UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

PATRICIA CAROLINA ALEJANDRA RODRÍGUEZ SAAVEDRA

Análise do microfissuramento em rochas no ensaio de compressão diametral por meio
da técnica de emissão acústica

São Carlos
2015

Versão corrigida
Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

PATRICIA CAROLINA ALEJANDRA RODRÍGUEZ SAAVEDRA

Análise do microfissuramento em rochas no ensaio de compressão diametral por meio da técnica de emissão acústica.

Tese apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-graduação em Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R696a

Rodríguez Saavedra, Patricia Carolina Alejandra
Análise do microfissuramento em rochas no ensaio de compressão diametral por meio da técnica de emissão acústica / Patricia Carolina Alejandra Rodríguez Saavedra; orientador Tarcísio Barreto Celestino. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Emissão acústica. 2. Microfissuramento. 3. Processo de fissuramento. 4. Padrão de fissuramento. 5. Localização tridimensional. 6. Petrografia. 7. Análise de frequência. 8. Ensaio de compressão diametral. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **PATRICIA CAROLINA ALEJANDRA RODRIGUEZ SAAVEDRA**.

Título da Tese: "Análise do microfissuramento em rochas no ensaio de compressão diametral por meio da técnica de emissão acústica".

Data da defesa: 08/12/2015

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Tarcísio Barreto Celestino (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **Fábio Taioli**
(Instituto de Geociências/IGc-USP)

Prof. Titular **José Elias Lair**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **José Jorge Nader**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Resultado:

APROVADA

APROVADA

APROVADA

APROVADA

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:

Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

RESUMO

RODRÍGUEZ SAAVEDRA, P. C. A. *Análise do microfissuramento em rochas no ensaio de compressão diametral por meio da técnica de emissão acústica*. 2015. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Em nível microscópico, as rochas apresentam microdefeitos que agem como concentradores locais de tensão, favorecendo a ocorrência de ruptura frágil. O entendimento desse processo requer análises experimentais em rochas submetidas a tensões de tração. O ensaio de compressão diametral é uma alternativa apropriada, pois não apresenta as dificuldades envolvidas no ensaio de tração direta. A propagação de microfissuramento em materiais frágeis produz liberação de energia na forma de ondas elásticas chamadas de emissões acústicas (EA). O monitoramento com EA permite acompanhar a propagação de dano no corpo de prova (CP), sem perturbá-lo. Nesta pesquisa, CPs de mármore e monzogranito são submetidos a ensaios de compressão diametral com deslocamentos monotônicos e cíclicos, com controle de deslocamento. Aplica-se a técnica de EA, em conjunto com análises petrográficas, análises das curvas de força versus deslocamento e exame visual, para caracterizar o seu processo de microfissuramento. A localização tridimensional das fontes de EA foi realizada inicialmente utilizando-se o software AEwin® da PASA. Foi desenvolvido um programa de localização aprimorado que incorpora o cálculo da velocidade de propagação das ondas (v_p) média para cada instante em que uma fonte é localizada. O novo programa (Crack Location by Acoustic emission with P Wave Velocity determination, CLAPWaVe) mostra um claro decréscimo da velocidade de propagação com o aumento do dano. O programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou melhor ajuste e maior coerência com a literatura e com a condição final rompida dos CPs do que o software AEwin. Em mármore e monzogranito o microfissuramento se inicia a 25-30% e 75-85% do carregamento de pico, respectivamente, e localiza-se na vizinhança do centro do CP. Em ambas as rochas se acumulou, também, dano na região dos apoios do CP, associado à transferência de carregamento do berço ao CP. Antes do pico de carregamento, o microfissuramento tornou-se mais denso e localizado no centro e nos apoios do CP, embora a região central ainda concentre a maior parte. Após o pico, o microfissuramento acumulou-se em uma das faces do CP, progredindo até a outra face. O monzogranito apresentou ruptura progressiva do CP, enquanto que no mármore a maior parte da superfície de ruptura já está desenvolvida imediatamente após o pico. Durante o ensaio em ambas as rochas, no núcleo central foram registradas as menores velocidades v_p do CP. Na região dos apoios, embora tenha havido microfissuramento, registraram-se as maiores velocidades v_p no CP, pois o confinamento produzido pelo contato com o berço aumentou localmente a rigidez do CP. A distribuição não homogênea de v_p no CP revelou que a consideração desse parâmetro como constante e igual à

condição intacta ao longo do ensaio, como comumente encontrado na literatura, não representa a condição real do CP danificado. O microfissuramento no monzogranito se propaga principalmente através dos cristais de quartzo, seguindo um caminho tortuoso subparalelo à direção de carregamento e liberando altos níveis de energia absoluta. No mármore, a propagação segue os planos de clivagem da calcita, liberando níveis baixos de energia absoluta. Os histogramas da distribuição espacial da resistência em ambas as rochas mostraram bom ajuste a uma distribuição de Weibull, porém o monzogranito mostrou melhor ajuste e menor variabilidade que o mármore. As análises dos sinais no domínio das frequências mostraram que o microfissuramento é caracterizado por emissões de banda larga.

Palavras – chave: Emissão acústica. Microfissuramento. Processo de fissuramento. Padrão de fissuramento. Localização tridimensional. Petrografia. Análise de frequências. Ensaio de compressão diametral.

ABSTRACT

RODRÍGUEZ SAAVEDRA, P. C. A. Analysis of microcracking in rocks in diametral compression tests through the acoustic emission technique. 2015. Thesis (PhD) – São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

At microscopic level, rocks exhibit microflaws, which act as local stress concentrators, favoring the occurrence of brittle failure. The understanding of this process requires experimental analyses of rock specimens under tensile stresses. The diametral compression test is an adequate alternative for such a studies, because it does not present the difficulties of direct tension tests. Crack propagation in brittle materials releases energy as transient elastic waves known as acoustic emission (AE). Monitoring with AE enables an insight into the cracking process without affecting the integrity of the sample. In this work, marble and monzogranite specimens were subjected to monotonic and cyclic displacement-controlled diametral compression tests. The AE monitoring technique was applied in conjunction with petrographic analyses, interpretation of the load versus displacement curves and visual examination of the samples for the characterization of their cracking process. The three-dimensional localization of the AE sources was initially carried out by using the software AWin® from PASA. An improved localization software, which considers the P-wave velocity variation along the damage process (v_p) for each AE source was developed. The developed software (Crack Location by Acoustic emission with P Wave Velocity determination, CLAPWaVe) has shown greater consistency with literature and the final cracked samples and better accuracy than AWin. Microcracking in monzogranite and marble initiated at 25-30% and 75-80% of the peak load, respectively, and is located at the center of the specimen. In addition, both rocks showed concentrated microcracking close to the region of contact between the specimen and the loading platens, related to the loading transference along the loading edge. Before peak load, microcracking becomes denser and localized at the center and the contact region of the specimen, although, the central region still concentrates the main portion of the damage. After the peak load, new microcracks were first concentrated on one of the faces at the center of the specimen and then propagated through its thickness all the way to the other face. The progressive failure in monzogranite extended through to the end of the test, while in marble the main portion of the failure surface of the specimen developed just after peak. During the whole test in both rocks, the lowest velocities (v_p) of the specimen were recorded in the central core. Although microcracking was induced at the contact region, the highest velocities v_p of the specimen were registered there, because of the confinement effect produced by the platens, which lead to a local increase in the stiffness of the specimen. The non-homogeneous distribution of v_p in the specimen has revealed that the utilization of this parameter as a constant and equal to the value measured in the specimen before testing (as

usually adopted in the literature), does not represent the real condition of the damaged specimen. In monzogranite, microcracks propagate mainly through quartz crystals, following a tortuous path subparallel to the loading direction, by releasing high-level of absolute energy, while in marble the propagation of microcracks follows the cleavage planes of calcite, by releasing low-level of absolute energy. The histograms of spatial strength distribution in both rocks have shown good adjustment to a Weibull distribution, but monzogranite exhibited a more accurate adjustment with lower variability than marble. The analysis of signals in the frequency domain showed that the microcracking is characterized by wide band emissions.

Keywords: Acoustic emission. Microcracking. Cracking process. Cracking pattern. Three-dimensional localization. Petrography. Frequency analysis. Diametral compression test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação esquemática dos parâmetros envolvidos no cálculo do estado de tensões em um disco submetido a compressão diametral.....	2
Figura 2.1 – Diagrama esquemático do sistema de coleta e processamento de sinais de EA.....	12
Figura 2.2 – Parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT	16
Figura 2.3 – Definição dos parâmetros de EA	20
Figura 3.1 – Representação esquemática da montagem típica dos ensaios (Berço curvo)	24
Figura 3.2 – Fotografias da montagem dos ensaios. a) Montagem de CP de monzogranito em berço curvo. b) Montagem de CP de mármore em berço plano.....	25
Figura 3.3 – Curva de calibração típica dos sensores de banda larga utilizados na pesquisa.....	27
Figura 3.4 – Resumo do programa experimental adotado.....	28
Figura 3.5 – Esquema da curva força versus deslocamento u em ensaios de compressão diametral com controle do deslocamento u . a) Ensaio monotônico. b) Ensaio cíclico.....	30
Figure 3.6 - Representação esquemática de um CP e localização de extração das lâminas petrográficas (destacada na cor vermelha)	31
Figura 4.1 – Sistema de transferência de carregamento do equipamento de ensaio.....	33
Figura 4.2 – Montagem típica dos ensaios em alumínio e representação esquemática do conceito de excentricidade utilizado para avaliar o equipamento. a) rotação do berço em 0° em relação ao prato. b) rotação do berço em 180° em relação ao prato. c) Configuração idealizada de aplicação de carregamento sem excentricidade. d) Configuração idealizada de aplicação de carregamento com excentricidade	34
Figura 4.3 – Força versus excentricidade (expressa como porcentagem de espessura) de acordo com o tipo de berço e sua orientação em relação ao prato. a) CP de alumínio e berços curvo e plano. b) CP de aço e berço plano. c) CP de alumínio e berço plano. d) CP de alumínio e berço curvo.....	36
Figura 5.1 – Força versus deslocamento u no monzogranito	37
Figura 5.2 – Força versus deslocamento v médio no monzogranito (até o pico de carga). Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	40
Figura 5.3 – Força versus excentricidade (expressa como porcentagem da espessura) nos ensaios em monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	41
Figura 5.4 – Força versus deslocamento u no mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	42
Figura 5.5 – Força versus deslocamento v médio no mármore (até o pico de carga). Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	43
Figura 5.6 – Força versus excentricidade (expressa como porcentagem de espessura) nos ensaios em mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4.....	44
Figura 5.7 – Rigidez K_u no monzogranito para o estágio A do ensaio.	45

Figura 5.8 – Rigidez K_u no mármore para o estágio A do ensaio.....	47
Figura 5.9 – Rigidez K_v no monzogranito para o estágio A do ensaio.....	49
Figura 5.10 – Rigidez K_v no mármore para o estágio A do ensaio.....	50
Figura 5.11 – Exemplo de determinação das propriedades elásticas E e ν no monzogranito. Dados experimentais obtidas utilizando berço curvo	53
Figura 5.12– Exemplo de determinação das propriedades elásticas E e ν no monzogranito. Dados experimentais obtidas utilizando-se berço plano	54
Figura 5.13 – Exemplo de determinação das propriedades elásticas E e ν no mármore. Dados experimentais obtidas utilizando-se berço plano.....	55
Figura 5.14 – Propriedades elásticas E e ν , para os ensaios feitos na pesquisa. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4. No caso dos ensaios monzogranito, adiciona-se ao ID a identificação do bloco de extração das amostras	55
Figura 5.15 – Metade do ângulo da área de contato, α e tensão máxima $\sigma_{\max}$ para os ensaios feitos no monzogranito.	58
Figura 5.16 – Metade do ângulo da área de contato, α e tensão máxima, $\sigma_{\max}$, para todos os ensaios feitos no mármore.....	58
Figura 5.17 – Distribuição de tensão elíptica típica no contato entre o berço e o CP. Tensão σ versus α o ângulo da área de contato para um ensaio feito em monzogranito.	59
Figura 5.18 – Interpretação do ensaio de compressão diametral e definição do comprimento da fissura equivalente $2a$	60
Figura 5.19 – Adimensionais representativos de: a) deslocamento diametral U e comprimento da fissura equivalente; b) tenacidade à fratura F^* e comprimento da fissura equivalente.....	61
Figura 5.20 – Exemplo de determinação da tenacidade à fratura, K_{IC} , no monzogranito e no mármore. Ajuste linear dos dados de cada ciclo de carregamento	61
Figura 5.21 –Variação do comprimento da fissura equivalente $2a$ no monzogranito e no mármore, considerando-se os 5 ciclos de descarregamento e recarregamento	62
Figura 5.22 –Variação da tenacidade à fratura K_{IC} no monzogranito e no mármore, considerando-se os 5 ciclos de descarregamento e recarregamento	63
Figura 6.1 –Níveis de carregamento considerados para a preparação e a análise das lâminas petrográficas. Ponto A: rocha intacta. Ponto B: 75-80% da resistência de pico. Ponto C: 90% da resistência de pico. Ponto D: final do ensaio.....	65
Figura 6.2 – Fotomicrografia de monzogranito intacto a nicóis cruzados (ponto A na Figura 6.1). Qz – quartzo, Mc – microclínio, Pl – plagioclásio, Bt – biotita, Ms – muscovita	68
Figura 6.3 –Microfissuras induzidas na condição de 90% do carregamento e pico no monzogranito (ponto C na Figura 6.1). Microfissuras indicadas com setas pretas e brancas.....	69
Figura 6.4 – Detalhe de uma microfissura que se inicia no interior de um cristal de quartzo no monzogranito (o retângulo em vermelho corresponde ao zoom da área na Figura 6.3)	70

Figura 6.5 – Microfissuras induzidas na condição de 90% do carregamento e pico no monzogranito (ponto C na Figura 6.1). Setas retas indicam uma microfissura que passa por cristais de quartzo, plagioclásio e microclínio. A seta branca indica a microfissura observada no limite entre cristais	70
Figura 6.6 – Fissura macroscópica principal e fissuras secundárias observadas no fim do ensaio no monzogranito (ponto D na Figura 6.1). A fissura macroscópica principal parece ter uma espessura maior devido à colagem das metades do CP antes da preparação das lâminas petrográficas	71
Figura 6.7 – Fissura aberta e deslocamento relativo em fenocristal de microclínio próximo à fissura macroscópica principal no final do ensaio no monzogranito (ponto D na Figura 6.1).....	72
Figura 6.8 – Fotomicrografia de uma amostra de mármore intacto (ponto A na Figura 6.1). Cal – calcita.....	72
Figura 6.9 – Nucleação de microfissuras induzidas até 75-80% do carregamento de pico no mármore (ponto B na Figura 6.1). Microfissuras indicadas com setas brancas	73
Figura 6.10 – Detalhe da nucleação de microfissuras através de planos de clivagem a 90% do carregamento de pico no mármore (ponto C na Figura 6.1)	74
Figura 6.11 – Fissura macroscópica observada no fim do ensaio no mármore (ponto D na Figura 6.1), a nicois cruzados. A fissura macroscópica principal parece ter uma espessura maior devido à colagem das metades do CP antes da preparação das lâminas petrográficas	74
Figura 7.1 – Contagem e energia absoluta acumuladas versus tempo em ensaios monotônicos no monzogranito.	80
Figura 7.2 – Contagem e energia absoluta acumuladas versus tempo em ensaios cíclicos no monzogranito. a) Registro de contagem até o fim do ensaio. b) Zoom do registro de contagem no estágio A. c) Registro de energia absoluta até o fim do ensaio. d) Zoom do registro de energia absoluta no estágio A	81
Figura 7.3 – Contagem e energia absoluta acumuladas versus tempo em ensaios monotônicos no mármore.	83
Figura 7.4 –Contagem acumulada versus tempo em ensaios cíclicos no mármore.....	84
Figura 7.5 – Contagem acumulada versus deslocamento adimensional u/up típica no estágio A. a) Mármore; b) Monzogranito.....	86
Figura 7.6 – Energia absoluta acumulada versus deslocamento adimensional u/up típica no estágio A; a) Mármore; b) Monzogranito.....	87
Figura 7.7 – Contagem acumulada (Figura a) e Energia Absoluta (Figura b) versus deslocamento adimensional u/up em ensaios monotônicos no monzogranito e no mármore	88
Figura 7.8 – Contagem acumulada (Figura a) e Energia Absoluta (Figura b) versus deslocamento adimensional u/up em ensaios cíclicos no monzogranito e no mármore.....	89
Figura 7.9 – Parâmetro RA. a) Definição esquemática geral. b) Relação entre o modo de ruptura e a forma da onda.....	90
Figura 7.10 – Parâmetros AF e IF. a) Frequência média AF. b) Frequência de iniciação IF	91
Figura 7.11 – Frequência de iniciação média IF e RA médio versus tempo no monzogranito. a) Ensaio monotônico no monzogranito. b) Ensaio cíclico no monzogranito.....	93

Figura 7.12 – Frequência de iniciação média IF e RA médio versus tempo no mármore. a) Ensaio monotônico no mármore. b) Ensaio cíclico no mármore	95
Figura 7.13 – Representação conceitual da Transformada de Fourier	98
Figura 7.14 – Transformada de Fourier e espectrograma para um sinal de EA	99
Figura 7.15 – Modificação das ondas de EA pelo meio e pelo sensor.....	101
Figura 7.16– Espectrogramas corrigidos em ensaios monotônicos no monzogranito. a) Monzogranito com alta saturação. b) Monzogranito sem saturação.....	104
Figura 7.17– Espectrogramas corrigidos em ensaios cíclicos no monzogranito. a) Monzogranito com alta saturação. b) Monzogranito com saturação média. c) Monzogranito sem saturação	106
Figura 7.18– Espectrogramas corrigidos em ensaios monotônicos e cíclicos no mármore. a) Monotônico. b) Cíclico	108
Figura 8.1 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em monzogranito	113
Figura 8.2 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em um CP de monzogranito obtido com o software AEwin.....	115
Figura 8.3 - Distribuição típica da energia acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controle 1 a 5 do estágio A apresentado na Figura 8.1. Resultados obtidos com o software AEwin.....	118
Figura 8.4 – Localização típica de fontes de EA na condição danificada final do CP em monzogranito. a) CP Condição final do CP na face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. d) Condição final do CP na face identificada como 456. e) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. f) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456.....	119
Figura 8.5 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em mármore	120
Figura 8.6 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em um CP de mármore obtido com o software AEwin	122
Figura 8.7: Distribuição típica da energia acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A apresentado na Figura 4. Resultados obtidos com o software AEwin.....	124
Figura 8.8 – Localização típica de fontes de EA na condição danificada final do CP em mármore. a) CP Condição final do CP da face identificada como 456. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456. d) Condição final do CP da face identificada como 123. e) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. f) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123	125
Figura 8.9 – Exemplo de cálculo da chegada da onda P em de um sinal através do método AIC. Curva preta representa a variação de AIC em linha vermelha indica o instante de chegada da onda P. a) Detecção da onda P em um sinal inteiro . b) Zoom da região próxima à detecção da onda P do sinal apresentado em a	135
Figura 8.10 – Exemplo de cálculo da chegada da onda P em de um sinal através dos métodos AIC e AIC-TC. a) Detecção da onda P em um sinal inteiro . b) Zoom da região próxima à detecção da onda P do sinal apresentado em a	137
Figura 8.11 – Montagem dos sensores para o cálculo de velocidade de propagação de ondas.....	147

