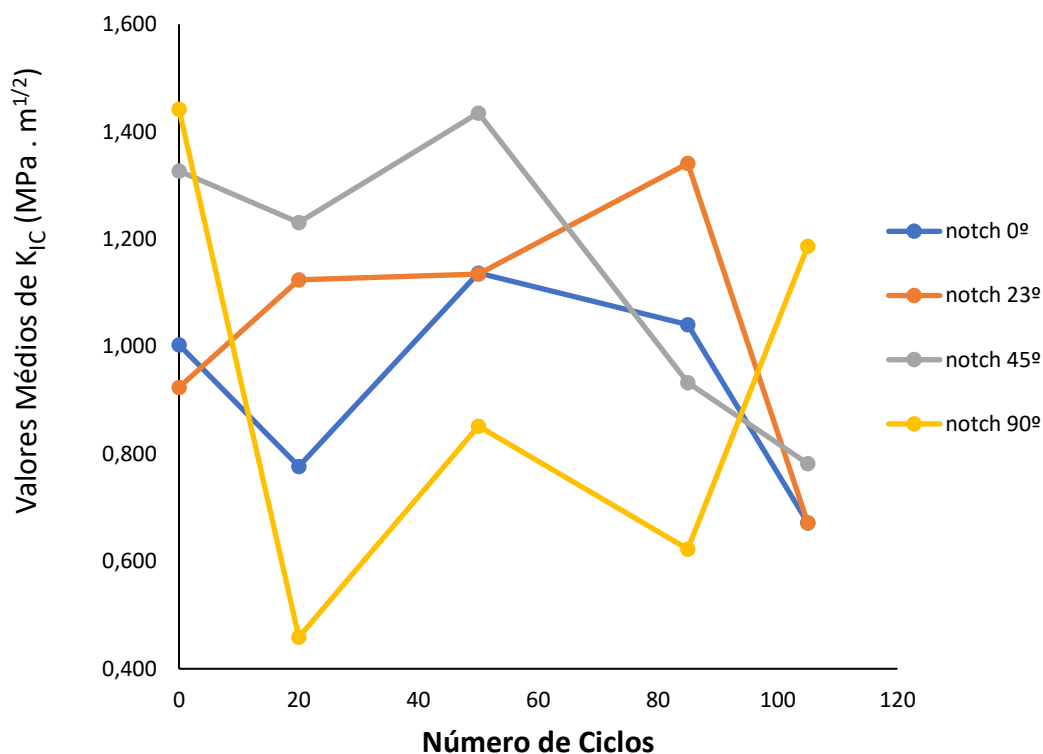
u e v - Constantes tabeladas

 $Y_{min}^*$  - Valor mínimo do fator de intensidade de tensão adimensional $^2K_{IIC}$  - Tenacidade à fratura no modo II

De acordo com valores médios de tenacidade a fratura para uma melhor compreensão dos efeitos da ciclagem água-estufa e da variação do *notch* com a direção de carregamento, foram feitos dois gráficos com os valores representativos, como mostrado na Figura 37.

Conforme observado na Figura 37 e de acordo com a variação de angulação do *notch*, as amostras apresentaram uma leve diminuição no valor de tenacidade à fratura no ciclo 20, com exceção do valor médio de 23°, que apresentou um leve aumento, e do *notch* com ângulo de 90°, que diminuiu muito. Essa redução nos valores de tenacidade pode ser atribuída a um maior faturamento inicial das amostras nesse ciclo o que também foi observado na Figura 30, Figura 31, Figura 32.

Figura 37 - Variação do valor de tenacidade a fratura de acordo com cada ângulo do *notch* ensaiado e de acordo com cada ciclo de água estufa.



Fonte: Autor, 2020.

No ciclo 50 é observado um leve aumento no valor de tenacidade à fratura em todos os ângulos do *notch* ensaiados, após o ciclo 50 observa-se, nos ciclos subsequentes, uma diminuição do valor de tenacidade resultando em valores menores valores nos ciclos 105, com exceção da amostra com *notch* a 90°. Isso ocorre devido ao efeito da alteração das maiores ciclos água-estufa alterarem levemente a matriz da rocha.

De acordo com a Figura 37, é possível observar a variação dos valores de tenacidade à fratura com o ângulo do *notch* ensaiado. Na direção paralela (0°), a reta obtida por esse ângulo indica menores valores de tenacidade a fratura, quando comparado com as retas dos ângulos de 23° e 45°.

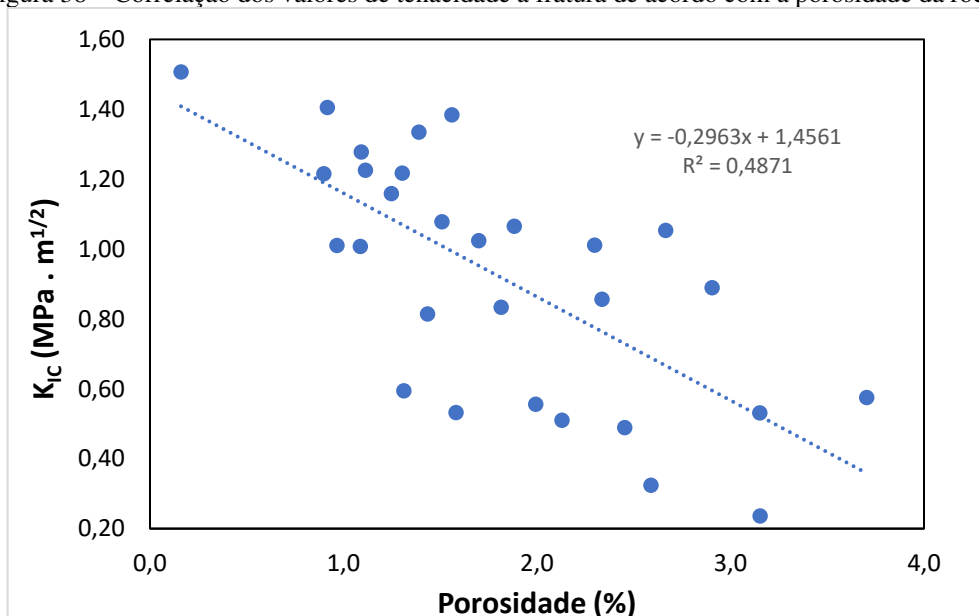
As retas representadas pelos ângulos de 23° e 45°, são as que representam maiores valores de tenacidade indicando que nesses ângulos.

De acordo com os resultados dos valores esperados para o ângulo de 90°, foi observado que a reta ficou bem abaixo do esperado, uma vez que, a direção de carregamento está perpendicular ao *notch*. Estimava-se que na angulação de 90° apresentasse os maiores valor de tenacidade a fratura.

O comportamento anômalo das amostras ensaiadas para o ângulo de 90° é atribuído ao fato delas apresentarem valores de porosidade um pouco maiores quando comparadas com os outros ciclos restantes, além de apresentarem algumas fraturas como dito anteriormente.

Conforme observado na Figura 38 são apresentados os dados porosidade e tenacidade a fratura. A relação entre porosidade e tenacidade a fratura é uma grandeza inversamente proporcional, portanto, no início do gráfico observa-se que os menores valores de porosidade, entre 0,5% e 1%, apresentam maiores valores de tenacidade a fratura, e as amostras que apresentaram valores de porosidade entre 3% e 4% apresentaram menores valores de tenacidade. Esse comportamento apresentando no gráfico também foi observado por Chang, Lee e Jeon (2002) para rochas graníticas.