Figura 8.12 – Velocidade de propagação de ondas v_p média obtido em alumínio utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P	148
Figura 8.13 – Coeficiente de variação obtido no cálculo da velocidade de propagação de ondas v_p em alumínio utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P	149
Figura 8.14 – Montagem dos sensores para testes de localização de fontes de EA em um CP de alumínio	150
Figura 8.15 –Localização de fontes de EA obtidas utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P	152
Figura 8.16 – Erro ε_i de minimização médio utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P. a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro.....	153
Figura 8.17 – Erro de localização entre os focos gerados e os focos calculados utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P. a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro.....	153
Figura 8.18 - Comparação da velocidade de propagação de ondas v_p obtida por meio do cálculo direto e da localização de fontes de EA para as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P. a) Média da velocidade de propagação de ondas P. b) Coeficiente de variação associado à velocidade de propagação de ondas	154
Figura 8.19 – Localização de fontes de EA obtidas para o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin. Apresentam-se os resultados do software AEwin para 5 diferentes valores da velocidade de propagação de ondas v_p	157
Figura 8.20 – Erro ε_i médio de minimização na localização obtido para o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin. Apresentam-se os resultados do software AEwin para 5 diferentes valores da velocidade de propagação de ondas v_p . a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro	158
Figura 8.21 –Erro (mm) de localização entre os focos gerados e as fontes localizadas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin. Apresentam-se os resultados do software AEwin para 5 diferentes valores da velocidade de propagação de ondas v_p . a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro.....	159
Figura 8.22 – Força e energia absoluta acumulada versus tempo no estágio A em ensaios em monzogranito. a) Força obtida das leituras da prensa servocontrolada. b) Energia absoluta acumulada das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)	162
Figura 8.23 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA no estágio A em ensaios em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe).....	163
Figura 8.24 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA no estágio A em ensaios em monzogranito. Utilização do software AEwin	165
Figura 8.25: Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controle 1 a 5 do estágio A em ensaios em monzogranito. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe).....	168
Figura 8.26 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em monzogranito	169
Figura 8.27 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo em ensaios monotônicos em monzogranito	170

Figura 8.28 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe).....	172
Figura 8.29 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização do software AEwin	174
Figura 8.30- Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controle 1 a 5 do estágio A em ensaios monotônicos em monzogranito. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)	176
Figura 8.31 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaio monotônico em monzogranito. a) CP Condição final do CP na face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP na face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456	177
Figura 8.32 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios monotônicos em monzogranito. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa	179
Figura 8.33 – Distribuição típica da velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA durante o estágio A de um ensaio em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe).....	182
Figura 8.34 – Distribuição típica da Velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito	183
Figura 8.35 – Variação típica da energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo externo do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d	187
Figura 8.36 – Variação típica da velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo externo do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d.....	192
Figura 8.37 - Força versus tempo típico em ensaios cíclicos em monzogranito	195
Figura 8.38 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo no estágio A em ensaios cíclicos em monzogranito	196

Figura 8.39 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de programa desenvolvido (CLAPWaVe).....	197
Figura 8.40 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização do software AEwin.....	200
Figura 8.41: Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A em ensaios cíclicos em monzogranito. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe).....	202
Figura 8.42 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaios cíclicos em monzogranito. a) CP Condição final do CP, face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP, face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456.....	203
Figura 8.43 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios cíclicos em monzogranito. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa.....	205
Figura 8.44 – Distribuição típica da velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de programa desenvolvido (CLAPWaVe)	207
Figura 8.45 – Variação típica da energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo externo do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d	210
Figura 8.46 – Variação típica da velocidade média móvel associada às fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo externo do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d	213
Figura 8.47 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em mármore.....	215
Figura 8.48 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo em ensaios monotônicos em mármore	216
Figura 8.49 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe).....	219

Figura 8.50 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização do software AEWIn.....	221
Figura 8.51 - Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A em ensaios monotônicos em mármore. a) Resultados obtidos com o software AEWIn. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)	223
Figura 8.52 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaios monotônicos em mármore. a) CP Condição final do CP, face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP, face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEWIn na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o software AEWIn na face identificada como 456.....	224
Figura 8.53 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios monotônicos em mármore. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEWIn, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEWIn, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa	226
Figura 8.54 – Distribuição típica da velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore	229
Figura 8.55 – Variação típica da Energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região central próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d	232
Figura 8.56 – Variação típica da velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região central próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d.....	236
Figura 8.57 – Força versus tempo típica em ensaios cíclicos em mármore	239
Figura 8.58 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo em ensaios cíclicos em mármore ..	240
Figura 8.59 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe)	241
Figura 8.60 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização do software AEWIn.....	243

Figura 8.61 - Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A em ensaios cíclicos em mármore. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)..... 244

Figura 8.62 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaios cíclico em mármore. a) CP Condição final do CP, face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP, face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456..... 246

Figura 8.63 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios cíclicos em mármore. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa..... 247

Figura 8.64 – Distribuição típica da velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore..... 249

Figura 8.65 – Variação típica da Energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região central próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d..... 251

Figura 8.66 – Variação típica da velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região central próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d 253

Figura 9.1 – Histogramas típicos de resistência intrínseca das rochas. a) Monzogranito. b) Mármore. As tensões são adimensionalizadas pela tensão 258

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Valores médios de rigidez Ku para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	46
Tabela 5.2 - Valores médios de rigidez Ku para o mármore. A rigidez Ku média é definida para quatro trechos pré-pico. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	48
Tabela 5.3 - Valores médios de rigidez Ku para o mármore. A rigidez Ku média é definida para quatro trechos pré-pico. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	48
Tabela 5.4 - Valores médios para a rigidez Kv para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.2. Adiciona-se ao código ID a identificação do bloco de extração das amostras	50
Tabela 5.5 - Valores médios de rigidez Kv para o mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	50
Tabela 5.6 - Propriedades elásticas e raio de curvatura do berço curvo utilizado nos ensaios	52
Tabela 5.7 - Resumo das propriedades elásticas médias E e ν para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4. Adiciona-se ao ID a identificação do bloco de extração das amostras	56
Tabela 5.8 - Resumo as propriedades elásticas médias E e ν para o mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	56
Tabela 5.9 - Resumo dos valores de tenacidade à fratura K_{IC} média para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4. Adiciona-se ao ID a identificação do bloco de extração das amostras	64
Tabela 5.10 - Resumo dos valores de tenacidade à fratura K_{IC} média para o mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4	64
Tabela 6.1 - Caracterização petrográfica do mármore	66
Tabela 6.2 - Caracterização petrográfica do monzogranito	67
Tabela 8.1 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio monotônico em monzogranito. Definição das zonas de acordo à Figura 8.35	188
Tabela 8.2 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio cíclico em monzogranito. Definição das zonas de acordo a Figuras 8.45 e 8.46	211
Tabela 8.3 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio monotônico em mármore. Definição das zonas de acordo a Figuras 8.55 e 8.56	233
Tabela 8.4 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio cíclico em mármore. Definição das zonas de acordo a Figuras 8.65 e 8.66	252
Tabela 9.1 - Parâmetros estatísticos associados à qualidade de ajuste dos histogramas de resistência intrínseca σ_1/σ_{1pico} da Figura 9.1 a uma distribuição de Weibull	258
Tabela 9.2 - Resumo dos parâmetros estatísticos médios associados à qualidade de ajuste dos histogramas de todos os ensaios utilizados nas análises de resistência intrínseca σ_1/σ_{1pico} uma distribuição de Weibull	259

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	A TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	11
2.1	Princípios físicos da emissão acústica EA.....	11
2.2	O sistema de detecção de EA.....	11
2.3	Instalação e calibração dos sensores.....	12
2.4	Algoritmo do software para a coleta de dados	13
2.4.1	O Limiar de Referência - LR	14
2.4.2	Filtros passa baixa e passa alta.....	15
2.4.3	Parâmetros de tempo	15
2.4.4	Parâmetros de amostragem.....	16
2.5	Ajuste do LR e saturação na coleta de dados.....	17
2.6	Procedimento de ajuste dos parâmetros de aquisição de emissões.....	18
2.7	Opções de aquisição de dados	18
2.7.1	Parâmetros de EA (ou características do sinal)	19
2.7.2	Formas de onda.....	21
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	23
3.1	Rochas utilizadas.....	23
3.2	Montagem típica dos ensaios – instrumentação	23
3.2.1	Instrumentação para o registro de deslocamentos	26
3.2.2	Instrumentação para o monitoramento de EA.....	26
3.3	Descrição do programa de ensaios	28
3.4	Ensaio adicionais.....	30
3.5	Lâminas petrográficas.....	31
4	CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO.....	33
5	ANÁLISES BASEADAS NA CURVA FORÇA - DESLOCAMENTO.....	37

5.1	Caracterização do comportamento força-deslocamento.....	37
5.2	Variação da rigidez em relação ao deslocamento no monzogranito e no mármore	44
5.3	Comparação de ensaios com e sem controle de deslocamento	51
5.4	Estimativa das propriedades elásticas	52
5.5	Estimativa da tenacidade à fratura	59
6	ANÁLISE PETROGRÁFICAS	65
6.1	Caracterização geológica das rochas em condição intacta.....	66
6.2	Caracterização do microfissuramento natural e induzido nas rochas.....	68
6.2.1	Monzogranito	68
6.2.2	Mármore.....	72
7	ANÁLISES BASEADAS NOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	77
7.1	Análises baseadas nos parâmetros EA	77
7.1.1	Contagem e energia absoluta acumulada.....	78
7.1.2	Frequência de iniciação e ângulo de subida	90
7.2	Análises baseadas nas formas de onda no domínio das frequências	96
7.2.1	Conceitos gerais da transformada de Fourier e geração de espectrogramas.....	97
7.2.2	Influência do meio, do sensor e do processador no registro de frequências.....	100
7.2.3	Caracterização do fissuramento através de espectrogramas	103
8	LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS FONTES DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	111
8.1	Localização através do software AEwin	111
8.1.1	Aspectos teóricos da localização de fontes de EA.....	111
8.1.2	Determinação da velocidade de propagação de ondas P - v_p	112
8.1.3	Padrão de microfissuramento em monzogranito	113
8.1.4	Padrão de microfissuramento no mármore	120
8.1.5	Deficiências observadas no algoritmo de localização do software AEwin.....	125
8.2	Desenvolvimento do programa de localização proposto – programa desenvolvido (CLAPWaVe)	128
8.2.1	A velocidade de propagação das ondas P - v_p	129

8.2.2	O algoritmo de minimização utilizado	129
8.2.3	Utilização das formas de onda salvas durante monitoramento com EA	130
8.2.4	Metodologias para a estimativa da chegada da onda P.....	131
8.2.5	Criação de caixas de clusters	138
8.3	O Algoritmo do programa de localização desenvolvido (CLAPWaVe).....	138
8.3.1	Parâmetros utilizados	138
8.3.2	Procedimento geral do programa e fases de iteração incorporadas	139
8.3.3	Filtragem de dados	143
8.4	Validação do programa desenvolvido (CLAPWaVe) – testes em alumínio.....	145
8.4.1	Influência da metodologia de estimativa da chegada da onda P na velocidade de propagação de ondas - v_p	146
8.4.2	Influência da metodologia utilizada na estimativa da chegada da onda P na localização.....	149
8.4.3	Comparação dos resultados de localização entre software AEwin e programa desenvolvido (CLAPWaVe)	155
8.5	Resultados obtidos com o programa de localização desenvolvido (CLAPWaVe)	159
8.5.1	Ensaio monotônicos em monzogranito	161
8.5.2	Ensaio cíclicos em monzogranito.....	194
8.5.3	Ensaio monotônicos em mármore.....	214
8.5.4	Ensaio cíclicos em mármore	238
9	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA INTRINSECA DE ROCHAS POR MEIO DE LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE EA	254
9.1	Metodologia de cálculo da distribuição da resistência intrínseca em CPs de rocha ...	255
9.1.1	Seleção e filtragem das fontes de EA	256
9.1.2	Cálculo da resistência associada a cada fonte	257
9.2	Histogramas de distribuição da resistência intrínseca	257
10	CONCLUSÕES.....	261
	REFERÊNCIAS	267
	APÊNDICE A.....	277

1 INTRODUÇÃO

Na maioria das aplicações práticas da mecânica das rochas, os estados tensionais atuantes em um elemento de volume representativo de rocha são de compressão. Do ponto de vista microscópico pequenos defeitos ou microfissuras no interior das rochas agem como concentradores locais de tensão (Griffith, 1920; Inglis, 1913; Kirsch, 1898). Assim, ainda nessas condições de tensão são as trações geradas pelos microdefeitos ou microfissuras nas rochas que deflagram o processo de ruptura da mesma (Eberhardt et al., 1998; Labuz; Cattaneo; Chen, 2001; Zietlow; Labuz, 1998), afetando globalmente sua resistência e rigidez. Na medida em que as rochas são submetidas a altos níveis de tensão com pouco confinamento, o efeito de microfissuramento é acentuado. Por esta razão, análises experimentais do processo de microfissuramento em diferentes tipos de rocha são essenciais para o entendimento do processo de ruptura em rochas.

O comportamento de rochas submetidas a tensões de tração tem sido estudado através de diferentes pontos de vista. O ensaio de compressão diametral tem sido amplamente utilizado para determinar a resistência à tração de matérias quase frágeis, como rochas e concreto (LAVROV; VERVOORT, 2002; LI; WONG, 2013), pois possibilitam geração de tração sem as dificuldades envolvidas na execução do ensaio de tração direta. Além disso, a localização previsível da superfície de ruptura dos corpos de prova (CPs) ensaiados em compressão diametral, permite a adequada montagem do ensaio. Celestino, Bortolucci e Nóbrega (1995) apresentaram um arranjo de controle do deslocamento do ensaio que permite a obtenção da curva completa força – deslocamento diametral. Dessa maneira, tanto a instrumentação para o registro das deformações do corpo de prova quanto os sensores para o monitoramento com emissão acústica (EA) podem ser dispostos de forma a se obter um aprimorado conjunto de informações a respeito do processo de fissuramento microscópico e macroscópico.

A determinação da resistência à tração por meio do ensaio de compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro, foi proposta por Lobo Carneiro em 1947. O ensaio surgiu da necessidade de se avaliar a capacidade dos rolos de concreto de 60cm de diâmetro que iriam a ser utilizados para deslocar a igreja Igreja de São Pedro no Rio de Janeiro (BALBO, 2013). Os resultados obtidos por Carneiro, originalmente publicados na França, são atualmente normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). No ensaio brasileiro o estado de tensões em qualquer ponto (x,y) do disco pode ser obtido com as expressões propostas por Hertz em 1859 (PROCOPIO; ZAVALIANGOS; CUNNINGHAM, 2003) para discos e esferas de material elástico submetidas a compressão diametral.

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot t} \cdot \left[\frac{x^2 \cdot (r-y)}{\beta_1^4} + \frac{x^2 \cdot (r+y)}{\beta_2^4} - \frac{1}{2 \cdot r} \right] \quad (1.1)$$

$$\sigma_y = \frac{-2 \cdot F}{\pi \cdot t} \cdot \left[\frac{(r-y)^3}{\beta_1^4} + \frac{(r+y)^3}{\beta_2^4} - \frac{1}{2 \cdot r} \right] \quad (1.2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot t} \cdot \left[\frac{x \cdot (r-y)^2}{\beta_1^4} + \frac{x \cdot (r+y)^2}{\beta_2^4} \right] \quad (1.3)$$

Em que:

$$\beta_1^2 = (r - y)^2 + x^2 \quad (1.4)$$

$$\beta_2^2 = (r + y)^2 + x^2 \quad (1.5)$$

Nessas equações t é a espessura do CP, F é a força aplicada no instante em que a fonte de EA é calculada, r é o raio CP e x e y são as coordenadas das fontes de EA nos eixos X e Y, definidos no esquema apresentado na Figura 9.1.

Figura 1.1 – Representação esquemática dos parâmetros envolvidos no cálculo do estado de tensões em um disco submetido a compressão diametral

Por outro lado, têm sido desenvolvidas pesquisas que utilizam a mecânica da fratura com o objetivo de explicar o processo de propagação de microfissuras em rochas (FAIRHURST, 1964; GRIFFITH, 1920; HOEK; BIENIAWSKI, 1965; INGLIS, 1913; LAJTAI, 1971; PALUSZNY; MATTHÄI, 2009). Inglis (1913) estudou a distribuição dos esforços ao redor de uma abertura elíptica, dentro de uma placa submetida a esforços de tração perpendiculares ao eixo principal maior da elipse. Griffith (1920) usou o trabalho de Inglis (1913) para avaliar a propagação de uma fissura com base no balanço energético, o qual deu origem à estimativa da

propagação de uma fissura através do fator de intensidade de tensão e da tenacidade à fratura. O primeiro reflete o nível de tensão atuante nas proximidades da ponta da trinca, enquanto que o segundo reflete a resistência do material à propagação da mesma. No caso de campos de tensões de compressão o entendimento do fenômeno não é tão intuitivo quanto nos casos anteriores. Inglis (1913) e Latjai (1971) avaliaram a propagação de uma trinca elíptica inclinada em relação à tensão principal maior, sejam estas de tração ou compressão. Hoek e Bieniawski (1965) avaliaram o processo de propagação de uma trinca elíptica submetida a compressão biaxial. Paluszny e Matthäi (2009) modelaram a propagação de microfissuras múltiplas através da aplicação da técnica dos elementos finitos combinada com os postulados da mecânica da fratura. Embora essas pesquisas tenham conseguido explicar parcialmente a ruptura das rochas, nelas se abordam somente alguns aspectos particulares do fenômeno de microfissuramento que não permitem caracterizar o processo de maneira global. Aliás, a definição da função de cada fissura ou defeito microscópico da rocha no processo de microfissuramento, assim como a sua contribuição ao comportamento global após a coalescência, não são simples de se modelar.

Segundo outro ponto de vista, a mecânica do dano descreve localmente a evolução de microfissuras continuamente distribuídas através de uma variável chamada de dano (DIEDERICHS, 1999; GUELLO, 2002; PROENÇA, 1992). O dano pode ser quantificado através de uma redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como, por exemplo, a rigidez do material. Têm sido desenvolvidos alguns modelos de comportamento (AL-RUB; VOJIADJIS, 2009; AL-RUB; KIM, 2010; CICEKLI; VOJIADJIS; AL-RUB, 2009; MAZARS, 1984; MAZARS; PJAUDIER-CABOTO, 1989), porém, não é o objetivo dessa teoria nem dos modelos fornecer informação sobre a propagação das fissuras, assim, o aspecto microscópico não pode ser resolvido através da utilização destas teorias.

Diversos trabalhos de simulação numérica têm sido desenvolvidos com o intuito de se estudar o processo progressivo de fraturamento que leva à ruptura de rochas ou materiais semelhantes às rochas submetidas a ensaios de compressão diametral (DIEDERICHS, 1999; LAVROV et al., 2002; LI; WONG, 2013; LIU; KOU; LINDQVIST, 2002; LIU et al., 2004, 2007; LANARO; SATO; STEPHANSSON, 2009; YUE et al., 2003; ZHU; TANG, 2004). As diferentes simulações mostram que o microfissuramento pode começar distribuído aleatoriamente tanto no eixo diametral ou na vizinhança dos pontos de aplicação de carregamento, mas, quando o carregamento aumenta, o microfissuramento avança pelo eixo diametral vertical gerando uma fissura macroscópica. Diederichs (1999), Lanaro, Sato e Stephansson (2009) e Yue et al. (2003) indicam que a aleatoriedade na designação da resistência à tração da rocha intacta em cada ponto do modelo do CP influencia o ponto de maior concentração de tensão e, portanto, o local onde o microfissuramento se inicia. Li e Wong (2013) utilizaram um modelo homogêneo e elástico linear tridimensional e concluíram que a distribuição de tensões ao longo da

espessura do CP não é uniforme, mas sim simétrica. No entanto, a heterogeneidade própria do material faz com que o microfissuramento não seja simétrico e que a fissura macroscópica gerada apresente o padrão tortuoso observado experimentalmente. Contudo, os resultados e conclusões dessas simulações todas são dependentes da utilização de uma distribuição espacial de propriedades mecânicas do material na escala do CP, sendo esta definida aleatória ou estatisticamente nas simulações. Nenhum dos estudos acima referidos utiliza resultados experimentais obtidos na escala do CP como input para tais distribuições, portanto, não podem representar de maneira fiel a distribuição de propriedades no interior de uma rocha. Além disso, em um ensaio convencional de compressão diametral apenas se pode aferir o comportamento de rochas em escala macroscópica, fornecendo-se informações gerais, tais como o carregamento de ruptura e a sua deformação. Não obstante, o conhecimento real do processo de progressão do dano, desde a escala microscópica até a escala macroscópica, só pode ser aferido com resultados como os que são mostrados neste trabalho. Assim, os resultados apresentados nesta pesquisa fornecem informações da variabilidade da resistência da rocha em escala microscópica indispensáveis para a obtenção das distribuições necessárias para se conseguir modelagens realistas do processo de microfissuramento.

A determinação dos padrões de microfissuramento é ainda um assunto não muito bem explicado (LI; WONG, 2013), sendo preciso avançar em sua caracterização a partir da avaliação de rochas reais e não somente rochas idealizadas. Têm sido utilizadas diversas metodologias para estudar a propagação e a coalescência de microfissuras no interior dos CPs submetidos a carregamentos, tais como o microscópio eletrônico de varredura, o microscópio eletrônico óptico e a emissão acústica. Nas duas primeiras é preciso selecionar um determinado nível de tensão e cortar amostras para analisar o fissuramento (CHANG; LEE, 2004), enquanto que a emissão acústica (EA) é uma técnica não destrutiva que permite acompanhar o processo de dano no volume do corpo de prova ao longo de todo o ensaio sem perturbá-lo (CHANG; LEE, 2004; KÖPPEL; GROSSE, 2000; LABUZ; CATTANEO; CHEN, 2001; ZIETLOW; LABUZ, 1997).

Por outro lado, a geração de microfissuramento no interior de materiais frágeis e quase frágeis, como rocha e concreto, quando submetidos a carregamento, produz liberação de energia na forma de ondas elásticas chamadas de emissões acústicas (LABUZ; CATTANEO; CHEN, 2001). O monitoramento desses sinais, incluindo a sua localização e a sua intensidade, é fundamental para se conseguir o entendimento quantitativo do processo de propagação de microfissuras, sua coalescência e geração de fissuras macroscópicas. Tais emissões podem ser registradas por sensores colocados na superfície do CP (KÖPPEL; GROSSE, 2000). Assim, a aplicação da técnica de emissão acústica em ensaios convencionais permite acompanhar e estudar o processo de propagação de dano no interior do CP, sem perturbá-lo.

A emissão acústica tem sido utilizada para estudar o processo de microfissuramento por compressão em materiais frágeis e quase frágeis, com diferentes objetivos de estudo. Os registros de EA são obtidos através da leitura de trechos do sinal emitido pela rocha quando é submetida a carregamento. Estes trechos do sinal podem ser analisados por meio de características mensuráveis do sinal, tais como amplitude, energia, duração, contagem de eventos ou hits, tempo de subida, frequência média, as quais são chamadas de parâmetros de EA. Por outro lado, os trechos do sinal podem ser guardados para ser analisados de maneira integral através do registro de voltagem no tempo, que representa o deslocamento no tempo recolhido pelo sensor e transformado em um sinal eletrônico. Este tipo estudo é chamado de análise das formas de onda.

Pesquisadores têm utilizado a técnica de EA para o monitoramento e caracterização do processo de ruptura em rochas e concreto de forma qualitativa e quantitativa. A avaliação qualitativa é feita por meio das relações entre o processo de microfissuramento e os parâmetros de EA em rocha e concreto (AGGELIS, 2011; CARPINTERI; CORRADO; LACIDOGNA, 2013; CHENG; MITRA; HAGAN, 2012; EBERHARDT et al., 1998; KHAZAEI; HAZZARD; CHALATURNYK, 2015; OHNO; OHTSU, 2010; OHTSU; ISODA; TOMODA, 2007; PEHOVAZ, 2009; SCHIAVI et al., 2009; SOULIOTI, 2009). Análises quantitativas do processo de microfissuramento baseiam-se na localização tridimensional de fontes de EA, aplicada em ensaios uniaxiais, biaxiais, triaxiais, flexão e compressão diametral assim como em escavações subterrâneas (AKER et al., 2014; BUNGER et al., 2015; CAI; KAISER; MARTIN, 2001; CARVALHO, 1999; CARVALHO; LABUZ, 2002; CARLSON; YOUNG, 1993; CHANG, LEE, 2004; JIAN-PO et al., 2015a; 2015b; KAO; CARVALHO; LABUZ, 2011; LABUZ; CATTANEO; CHEN, 2001; LABUZ; DAI; SHAH, 1996; LEI et. al., 2000; LOCKNER et. al., 1991; SATOH; LEI, 2006; SHAH; LABUZ, 1995; SHUAI et al., 2012; SURDI, 2010; ZIETLOW; LABUZ, 1998). No entanto, as descrições feitas nessas pesquisas estão focadas ou nos parâmetros de EA ou na localização de fontes de EA, mas não se apresentam análises que aliem ambos os aspectos. Todavia, a literatura apresenta algumas pesquisas que envolvem análises dos parâmetros de EA e localização de fontes de EA (BENSON et al., 2007; MEGLIS; CHOWS; YOUNG, 1995; MURALIDHARA et al., 2010; THAM et al., 2005; ZANG et al., 1998). A fim de se aprimorar a caracterização do processo de microfissuramento em rochas, as análises dos parâmetros de EA têm sido combinadas com análises petrográficas (LAVROV et al., 2002; PŘIKRYL et al., 2003), porém, apenas algumas pesquisas que incluam parâmetros de EA, petrografia e localização (ADELINET et al., 2014; LEI et al., 2004), foram publicadas. Contudo, nessas análises considera-se apenas uma pequena porção dos sinais coletados, focando-se em alguns trechos definidos do processo de carregamento, ou incluindo-se análises petrográficas preparadas a partir de CPs de rocha intacta (antes de ser ensaiados). Isso impede a caracterização global da geração e coalescência do dano na rocha sob carregamento estático. Cabe ressaltar que essas

técnicas não têm sido aplicadas conjuntamente na caracterização do processo de microfissuramento em ensaios de compressão diametral.

EA tem sido aplicada ao monitoramento de ensaios de compressão diametral por meio de localização de fontes de EA (FALLS et al., 1993; LABUZ; CATTANEO; CHEN, 2001). Falls et al. (1993) localizaram fontes de EA em CPs de granito, enquanto que Labuz, Cattaneo e Chen (2001) localizaram fontes de EA em CPs de concreto e aplicaram controle do deslocamento transversal ao carregamento nos seus ensaios a fim de se obter o trecho pós-pico. Ambas as pesquisas possuem foco no padrão de microfissuramento de CPs antes e ao redor da resistência de pico, porém, nem a caracterização completa do processo de dano durante os diferentes estágios do ensaio, incluindo o trecho pós-pico, nem a caracterização do padrão de microfissuramento na espessura do CP, foram realizadas. Em adição, o uso de algum parâmetro para agrupar as fontes de EA, permitindo a visualização das áreas mais importantes de microfissuramento e o uso de análises petrográficas para acompanhamento do processo de ruptura dos CPs de rocha sob carregamento, não foram adotados previamente em ensaios de compressão diametral.

Por outro lado, os programas de localização tridimensional de fontes de EA aplicados na literatura não são suficientemente ajustados, considerando-se a determinação simplificada da chegada da onda P a cada sensor e admitindo-se ser constante a velocidade de propagação de ondas no CP ao longo do ensaio (na realidade, na medida em que o dano aumenta a velocidade de propagação de ondas deve mudar). Além disso, muitas vezes os algoritmos de busca dos focos de EA são pouco eficientes, o que resulta em uma fonte a mais de erro na localização. A quantidade de sinais emitidos pela rocha durante o processo de microfissuramento assim como a taxa de emissões pode ser muito alta (quantidade de sinais emitidos da ordem de dezenas ou centenas de milhares ou mais), a localização tridimensional de fontes de EA requer muito tempo de computadores com grande capacidade de processamento. Contudo, os avanços na tecnologia possibilitam a aplicação de técnicas de estimativa da chegada da onda P mais ajustadas assim como de algoritmos aprimorados de localização tridimensional. Diversas pesquisas têm sido feitas considerando-se um ou ambos os aspectos antes referidos (BUNGER et al., 2015; CARVALHO, 1999; CHEN et al., 2011; HAN et al., 2015; INCE et al., 2009; IVERSON; KAO; LABUZ, 2007; JIAN-PO et al., 2015a; 2015b; KUNDU, 2014; XU; LACIDOGNA; CARPINTERI, 2013), porém sem incorporar-se o cálculo da velocidade de propagação das ondas das fontes de EA. A incorporação do cálculo da velocidade de propagação das ondas do material ao algoritmo de localização tem sido adotada em algumas pesquisas (CIAMPA; MEO, 2010; NIRI; SALAMONE, 2012; YAN; TANG, 2015), mas apenas para o caso bidimensional, focando-se em placas de comportamento tanto isotrópico quanto anisotrópico. Para o caso tridimensional, algumas pesquisas têm considerado indiretamente o cálculo da velocidade (AKER et al.,

2014; SALINAS et al., 2010). AKER et al. (2014) utilizaram grupos de sensores separadamente para o cálculo da velocidade de propagação das ondas e para a localização das fontes de EA. Assim, os autores incorporam a informação das diferentes velocidades obtidas em diferentes estágios do ensaio como input para calcular as coordenadas das fontes. Salinas et al. (2010) incorporam no algoritmo de localização a obtenção da velocidade de propagação das ondas, porém, a utilizam apenas para ajustar o tempo de chegada da onda P a cada sensor. Dessa maneira, quando a diferença entre a velocidade de propagação de ondas calculada e a medida inicialmente é pequena o suficiente, a iteração termina e o foco é obtido. Como visto, as propostas dessas duas pesquisas não permitem a obtenção da velocidade de propagação das ondas para cada fonte de EA ao longo do tempo. Dong e Li (2013) e Li e Dong (2014) apresentam uma proposta numérica e uma teórica para o cálculo das fontes de EA e da velocidade de propagação das ondas do sistema, considerando-se as diferenças entre a chegada da onda P ao primeiro sensor que recebe o sinal e os restantes sensores como informação previamente conhecida. Assim, embora a estimativa ajustada desses tempos seja fundamental na exatidão da localização das fontes de EA (EATON; PULLIN; HOLFORD, 2012), os algoritmos de localização propostos por Dong e Li (2013) e Li e Dong (2014) não incluem alguma metodologia para se obter os tempos de chegada da onda P aos sensores. Além disso, a validação dos algoritmos desses autores (DONG; LI, 2013; LI; DONG, 2014) é feita a partir de experimentos numéricos e não a partir de ensaios reais em materiais nos que realmente tenha sido induzido algum nível de dano. Assim, a variação da velocidade de propagação das ondas na medida em que o dano ocorre no interior do material não é usualmente avaliada. Contudo, apenas algumas das pesquisas antes definidas aplicam a metodologia de localização tridimensional em CPs de rocha e em nenhuma delas o algoritmo aprimorado foi aplicado ao ensaio de compressão diametral. Em consequência, o desenvolvimento de um programa de localização tridimensional de fontes de EA que incorpore metodologias aprimoradas para a estimativa da chegada da onda P, algoritmos de busca de fontes de EA mais eficientes assim como o cálculo da velocidade de propagação das ondas no tempo, como o apresentado nesta pesquisa, representa um avanço significativo no estado da arte da caracterização dos processos de ruptura de rochas.

A análise quantitativa dos sinais de EA no domínio das frequências representa um aspecto importante no estudo do processo de microfissuramento em materiais frágeis e quase-frágeis, pois o espectro de frequências contém informação associada às características dos materiais, o mecanismo de ruptura e o padrão de propagação dos sinais (WANG; ZHAO, 1986; WANG et al., 2004). Algumas pesquisas desse tipo têm sido desenvolvidas em concreto (ARASTEH et al., 1997; MCLASKEY; GLASER; GROSSE, 2007; SCHIAVI et. al., 2009), concreto com fibras (VAN HAUWAERT;

DELANNAY; THIMUS, 1996) assim como em algumas rochas (HE; MIAO; FENG, 2010; JI et al., 2012; OHNAKA; MOGI, 1982).

No entanto, nessas pesquisas obtiveram-se diferentes conclusões a respeito da faixa de frequência associada ao processo de microfissuramento. Assim, em algumas dessas pesquisas a faixa de frequências considerada foi muito estreita para permitir a obtenção de conclusões apropriadas. Outras pesquisas indicam que as emissões acústicas apresentam um conteúdo amplo de frequências, enquanto que em outras foram registradas faixas predominantes associadas ao microfissuramento em cada material. Assim, os resultados nessa linha de pesquisa têm sido conflitivos, com análises de frequências muito influenciadas pelas características dos sensores, sendo necessários assim, sensores de banda larga, os quais podem ser muito dispendiosos (CHENG; MITRA; HAGAN, 2012). Cabe ressaltar, também, que nessas pesquisas considera-se apenas uma pequena porção de sinais coletadas nos ensaios, que nem sempre conseguem registrar o trecho pós pico ou o comportamento cíclico do material. Assim, a porção de informação realmente avaliada é pequena, devido ao alto custo computacional, o que impede a avaliação global dos espectros de frequências durante o processo de microfissuramento dos CPs. O acompanhamento do processo de microfissuramento em CPs de rocha ao longo de um ensaio de compressão diametral, como apresentado nesta pesquisa, é apropriado para se chegar a conclusões adequadas a respeito da frequência, frequências ou faixas de frequência características do processo de microfissuramento em materiais frágeis como são as rochas.

As pesquisas que consideram o estudo das características dos sinais coletados no domínio das frequências não incorporam análise dos parâmetros de EA, análises petrográficas nem localização tridimensional das fontes de EA. Pelo exposto, a realização de análises qualitativas e quantitativas apuradas dos sinais de EA assim como o desenvolvimento de análises conjuntas que permitam caracterizar globalmente o processo de microfissuramento e relacioná-lo com o carregamento, os deslocamentos registrados e o macro fissuramento gerado ao longo do ensaio, são aspectos não tratados na literatura.

Nesta pesquisa apresenta-se a caracterização do processo de microfissuramento e dos padrões de microfissuramento de uma rocha ígnea e uma rocha metamórfica submetidas a ensaios monotônicos e cíclicos de compressão diametral com controle do deslocamento diametral transversal ao carregamento. As descrições do processo de ruptura das rochas desde o fissuramento microscópico ao macroscópico baseiam-se nas análises complementares dos parâmetros de EA (amplitude, energia absoluta, contagem, frequência média e tempo de subida), localização tridimensional das fontes de EA, análises no domínio das frequências e análises petrográficas de CPs submetidos a diferentes estágios de carregamento (condição intacta, pré-pico e pós-pico). Esses aspectos todos são incorporados com o objetivo de se obter a caracterização global do processo progressivo de dano nas rochas durante os

ensaios, incluindo os trechos pré-pico, pico e pós-pico de carregamento, assim como a avaliação do início do microfissuramento em ambas as rochas e da progressão do padrão de dano através da espessura dos CPs. A localização tridimensional é aprimorada por meio da incorporação de um parâmetro de energia (ou energia absoluta) que permite agrupar as fontes de EA, facilitando, assim, a identificação das regiões de maior acúmulo de dano no volume do CP e a sua progressão durante o ensaio. A localização das fontes de EA é feita por meio de duas metodologias. A primeira considera a utilização de um programa de localização tradicional incorporado no software AEwin® da empresa Physical Acoustic South America (PASA) e que permite o cálculo das coordenadas das fontes de EA, considerando-se uma velocidade de propagação de ondas do CP constante durante o ensaio e igual à calculada para o CP na condição intacta. A segunda metodologia considera o desenvolvimento de um programa de localização aprimorado que utiliza uma metodologia mais ajustada para o cálculo da onda P, um algoritmo de localização mais eficiente e que permite a obtenção das coordenadas das fontes de EA e das velocidades de propagação das ondas durante o ensaio. Esse programa desenvolvido (*Crack Location by Acoustic emission with P wave velocity determination*, CLAPWaVe) é inicialmente avaliado e validado em testes em materiais homogêneos e isotrópicos sem induzir dano e logo é aplicado à caracterização do microfissuramento nos dois tipos de rochas utilizadas nesta pesquisa. Assim, utilizando-se o programa desenvolvido (CLAPWaVe) avalia-se o padrão de microfissuramento nos CPs de rocha assim como a variação espacial da velocidade de propagação de ondas no CP, durante o ensaio.