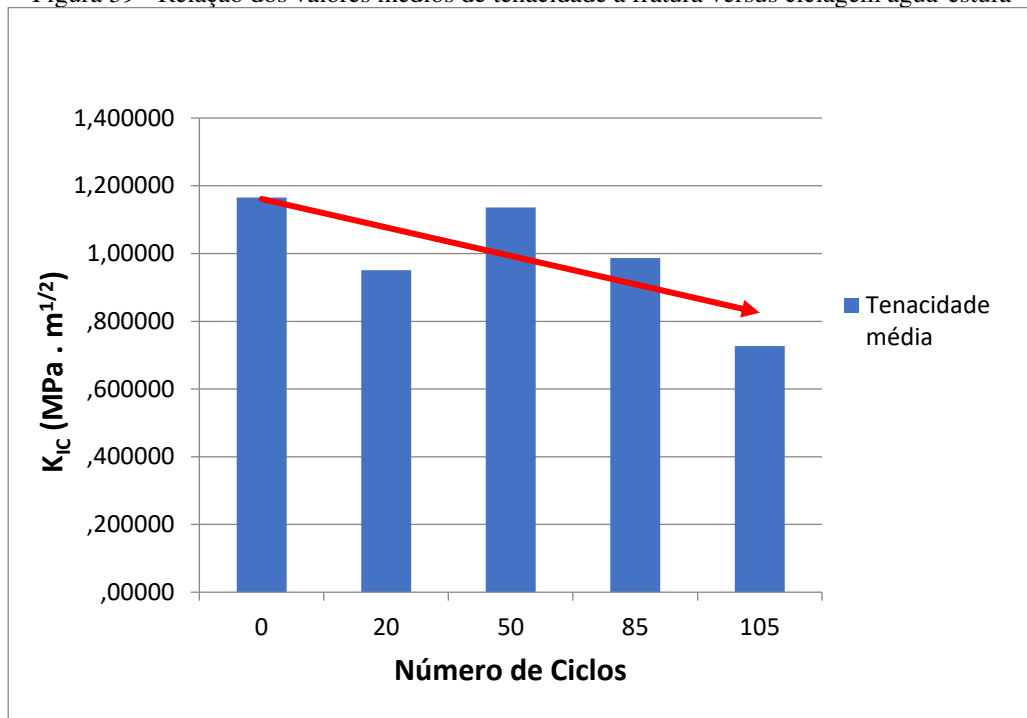
Figura 38 – Correlação dos valores de tenacidade a fratura de acordo com a porosidade da rocha.



Fonte: Autor, 2020.

Um comportamento geral dos valores médios de tenacidade à fratura em relação à ciclagem água-estufa é apresentado na Figura 39. Conforme a reta média dos valores de tenacidade, é possível observar que a mesma apresenta uma tendência de decréscimo com o avanço da ciclagem água estufa. Destaca-se que os ensaios de ciclagem realizados apresentaram uma queda no valor médio de tenacidade à fratura de aproximadamente 35% de degradação elevada das amostras que pudesse influenciar, de forma marcante, o comportamento da tenacidade à fratura.

Figura 39 - Relação dos valores médios de tenacidade a fratura versus ciclagem água-estufa



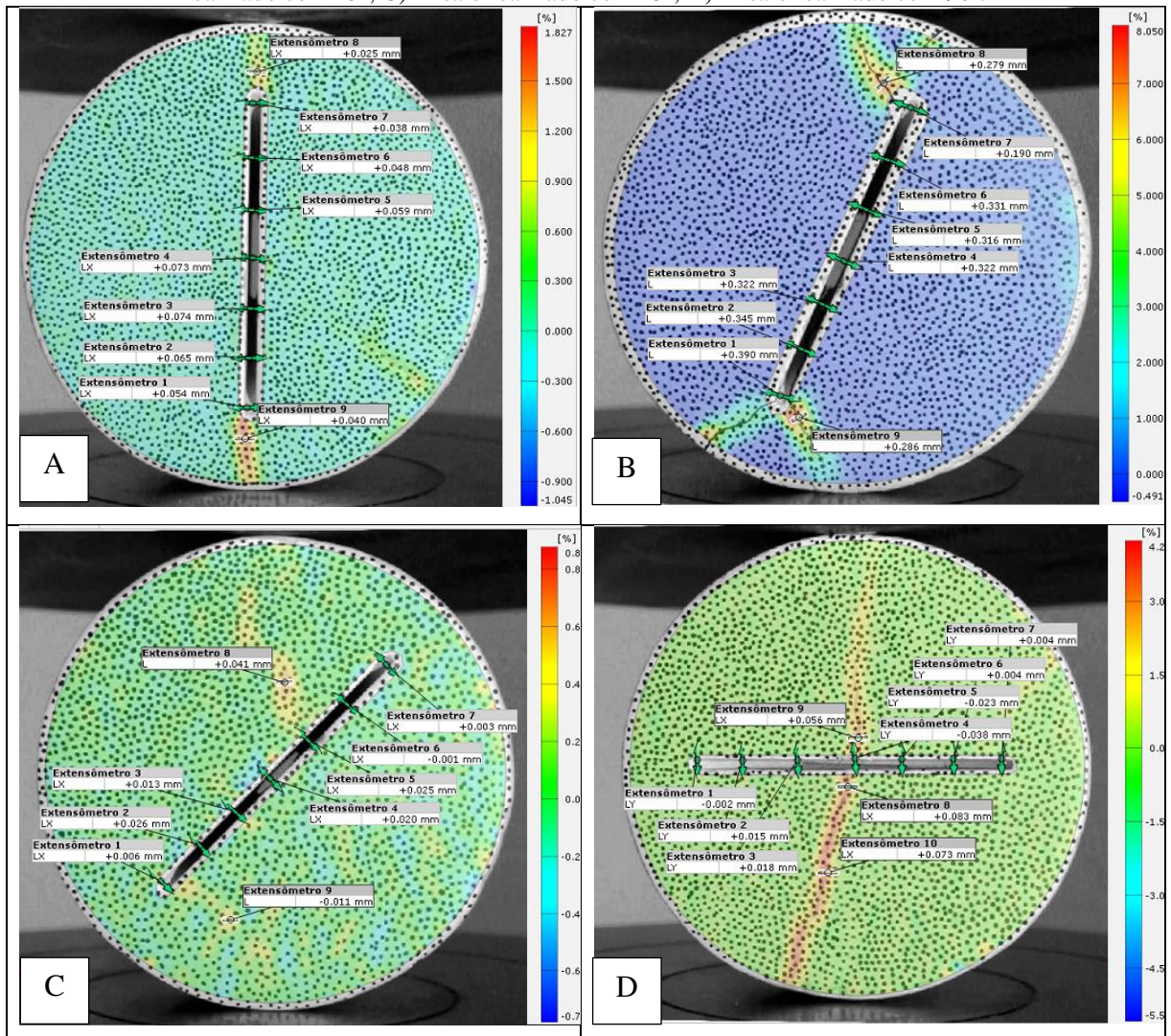
Fonte: Autor, 2020.

#### 4.4.3 Resultados da Técnica de Correlação Digital de Imagem (CID)

A aplicação da técnica de correlação de imagem (CID) foi utilizada como um método alternativo de medição dos deslocamentos da região do *notch*, e também como ferramenta de visualização da zona do processo de fatura (ZPF).

Assim como dito anteriormente, os ensaios de CCNBD foram feitos estabelecendo uma angulação aos corpos de prova de 0°, 23°, 45° e 90°. A definição e determinação das deformações encontradas na ZPF são representadas da Figura 40 à Figura 43.

Figura 40 - Ensaio CCNBD realizado para as amostras do ciclo 20. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°.



Fonte: Autor, 2020.