Por outro lado, a mecânica do dano permite modelar a variação da resistência de materiais quase frágeis (concreto ou rocha), na medida em que o dano vai se acumulando no seu interior. Isto é feito através da diminuição de alguma propriedade mecânica do material de acordo com uma variável chamada de dano, que incorpora todos os microdefeitos e microfissuras existentes no seu interior de uma maneira global. No entanto, para poder modelar adequadamente o efeito das microfissuras na relação de resistência versus deslocamento das rochas, é necessário começar pela caracterização dos processos de microfissuramento, acompanhando o processo de ruptura em macroescala com o microfissuramento e dano em microescala. Este é o intuito da presente pesquisa. Em futuras pesquisas deve-se tomar a caracterização obtida nesta tese e incorporá-la na variável de dano, permitindo assim conectar os processos em macroescala com aqueles que acontecem em microescala e aprimorando a calibração às relações constitutivas do material que são utilizadas nas modelagens.

2 A TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA

2.1 Princípios físicos da emissão acústica EA

Define-se como emissão acústica (EA) uma onda elástica transiente gerada pela rápida liberação de energia de uma fonte localizada no interior do material submetido a algum estado de tensões (ABENDI, 2011; CARVALHO, 1999). Tais sinais de EA contêm informações relacionadas tanto às fontes microscópicas da onda quanto o meio através do qual elas viajam (CARVALHO, 1999), podendo ser coletadas por meio de sensores dispostos na superfície desse material. Lockner et al. (1993) afirma que tanto a EA quanto a sismologia possuem conceitos semelhantes, no entanto a diferença é a escala na qual cada uma delas se desenvolve.

Pelo fato de se tratar de uma técnica passiva e não destrutiva, a AE tem sido utilizada tanto em laboratório quanto em obras para o monitoramento de diversas estruturas e tipos de materiais.

2.2 O sistema de detecção de EA

O equipamento de EA consiste em um conjunto de sensores e amplificadores e uma ou mais placas dispostas no interior de um computador, as quais detectam o movimento induzido pelas ondas ao chegar à superfície do corpo de prova (CP).

Os sensores piezoelétricos geram tensões elétricas como resultado da deformação mecânica. Por serem sensíveis ao deslocamento, os mesmos contêm um elemento transdutor que transforma ondas de EA em voltagem elétrica (ABENDI, 2011). Desta forma, o fenômeno de deslocamento é estudado através da voltagem. É importante salientar que a alta fidelidade dos sensores permite que a voltagem registrada no equipamento reproduza o movimento da onda incidente (ABENDI, 2011). Geralmente, a voltagem dos sinais detectados pelos sensores é muito pequena, assim é utilizado um amplificador para aumentar a sua intensidade e facilitar a sua medição (ABENDI, 2011). Para a amplificação do sinal, é programado um valor para o “ganho” no amplificador, o qual é definido como a relação entre a voltagem de saída e a voltagem de entrada no mesmo.

Os sinais de EA são captados pelos sensores, amplificados e logo chegam à placa de análise contida dentro de um computador, onde é feita sua aquisição, processamento e o armazenamento (ver

Figura 2.1). A placa de análise coleta e processa os sinais de EA de acordo com a programação do software de coleta de dados (ver itens 3.4 e 3.2.2).

Figura 2.1 – Diagrama esquemático do sistema de coleta e processamento de sinais de EA

Para a obtenção de sinais de EA de qualidade, devem ser considerados alguns aspectos importantes tanto no processo de instalação dos sensores no CP (ver item 2.3) quanto na programação inicial do software que fará a coleta de dados (ver item 3.4).

2.3 Instalação e calibração dos sensores

Com o intuito de garantir a adequada transmissão dos sinais de EA através do CP, um agente de acoplamento na interface deve ser utilizado. Este agente é essencial para preencher o espaço entre o sensor e o CP, pois o mesmo é responsável por manter alta e estável a sensibilidade de cada sensor (ABENDI, 2011). No entanto, deve-se aplicar uma camada fina a fim de se evitar que as propriedades do acoplamento influenciem a transferência do sinal, atenuando-a. Alguns exemplos de acoplantes utilizados são: adesivos, graxas e vaselina. Nos casos em que o agente de acoplamento utilizado não é adesivo, deve-se utilizar algum dispositivo acessório para fixar o sensor ao CP. Fita adesiva, fita de borracha e ímãs são elementos comumente utilizados para estes fins.

Após a montagem dos sensores em qualquer estrutura ou CP, é necessário conferir o correto acoplamento dos mesmos, assim como a correta montagem de todo o sistema de coleta de informações (conexões entre o sensor e o amplificador e entre o amplificador e a placa), o que é feito

através da calibração. Diferentes técnicas de calibração têm sido utilizadas, sendo a técnica da “quebra de grafite” a mais comumente aplicada (HARDY, 2003). Esta técnica consiste em gerar uma fonte fictícia e padronizada de EA por meio da quebra de grafite. Com o intuito de manter a reprodutibilidade da emissão da fonte, as características do grafite a ser utilizada são unificadas. O padrão mais típico é o uso de grafite de dureza 2H e diâmetro de 0.5mm, projetado 3mm em comprimento cada vez que a quebra é feita (HARDY, 2003). Este procedimento é aplicado antes do início de um ensaio ou teste, principalmente em laboratório e da seguinte forma: quebra-se o grafite do lado de cada sensor instalado e se confere se a amplitude do sinal recebida é a máxima que o sensor pode receber, garantindo desta forma o adequado acoplamento do sensor e correta transferência dos sinais de EA. Repete-se o procedimento pelo menos 3 vezes em cada sensor instalado e se compara a calibração de todos os sensores. Se todos os sensores estão recebendo os sinais com a mesma sensibilidade, a calibração é considerada bem sucedida e se considera que o sistema de EA está funcionando adequadamente.

A calibração é um procedimento muito simples, porém extremamente importante pela sua influência na validade e qualidade dos sinais registrados, assim como nas análises decorrentes destes sinais.

O processo de calibração é aplicado antes do início de cada ensaio e também depois de finalizado o ensaio para conferir se não houve mudanças na sensibilidade do sistema de EA durante o mesmo.

2.4 Algoritmo do software para a coleta de dados

Durante um ensaio, mesmo que as emissões originadas na rocha sejam contínuas, o registro e a coleta dessas emissões através do equipamento de EA é feito por trechos discretos. Cada trecho registrado pelo sistema é chamado de sinal de EA. Isto permite que o sistema colete somente informações importantes e não utilize parte da sua capacidade registrando, por exemplo, o ruído do equipamento. A programação inicial do software é que vai definir quais trechos da emissão serão coletados e quais características desses sinais de EA vão ser armazenadas. No item 3.2.2 são definidas as características do equipamento e do software utilizado para coleta de sinais de EA). Assim, se a programação não for adequada, o equipamento de EA pode não fornecer os dados requeridos para representar os fenômenos em estudo (o que no caso desta pesquisa é o microfissuramento no interior de rochas).

Os parâmetros envolvidos neste processo são os seguintes: o limiar de referência, o ganho (definido no item 2.2), os parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT, os parâmetros de amostragem do sinal, taxa de amostragem, comprimento do sinal e pré-trigger e os filtros passa baixa e passa alta. Estes parâmetros são definidos em seguida.

2.4.1 O Limiar de Referência - LR

Um dos aspectos que mais influenciam a coleta de informações de EA é o ajuste da sensibilidade do sistema frente às emissões. Isto é feito principalmente através da programação do LR, que define o valor mínimo de amplitude, em decibéis, para o qual os sinais são detectados. Se um sinal não tem amplitude suficiente para ultrapassar o LR, este é desconsiderado. O instante em que o sinal ultrapassa o LR é chamado de gatilho (ou “*Trigger*”) e identifica o tempo associado à coleta do sinal. A relação entre volts e decibéis utilizada pelo software AEwin® (PASA), o qual foi adotado nesta pesquisa é a seguinte:

$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right) - g \quad (2.1)$$

$$V = V_{ref} \cdot 10^{\frac{A_{dB} + g}{20}} \quad (2.2)$$

Em que g corresponde ao ganho no pré-amplificador e V_{ref} é definido como $1\mu V$.

Outro aspecto importante na definição do LR é que ele afeta a estimativa da chegada da onda P a cada sinal de EA. Como consequência, o cálculo de alguns parâmetros de EA são afetados (ver item 2.7.1).

A dificuldade na definição deste parâmetro é que o mesmo deve ser estabelecido antes do início do ensaio e sem o conhecimento prévio das características dos sinais que serão registrados pelo equipamento de EA. Se o limiar de detecção é predefinido para coletar informações desde amplitudes muito baixas e a taxa de emissões no interior da rocha durante o ensaio é grande demais, o sistema de EA pode ser incapaz de salvar todas as informações, perdendo-se uma porção delas. Este fenômeno é conhecido como saturação na coleta de sinais e explica-se em maior detalhe no item 2.5. Porém, se o limiar é ajustado para coletar amplitudes maiores, são desconsiderados os sinais de baixa amplitude, assim há possíveis perdas de informações de interesse. No item 2.6, apresentam-se os delineamentos

gerais do procedimento utilizado nesta pesquisa para ajustar o LR e os outros parâmetros de coleta de dados.

2.4.2 Filtros passa baixa e passa alta

Os filtros passa baixa e passa alta são filtros eletrônicos que fornecem transmissão constante de emissões em uma determinada faixa de frequências e um alto grau de atenuação para as outras frequências. O filtro passa alta permite a transmissão de frequências altas e filtra aquelas inferiores a um determinado valor preestabelecido antes do início da coleta de dados. Da mesma forma, o filtro passa baixa permite a transmissão de frequências baixas e filtra aquelas superiores a um valor limite preestabelecido.

Os filtros passa alta e passa baixa devem ser definidos de acordo com a sensibilidade dos sensores e da placa de recepção do equipamento, em termos de frequências. Isto é, a faixa de frequências em que os sinais serão coletados corresponde à interseção entre a faixa de frequências definida pelos sensores, a placa de recepção e os filtros passa alta-passa baixa.

2.4.3 Parâmetros de tempo

Após ultrapassar o LR, o registro de voltagem é analisado segundo os seguintes parâmetros de aquisição utilizados para separá-lo em hits: PDT, HDT e HLT. O PDT é o tempo de definição de pico de amplitude (*Peak definition time*), definido como o tempo constante de um novo disparo (*retrigger*) na coleta do registro de voltagem no tempo que determina o tempo de subida e a amplitude do sinal. O HDT é o tempo de definição da finalização do hit (*hit definition time*, HDT), definido como o tempo constante de um novo disparo (*retrigger*) na coleta do registro de voltagem no tempo que determina o fim do sinal. Finalmente, o HLT é o tempo de travamento da detecção de hits (*Hit lockout time*, HLT) e define-se como o intervalo de trava ou pausa na aquisição de sinais, que tem início no fim do sinal, e durante o qual o sistema não responde ao LR (ABENDI, 2011). A Figura 2.2 apresenta a visualização gráfica destes parâmetros.

Figura 2.2 – Parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT

A janela de tempo do PDT irá a iniciar de novo toda vez que for registrada uma amplitude maior do que a máxima previamente registrada para esse sinal. Se ao chegar ao final do tempo PDT não houve registro de amplitudes maiores que a já registrada, então a janela de tempo PDT fecha e o valor de amplitude máxima registrada será a máxima do sinal. A janela de tempo HDT irá a iniciar novamente toda vez que for registrada uma voltagem que ultrapassar o valor do LR. Se ao chegar ao final do tempo HDT não houve registro de sinais com voltagem maior do que o LR, então a janela de tempo HDT fecha, definindo o fim do sinal de EA.

Se a programação destes parâmetros for inadequada, os sinais coletados não vão representar de maneira certa as emissões relacionadas ao fissuramento. O ideal é que cada sinal represente um pulso de emissão originado na rocha, como ocorre com os sinais gerados durante o fraturamento. Porém, pode ocorrer somente o registro de uma porção da emissão associada a um pulso, perdendo-se o restante do sinal. Outra possibilidade é que ocorra a coleta de dois pulsos com um único sinal. Dessa maneira, os parâmetros de EA podem perder representatividade.

2.4.4 Parâmetros de amostragem

A aquisição do registro de voltagem no tempo é feita através da definição de três parâmetros: o comprimento do sinal, o pré-trigger e a taxa de amostragem.

O comprimento do sinal define a quantidade de amostras que serão consideradas dentro de um arquivo de forma de onda. Por exemplo, se o comprimento é definido como 1kB, o arquivo de cada forma de onda terá 1024 amostras (pontos com registro de voltagem no tempo). O pré-trigger

estabelece quanto tempo antes da ativação do trigger (gatilho) será gravado em cada forma de onda. Este tempo é medido em microssegundos. A taxa de amostragem estabelece a quantidade de amostras por segundo que serão coletadas pelo sistema (frequência de amostragem). Por exemplo, uma taxa de amostragem de 1MSPS ("Mega Samples Per Second") significa que o sistema vai gravar uma amostra a cada 1 microssegundo. Contudo, a taxa de amostragem imposta deve garantir a transmissão de todas as frequências contidas na faixa definida através dos filtros passa baixa e passa alta, especialmente as frequências altas. Para isto, utiliza-se o teorema de amostragem de Nyquist-Shannon, o qual estabelece que o intervalo máximo de tempo t entre amostras para garantir a detecção da frequência máxima desejada f é:

$$t = \frac{1}{2 \cdot f} \quad (2.3)$$

Desta forma, se por exemplo o filtro passa baixa estabelece a transmissão de frequências até 500kHz, o tempo entre amostras deve ser no máximo de $t = 1/(2 \cdot 500 \cdot 10^3) = 1 \cdot 10^{-6} = 1 \mu s$. A condição definida pela equação 2.3 é satisfeita se a taxa de amostragem é ajustada para pelo menos 1MSPS.

2.5 Ajuste do LR e saturação na coleta de dados

Quando a taxa de emissões acústicas ultrapassa a capacidade da placa em algum momento do ensaio, ocorre saturação e os sinais recebidos deixam de ser coletados. Neste instante, o sistema de coleta de formas de onda trava e não grava sinal nenhum, apenas são registrados os parâmetros de EA dos sinais (item 2.7.1). Esta condição é intrínseca a este tipo de equipamento e não deve ser considerada uma limitação, mas sim uma característica.

Para evitar a saturação da placa e a perda de informações, deve-se ajustar a sensibilidade na coleta de emissões, o que é feito principalmente através da programação do limiar de referência. Assim, se o LR for muito baixo, o sistema começa a coletar sinais desde amplitudes pequenas, e quando a taxa de emissões aumentam, pode ocorrer saturação. Por outro lado, se o LR for muito alto, o sistema coleta somente os sinais de maior amplitude, desconsiderando a informação proveniente dos sinais menores. Em resumo, o ajuste do LR é um processo iterativo que busca obter a maior quantidade de informação nos ensaios, mas aceita que este parâmetro defina a faixa de informações que são coletadas. Por exemplo, se o LR de um ensaio promove saturação na coleta de formas de onda, no ensaio seguinte o valor do limiar é aumentado para evitar saturação. Se no segundo ensaio ainda se observa saturação, o limiar é aumentado mais um pouco no ensaio seguinte. Se o sistema

coleta sinais e apresenta informação de parâmetros de EA, mas não registra aumento na quantidade de formas de onda coletadas, considera-se que houve saturação. Assim, são realizados tantos ensaios quanto sejam necessários para ajustar o LR até o ponto em que não se registre saturação nenhuma na coleta de formas de onda. Considera-se que este procedimento de ajuste iterativo do LR é adequado, principalmente quando a taxa de emissões é muito alta. Isto, porque permite obter um conjunto de ensaios com informação representativa de todos os sinais gerados em um ensaio.

2.6 Procedimento de ajuste dos parâmetros de aquisição de emissões

No item 2.4 foram definidos os diferentes parâmetros de programação do software de monitoramento de emissões acústicas e a sua influência na qualidade dos sinais coletados. Cada um deles precisa ser ajustado segundo as necessidades de informação de cada ensaio, as quais são influenciadas pelo comportamento do CP durante o processo de carregamento.

O ajuste de cada um deles, especialmente o LR, a taxa de amostragem e os parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT, faz com que haja um processo gradativo em que é necessária a realização de alguns ensaios com variações na programação inicial que permitam a identificação das características particulares das emissões da rocha e do ensaio. Desta forma, obtém-se o maior aproveitamento do sistema de emissão acústica na coleta de dados.

Devido às variações na quantidade e intensidade dos sinais de EA durante um ensaio de compressão diametral, principalmente em CP de monzogranito, o LR é o parâmetro que apresenta maiores variações entre um ensaio e outro. Portanto, o processo do seu ajuste necessita de várias iterações até a obtenção de uma coleta de sinais sem saturação. Contudo, mesmo os ensaios que apresentaram perda de sinais pela saturação na sua coleta forneceram informações úteis que complementam aquelas sem saturação. Por outro lado, os parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT precisam somente de uma única iteração para serem ajustados satisfatoriamente.

2.7 Opções de aquisição de dados

Os sinais amplificados que chegam às placas de análise podem ser coletados e salvos pelo equipamento segundo duas metodologias. A primeira delas consiste em salvar trechos do registro de

voltagem no tempo (formas de onda) e a segunda consiste em ler e analisar o registro de voltagem com o intuito de se extrair e salvar somente algumas características desses sinais (parâmetros de EA ou características de EA), de acordo com o que tenha sido previamente programado.

O LR, o ganho e os filtros passa alta e passa baixa são parâmetros da programação inicial do software, que afetam tanto o registro das formas de onda quanto o cálculo das características de EA. A respeito dos parâmetros específicos aplicados em cada caso, a coleta e armazenamento das formas de onda são dependentes da taxa de amostragem, do pré-trigger e do comprimento do sinal, enquanto o cálculo dos parâmetros de EA é condicionado pelos parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT.

Os parâmetros de EA são processados e guardados em uma região da placa, enquanto a coleta da voltagem no tempo (formas de onda) é feita em outra região da mesma. A segunda metodologia é mais simples e gera arquivos de informação muito mais leves. No entanto, os parâmetros obtidos dependem muito dos parâmetros da programação do software tais como LR, PDT, HDT e HLT e não podem ser reavaliados se as formas de onda não forem coletadas.

2.7.1 Parâmetros de EA (ou características do sinal)

Para a extração dos parâmetros de EA, os sinais são analisados e separados em *hits* de acordo com os parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT preestabelecidos (ver definição em item 2.4.3). Os *hits* não são gravados, sendo registradas e armazenadas somente algumas características dos mesmos, tais como o número de hits, a amplitude máxima (o maior pico de voltagem registrado no sinal, chamado de A), a contagem (número de vezes em que o sinal ultrapassou o LR, chamado também de *AE counts* na Figura 2.3a), o tempo de subida (tempo entre a chegada do sinal e a ocorrência da amplitude máxima, chamado também de RT na Figura 2.3a), a duração do sinal (tempo entre o primeiro e o último instante em que o sinal ultrapassa o LR, chamado também de *td* na Figura 2.3a) e a frequência média (contagem do sinal dividido por sua duração). Outros dois parâmetros de interesse são a energia e a energia absoluta. A energia (chamada também de *AE energy* na Figura 2.3b) é calculada como a área sob a curva de voltagem-tempo de cada hit, ajustada por um conjunto de valores constantes que fazem com que seu valor seja igual aos valores de energia calculados nos sistemas analógicos anteriores da empresa PASA. Para isso, a voltagem é convertida em amostras a uma taxa de aquisição de 100kHz/mV. Como resultado, a energia é um valor adimensional calculado da seguinte maneira (PHILIPPIDIS; NIKOLAIDIS; KOLAXIS, 1999):

$$\text{Energia} = 10^{(\text{GRE}-20/20)} \cdot 100 \frac{\text{kHz}}{\text{mV}} \cdot \int_0^{t_d} |V(t)| dt \quad (2.4)$$

Em que GRE corresponde ao ganho da energia de referência, sendo um fator de ganho constante e igual a 20dB nesta pesquisa.

Figura 2.3 – Definição dos parâmetros de EA

A energia absoluta do sinal é definida como a somatória do quadrado da voltagem dividido por um valor constante R , que corresponde à impedância do sistema e é calculada como:

$$\text{Energia absoluta} = E_A = \frac{\int_0^{t_d} V(t)^2 dt}{R} \quad (2.5)$$

e é medida em unidades de energia (aJ). Tanto a energia quanto a energia absoluta refletem a intensidade do sinal. Considerando-se o mesmo sinal de EA coletado, a única variável nas equações 2.4 e 2.5 é a voltagem. Assim, a relação entre a energia absoluta e energia é:

$$\frac{E_A}{E} = F \cdot \frac{\int_0^{t_d} V(t)^2 dt}{\int_0^{t_d} |V(t)| dt} \quad (2.6)$$

Em que:

$$F = \frac{1}{10^{(\text{GRE}-20/20)} \cdot 100 \frac{\text{kHz}}{\text{mV}} \cdot R} \quad (2.7)$$

Assim, a relação entre a energia absoluta e a energia é definida, essencialmente, pela relação entre área sob a curva da voltagem ao quadrado no tempo e o valor absoluto da voltagem no tempo para cada hit.

2.7.2 Formas de onda

A coleta de formas de onda considera salvar trechos do registro de voltagem no tempo, utilizando para isso os parâmetros de amostragem definidos no item 2.4.4. Este processo é muito exigente para a placa de aquisição de dados, sendo necessários computadores com grande capacidade de armazenagem e processamento. Este tipo de coleta de dados é muito vantajoso para a presente pesquisa, já que se encontram disponíveis trechos reais do sinal que podem ser processados e reprocessados várias vezes e de diferentes formas. O estudo das formas de onda coletadas pode ser feito no domínio do tempo ou no domínio das frequências. O primeiro tipo de análise considera a localização e caracterização das fontes de EA, assim como a obtenção de parâmetros dos sinais considerando diferentes valores para LR, PDT, HDT e HLT. Já as análises feitas no domínio das frequências incorporam ferramentas auxiliares, tais como transformada de Fourier ou espectrogramas. A transformada de Fourier e os espectrogramas podem ser obtidos utilizando-se os trechos reais do sinal de voltagem no tempo ao longo do ensaio.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Rochas utilizadas

O programa experimental envolve a utilização de amostras de dois tipos de rochas: mármore e monzogranito; as quais foram escolhidas pelas suas diferentes características geológicas e mecânicas, assim como pelas condições iniciais de microfissuramento das mesmas. Do ponto de vista geológico, o monzogranito é uma rocha ígnea pluriminerálica enquanto o mármore é uma rocha metamórfica formada basicamente por um único mineral. Em nível microscópico, a presença ou não de planos de clivagem assim como a preexistência de microfissuramento nos minerais são fatores que também diferenciam as duas rochas. Em termos macroscópicos, o monzogranito caracteriza-se por ser uma rocha de maior resistência, rigidez e comportamento muito frágil se comparada ao mármore. Tais características promovem diferentes comportamentos que foram aproveitados para o estudo do microfissuramento induzido pelo carregamento no ensaio de compressão diametral.

O mármore é procedente da Unidade São Joaquim, Grupo Itavaia (ou Complexo Paraíba do Sul), coletado em Cachoeiro de Itapemirim – ES, Brasil, e data do período Neoproterozóico - 790 – 600 Ma. (MACHADO et al., 1996). O monzogranito é procedente da Suíte Granítica Sin-Tectônica, Fácies Cantareira ou Batólito Cantareira, coletado em São Paulo - SP, Brasil e data do período Neoproterozóico - 590 – 563 Ma (HASUI, 1975).

3.2 Montagem típica dos ensaios – instrumentação

O programa experimental elaborado considera a execução de ensaios de compressão diametral em CPs de granito e mármore de aproximadamente 100mm de diâmetro e 50mm de espessura. Para tornar o ensaio estável, é adotado o procedimento proposto por Celestino, Bortolucci e Nóbrega (1995), controlando-se o deslocamento diametral transversal ao carregamento (deslocamento u), ao qual se impõe velocidade constante. Também são registrados os deslocamentos paralelos ao carregamento (deslocamento v), por meio de instrumentação disposta de acordo ao procedimento proposto por Celestino et al. (1998) para determinação de constantes elásticas. Por fim, são instalados sensores de EA para o monitoramento do processo de microfissuramento ao longo do ensaio.

Os ensaios foram realizados em uma prensa servocontrolada de compressão uniaxial com capacidade máxima de 2700kN (*MTS 815 Rock mechanics test system*), que possui uma célula de carga de 100kN. Foram utilizados dois tipos de berço nos ensaios: berço curvo e berço plano, a fim de se avaliar a influência de ambos na curva força-deslocamento em CPs do mesmo tipo de rocha. A Figura 3.1 mostra um esquema da montagem típica do ensaio, em que se pode observar a distribuição da instrumentação utilizada para o monitoramento de EA (sensores e os seus respectivos amplificadores) assim como a instrumentação para o registro dos deslocamentos u e v . É importante ressaltar que o esquema de montagem apresentado na Figura 3.1 corresponde ao uso do berço plano, porém, a montagem é idêntica no caso dos ensaios feitos com o berço curvo. A Figura 3.2 apresenta duas fotografias da montagem típica utilizada nos ensaios, em que é apresentada a montagem com berço plano e curvo.

Figura 3.1 – Representação esquemática da montagem típica dos ensaios (Berço curvo)

Sabe-se que neste tipo de ensaio a ruptura do CP ocorre através de um plano vertical central que atravessa a espessura do mesmo. No entanto, as fissuras geradas são muito finas, assim é difícil percebê-las a olho nu quando elas surgem nas faces do CP. Por isso, em adição à instrumentação colocada no CP, considerou-se colorir a região central de cada face do CP utilizando uma mistura de giz com água. Como a mistura seca torna-se muito frágil há a sua quebra com o rompimento da rocha, permitindo, desta forma, realçar as fissuras que aparecem na superfície do CP.

Figura 3.2 – Fotografias da montagem dos ensaios. a) Montagem de CP de monzogranito em berço curvo. b) Montagem de CP de mármore em berço plano

3.2.1 Instrumentação para o registro de deslocamentos

O deslocamento u foi obtido por meio de um extensômetro duplo (*extensometer diametral measurement system, model 632.94F-20, diameter gage length 165,00 mm*) que permite medir o deslocamento diametral médio do CP. O deslocamento v foi medido como o deslocamento relativo entre os apoios superior e inferior do berço, por meio de dois LVDTs (*LVDT Schaumburg xdcr 0,25 mm, model 209768, precision 0,0001 mm*) dispostos um em cada face do berço, segundo o procedimento descrito em Celestino e Bortolucci (1998) para determinação de constantes elásticas (os detalhes do procedimento são apresentados no item 5.4). O objetivo da instrumentação para o registro de deslocamentos paralelos ao carregamento no berço é registrar estes deslocamentos no CP, porém, a dificuldade de fixação da instrumentação na superfície do CP (onde são dispostos os sensores de EA) faz com que ela precise ser disposta no berço o mais próximo possível do CP. Além disso, de acordo com Celestino e Bortolucci (1998), o uso de strain gages no centro do CP para o registro de deformações paralelas ao carregamento é pouco prático quando aplicado em materiais heterogêneos, que apresentam tamanho grosseiro de grãos ou em concreto. Por outro lado, os autores salientam a dificuldade em medir o deslocamento v diretamente no CP, dispondo a instrumentação entre o CP e o berço, já que o elevado gradiente de deslocamento nesta região pode levar a grandes erros de medição. O procedimento de interpretação proposto por Celestino e Bortolucci (1998) leva em conta a deformação do berço. A taxa de amostragem utilizada nos ensaios para o registro da força e dos deslocamentos u e v foi de 1 ponto cada 3 segundos, o que permitiu a obtenção adequada das curvas de força versus deslocamento.

3.2.2 Instrumentação para o monitoramento de EA

A montagem do equipamento para o monitoramento dos sinais de EA consiste de seis sensores, seis amplificadores e uma placa de aquisição de dados com capacidade de até oito canais. Os sensores piezoelétricos são de alta fidelidade e banda larga, modelo D9203B (Physical Acoustic Corporation, PAC), de dimensões 17.8 x 16.5 mm (diâmetro x espessura) e com capacidade de recepção de sinais de até 1MHz (Figura 3.3). A placa de recepção e análise é do tipo SAMOS (PAC), possui oito canais para aquisição de dados e sua faixa de recepção de sinais é de 10kHz - 400kHz.

Assim, pela interseção entre a faixa de recepção da placa e dos sensores, faixa de frequências considerada mais confiável na coleta de sinais encontra-se entre 100kHz e 400kHz, aproximadamente.

A partir do conhecimento prévio do modo de ruptura nos ensaios de compressão diametral e levando em consideração a influência da borda do CP na qualidade dos sinais coletados (os sensores não podem ser colocados muito próximos das bordas do CP devido a efeitos tais como reflexão e refração), foram dispostos três sensores em cada face do CP, distribuídos de maneira a otimizar a recepção de sinais da região mais afetada pelo fissuramento, permitindo o acompanhamento de todo o processo de microfissuramento durante os ensaios e sem impedir a visualização direta do fissuramento nas faces do CP. Os sensores foram fixados na superfície de cada CP utilizando-se apoios de isopor e fita adesiva (ver Figura 3.2), os quais mostraram ser eficientes para mantê-los fixos durante o ensaio. Além disso, foi usada vaselina como agente de acoplamento entre o CP e o sensor, o que junto ao sistema de fixação utilizado permitiu a correta transferência dos sinais. Isto foi verificado aplicando-se o processo de calibração explicado no item 2.3.

Figura 3.3 – Curva de calibração típica dos sensores de banda larga utilizados na pesquisa

Utilizou-se o software AEwin® da empresa Physical Acoustic South America (PASA) para a coleta dos sinais de emissão acústica dos ensaios. A programação do software considera a determinação dos parâmetros apresentados no item 2.4. O LR foi ajustado para 40dB até 68dB nos diferentes ensaios, com o intuito de se coletar informação complementar dos mesmos, nas faixas de amplitudes baixas e altas, especialmente nos ensaios feitos em amostras de monzogranito. O ganho foi ajustado para 40dB e os filtros passa alta e passa baixa foram ajustados para 10kHz e 400kHz,

respectivamente. A taxa de amostragem utilizada foi de 1MSPS, o comprimento do sinal considerado foi de 1k e o pré-trigger foi de 256 μ s. Finalmente, os parâmetros de tempo PDT, HDT e HLT foram ajustados para 50,100,100 μ s, respectivamente.

3.3 Descrição do programa de ensaios

A Figura 3.4 apresenta o resumo do programa experimental desenvolvido, incluindo nas primeiras quatro colunas os tipos de rocha ensaiados, a configuração do ensaio, a orientação do CP (em relação ao eixo de carregamento) e o tipo de berço utilizado. As últimas duas colunas apresentam o número de ensaios realizados em cada configuração e sua respectiva identificação (ID). O código de identificação (ID) considera o tipo de rocha (G=Monzogranito ou M=mármore), a configuração do ensaio (M=monotônico ou C=cíclico), a orientação do CP com respeito do eixo de aplicação da carga (0° ou 90°) e o tipo de berço utilizado (P=plano ou C=curvo). A orientação do CP foi considerada somente para o mármore devido a que sua origem geológica pode ter gerado maior anisotropia na sua estrutura. Foram feitos ensaios em diferentes orientações no monzogranito, e comprovou-se que não havia diferença no comportamento.

Figura 3.4 – Resumo do programa experimental adotado

Na extração dos CPs, tomou-se cuidado para manter a orientação dos mesmos, com todos alinhados segundo um único eixo diametral, o qual foi definido arbitrariamente como sendo a

orientação de 0° . Na informação da Figura 3.4 associada à orientação do CP, considera-se que o eixo de aplicação de carga de 0° coincide com a orientação de 0° definida na extração. Considera-se ainda uma orientação de carregamento de 90° para os CPs de mármore quando no CP o eixo diametral de carregamento de 0° é girado em 90° no plano definido pela face, sem mudar sua orientação em relação ao berço ou ao prato da prensa. Dessa maneira, os CPs orientados em 90° são carregados ao longo do eixo diametral perpendicular ao eixo de carregamento dos CPs orientados em 0° .

Quanto às configurações dos experimentos, os ensaios monotônicos foram executados por meio do carregamento contínuo do CP até a sua estabilização e o desenvolvimento da fissuração do plano central vertical do mesmo. Com o intuito de se alcançar o nível necessário de deslocamento para permitir o desenvolvimento do fissuramento e o dano em cada CP, foi definido que todos os ensaios alcançariam um deslocamento u próximo de 0,1mm. Em seguida, o CP foi descarregado e o ensaio finalizado. A Figura 3.5a mostra uma curva de força versus deslocamento u típica com controle de deslocamento. Após um trecho relativamente linear, o dano começa a se acumular antes do carregamento de pico. O ensaio seria instável após o pico se não fosse utilizado o controle de deslocamento. As fissuras crescem em comprimento e espessura. Após o pico, o valor de fator de intensidade de tensão na ponta da fissura atinge a tenacidade à fratura.

Os ensaios cíclicos contemplam vários estágios de descarregamento e recarregamento do CP depois de atingido o pico de resistência do material, como mostra a Figura 3.5b. Isto é feito com o intuito de se registrar a perda de rigidez ao longo do ensaio e estimar a tenacidade à fratura segundo a metodologia proposta por Celestino, Bortolucci e Nóbrega (1995). Além disso, este tipo de ensaio permite mostrar que o acúmulo de microfissuramento ocorre cada vez que o carregamento atinge o trecho virgem da curva de força versus deslocamento (não existindo microfissuramento nos estágios de descarregamento e recarregamento) de acordo com o efeito Kaiser (LAVROV et al., 2002). O término desses ensaios é definido quando são completados os ciclos mostrados na Figura 3.5b, em que o deslocamento u atinge 0,1mm, mesmo valor utilizado para definir o fim dos ensaios monotônicos.

Por conveniência da apresentação dos resultados nos capítulos seguintes, os ensaios cíclicos foram divididos nos seguintes estágios (Figura 3.5b): Estágio A: Primeiro estágio de carregamento, incluindo o pico de carga do ensaio e o trecho pós-pico até o início do primeiro ciclo de descarregamento e recarregamento. Estágios B a F: Trecho virgem entre ciclos de recarregamento e descarregamento. Estágios I a V: Trecho de descarregamento e recarregamento de cada ciclo.

A velocidade de carregamento nos ensaios monotônicos foi definida como $0,75\mu\text{m}/\text{min}$. Nos ensaios cíclicos, a velocidade de carregamento para o estágio A foi de $0,75\mu\text{m}/\text{min}$. No estágio I utilizou-se uma velocidade de $1\mu\text{m}/\text{min}$ para o trecho de descarregamento e $2\mu\text{m}/\text{min}$ para o

recarregamento. Nos estágios II até V e B até F, utilizou-se uma velocidade de $2\mu\text{m}/\text{min}$, com exceção do trecho de descarregamento do estágio V em que foi utilizada uma velocidade de $5\mu\text{m}/\text{min}$. A razão para o uso de uma velocidade menor no estágio A foi a de controlar melhor o ensaio na vizinhança do pico de resistência, no qual o comportamento frágil da rocha é mais evidente e o sistema de controle de deslocamento u é mais exigido, especialmente no caso do monzogranito.

Figura 3.5 – Esquema da curva força versus deslocamento u em ensaios de compressão diametral com controle do deslocamento u . a) Ensaio monotônico. b) Ensaio cíclico

3.4 Ensaio adicionais

Em adição ao programa experimental apresentado no item 3.3, foram feitos mais alguns ensaios de compressão diametral, descritos a seguir.

Para avaliar se o uso do controle de deslocamento u influi a resistência máxima dos CPs, foram realizados dois ensaios utilizando controle de força. A montagem destes ensaios não incluiu instrumentação para o registro dos deslocamentos nem monitoramento de EA, porque a comparação com os ensaios feitos com controle de deslocamento foi baseada somente na resistência máxima obtida nos dois tipos de ensaio. A taxa de carregamento considerada para o ensaio do CP de monzogranito foi de $2,3\text{kN}/\text{min}$ enquanto que para o mármore foi de $1,5\text{kN}/\text{min}$. Com essas taxas, foi possível obter rupturas aproximadamente no mesmo tempo que nos ensaios feitos com controle de

deslocamento. Desta forma, é possível comparar as resistências máximas obtidas nos dois tipos de ensaio.

Para a realização das análises petrográficas do trecho pré-pico de carregamento em ambas as rochas, foram realizados outros ensaios utilizando-se somente a instrumentação para o registro de deslocamento definida no item 3.2.1. No caso do mármore, dois ensaios com carregamentos aproximados de até 75-80% e 90% do pico, respectivamente. No caso do monzogranito, foi feito um ensaio em que o carregamento máximo atingido foi de aproximadamente 90% do pico.

3.5 Lâminas petrográficas

Um total de 12 lâminas petrográficas foram confeccionadas para a avaliação do microfissuramento nas rochas sob três condições de carregamento: rocha intacta, antes de ser atingido o pico de carregamento e no final do ensaio. Foram consideradas duas lâminas para cada condição e para cada tipo de rocha. No caso daquelas na condição final do ensaio, em que os CPs encontravam-se completamente rompidos, foi necessário separar as metades de cada CP e colá-las. Este procedimento foi realizado para evitar que o rompimento da região mais danificada ocorresse no processo de preparação das lâminas.