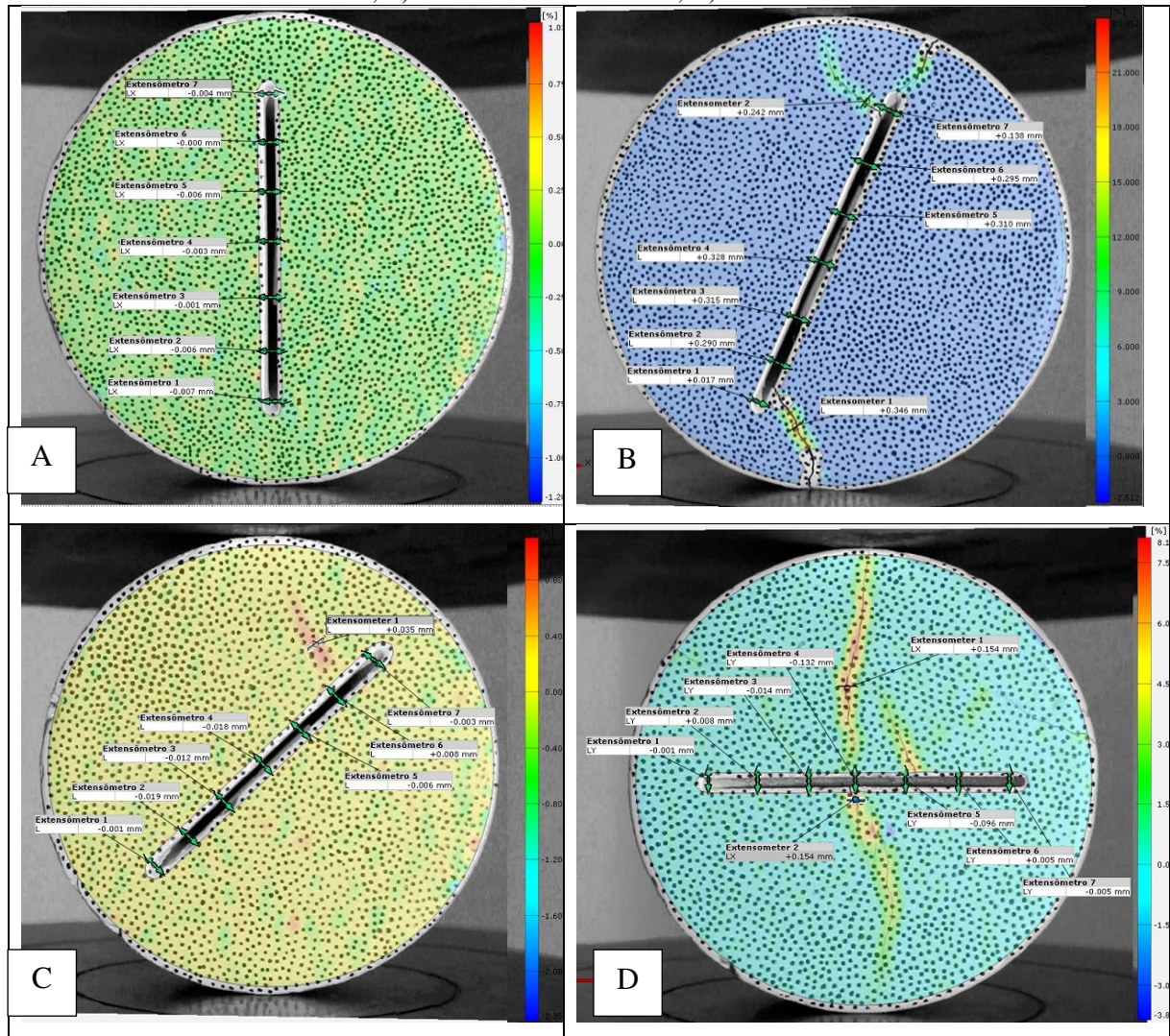
Analisando as amostras ensaiadas é possível determinar a direção da fratura criada durante a compressão diametral, marcada pelas regiões com coloração a partir de laranja, nas Figura 40 à Figura 43. As fraturas normalmente surgem paralelas à direção de aplicação de carregamento nas amostras. Isso também é observado para as amostras dos outros ciclos, conforme se observa a seguir, com algumas exceções.

Nas amostras ensaiadas do ciclo 20, constata-se que os maiores valores de deformação obtidos estão na região da ponta da trinca do *notch*, que é de onde a trinca inicia sua propagação, com exceção do ângulo de 90°, em que a trinca de propaga em direção ao centro do *notch* e não em direção ponta da trinca no interior do mesmo.

As amostra do ciclo 50, apresentadas na Figura 41, tiveram um comportamento semelhante ao do ciclo 20, porém como observado na Figura 41A, não foi possível determinar

a ZPF e as deformações da trinca, uma vez que a ruptura ocorreu de forma muito rápida, e as limitações de filmagem da câmera de 60 FPS não foi suficiente para captura no momento exato.

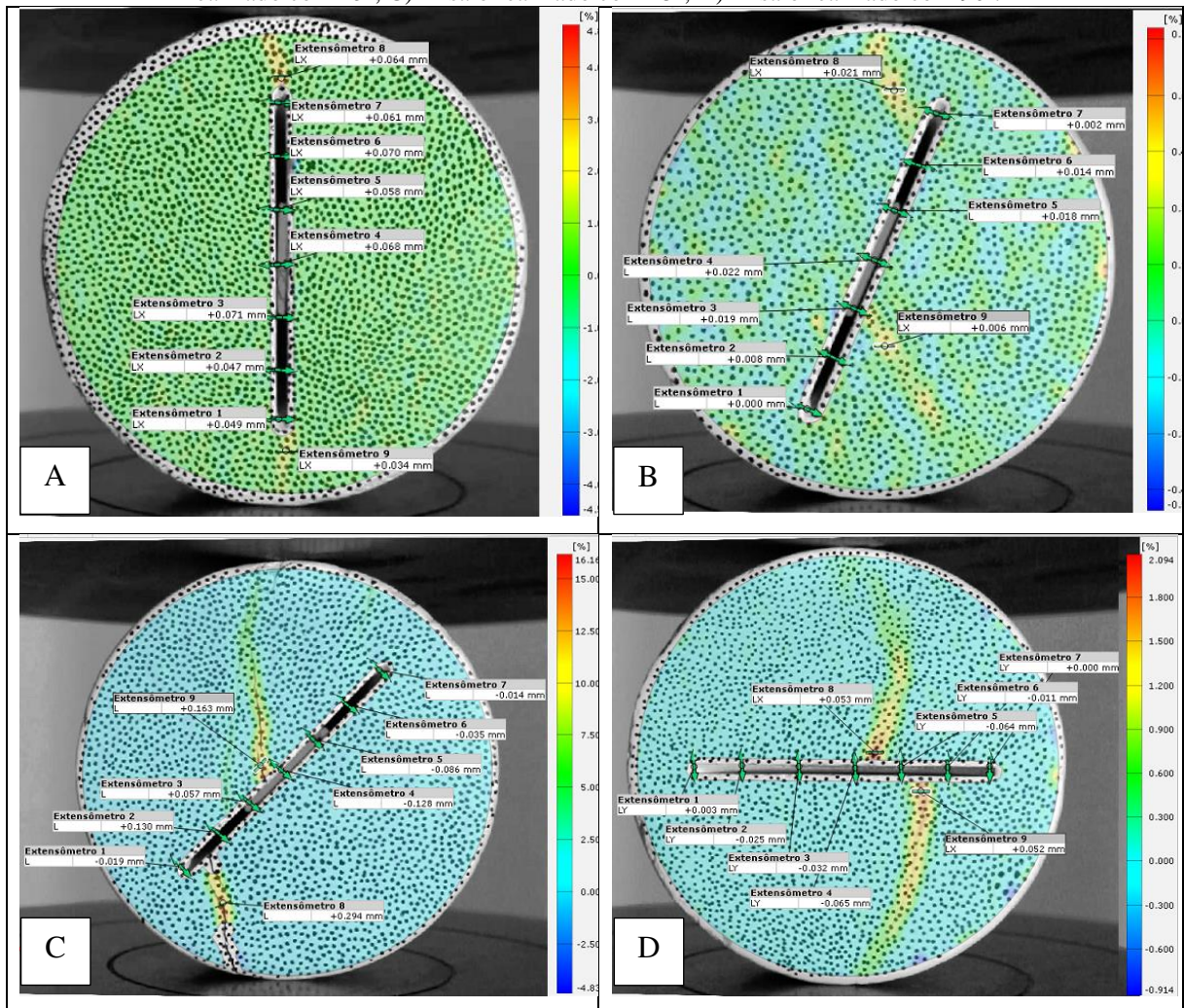
Figura 41 - Ensaio CCNBD realizado para as amostras do ciclo 50. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°.



Fonte: Autor, 2020.

Durante os ensaios do ciclo 85 pode-se observar que amostras ensaiadas em uma angulação de 45° e 90° (Figura 42C e D) apresentaram um certo desvio na propagação da trinca, pois esperava-se que fissura surgiria na ponta do *notch*. Esse desvio na propagação da trinca está atrelado a presença de fraturas secundárias geradas durante o ensaio de ciclagem-água estufa.

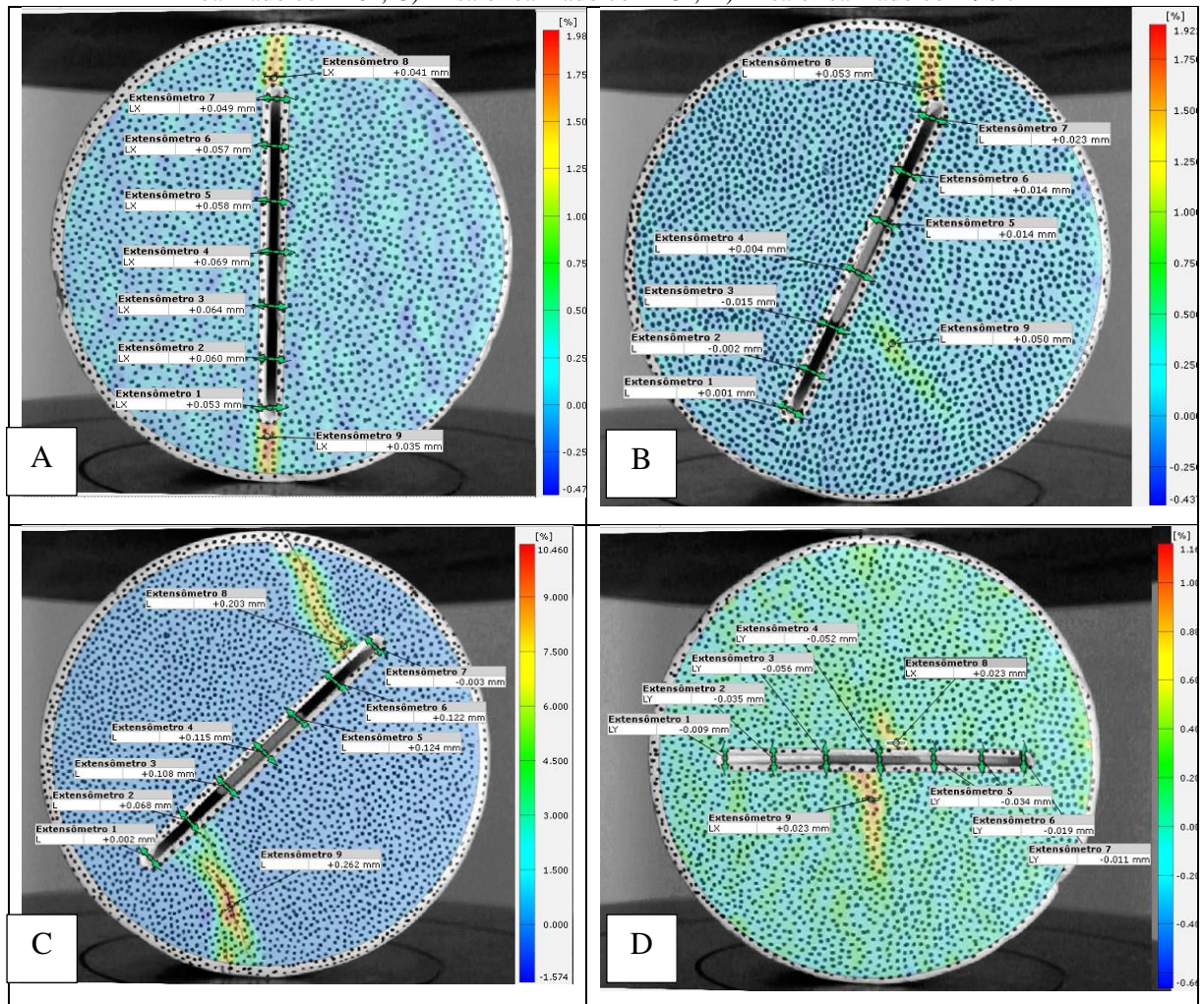
Figura 42 - Ensaio CCNBD realizado para as amostras do ciclo 85. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°.



Fonte: Autor, 2020.

Nos ensaios CCNBD realizados nas amostras com 105 ciclagens, foi possível identificar e medir a deformação de todas as amostras, mostradas na Figura 43. Nesse ciclo quase todas amostras apresentaram um comportamento esperado, com exceção da amostra rompida no ângulo de 23°, uma vez que a trinca gerada se propagou em direção ao centro do *notch*.

Figura 43 - Ensaio CCNDB realizado para as amostras do ciclo 105. A) Ensaio realizado com 0°; B) Ensaio realizado com 23°; C) Ensaio realizado com 45°; D) Ensaio realizado com 90°.



Fonte: Autor, 2020.

De modo geral, durante a realização dos ensaios CCNDB aplicando a técnica CID foi possível constatar que, ao se fazer o ensaio em diferentes ângulos do *notch*, o mesmo causa um desvio na trajetória da fissura, que no ensaio de tração normalmente seria paralela ao carregamento.

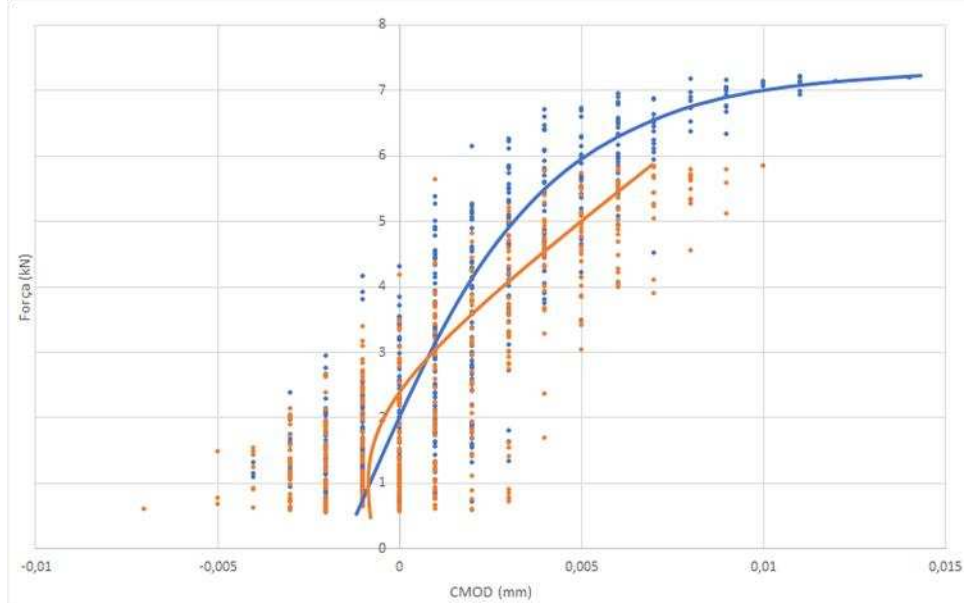
Porém, esses desvios das trajetórias das fissuras não deveriam ser muito grandes, como ocorreu em algumas amostras descrita anteriormente. Esses desvios foram atribuídos às fissuras geradas durante os ensaios de ciclagem água-estufa.

A fim de se analisar os deslocamentos na região central da trinca, foram extraídos os valores de abertura da através da técnica CID usando do software GOM CORRELATE 2019. Dentro da interface do software foram inseridos extensômetros virtuais, como visto da Figura 40 à Figura 43. Através dos frames analisados no software de correlação digital de imagens os deslocamentos registrados pelos extensômetros virtuais retomaram os valores de deslocamento

em mm medindo assim abertura da trinca CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) para diferentes ângulos de amostras CCNBD ensaiadas.

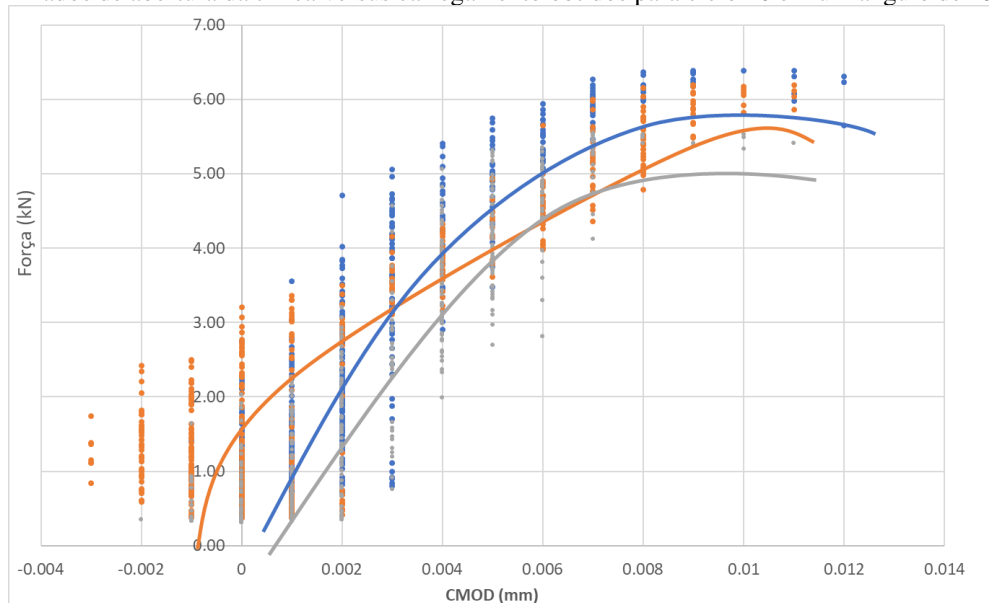
Os resultados do CMOD são apresentados em mm versus o carregamento mostra em kN são mostrados da Figura 44 a Figura 47. As curvas coloridas representam as diferentes amostras ensaiadas para cada ciclo em cada ângulo apresentado nas figuras.