Com o intuito de se estudar especialmente a região onde o fissuramento é concentrado, todas as lâminas foram obtidas a partir do núcleo central de cada CP, em um plano central paralelo às faces do mesmo (área colorida de vermelho na Figura 3.6), região onde se espera que o CP rompa.

Figura 3.6 - Representação esquemática de um CP e localização de extração das lâminas petrográficas (destacada na cor vermelha)

As lâminas petrográficas foram analisadas por meio de microscopia de luz polarizada (MLP) em um microscópio petrográfico Olympus BX 40.

4 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO

A transferência de carregamento entre a prensa servocontrolada e o CP ocorre por meio de um conjunto de peças que se encaixam como mostra a Figura 4.1. Neste sistema, dois fatores podem afetar a transferência de carregamento e induzir excentricidade. O primeiro é relacionado ao CP e o segundo é associado ao sistema célula de carga – espaçador – esfera – pórtico - berço que transfere o carregamento ao CP (ver detalhe na Figura 4.1b). Um CP, mesmo retificado, apresenta pequenas imperfeições que podem até ser imperceptíveis a olho nu, mas afetam em maior ou menor grau o contato com o sistema de aplicação de carga. Sua aresta não é perfeitamente retilínea, como também não é retilínea a aresta do berço. Portanto o contato não ocorre como se idealiza ao longo de uma linha. Em vez disto, concentra-se em regiões daquela linha. O segundo fator associa-se com os possíveis desvios na transferência de carregamento através do sistema prensa – rosca – esfera – pórtico - berço até o CP. Em ambos os casos é a esfera (ver Figura 4.1) que proporciona o ajuste, ou “jogo”, permitindo compensar as irregularidades próprias do sistema, diminuindo e estabilizando, assim, a excentricidade induzida. Contudo, o primeiro fator é intrínseco a cada CP e a cada ensaio. Sua quantificação está contemplada no capítulo 6, em que são analisadas as curvas força versus deslocamento de todos os ensaios feitos nesta pesquisa. O segundo fator é uma característica do equipamento e sua avaliação é o objeto deste capítulo.

Figura 4.1 – Sistema de transferência de carregamento do equipamento de ensaio. a) Vista geral do equipamento (berço curvo). b) Vista em detalhe da região de transferência de carga desde a prensa servocontrolada até o CP

A caracterização do equipamento envolveu 46 ensaios de compressão diametral, utilizando-se um CP de alumínio e um CP de aço, ambos com a mesma montagem definida no capítulo 3. Tais materiais foram escolhidos por apresentarem comportamento elástico linear na faixa de carregamento, por serem isótropos e homogêneos e por terem suas superfícies polidas e lisas com a mesma precisão da geratriz do berço. Isso permite avaliar as características próprias do equipamento sem a influência do material a ser ensaiado. As Figuras 4.2a e b mostram a montagem típica dos ensaios com o CP de alumínio, identificando o prato do equipamento de aplicação de carregamento, onde é disposto o berço (a montagem com o CP de aço é análoga).

O processo de caracterização do equipamento consiste em avaliar a forma em que a carga é transmitida ao CP. O caso idealizado apresenta-se na Figura 4.2c, em que a carga é aplicada exatamente no eixo central do berço e do CP, sem excentricidade ($e=0$), obtendo-se assim uma distribuição uniforme de carga ao longo da espessura do mesmo. O caso real é representado de modo esquemático na Figura 4.2d, em que o sistema de aplicação de carga induz um momento de flexão que faz com que a distribuição tenha uma forma trapezoidal ou até triangular (o que pode acontecer no processo de ajuste inicial do teste). Neste caso, pode-se representar a excentricidade do carregamento segundo a relação definida na Figura 4.2d.

Figura 4.2 – Montagem típica dos ensaios em alumínio e representação esquemática do conceito de excentricidade utilizado para avaliar o equipamento. a) rotação do berço em 0° em relação ao prato. b) rotação do berço em 180° em relação ao prato. c) Configuração idealizada de aplicação de carregamento sem excentricidade. d) Configuração idealizada de aplicação de carregamento com excentricidade

Como já exposto, a caracterização do equipamento é resumida através do cálculo da excentricidade na aplicação da carga no CP. Considerou-se estudar a influência do tipo de berço na excentricidade, assim como a orientação do berço em relação ao prato. O berço pode girar em relação

ao eixo vertical de aplicação do carregamento, como mostram as Figuras 4.2a e b (setas brancas). A influência da posição do berço (em relação ao prato) na excentricidade foi avaliada por meio de duas configurações. A primeira configuração considera uma posição arbitrária do berço em relação ao prato, a qual é definida como a posição do berço com rotação de 0° (Figura 4.2a). A segunda considera a rotação do berço em 180° em relação à primeira configuração (Figura 4.2b). Ambas as configurações foram aplicadas tanto ao berço plano quanto ao berço curvo com o intuito de se aferir se o equipamento apresentava alguma orientação preferencial de excentricidade.

Para cada instante de aplicação de carregamento nos ensaios feitos em aço e alumínio, a excentricidade é calculada de acordo ao esquema da Figura 4.2d. Utilizam-se os registros dos deslocamentos v obtidos com os LVDT para se definir se a distribuição de tensões no contato entre o CP e o berço é triangular ou trapezoidal. Na condição inicial, antes do carregamento, os deslocamentos v são nulos em ambas as faces do berço. Na medida em que o carregamento é aplicado os deslocamentos v registrados em ambas as faces do berço apresentam diferentes magnitudes (caso sejam iguais não haveria excentricidade) e podem apresentar sentidos iguais ou diferentes. Quando as magnitudes de ambos os deslocamentos v são diferentes entre elas, não nulas e os seus sentidos são iguais, tem-se uma distribuição de tensão trapezoidal. Quando as magnitudes dos deslocamentos v são diferentes entre elas e os seus sentidos são diferentes, tem-se uma distribuição de tensão triangular. Além disso, considera-se que as magnitudes dos deslocamentos medidos em ambas as faces do berço são proporcionais às tensões nesses pontos. Após definir a geometria da distribuição existente, obtêm-se as magnitudes das tensões por meio do equilíbrio do sistema (equilíbrio de forças e de momento de flexão). Para o caso de distribuição de tensões triangular calcula-se o momento de flexão, a tensão máxima e o comprimento de apoio. E para o caso da distribuição de tensões trapezoidal calcula-se o momento de flexão e as tensões máxima e mínima. Para resolver o sistema de 3 incógnitas utilizam-se as equações de equilíbrio de força e de momento de flexão, além da relação de proporcionalidade entre os deslocamentos v e as tensões.

A Figura 4.3 apresenta a relação entre a força aplicada em cada ensaio e a relação percentual entre a excentricidade e a espessura do CP. A Figura 4.3a mostra como ambos os berços apresentam níveis semelhantes de excentricidade. As Figuras 4.3b, c, e d mostram a comparação das excentricidades no carregamento segundo a orientação do berço (0° ou 180°) em relação ao prato, percebendo-se como a orientação do berço influencia no sentido da excentricidade. Ressalta-se que esta influência da orientação do berço na excentricidade ocorre nos dois tipos de berço.

Figura 4.3 – Força versus excentricidade (expressa como porcentagem de espessura) de acordo com o tipo de berço e sua orientação em relação ao prato. a) CP de alumínio e berços curvo e plano. b) CP de aço e berço plano. c) CP de alumínio e berço plano. d) CP de alumínio e berço curvo

No sistema de aplicação de carga, espera-se que nos trechos iniciais de ajuste na aplicação do carregamento a excentricidade da carga seja maior. Espera-se, também, que na medida em que o ajuste é realizado e o carregamento cresce, a excentricidade diminua. Pode-se observar na Figura 4.3 como, para todos os casos, o equipamento consegue ajustar a aplicação da força no CP desde níveis muito baixos de carregamento, o que se observa através da rápida diminuição da excentricidade (alcançando sua estabilização para cargas inferiores a 10 kN). Isto é coerente com o comportamento esperado do equipamento.

Como qualquer equipamento, aquele utilizado nesta pesquisa apresenta características de fabricação que fazem com que na transferência de carregamento haja excentricidade, que mesmo sendo muito pequena (menor do que 2,5% da espessura do CP), não é nula. Isto somente poderia ocorrer em um equipamento idealizado.

5 ANÁLISES BASEADAS NA CURVA FORÇA - DESLOCAMENTO

5.1 Caracterização do comportamento força-deslocamento

A Figura 5.1 apresenta a relação força versus o deslocamento u obtida em todos os ensaios feitos em monzogranito. A identificação dessas curvas é feita de acordo com os códigos (ID) definidos na Figura 3.4, adicionando-se a informação a respeito do bloco de onde foram extraídas as amostras. A Figura 5.1a reúne todos os ensaios e mostra um comportamento frágil coerente em todas as amostras de monzogranito. A curva de força versus o deslocamento u característica apresenta-se linear até quase ser atingido o pico de força. Após o pico, a força diminui drasticamente até se estabilizar, e então o deslocamento continua a aumentar com pouco decréscimo de força. No caso dos ensaios cíclicos, a envoltória mostra a mesma tendência.

Figura 5.1 – Força versus deslocamento u no monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

O comportamento frágil exibido pelo monzogranito e a grande diminuição de força acompanhada do deslocamento u muito pequeno ou quase nulo faz com que a estabilização do ensaio através do controle de deslocamento seja difícil de ser obtida. Como já discutido, em 5 dos 21 ensaios realizados não foi possível obter o trecho pós-pico da curva. Outro aspecto importante é que para níveis de deslocamento u entre 0,05mm e 0,06mm foi observada uma segunda redução de força em todos os ensaios, sendo mais marcante nos ensaios monotônicos do que nos cíclicos (ver Figuras 5.1b, 5.1e e 5.1d). Do exame visual das faces do CP durante os ensaios, observou-se que a primeira queda do valor de força (após o pico) foi acompanhada pelo aparecimento de uma fissura vertical centralizada em uma das faces do CP. A segunda redução de força foi, na maioria dos casos, acompanhada pelo aparecimento de uma fissura vertical centralizada na outra face do CP. As Figuras 5.1b e 5.1c apresentam os resultados dos ensaios feitos em monzogranito com o berço curvo, utilizando-se amostras obtidas de dois blocos diferentes. A força de pico alcançada nos ensaios foi semelhante, mesmo com amostras de blocos diferentes. A semelhança na forma das curvas e na força de pico, independente do bloco de extração, é coerente com materiais de comportamento homogêneo, como se considerou o monzogranito. A Figura 5.1d apresenta os resultados dos ensaios feitos em monzogranito com o berço plano e com amostras extraídas de outro bloco, observando-se uma diminuição da força de pico próxima de 14% em relação aos ensaios feitos com o berço curvo. No entanto, a rigidez no trecho linear é semelhante em todos os ensaios feitos em monzogranito, independente do tipo de berço utilizado. Este aspecto é discutido em detalhe nos itens 5.2 e 5.4.

A respeito da diferença nas forças de pico, sem mudança perceptível na rigidez, a literatura apresenta algumas informações importantes. Segundo a norma American Standard Technical Materials - ASTM (2008), o cálculo da força à tração no ensaio de compressão diametral com berço plano é feito considerando-se que o carregamento corresponde a uma linha e não a uma faixa. No entanto, Ma e Hung (2008) indicam que experimentalmente não é possível obter um apoio linear, pois sempre existe uma largura de contato nos apoios do CP. Celestino e Bortolucci (1998) analisaram resultados de ensaios considerando a não linearidade geométrica do contato elástico entre o CP e o berço. Apresentaram resultados da variação da área de contato com o acréscimo do carregamento e a distribuição da tensão de contato. A distribuição de tensão entre o CP e o berço é elíptica. O ângulo de contato determinado foi da ordem de 5° . Por outro lado, Kourkoulis, Markides e Chatzistergos (2012, 2013) realizaram cálculos teóricos e experimentais sobre o ensaio de compressão diametral com berço curvo, e concluíram que a largura de contato nos apoios pode ser simulado através de uma distribuição parabólica nos apoios. Fairhurst (1964) e Rocco et al. (1996) estudaram o efeito da largura de contato nos apoios e concluíram que quando este é menor, a força também diminui. Assim, considerando-se que o berço plano apresenta uma largura de contato menor do que o berço curvo (em

ambos os casos a área de contato aumenta com o carregamento e é maior para berço curvo), a diferença na força máxima observada nos ensaios feitos com berço plano e curvo deve-se principalmente à largura de contato nos apoios que se tem com cada berço. Em relação à influência do bloco de extração das amostras na diminuição de força observada nos ensaios da Figura 5.1d, baseados nos resultados semelhantes obtidos para dois blocos diferentes em um mesmo tipo de berço, considera-se que sua influência é mínima.

A Figura 5.2 apresenta a relação entre a força e o deslocamento v médio obtido através das leituras dos LVDT dispostos nos dois lados do berço, o mais próximo possível do CP. Para permitir a melhor visualização do comportamento força-deslocamento v , são apresentados somente os registros até o pico de carregamento. A Figura 5.2a reúne todos os ensaios realizados, evidenciando novamente a coerência de comportamento mesmo nos ensaios feitos com berços distintos ou com amostras extraídas de diferentes blocos. Das Figuras 5.2b, 5.2c e 5.2d, observa-se que os ensaios realizados com berço curvo (Figuras 5.2b e 5.2c) apresentam uma curvatura côncava para níveis de carregamento inferiores a 10kN, enquanto que aqueles feitos com o berço plano (Figura 5.2d) apresentam um comportamento geral mais linear. Celestino e Bortolucci (1998) fizeram ensaios de compressão diametral com berço curvo em CPs de arenito e granito para a obtenção das propriedades elásticas dessas rochas e observaram um trecho não linear da curva de força versus deslocamento v até níveis de força na faixa 7 - 10kN. Os autores indicam que nesse trecho a curva experimental encontra-se deslocada da curva teórica linear calculada por eles em uma quantidade da ordem dos 0,01mm. No item 5.4 apresenta-se o ajuste dos dados experimentais dos ensaios de compressão diametral a uma curva teórica para a determinação das propriedades elásticas, utilizando-se o método proposto por Celestino e Bortolucci (1998). Os resultados obtidos nesse item mostram que para os ensaios feitos em monzogranito com berço curvo o trecho não linear dos dados experimentais da curva de força versus deslocamento v deslocou-se em média 0,012mm em relação à curva teórica. Assim, os resultados obtidos com o berço curvo nesta pesquisa são consistentes com os obtidos por Celestino e Bortolucci (1998) em termos dos níveis de força em que o comportamento não linear ocorre assim como na ordem de grandeza em que esse trecho não linear se afasta da curva teórica. Celestino e Bortolucci (1998) indicam que o comportamento não linear do trecho inicial da curva de força versus deslocamento v pode ser explicado pelas irregularidades que existem nas arestas do CP, as que concentram o contato com o berço em pontos isolados do comprimento de contato. De acordo com os autores, o antes referido faz com que o CP seja mais deformável do que a curva teórica em estágios iniciais de carregamento, pois na curva teórica supõe-se que o carregamento é distribuído ao longo de todo o comprimento de contato entre o CP e o berço, o que permite explicar o trecho inicial não linear das Figuras 5.2b e c. No caso dos resultados obtidos com o berço plano em monzogranito, o

deslocamento médio do trecho não linear em relação à curva teórica foi de 0,004mm. O deslocamento desse trecho não linear menor no caso dos ensaios feitos com o berço plano em comparação ao obtido na mesma rocha, mas com o berço curvo pode ser explicado pela diferença na área de apoio no contato entre o berço e o CP. Assim, se a área de contato é maior espera-se que o efeito das irregularidades nessa região também seja maior, tornando o CP mais deformável nesse estágio inicial de carregamento. Isso permite explicar a maior curvatura observada nos ensaios feitos com o berço curvo.

Figura 5.2 – Força versus deslocamento v médio no monzogranito (até o pico de carga). Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

A Figura 5.3 apresenta os resultados de excentricidade na carga aplicada aos CPs de monzogranito, calculada através dos registros dos LVDT dispostos em ambas as faces do berço. Na Figura são apresentados os dados de excentricidade da mesma forma em que foram apresentadas as curvas de caracterização do equipamento na Figura 3.4. As excentricidades registradas nos ensaios

em monzogranito encontram-se delimitadas numa faixa um pouco maior do que a registrada na Figura 3.4 ($\pm 3\%$), tanto para os ensaios feitos com berço plano quanto para aqueles feitos com berço curvo.

Figura 5.3 – Força versus excentricidade (expressa como porcentagem da espessura) nos ensaios em monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

A diferença nas excentricidades máximas ocorre principalmente devido ao fato de que os registros dos ensaios foram feitos ao longo de todo o ensaio, ultrapassando o trecho linear elástico do material. A faixa de excentricidade até o pico de carregamento manteve-se na faixa de $\pm 2,5\%$. Nos ensaios cíclicos, pode-se observar como a excentricidade muda de orientação na medida em que o ensaio avança e o dano progride ao longo da espessura do CP. Nas análises dos padrões de microfissuramento apresentadas no item 8.5.1 estabeleceu-se que inicialmente o microfissuramento se concentra no centro do CP e em uma das faces, gerando-se uma macrofissura em uma das faces do CP entre o pico de carregamento e o fim do estágio A. Esse padrão de dano no CP introduz uma diferença substancial de rigidez de uma face em relação à outra face. Este comportamento é devido ao correto ajuste do equipamento às novas condições de contato entre o berço e o CP, na medida em que o dano localizado modifica a rigidez da rocha. Este fato será discutido em maior detalhe nos capítulos 7

e 8, nos quais é apresentado o padrão de microfissuramento dos ensaios através de análise petrográfica e EA.

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram as relações entre a força e o deslocamento u , e a força e o deslocamento v médio, obtidas para o mármore. A identificação dessas curvas é feita de acordo com os códigos (ID) definidos na Figura 3.4. Nesse conjunto de ensaios não houve mudança no tipo de berço nem no bloco de extração das amostras. Em termos gerais, o comportamento observado nos ensaios é coerente, porém observa-se maior dispersão do que nos ensaios feitos em monzogranito, principalmente nas forças máximas alcançadas em cada ensaio. Isso não pode ser associado a mudanças na configuração de ensaio, pois a dispersão é observada tanto no conjunto de ensaios feitos com orientação de 0° quanto no conjunto de ensaios feitos com orientação de 90° . Também não está associado com amostras obtidas de diferentes locais, mas sim com as características próprias da rocha. Devido ao fato de o mármore ser uma rocha metamórfica, às condições variáveis de pressão e temperatura durante a sua gênese podem induzir maior heterogeneidade entre CPs. Além disso, os histogramas da variabilidade na resistência intrínseca dos CPs de mármore e monzogranito do capítulo 9 mostram que o mármore exibe maior a variabilidade interna que o monzogranito. Assim, a maior variabilidade intrínseca no mármore pode também fazer com que o mármore apresente maior heterogeneidade entre CPs. Maior variabilidade na resistência ao microfissuramento também foi observada no interior de cada CP de mármore. No capítulo 9 aprofunda-se neste aspecto muito interessante observado nas rochas e que reflete a influência das características microscópicas da rocha e a sua formação no seu comportamento macroscópico.