Figura 44 – Dados de abertura da trinca versus carregamento obtidos para ciclo 50 em um ângulo de  $0^\circ$ .



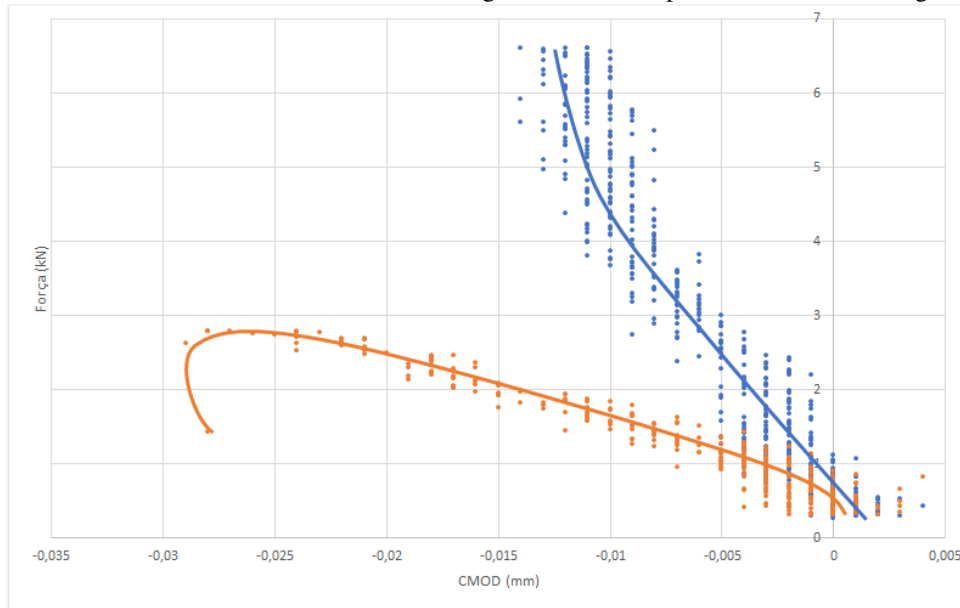
Fonte: Autor, 2020.

Figura 45 - Dados de abertura da trinca versus carregamento obtidos para ciclo 20 em um ângulo de  $23^\circ$ .



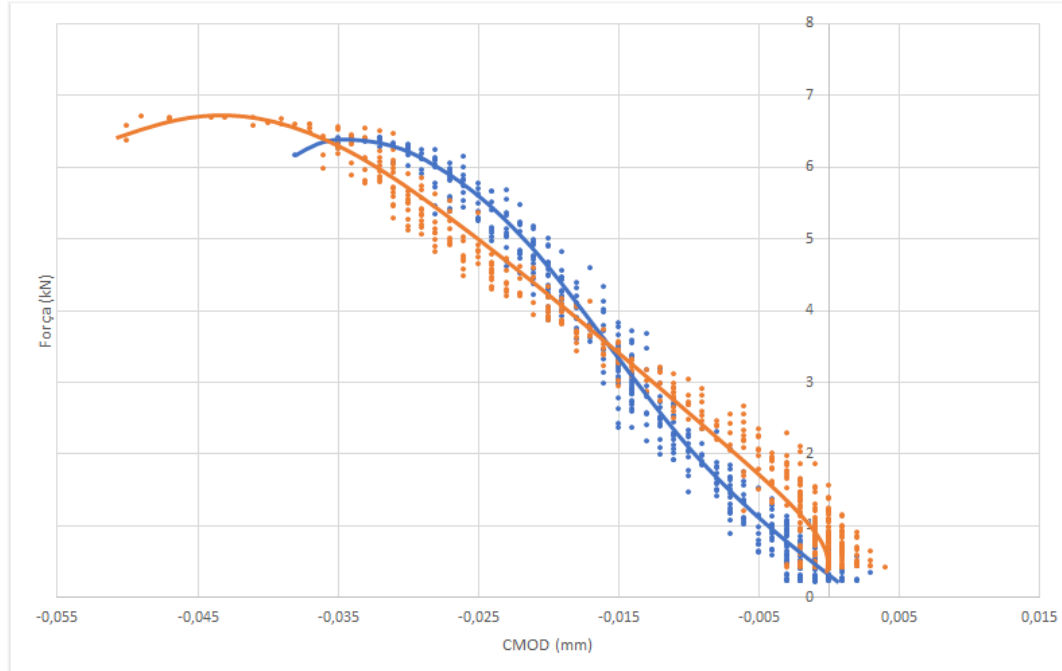
Fonte: Autor, 2020.

Figura 46 - Dados de abertura da trinca versus carregamento obtidos para ciclo 85 em um ângulo de 45°.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 47 - Dados de abertura da trinca versus carregamento, obtidos para ciclo 105 em um ângulo de 90°.



Fonte: Autor, 2020.

De acordo com gráficos apresentados acima, foi possível observar que no ângulo de 0° (Figura 44), apresentou um comportamento semelhante ao gráfico gerado na Figura 45 para o ângulo ensaiado de 23°. De acordo com a forma da reta pode-se definir que a trinca se propaga linearmente estável até atingir o limite aproximadamente 6 kN para o ângulo 23° e 7 kN para

ângulo de  $0^\circ$ . Ambas amostras apresentam um comportamento frágil, porém esse o limite de escoamento não é muito nítido para todos os gráficos, com exceção do gráfico da Figura 46, em que fica evidenciado de melhor maneira o pós-pico da ruptura.

Na Figura 46 e Figura 47 é possível observar um comportamento inverso ao observado nos gráficos anteriores. Ambos apresentaram valores negativos de abertura da trinca, o que indica que ao se girar o *notch* em um ângulo maior de  $45^\circ$  ocorre o predomínio de forças compressivas sobre forças cisalhantes resultando em que ela se feche ao invés de abrir.

No ângulo de  $90^\circ$  o *notch* apresenta um maior deslocamento negativo, indicando assim um maior fechamento da trinca na região central de aplicação da carga, o que reflete em um gráfico de maior inclinação quando comparado com ângulo de  $45^\circ$ .

De maneira a permitir a determinação dos valores diretos de abertura e fechamento das fissuras fez-se ensaios em amostras de CCNBD para o mesmo tipo de rocha, porém, utilizando um *clip gauge* da MTS e com controle de carga. Os gráficos comparativos dos ensaios realizados utilizando o *clip gauge* estão apresentados na Figura 48.

Comparando os gráficos obtido utilizando *clip gauge*, com gráfico obtidos pela técnica de correlação de imagem, foi possível confirmar o comportamento frágil das amostras, o que com a técnica CID não tinha ficado tão nítido. Analisando ainda os gráficos gerados utilizando o clip-gauge e utilizando a técnica CID foi possível observar que as escalas de ambos de deslocamento do CMOD são próximas para os ciclos ensaiados.

Analisando o primeiro gráfico da Figura 48, nos primeiros valores de abertura da trinca temos uma alta carga, até atingir o valor máximo que de 7,84 kN, nesse primeiro trecho a fratura ocorre internamente no *notch* após atingir o valor máximo. Algumas vezes é possível observá-la na face do corpo de prova.

Após atingir o valor máximo a fratura passa a ter um comportamento instável apresentando um patamar de escoamento descendente. A trinca se continua se propagando instavelmente fazendo surgir novas trincas, representadas pelos patamares secundários nos gráficos do ciclo 20 e ciclo 50. É possível observar também que em ambos os ciclos a reta inicial apresenta uma maior inclinação quando comparado com os ciclos 85 e 105.

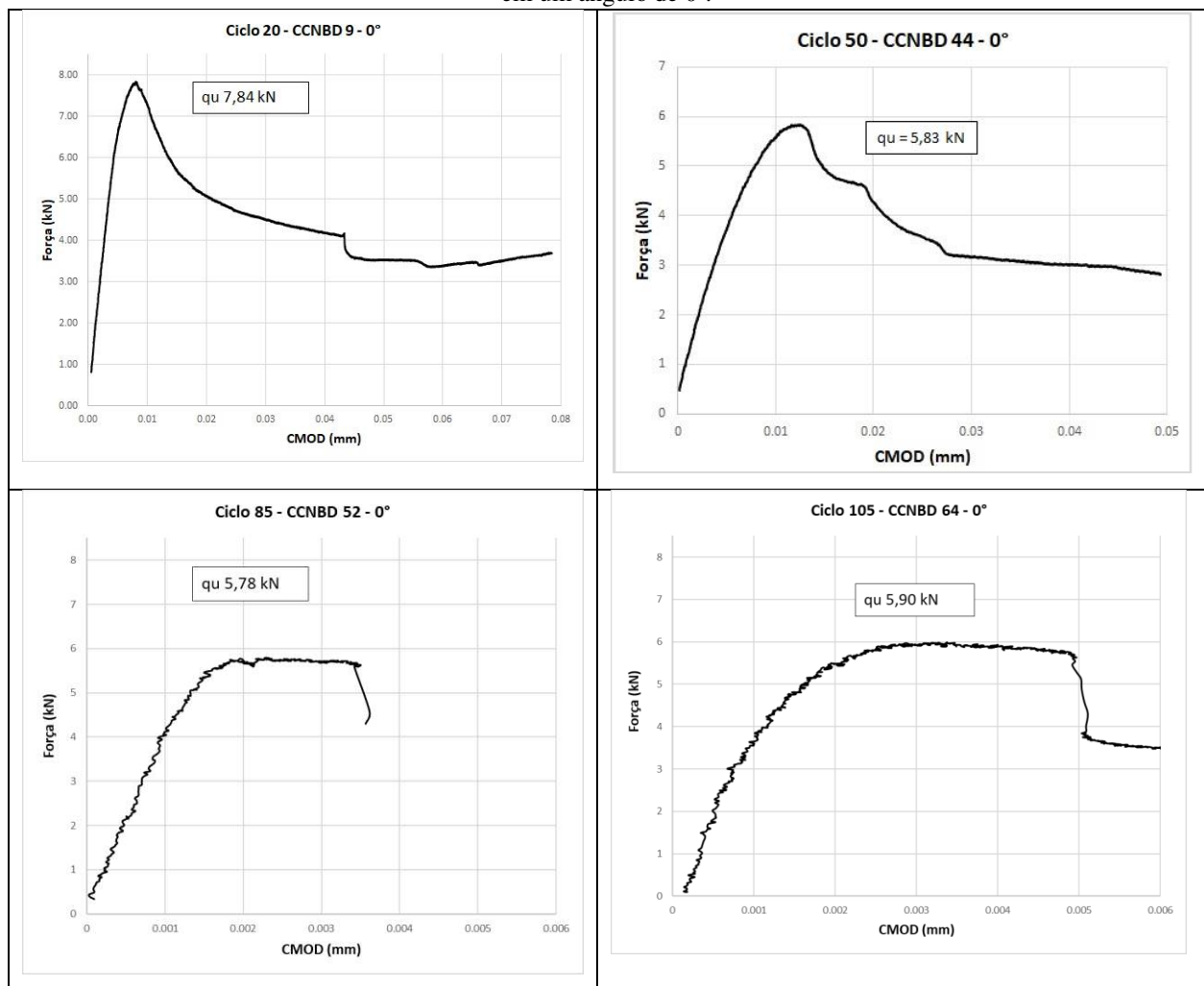
Nos ciclos 85 e 105 é possível notar uma mudança de comportamento dos gráficos, já que em ambos é possível observar que para um maior deslocamento da abertura da trinca, tem-se uma menor variação da carga, o que não ocorre nos dois primeiros ciclos demonstrados na figura abaixo. É possível observar nos ciclos 20 e 50 que o a abertura do *notch* ocorre até aproximadamente 0.01mm, já nos ciclos 85 e 105 esse deslocamento é 0,02mm representando

um aumento duas vezes em relação ao valor inicial. Isso deve ser efeito do intemperismo causado pelos ciclos de umedecimento e ciclagem.

Outro fato que deve ser observado é que nos ciclos 85 e 105 a força aplicada para abrir uma fissura é menor que nos dois primeiros ciclos da Figura 48. Uma vez que nesses dois últimos gráficos, ambos, apresentaram um único patamar de escoamento, porém maior que nos dois gráficos iniciais. De novo, interpreta-se esse resultado como sendo influenciado pela alterabilidade originado pela ciclagem realizada nas amostras.

Esse maior patamar escoamento dos ciclos 85 e 105 indica que com o avanço da ciclagem a rocha passou a ter um comportamento mais dúctil do que frágil gerando menos fissuras no *notch* previamente à ruptura.

Figura 48 – Gráfico de carregamento versus o deslocamento de abertura do *notch* para os ciclos 20, 50, 85 e 105, em um ângulo de 0°.



Fonte: Autor, 2020.

#### 4.4.4 Variação da liberação de energia de deformação ( $G_c$ )

De acordo com Irwin et al. (1948) propuseram uma modificação da teoria de Griffith que, ao invés de analisar a energia específica de superfície, analisa a “velocidade” com que a energia de deformação é transformada em energia de superfície, em função do comprimento da trinca, ou seja, a variação da liberação da energia de deformação ( $G_c$ ) durante o processo de fraturamento.

Segundo a Equação 16, para se calcular a variação de liberação de energia são necessários aos valores de tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Os valores de tenacidade à fratura, foram retirados das **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a Tabela 13. O valor do módulo de elasticidade foi retirado dos ensaios de compressão apresentados na Tabela 7. Os valores do coeficiente de Poisson não foram determinados, pelo que se optou por realizar uma análise de sensibilidade fazendo-se variar essa propriedade entre 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5. O valor médio de módulo do módulo de elasticidade adotado foi de 70,74 GPa. Na Tabela 14 apresentam-se os resultados de  $G_c$  com base nessas informações.

Tabela 14 - Valos de liberação de energia de deformação ( $G_c$ ) em função dos valores obtidos de  $K_{IC}$ .

Ciclo	$\theta$	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$G_c(\nu=0,2)$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c(\nu=0,3)$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c(\nu=0,4)$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c(\nu=0,5)$ (J/m <sup>2</sup> )
Ciclo 20	0°	0,777	0,819	0,777	0,717	0,640
	23°	0,904	1,109	1,051	0,970	0,866
	45°	1,231	2,056	1,949	1,799	1,607
	90°	0,459	0,286	0,271	0,250	0,223
Ciclo 50	0°	1,137	1,754	1,663	1,535	1,371
	23°	1.135	1.748	1.657	1.530	1.366
	45°	1.435	2.795	2.649	2.445	2.183
	90°	0.852	0.985	0.934	0.862	0.770
Ciclo 85	0°	1.041	1.471	1.394	1.287	1.149
	23°	1.341	2.440	2.313	2.135	1.907
	45°	0.933	1.181	1.120	1.034	0.923
	90°	0.623	0,527	0,499	0,461	0,412
Ciclo 105	0°	0,672	0,613	0,581	0,536	0,479
	23°	0,672	0,613	0,581	0,536	0,479
	45°	0,782	0,830	0,787	0,726	0,648
	90°	1,187	1,912	1,812	1,673	1,494

Fonte: Autor, 2020.

$\theta$  - Ângulo entre eixo da fratura;  $K_{IC}$  - Tenacidade à fratura;  $G_c$  - Variação da energia de liberação

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 14, pode-se perceber que houve uma variação substancial de  $G_c$  quando comparamos para uma mesma amostra os diferentes coeficientes de Poisson compreendidos entre 0,2 e 0,5. A variação  $G_c$  observada entre as amostra do mesmo ciclo depende do valor de  $K_{IC}$  e logicamente como o valor e tenacidade à fratura apresentaram ampla variação, o valor de  $G_c$  logicamente também será afetado. Outra observação a ser feita é que quanto maior o coeficiente de Poisson, menor será o valor de  $G_c$  e consequentemente obteremos menor valor de tenacidade a fratura, indicando assim que o coeficiente de Poisson é uma grandeza inversamente proporcional a tenacidade.