Figura 5.4 – Força versus deslocamento u no mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

As Figuras 5.4b e 5.5b apresentam a influência da orientação do CP em relação ao eixo de carregamento (rotação de 90°). Observa-se que a força máxima média é menor no caso dos CPs ensaiados a 90°. Observa-se, também, um aumento da rigidez média dos CPs nessa direção, assim como uma diminuição nos deslocamentos u e v médios para aqueles CPs ensaiados a 90°. Tais diferenças devem-se a um dos ensaios feitos com rotação de 90° que apresentou o comportamento mais afastado da tendência geral definida pelos restantes CPs, independente da orientação deles.

Figura 5.5 – Força versus deslocamento v médio no mármore (até o pico de carga). Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Contudo, houve também variabilidade entre ensaios feitos com a mesma orientação do CP em relação do eixo de carregamento rotação de 0°, pelo qual as diferenças devidas à rotação do CP em relação do eixo de carregamento podem ser associadas à influência da heterogeneidade própria do material no comportamento, mais do que a anisotropia. As condições de formação do mármore revelam que o processo de metamorfismo não induz níveis significativos de anisotropia na rocha, o qual confirma que as diferenças entre CPs ocorram independente da orientação do CP.

A excentricidade da força resultante do contato entre berço e CP também foi calculada nos ensaios em mármore, e os resultados podem ser observados na Figura 5.6. Nota-se que a excentricidade nestes ensaios se encontra delimitada numa faixa pequena ($\pm 4\%$), porém neste caso os valores são um pouco maiores do que os observados nas Figuras 5.3 (monzogranito) e 4.3 (caracterização do equipamento).

Sabendo-se que a excentricidade registrada nos ensaios é devida ao efeito combinado das características do equipamento e do material ensaiado, o aumento de aproximadamente 1 ponto percentual na excentricidade nestes ensaios, em relação aos outros registros, pode ser associado ao comportamento próprio da rocha (maior variabilidade de propriedades).

Figura 5.6 – Força versus excentricidade (expressa como porcentagem de espessura) nos ensaios em mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

5.2 Variação da rigidez em relação ao deslocamento no monzogranito e no mármore

As Figuras 5.7 a 5.10 apresentam as relações da rigidez versus o deslocamento adimensional obtidas para todos os ensaios realizados em monzogranito e mármore para o estágio A (ver definição na Figura 3.5). As Figuras 5.7 e 5.9 apresentam a carga e a rigidez K_u versus o deslocamento adimensional u/u_p , e as Figuras 5.8 e 5.10 apresentam a carga e a rigidez K_v versus o deslocamento adimensional v/v_p (u_p e v_p são os deslocamentos u e v registrados no pico de carregamento). As rigidezes K_u e K_v são definidas como a relação entre acréscimos de força dP e de deslocamentos du e dv , respectivamente. Ambas foram calculadas utilizando-se o método de regressão do ponto móvel ou “*moving point regression method*” (descrito em EBERHARDT et al., 1998), considerando-se uma janela média de $1,8\mu\text{m}$ para o deslocamento u e de $3,7\mu\text{m}$ para o deslocamento v .

De forma semelhante ao feito nas Figuras 5.1 a 5.6, a identificação das curvas nas Figuras 5.7 a 5.10 é feita de acordo com os códigos (ID) definidos na Figura 3.4, aos quais se adicionou a identificação associada ao tipo de curva: força ou rigidez. No caso das Figuras 5.7 e 5.8, adicionou-se a informação a respeito do bloco de onde foram extraídas as amostras. Isso não foi necessário nas Figuras 5.9 e 5.10, já que foi utilizado um único bloco de rocha para extrair todas as amostras de mármore.

Com o intuito de auxiliar nas análises da variação de rigidez nas Figuras 5.7 a 5.10 foram incorporados quatro pontos de controle associados a percentagens do carregamento de pico. Os pontos de controle 1 a 4 são definidos para 50, 75, 90 e 100% do carregamento de pico. A separação das curvas segundo estes níveis de carregamento também foi utilizada nos capítulos seguintes na

definição dos padrões de microfissuramento obtidos através de emissão acústica e análises petrográficas.

Figura 5.7 – Rigidez K_u no monzogranito para o estágio A do ensaio. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

A Figura 5.7a reúne todos os ensaios de compressão diametral feitos em monzogranito, incluindo os ensaios monotônicos com berço curvo (Figuras 5.7b), os ensaios cíclicos com berço curvo (Figuras 5.7c) e os ensaios cíclicos com berço plano (Figuras 5.7d). A Figura 5.7 mostra como no monzogranito a rigidez K_u se manteve praticamente constante até o ponto de controle 2 (75% do carregamento de pico). Entre o ponto de controle 2 e 3 observa-se uma pequena diminuição de rigidez

e deste ponto em diante observa-se um forte decréscimo da rigidez. A Tabela 5.1 apresenta os valores de rigidez Ku média para os casos apresentados na Figura 5.7. O valor da rigidez Ku média para os ensaios feitos no monzogranito é de 3,23MN/mm, valor que é semelhante em todos os ensaios, independente do bloco de extração da amostra ou do tipo de berço utilizado. As pequenas diferenças observadas podem ser associadas à heterogeneidade própria da rocha e não ao efeito do berço no resultado.

Tabela 5.1 - Valores médios de rigidez Ku para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Identificação	Ku (MN/mm)
G-50-C-0-C-bloco 0	3,50
G-50-C-0-C-bloco 1	3,11
G-50-M-0-C-bloco 1	3,00
G-50-C-0-P-bloco2	3,32
Média, μ	3,23
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	6,91

Como foi observado na Figura 5.1, e confirmado na Figura 5.7, a utilização do berço plano faz com que a força máxima registrada nos ensaios diminua devido à distribuição do carregamento em uma área menor, mas não há alteração da rigidez registrada nos ensaios da rocha.

No capítulo 8 são apresentados os padrões de microfissuramento em monzogranito obtidos por meio de localização tridimensional de fontes de EA. Dessas análises obteve-se que o microfissuramento no monzogranito inicia-se aproximadamente a 75-85% do carregamento de pico (independente do tipo de berço utilizado no ensaio). Assim, a tendência na variação da rigidez Ku apresentada na Figura 5.7 para é consistente com as observações posteriores.

A Figura 5.8 mostra a variação da rigidez Ku para o mármore ao longo do estágio A para o ensaio monotônico (Figura 5.8a) e para os ensaios cíclicos (Figura 5.8b). A Figura 5.8b apresenta a rigidez Ku para os casos em que a orientação do CP em relação ao eixo de carregamento é 0° e 90°. Observa-se no mármore um pequeno trecho inicial de rigidez Ku aproximadamente constante, seguido de uma diminuição gradativa desde níveis de carregamento próximos de 20-30% do carregamento de pico. Deste ponto em diante, quanto mais próximo do pico for o carregamento, maior é o decréscimo na rigidez Ku. Como esperado, após o pico a rigidez é negativa (ver escala de valores negativos após o ponto de controle 4 no eixo vertical direito das Figuras 5.8 a e b) e o decréscimo é mais pronunciado.

Figura 5.8 – Rigidez K_u no mármore para o estágio A do ensaio. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Observa-se ainda que a rigidez K_u é semelhante para todos os ensaios feitos em mármore, porém um dos ensaios feito com rotação de 90° do CP em relação ao eixo de carregamento (linha de traço descontínuo na cor laranja na Figura 5.8b) se afasta da tendência geral no primeiro trecho até o ponto de controle 1.

A Tabela 5.2 apresenta os valores médios da rigidez K_u do mármore para os diferentes trechos de carregamento definidos na Figura 5.8, visto que a diminuição deste parâmetro, no mármore, é gradual. O 1º trecho é definido entre o início do ensaio e o ponto de controle 1, o 2º trecho é definido entre os pontos de controle 1 e 2, o 3º trecho é definido entre os pontos de controle 2 e 3 e o 4º trecho é definido entre os pontos de controle 3 e 4. Observa-se que no 1º trecho a rigidez K_u mostra uma primeira parte quase constante, seguida de uma outra parte em que taxa de decréscimo da rigidez é pequena em comparação aos seguintes trechos. Assim, calcula-se para o 1º trecho um valor médio de 3,22MN/mm, semelhante para todos os ensaios, mas com maior dispersão do que a observada para o monzogranito. Nos trechos seguintes, a tendência de decréscimo é mais marcante. Além disso, a dispersão nos trechos 2º, 3º e 4º é menor do que a registrada no 1º trecho. A Tabela 5.3 apresenta a diminuição percentual da rigidez K_u entre os trechos definidos para a Tabela 5.2 e o 1º trecho. A perda de rigidez média no 2º trecho em relação ao 1º trecho é definida como ΔK_{v1} na Tabela 5.3. Da mesma forma, ΔK_{v2} é definida como a perda de rigidez média no 3º trecho em relação ao 1º trecho, e ΔK_{v3} é definida como a perda de rigidez média no 4º trecho em relação ao 1º trecho. Pode-se observar que até o ponto de controle 3 (90% do carregamento de pico) a rigidez K_u é quase a metade do valor inicial (45,8%). O K_u diminui em 73,9% até o ponto de controle 4 (pico de carregamento).

Em etapas posteriores desta pesquisa serão apresentadas observações e análises obtidas do monitoramento com EA, as quais mostrarão que no mármore o microfissuramento inicia-se aproximadamente a 25-30% do carregamento de pico. Além disso, as análises com EA mostram que a porção mais significativa de microfissuramento no mármore desenvolve-se durante o estágio A. A variação da rigidez Ku apresentada na Figura 5.8 é consistente com as observações posteriores.

Tabela 5.2 - Valores médios de rigidez Ku para o mármore. A rigidez Ku média é definida para quatro trechos pré-pico. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Identificação	Ku (MN/mm) (0-1)	Ku (MN/mm) (1-2)	Ku (MN/mm) (2-3)	Ku (MN/mm) (3-4)
M-50-M-0-P	2,67	2,14	1,59	0,70
M-50-C-0-P	2,95	2,31	1,67	0,93
M-50-C-90-P	4,03	2,71	1,87	0,82
Média, μ	3,22	2,39	1,71	0,82
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	22,26	12,39	8,46	14,07

Tabela 5.3 - Valores médios de rigidez Ku para o mármore. A rigidez Ku média é definida para quatro trechos pré-pico. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Identificação	$\Delta Ku1$ (%)	$\Delta Ku2$ (%)	$\Delta Ku3$ (%)
M-50-M-0-P	20,05	40,47	73,74
M-50-C-0-P	21,88	43,37	68,40
M-50-C-90-P	32,70	53,53	79,54
Média, μ	24,88	45,79	73,89
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	27,47	14,98	7,54

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam as variações de força e de rigidez Kv versus o deslocamento adimensional v/v_p para o monzogranito e o mármore. Observa-se que a variação da rigidez Kv é semelhante para ambas as rochas. O efeito do microfissuramento e as diferenças associadas a isso, no mármore e no monzogranito, não são refletidas na rigidez Kv. Contudo, os valores de Kv para todos os ensaios no monzogranito (Figura 5.9) são semelhantes, o que confirma o fato de que o comportamento obtido nestes ensaios é comparável e, portanto, seu processo de microfissuramento também é análogo.

A Tabela 5.4 apresenta os valores do Kv médio no trecho em que este é aproximadamente constante (entre os pontos de controle 1 e 3). O valor médio obtido para todos os ensaios é de 0,48MN/mm e o coeficiente de variação obtido mostra pouca dispersão.

No caso do mármore, os valores de todos os ensaios são também semelhantes (Figura 5.10), incluindo aqueles que foram feitos com rotação de 90° do CP em relação ao eixo de carregamento. A Tabela 5.5 mostra os valores de K_v médios para esses ensaios, com um valor médio de 0,28MN/mm e uma dispersão maior do que a obtida para o monzogranito. Esta informação é importante porque nas análises posteriores (EA e petrografia) os dados dos diferentes ensaios serão estudados tanto separadamente como em conjunto. Algumas tendências, especialmente as análises no domínio das frequências, são obtidas através da análise complementar de vários ensaios.

Figura 5.9 – Rigidez K_v no monzogranito para o estágio A do ensaio. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Tabela 5.4 - Valores médios para a rigidez Kv para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.2. Adiciona-se ao código ID a identificação do bloco de extração das amostras

Identificação	Kv (MN/mm)
G-50-C-0-C-bloco 0	0,51
G-50-C-0-C-bloco 1	0,48
G-50-M-0-C-bloco 1	0,50
G-50-C-0-P-bloco2	0,43
Média, μ	0,48
Coefficiente de variação, σ/μ (%)	7,75

Figura 5.10 – Rigidez Kv no mármore para o estágio A do ensaio. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Tabela 5.5 - Valores médios de rigidez Kv para o mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Identificação	Kv (MN/mm)
M-50-M-0-P	0,24
M-50-C-0-P	0,31
M-50-C-90-P	0,30
Média, μ	0,28
Coefficiente de variação, σ/μ (%)	12,82

5.3 Comparação de ensaios com e sem controle de deslocamento

A relação entre a força máxima obtida em ensaios com e sem controle de deslocamento foi de 0,9 para o monzogranito e de 0,83 para o mármore. A maior força obtida em ambas as rochas quando o ensaio é feito sem controle de deslocamento pode ser explicada pela influência do sistema de controle de deslocamento no dano produzido nos CPs. O sistema ajusta os incrementos de carregamento para se adequar à taxa de deslocamento u definida para o ensaio. Desta forma, se o CP deforma além do definido, o sistema diminui o carregamento para atingir o deslocamento correto. Este processo ocorre em uma escala muito pequena (da ordem de μm), durante o ensaio todo e mantendo-o estável, no entanto gera um pequeno dano no CP uma vez que ele ultrapassa o trecho elástico linear. Este processo não acontece nos ensaios feitos com controle de força, nos quais se espera que a resistência seja maior, entretanto tornando-se instáveis após o pico.

Em materiais frágeis como as rochas em estudo, a ruptura após o pico é muito rápida em ensaios com controle de deslocamento, e ainda mais rápida e descontrolada nos ensaios com controle de força. Considera-se que o desenvolvimento do microfissuramento é semelhante em ambos os casos, mas em um deles o processo é tão rápido que não é possível perceber o avanço do fissuramento no interior do CP.

A relação menor entre as forças com ou sem controle de deslocamento obtida para o mármore pode ser explicada pois o microfissuramento começa e progride antes no mármore do que no monzogranito. As Figuras 5.7 e 5.9 mostram como a rigidez no monzogranito permanece praticamente constante até valores próximos de 90% da carga de pico (tendo-se uma leve diminuição entre 75 e 90% do carregamento de pico), enquanto o mármore apresenta diminuição na rigidez desde valores próximos de 50% da carga de pico. Este aspecto será explicado em maior detalhe nos capítulos seguintes, nos quais os padrões de microfissuramento ao longo do ensaio são definidos por meio da localização das fontes de EA, assim como por análises petrográficas. Como foi descrito no capítulo 5.2, a perda de rigidez é devida ao microfissuramento e ao dano no interior do CP, o qual acontece mais cedo no mármore. Assim, esta rocha é mais sensível ao efeito do pequeno dano produzido no controle de deslocamento. Isto é coerente com as maiores diferenças entre as forças máximas obtidas com e sem controle de deslocamento no mármore.

5.4 Estimativa das propriedades elásticas

As propriedades elásticas do monzogranito e do mármore foram obtidas para todos os ensaios levando-se em consideração a metodologia proposta por Celestino e Bortolucci (1998) para ensaios de compressão diametral com berço curvo. Para determinar tais propriedades (E , ν), são utilizados os dados do estágio A de cada ensaio, i.e., a força, o deslocamento diametral u e o deslocamento relativo entre os apoios v . Precisa-se também do conhecimento da espessura e raio (t , R) do CP a ser ensaiado. Além destes dados, o método requer a definição das propriedades elásticas (E_s , ν_s) do material que compõe o berço e de seu raio (R_j). A informação sobre o berço é importante, pois o deslocamento v entre o apoio superior e inferior do berço inclui o efeito da deformação do CP e do berço devido às tensões no contato (CELESTINO; BORTOLUCCI, 1998). A Tabela 6.6 apresenta os valores das propriedades do berço curvo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 5.6 - Propriedades elásticas e raio de curvatura do berço curvo utilizado nos ensaios

E_s	210 GPa
ν_s	0,3
R_j	75 mm

De acordo ao método de Celestino e Bortolucci (1998), o deslocamento u pode ser calculado através da seguinte relação:

$$u = \frac{P}{\pi \cdot t \cdot E} \cdot [4 - \pi \cdot (1 - \nu)] \quad (5.1)$$

Em que P é a força, t é a espessura do CP e (E , ν) são as propriedades elásticas do CP a serem estimadas. A respeito do deslocamento v , os autores propõem calculá-lo utilizando-se as expressões apresentadas por Hamrock e Anderson (1983):

$$v = \frac{2 \cdot W \cdot R_x}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot R}{b} \right) + \ln \left(\frac{4 \cdot R_j}{b} \right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

Em que os parâmetros b , R_x e W são definidos a seguir:

$$b = R_x \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot W}{\pi}} \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_j} \quad (5.4)$$

$$W = F \cdot \frac{(1-\nu^2)/E + (1-\nu_s^2)/E_s}{2 \cdot t \cdot R_x} \quad (5.5)$$

Onde R é o raio do CP, R_j é o raio de curvatura do berço curvo e (E_s, ν_s) são as propriedades elásticas do berço. O parâmetro b corresponde à metade do comprimento de apoio entre o CP e o berço. A distribuição de tensão vertical no contato entre o CP e o berço é elíptica, em que o valor máximo é definido através de:

$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot \sqrt{W/\pi}}{(1-\nu^2)/E + (1-\nu_s^2)/E_s} \quad (5.6)$$

A metade do ângulo da área de contato α calcula-se como:

$$\alpha = \frac{b}{R} \quad (5.7)$$

O procedimento proposto por Celestino e Bortolucci (1998) funciona da seguinte forma: as relações experimentais entre a força e os deslocamentos u e v para a obtenção das propriedades elásticas da rocha são expressas pelas equações 5.1 a 5.6. Busca-se o melhor ajuste das curvas experimentais e teóricas variando os valores de E e ν nas mesmas. O ajuste é feito na vizinhança de 50% do carregamento de pico. A Figura 5.11 mostra a aplicação do procedimento já explicado a um dos ensaios em monzogranito com o berço curvo. O ajuste para este caso em particular forneceu os seguintes resultados: E=50GPa e ν=0,33.