Conforme dito anteriormente e de acordo com o observado na tabela acima, aquelas amostras que apresentaram os valores de  $K_{IC}$  acima de  $G_c$  as fraturas se propagaram instavelmente. Uma vez que  $G_c$  representa a taxa crítica de alívio de energia de deformação geradora da fissura, ou seja, representa a energia necessária para se criar uma fissura. Quando o valor de  $K_{IC}$  atinge um valor menor do que  $G_c$  a trinca se propaga estavelmente, quando o valor de  $K_{IC}$  supera a taxa de alívio de energia de deformação da fissura a trinca se propaga instavelmente. Sendo  $G_c$  um parâmetro constante para um determinado material, estabelecendo sua capacidade de resistência à extensão das fraturas ou fissuras.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nos dados dos ensaios de índices físicos e mecânicos pode-se afirmar que apesar da rocha apresentar certa variação nos valores de Rebote, PLT, Compressão Uniaxial e  $V_p$  o número de ciclos aplicados à rocha não foi suficiente para impor modificações importantes à mesma. A variação nos valores das propriedades medidas deve-se mais à defeitos estruturais das amostras ensaiadas do que aos efeitos da ciclagem.

Os efeitos da ciclagem água-estufa alteraram de forma substancial os valores de porosidade e massa específica, sendo a ciclagem mais efetiva em criar fissuras e rachaduras. Após decorrido 20 ciclos foi possível observar uma geração de fissuramento maior nos corpos de prova. Esse comportamento também ocorre em condições de intemperismo natural, uma vez que o intemperismo físico geralmente é o primeiro a ocorrer criando fraturas nas rochas abrindo frentes de alteração para o intemperismo químico.

De acordo com os objetivos propostos foi possível determinar os parâmetros de tenacidade a fratura  $K_{IC}$  para o metadiabásio. Pode-se definir os valores de  $K_{IC}$  de acordo com os ciclos de alteração de 20, 50, 85 e 105 e de acordo com a angulação do *notch* ensaiadas de 0°, 23°, 45° e 90°. Os resultados de tenacidade à fratura apresentaram uma leve diminuição no valor de  $K_{IC}$  com aumento da ciclagem água-estufa, resultando em uma queda no valor de tenacidade médio de 35%.

Apesar do valor de  $K_{IC}$  ter apresentado certa dispersão, ainda assim são válidos e devem ser utilizados como parâmetro mecânico do metadiabásio. A dispersão nos valores tenacidade pode ter sido causada por anisotropia presente na rocha, como fissuras ou foliação. Essas variações também foram observadas nos outros ensaios mecânicos.

Utilizando a técnica de correlação digital de imagem em rochas foi possível inferir e confirmar o comportamento do *notch* durante o ensaio CCNBD. De acordo com os resultados obtidos pela técnica pode-se definir as zonas de maior deformação que ocorreram nos corpos de prova de acordo com o ângulo de ensaiado. Ou seja, antes mesmo de ocorrer a ruptura o software que utiliza a técnica já previa região das maiores deformações e logicamente o local em que a fissura se propagaria. Com essa técnica também foi possível obter os parâmetros de deformação de abertura e fechamento do *notch* e assim obter os gráficos de força versus deslocamento para o metadiabásio.

Conforme a técnica CID foi aplicada pode fazer uma comparação entre os gráficos obtidos pela técnica CID e os gráficos gerado com *clip gauge*. Ambos apresentaram uma escala de deslocamento parecidas, porém o comportamento dos gráficos é distinto. Logo a técnica CID

é bem promissora, no entanto é necessário estudar o método mais a fundo e realizar novos testes para definir a forma ideal de obter as imagens com os equipamentos disponíveis a baixo custo.

Por fim pode-se determinar outro parâmetro da mecânica da fratura que é a variação da liberação da energia de deformação,  $G_c$ , que de acordo com os resultados obtidos pode-se determinar as taxas em que as fraturas se propagaram instavelmente.

## 6. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Além dos resultados obtidos, a partir deste trabalho realizado fazem-se as seguintes recomendações:

- Para melhor estudar o comportamento do metadiabásio frente as alterações causadas pelo intemperismo, sugere-se que sejam realizados ensaios em vários graus de intemperismo do metadiabásio e utilizar uma maior quantidade de amostras.
- Um melhor entendimento da técnica CID é necessário, portanto, recomenda-se que para o ensaio CCNBD o mesmo seja feito utilizando um clip-gauge e aplicação da técnica CID concomitantemente.
- Sugere-se também que a técnica CID seja aplicada utilizando outros softwares livres.
- Uma outra etapa importante do ponto de vista de aplicação seria a modelagem dos parâmetros de tenacidade utilizando métodos numéricos através dos parâmetros obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABNT NBR 12696:1992** - Agregados - Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa - Método de ensaio, 1992.

ALBURQUERQUE, M. Determinação da tenacidade à fratura em rochas brasileiras. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 110 p. 1998.

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.

ALIHA, M. R. M.; MAHDAVI, E.; AYATOLLAHI, M. R. Statistical Analysis of Rock Fracture Toughness Data Obtained from Different Chevron Notched and Straight Cracked Mode I Specimens. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Ed. Springer Vienna, Austria, 2018,

ALIHA, M.R. M; AYATOLLAHI, M.R. Rock fracture toughness study using cracked chevron notched Brazilian disc specimen under pure modes I and II loading – A statistical approach. *Theoretical And Applied Fracture Mechanics*, [s.l.], v. 69, p.17-25, Elsevier 2014, BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2013.11.008>.

ALVAREZ, HUMBERTO I. P. Ensaio não convencionais para determinação da tenacidade à fratura em rochas: análise e comparação. Tese de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, **São Carlos**, 2004.

ASTM D5313 / D5313M-12, **Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ATKINSON, B.K. (1982). Subcritical crack propagation in rocks: theory, experimental results and applications. **Journal of Structural Geology**, Oxford, v.4, n.1, p.41-56.

ATKINSON, B. K. *Fracture Mechanics of Rock*. Academic Press, London, 1987.

BARTON, C. C. Variables in fracture energy and toughness of rock, Proc. 24rd US Symp. on Rock Mec/1., **The Univ. of California, Berkeley**, Califomia, R. E. Goodman & F. E. Heuze (Eds.), pp449- 462, 1983.

BACKERS, T.. **Punch-through shear test (PTS-Test) of drill core a new method for K<sub>IC</sub> testing**. Thesis (PhD) - Division of Engineering geology, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm. 2001.

BACKERS, T. Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading. Doctoral Thesis. University of Potsdam, **Germany**, 2004.

BEHRAFTAR, S.; TORRES, S. A. G.; SCHEUERMANN, A.; WILLIAMS, D. J.; MARQUES, E. A. G.; AVARZAMAN, H. J. A calibration methodology to obtain material

parameters for the representation of fracture mechanics based on discrete element simulations. **Computers and Geotechnics**, 2017.

BELEZA, S. C. A. Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem.. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, **Universidade Nova de Lisboa, Lisboa**, 2017.

BORTOLUCCI, A. A. **Modelo de ruptura em compressão de materiais frágeis baseado na mecânica da fratura e aplicado ao efeito escala**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

CASTRO, D. S. V. Avaliação dos Parâmetros da Técnica de Correlação Digital De Imagem Para o Cálculo da Integral-J Dinâmica em Materiais Compósitos. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Engenharia de Materiais, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

DEARMAN, W.R. Weathering classification in the characterisation of rock: a revision. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, 13: 123-127, 1976.

DEERE, D. U. & PATTON, F. D. Slope stability in residual soils. In: **PAN. CONF. SOIL MECH. FOUND. ENG.**, 4. Puerto Rico, 1971. Proceedings... Puerto Rico, ISSMFE, p. 87-170, 1971.

DOBEREINER, L. & PORTO, C.G. Considerations on the weathering of gneissic rocks. In: **Eng. Group Meeting on the Geol. of Weak Rock**, 26th ANNUAL CONF.OF B.G.S., Leeds, 1990. Proceedings... Leeds, B.G.S., p. 228-241, 1990.

DONOVAN, J. G. Fracture Toughness Based Models for the Prediction of Power Consumption, Product Size, and Capacity of Jaw Crushers. Doctor of Philosophy thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, **Blacksburg**, 2003.

FERREIRA, L.E.T. et al. R-curve behavior in notched beam tests of rocks. *Engineering Fracture Mechanics*, v.69, p.1845-1852. 2002.

FREIDMAN, M., HANDIN, J. & ALANI, G. Fracture - surface energy of rocks, **Int. J. Rock Mech. Min. Sei.**, 9 757-766 (1972).

GRIFFITH, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v.A221, p.163-98. 1921.

HOAGLAND, R. G., HAHN, G. T. & ROSENFELD, A. R. Influence of microstructure on fracture propagation in rock, *Rock Mechanics*, 5, **SpringerVerlag**, 77- 106, 1973.

HORII, H., HASEGA W A, A. & NISHINO, F. Process zone model and influencing factors in fracture of concrete, SEMIRILEM Int. **Conf. On Fracture of Concrete and Rock**, Houston, Texas S. P. Shah & S. E. Swartz, (Eds.), pp 299-307 1987.

HUANG, J.; WANG, S. An experimental investigation concerning the comprehensive fracture toughness of some brittle rocks. **International Journal of rock mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v.22, n.2, p.99-104, 1985.

HUDSON, J.A.; HARRISON, J.P. **Engineering rock mechanics** – an introduction to the principles. Amsterdam: Pergamon. 1997.

INGLIS, C.E. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Institution of Naval Architects, **London**, v.55, p.219-30. 1913.

INGRAFFEA, A.R. **Discrete fracture propagation in rock laboratory tests and finite element analysis**. Dissertation (PhD) - University of Colorado, Boulder, Colorado, 1977.

IRWIN, G.R. Fracture dynamics, fracture of metals. Metals Park: American Society of Metals. p.147-166, 1948.

IRWIN, G.R.; KIES, J.A. Fracturing and fracture dynamics. **Welding Journal of Research Supplement**, p.95-100, 1952.

ISRM – International Society Of Rock Mechanics. **The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006**. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. 2007.

ISRM – International Society of Rock Mechanics, **The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014**. Ed. Ulusay, R (Ed.), Cham, Switzerland: 2014 Springer. DOI 10.1007/978-3-319-007713-0

KARIHALOO, B.L.; NALLATHAMBI, P. Effective crack model and tensionsoftening laws. In: SEM/RILEM INTERNATIONAL CONFERENCE FRACTURE OF CONCRETE AND ROCK, 1987, Houston. Proceedings... New York: Springer-Verlag.p.701-710, 1989.

KAHRAMAN, S. **The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. Ultrason-ics**, v. 46, n. 4, pp.341-348. Elsevier BV. 2007.<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2007.05.003>.

KORBER, H. **Mechanical Response of Advanced Composites under High Strain Rates**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 43-80,87-96. 2010.

LABUZ, J.F.; SHAH, S.P.; DOWDING, C.H. . Experimental analysis of crack propagation in granite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.22, n.2, p.85-98, 1985.

LEÃO, M. F; BARROSO, E. V, POLINOV. H., MARQUES, E. A. G, VARGAS, E. A Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [s.l.], p.1-15, 6 abr. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-017-1036-1>

LAGATTU, F., BRILAUD, J., & LAFARIE-FRENOT, M.C.. **High strain gradient measurements by using digital image correlation technique**. Materials Characterization, 53(1), 17–28, 2004.

LAMA, R.D., VUTUKURI, V.S, **Handbook on Mechanical Properties of Rocks**. Trans Tech Publications, Clausthal. 1978.

LEE, S. G. & de FREITAS, M. H. Quantitative definition of highly weathered granite using the slake durability test. **Geotechnique**, 38: 635-640, 1989.

MARCHIORI, D.G. (1997). A mecânica da fratura elástica linear e o modelo coesivo na previsão do fraturamento de rochas. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

MARQUES, E. A. G., WILLIAMS, D. J., ASSIS, I.R. E LEÃO, M. F. Effects of weathering on characteristics of rocks in a subtropical climate: weathering morphology, in situ, laboratory and mineralogical characterization. **Environmental Earth Sciences**, Springer Nature. v. 76, n. 17, pp.1-17, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-017-6936-7>.

MARQUES, E. A. G. Caracterização geomecânica de um perfil de intemperismo em Kinsigitos. Tese de Doutorado, Dep.de Geologia, IGEO/UFRJ, RJ, 261p. 1998.

MARTINS G. P., Determinação dos parâmetros de iniciação  $J_i$  e  $\delta_i$  em junta de aço ASTM A516 grau 65-N soldada por arco submerso, Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais, 1985.

MOREIRA, P. **Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações**. Tese de Mestrado. FCT-UNL, 2015.

NOLEN-HOEKSEMA R. C. & GORDON, R. B. Optical Detection of Crack Patterns In The Opening-Mode Fracture of Marble, **Tecnical note, Jnt. J Rock Mech. Min. Sei. & Geomech. Abstr**, 24, 135 144, 1987.

OUCHTERLONY, F. A Core Bend Specimen With Chevron Edge Notch for Fracture Toughness Measurements. **Rock Mechanics: Key To Energy Production**. In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 27. Proceedings. Littleton: SME. p.177-184, 1986.

PAN, B., XIE, H., WANG, Z., QIAN, K., & WANG, Z . Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. **Optics Express**, 16(10), 7037–7048. 2008.

PATEL, S.; MARTIN, C. D. **Application of Digital Image Correlation Technique for Measurement of Tensile Elastic Constants in Brazilian Tests on a Bi-Modular Crystalline Rock**. *Geotechnical Testing Journal*, [s.l.], v. 41, n. 4, p.664-674. 2018. <http://dx.doi.org/10.1520/gtj20170208>.

PERIM, A. C. C e CERRATO, S. A. R - Caracterização da Tenacidade e da Propagação de Fraturas em Rochas Básicas da Mina do Tamanduá, MG. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - 2018.

REZENDE, K. S., JAQUES, D. S. E MARQUES, E. A. G. Correlações de resistência para algumas rochas metamórficas do estado de minas gerais, sudeste do Brasil. **15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**, Bento Gonçalves, pp. 1-9, 2015.

RUXTON, B. P. & BERRY, L. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 68: 1263-1292, 1957.

SANTIAGO, L. O. R. Alteração e Alterabilidade de Rochas Básicas Intrusivas Metamorfizadas e Filitos Sericíticos da Região do Quadrilátero Ferrífero e sua implicação no comportamento mecânico, Tese Universidade Federal de Viçosa. 2008.

SCHMIDT, R.A.; ROSSMANITH, H.P. Basics of rock fracture mechanics. In: Rossmanith, H.P. (Ed.). **Rock Fracture Mechanics: courses and lectures** New York: Technical University of Vienna; Springer-Verlag, 1983.

SCHREIER, H., ORTEU, J.-J., & SUTTON, M. A. **Digital Image Correlation (DIC). In Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements** (pp. 87–117). Springer US. 2009.

SCHÖN, J. H. **Density. Developments In Petroleum Science**. Elsevier. pp. 109-118 <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100404-3.00004-4>. 2015.

SILVA, F. L. C. Combinação de três métodos da mecânica da fratura para estimar a tenacidade em materiais semi frágeis. Tese de doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense – Darcy Ribeiro – UENF. Campos dos Goytacazes – RJ, 2017.

SUN, Z.Q.; OUCHTERLONY, F. **Fracture toughness of stripa granite cores**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Oxford, v.23, n.6, p.399-409. 1986.

SUTTON, M. A. **Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements**. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics. 2008.

TRČKOVÁ, J., ŠIVOR, R. E PŘIKRYL, R. Physical and Mechanical Properties of Selected Amphibolite Core Samples from the Kola Superdeep Borehole KSDB-3. **Terra Nova**. v. 14, n. 5, p.379-387. 2002. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00427.x>

WELLS, A.A. **Strain energy releasy rates for fractures caused by wedge action**. NRL Report, n.4705, 1956.

WESTERGAARD, H.M. **Bearing pressures and cracks**. Journal of Applied Mechanics, New York, v.24, p.31-34. 1939.

WHITTAKER B.N.; SINGH, R.N.; SUN, G. **Rock fracture mechanics: principles, design and applications**. Amsterdam: Elsevier. 1992.

YONEYAMA, S., & MURASAWA, G. Digital Image Correlation. Experimental Mechanics. Eolss Publishers, 2009.

WANG, Q. FAN, H. GOU, X. P. ZHANG, S. **Recalibration and Clarification of the Formula Applied to the ISRM-Suggested CCNBD Specimens for Testing Rock Fracture Toughness. Rock Mechanics And Rock Engineering**, [s.l.], v. 46, n. 2, p.303-313, Springer Science and Business Media LLC. 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-012-0258-6>.