Figura 5.11 – Exemplo de determinação das propriedades elásticas E e ν no monzogranito. Dados experimentais obtidas utilizando berço curvo

A metodologia acima definida foi aplicada para obter as propriedades elásticas naqueles ensaios feitos com o berço curvo, porém alguns ensaios no monzogranito e todos os ensaios no

mármore foram feitos utilizando-se o berço plano. Por isto, as expressões antes definidas para o deslocamento v (equações 5.2 a 5.5) não puderam ser utilizadas diretamente.

Com o intuito de se obter as propriedades elásticas nos casos em que foi utilizado o berço plano, utilizou-se a expressão teórica para o deslocamento v para o caso de um cilindro entre duas chapas planas, na qual também foram consideradas as propriedades elásticas do berço plano. A expressão para obter o deslocamento v teórico para berço plano será chamada de v_{plano} , para diferenciá-la daquela previamente apresentada para o berço curvo (equação 5.1). A expressão (NORDEN, 1973) é apresentada a seguir:

$$v_{plano} = \frac{W}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot t^2}{b_{plano}^2} \right) + 1 \right] \quad (5.8)$$

$$b_{plano} = \sqrt{\frac{4 \cdot R \cdot W_{plano}}{\pi}} \quad (5.9)$$

$$W_{plano} = F \cdot \frac{(1-\nu^2)/E + (1-\nu_s^2)/E_s}{t} \quad (5.10)$$

A distribuição da tensão vertical no contato entre o CP e o berço plano também é elíptica, e é calculada através da seguinte relação:

$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot t \cdot b} \quad (5.11)$$

O ângulo da área de contato α calcula-se igual que para o caso do berço curvo (equação 5.6)

A Figura 5.12 mostra um exemplo da aplicação da equação 5.1 em conjunto com as equações 5.8 a 5.11 para a estimativa das propriedades elásticas (E , ν) nos ensaios com berço plano no monzogranito. O ajuste para este caso forneceu os seguintes resultados: $E=49\text{GPa}$ e $\nu=0,33$.

Figura 5.12– Exemplo de determinação das propriedades elásticas E e ν no monzogranito. Dados experimentais obtidas utilizando-se berço plano

A Figura 5.13 apresenta a aplicação da metodologia a um dos ensaios no mármore. As propriedades elásticas obtidas para este caso são: $E=33\text{GPa}$ e $\nu=0,34$.

Figura 5.13 – Exemplo de determinação das propriedades elásticas E e ν no mármore. Dados experimentais obtidas utilizando-se berço plano

A Figura 5.14 e as Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam o resumo das propriedades elásticas obtidas para o monzogranito e o mármore.

Figura 5.14 – Propriedades elásticas E e ν , para os ensaios feitos na pesquisa. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4. No caso dos ensaios monzogranito, adiciona-se ao ID a identificação do bloco de extração das amostras

Tabela 5.7 - Resumo das propriedades elásticas médias E e ν para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4. Adiciona-se ao ID a identificação do bloco de extração das amostras

Identificação	E (Gpa)	ν
G-50-C-0-C-bloco 0	48,83	0,330
G-50-C-0-C-bloco 1	48,20	0,332
G-50-M-0-C-bloco 1	48,30	0,332
G-50-C-0-P-bloco2	49,00	0,330
Média, μ	48,58	0,331
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	0,81	0,32

Tabela 5.8 - Resumo as propriedades elásticas médias E e ν para o mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Identificação	E (Gpa)	ν
M-50-M-0-P	30,00	0,35
M-50-C-0-P	33,13	0,34
M-50-C-90-P	39,00	0,28
Média, μ	34,04	0,32
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	13,42	11,71

Pode-se observar que para todos os ensaios feitos em CPs de monzogranito, obtiveram-se valores praticamente iguais para ambas as propriedades, independente do bloco de extração da amostra e do tipo de berço utilizado, o que é confirmado pelo coeficiente de variação menor que 1%. No caso do Coeficiente de Poisson, a variação é muito pequena, tendo-se valores médios quase iguais para os diferentes grupos de ensaios feitos nesta rocha. Com o intuito de permitir a visualização das diferenças neste parâmetro na Tabela 5.7 são apresentados os resultados com três casas decimais. Os valores médios de E e ν são 48,51GPa e 0,331, respectivamente. Este último aspecto é coerente com as análises apresentadas nos capítulos prévios, nos quais se observou que os ensaios feitos com berço curvo e plano somente apresentam diferenças em relação à força máxima (não na sua rigidez).

Os ensaios feitos no monzogranito com berço plano (identificados como G-50-M-0-C-bloco 1 na Figura 5.14 e na Tabela 5.7) não apresentam diferenças significativas em relação ao restante dos ensaios feitos nas mesmas rochas, mas com berço curvo. Isto permite afirmar que as equações utilizadas para a estimativa das propriedades elásticas em CPs ensaiados com berço plano e aplicadas de acordo com a metodologia proposta por Celestino e Bortolucci (1998) forneceram resultados consistentes em relação àquelas utilizadas para o berço curvo. Na Figura 5.14 apresentam-se,

também, os valores das propriedades elásticas obtidas para o mármore. Observa-se que elas são semelhantes, mas a dispersão é maior. Os ensaios feitos com rotação do CP de 90° em relação ao eixo de carregamento apresentam as maiores variações (identificadas como M-50-C-90-O na Figura 5.14 e Tabela 5.8). Este comportamento é consistente com o observado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.8, nas quais o ensaio que mais se afasta da tendência geral é o mesmo que apresentou o maior E (27GPa) e o menor ν (0,22) de todos os ensaios em mármore. A Tabela 5.8 apresenta os valores médios obtidos para as propriedades elásticas no mármore. Nela pode-se ver que a dispersão é maior do que a observada no monzogranito, mesmo com amostras obtidas de um único bloco. Tal dispersão pode ser associada, principalmente, à heterogeneidade da rocha.

A equação 5.7 apresenta a relação teórica para a metade do ângulo da área de contato α entre os berços curvo e plano e o CP. Vale a pena lembrar que mesmo tendo-se a mesma equação para esse parâmetro em ambos os berços, os resultados são diferentes, pois o ângulo da área de contato α é dependente da metade do comprimento de contato b , definida nas equações 5.6 e 5.9 para o berço curvo e plano, respectivamente. As equações 5.6 e 5.11 apresentam as relações teóricas para o cálculo da tensão máxima no contato entre o CP e o berço. As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam a aplicação dessas equações aos ensaios feitos no monzogranito e no mármore. Nelas, apresentam-se os parâmetros α e $\sigma_{\max}$ versus a força registrada ensaio. No monzogranito, utilizaram-se ambos os berços. A Figura 5.15a mostra claramente como o ângulo da área de contato α é menor no caso dos ensaios feitos com o berço plano (identificados como G-50-C-0-P-bloco2) do que naqueles feitos com o berço curvo (identificados como G-50-C-0-C-bloco 0, G-50-C-0-C-bloco 1 e G-50-M-0-C-bloco 1). A Figura 5.15b mostra como a tensão máxima $\sigma_{\max}$ é consistentemente maior para os ensaios feitos com o berço plano. Estes resultados mostram como o uso do berço plano faz com que o carregamento distribua-se num comprimento de apoio ($2b$) menor (ângulo da área de contato, α menor), fazendo com que as tensões no contato sejam maiores. Isto explica a menor força máxima registrada nos ensaios feitos com este berço (diminuição de aproximadamente 14% em relação aos ensaios feitos com berço curvo). No caso do mármore (Figura 5.16) somente foram feitos ensaios com o berço plano, portanto, não há diferenças significativas no ângulo da área de contato, α , nem na tensão máxima, $\sigma_{\max}$, entre os ensaios. Observam-se, também, que os ensaios feitos com o berço plano em ambas as rochas mostram as mesmas ordens de grandeza em α e $\sigma_{\max}$. Outros efeitos, tais como a variação do comportamento entre ensaios feitos em mármore com e sem rotação do CP em relação ao eixo de carregamento, não foram observados na Figura 5.16. Isto porque tais efeitos estão associados a características intrínsecas da rocha e não ao efeito do berço no seu comportamento.

Figura 5.15 – Metade do ângulo da área de contato, α e tensão máxima $\sigma_{\max}$ para os ensaios feitos no monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4. Adiciona-se ao ID a identificação do bloco de extração das amostras

Figura 5.16 – Metade do ângulo da área de contato, α e tensão máxima, $\sigma_{\max}$, para todos os ensaios feitos no mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

A Figura 5.17 mostra um exemplo da distribuição elíptica típica da tensão no contato entre o CP e o berço. Nessa figura apresenta-se o resultado obtidos para um ensaio feito com berço curvo em monzogranito, considerando-se uma força de 95% do carregamento de pico. A distribuição tem a mesma forma no caso do berço plano.

Figura 5.17 – Distribuição de tensão elíptica típica no contato entre o berço e o CP. Tensão σ versus α o ângulo da área de contato para um ensaio feito em monzogranito. Uso de berço curvo

5.5 Estimativa da tenacidade à fratura

Utilizando-se os dados dos ensaios cíclicos concluídos no mármore e no monzogranito, e aplicando o procedimento proposto por Celestino e Bortolucci (1992), foram obtidas a metade do comprimento da fissura equivalente, a , e a tenacidade à fratura K_{IC} . Nesta metodologia não é necessário criar uma fissura no CP previamente ao ensaio. Isto porque a fratura inicia-se e cresce ao longo do eixo de carregamento, no trecho central do CP, determinando o comportamento do ensaio. A Figura 5.18a apresenta um diagrama de interpretação do ensaio de compressão diametral e a identificação do comprimento da fissura equivalente, $2a$, definida por Celestino e Bortolucci (1992). A Figura 5.18b apresenta um esquema da relação entre a força e o deslocamento u no ensaio de compressão diametral cíclico. Após um trecho de comportamento elástico, o dano começa a se acumular no CP antes do pico de carregamento. A fissura aumenta em comprimento e espessura. É razoável supor que neste trecho fator de intensidade de tensão, K_I , na ponta da fissura é mantido constante e igual ao seu valor crítico, à tenacidade à fratura, K_{IC} . O comprimento da fissura equivalente, $2a$, pode ser determinado utilizando-se a inclinação dos segmentos AA', BB', CC' ou qualquer um no trecho A'C' que representem a rigidez do CP na medida em que a fissura cresce e o dano aumenta. Utilizam-se as inclinações dos segmentos de descarregamento e recarregamento de cada ciclos (BB' ou CC' na Figura 5.18b), pois na medida em que o dano aumenta nos ciclos de descarregamento e recarregamento o CP apresenta deformação permanente.

Figura 5.18 – Interpretação do ensaio de compressão diametral e definição do comprimento da fissura equivalente $2a$

A relação entre a rigidez do CP e o comprimento da fissura equivalente, $2a$, assim como a relação entre esta e a tenacidade à fratura, K_{IC} , foram obtidas por Celestino e Bortolucci (1992) através de análises numéricas. Os resultados de tais análises numéricas são apresentados de forma adimensional na Figura 5.19. A figura apresenta a relação entre o deslocamento diametral adimensionalizado U e a metade do comprimento da fissura a adimensionalizada pelo raio R do CP. O adimensional U é dado por:

$$U = \frac{u \cdot L \cdot E}{F} \quad (5.11)$$

onde u/F representa a rigidez do CP em algum ponto do ensaio no trecho BC (inclinação AA' , BB' ou CC' na Figura 5.18), L é a espessura do CP e E corresponde ao módulo de elasticidade do CP. As análises numéricas desenvolvidas por Celestino e Bortolucci (1992) consideraram vários valores para o módulo de Poisson. O adimensional U varia linearmente com o módulo de Poisson. A tenacidade à fratura adimensional é definida como:

$$F^* = \frac{K_{IC} L R [\pi/a]^{1/2}}{F} \quad (5.12)$$

Celestino et al. (2001) fizeram ensaios de compressão diametral em CPs de mármore de acordo ao procedimento definido por Celestino e Bortolucci (1992). Os autores interpretaram os resultados dos ensaios usando o conceito dos adimensionais proposto por Celestino e Bortolucci (1992), mas fazendo um ajuste direto de resultados numéricos para a obtenção da tenacidade à fratura.

Figura 5.19 – Adimensionais representativos de: a) deslocamento diametral U e comprimento da fissura equivalente; b) tenacidade à fratura F^* e comprimento da fissura equivalente

A Figura 5.20 mostra um gráfico típico de força F versus deslocamento u para ambos os tipos de rocha, em que foram definidas as relações F/u através das inclinações de cada um dos ciclos de carregamento e descarregamento (ajuste ao trecho de carregamento do estágio A para o primeiro ciclo e ajuste aos estágios I a V para os ciclos restantes da Figura 5.20 como definido na Figura 5.18b). As inclinações foram definidas através de regressão linear dos trechos anteriormente definidos e apresentados como exemplo na Figura 5.20. O método precisa também da definição dos pares de dados (u, P) que representam o carregamento no pico de cada ciclo (força máxima de cada ciclo) e o deslocamento u associado ao carregamento.

Figura 5.20 – Exemplo de determinação da tenacidade à fratura, KIC, no monzogranito e no mármore. Ajuste linear dos dados de cada ciclo de carregamento

Utilizando-se as informações mencionadas no parágrafo anterior para cada ciclo pode-se aplicar o método de Celestino e Bortolucci (1992) para calcular o fator adimensional U , definido na

equação 5.11. O cálculo de U requer o uso da relação u/F , que é obtida do ajuste linear de cada ciclo (segundo foi definido previamente). As unidades para a força e o deslocamento u são as apresentadas na Figura 5.20. L é a espessura do CP (também definida em metros) e E é o módulo de elasticidade da rocha (expresso em MN/m^2). Depois de obtida a rigidez adimensional U , obtém-se a metade do comprimento da fissura, a , através da Figura 5.19a. Considerando que o módulo de Poisson médio para os ensaios no monzogranito foi de 0,33 e para aqueles feitos no mármore foi de 0,34, utilizou-se interpolação linear para obter as curvas associadas a cada módulo de Poisson para a obtenção de valores mais exatos. Tendo-se os valores do comprimento da fissura equivalente, $2a$, utiliza-se o gráfico da Figura 5.19b para se obter os valores da tenacidade à fratura, K_{IC} , para cada ciclo (utilizando a equação 5.12). As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam a variação dos parâmetros para os primeiros 5 ciclos de descarregamento e recarregamento aplicado nos ensaios (ver definição na Figura 5.20). Observa-se que não há diferenças significativas entre ensaios feitos com berço plano ou curvo no caso do monzogranito. No caso do mármore, o efeito da rotação do CP em relação ao eixo de carregamento também não fez muita diferença no cálculo do comprimento da fissura ou da tenacidade à fratura. Este resultado apoia a hipótese de que as diferenças na rigidez observadas entre as amostras de mármore são resultado da heterogeneidade da rocha, mais do que de sua anisotropia.

Figura 5.21 –Variação do comprimento da fissura equivalente $2a$ no monzogranito e no mármore, considerando-se os 5 ciclos de descarregamento e recarregamento

Figura 5.22 –Variação da tenacidade à fratura K_{IC} no monzogranito e no mármore, considerando-se os 5 ciclos de descarregamento e recarregamento

O ciclo 6 não foi considerado nas Figuras 5.21 e 5.22 porque para esses níveis de deslocamento e força o parâmetro U calculado permanecia fora dos limites dos valores considerados na simulação numérica feita por Celestino e Bortolucci (1992) e apresentados na Figura 5.19. No entanto, o valor do comprimento da fissura até o ciclo 5 foi suficiente para mostrar seu crescimento. A figura 5.21 mostra como em ambas as rochas o comprimento da fissura equivalente, $2a$, é de aproximadamente 60mm no terceiro ciclo e já no quinto ciclo o comprimento é de aproximadamente 90mm, ou seja, a fissura se propagou através de quase todo o diâmetro vertical do CP. Quando a fissura cresce até quase atingir as bordas do CP, o efeito do confinamento nas bordas devido ao contato entre o CP e o berço influencia a resistência à propagação da fissura, fazendo com que os valores da tenacidade sejam maiores do que na realidade. Isto é consistente com os resultados de tenacidade à fratura apresentados na Figura 5.22, em que se observa que tais valores são semelhantes nos primeiros três ciclos e logo mostram uma tendência crescente. Como já dito, o cálculo da tenacidade à fratura associada a cada CP é realizado apenas com os valores obtidos para os primeiros três ciclos, obtendo-se a média desses valores.

As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os valores da tenacidade à fratura, K_{IC} , para o monzogranito e o mármore, calculados para os grupos de amostras de ensaios cíclicos definido na Figura 3.4. O valor médio obtido foi $K_{IC}=1.7\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para o monzogranito e $K_{IC}=0,7\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para o mármore. Consistentemente com os outros parâmetros elásticos obtidos para ambas as rochas, a dispersão na tenacidade à fratura do mármore é maior. Isso reflete uma maior heterogeneidade entre amostras, mesmo sendo obtidas de um único bloco. A tenacidade à fratura maior no monzogranito é esperada devido à estrutura interna da rocha (tipo de minerais que compõem cada rocha e estrutura). A estrutura imbricada do monzogranito e a existência de alguns minerais sem planos de fraqueza

preferenciais faz com que ele oponha maior resistência à propagação da fissura. Em contraste, o caráter monominerálico do mármore e a presença de três planos de clivagem na calcita fazem com que a propagação das fissuras seja facilitada por tais planos de fraqueza. Nos capítulos posteriores será aprofundado o efeito da estrutura interna das rochas no processo de propagação do microfissuramento.

Tabela 5.9 - Resumo dos valores de tenacidade à fratura K_{IC} média para o monzogranito. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4. Adiciona-se ao ID a identificação do bloco de extração das amostras

Identificação	K_{IC} (MPa*m ^{1/2})
G-50-C-0-C-bloco 1	1,67
G-50-C-0-P-bloco2	1,70
Média, m	1,69
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	1.14

Tabela 5.10 - Resumo dos valores de tenacidade à fratura K_{IC} média para o mármore. Código das curvas segundo ID da Figura 3.4

Identificação	K_{IC} (MPa*m ^{1/2})
M-50-C-0-P	0,74
M-50-C-90-P	0,69
Média, m	0,71
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	4,78

6 ANÁLISE PETROGRÁFICAS ¹

A Figura 6.1 apresenta uma curva esquemática de força versus deslocamento u indicando os estágios de carregamento nos quais foram obtidas as lâminas. Apresenta-se, também, o esquema de um CP, no qual a região cinza escuro representa o local de onde se obteve a lâmina petrográfica. O retângulo vermelho no interior dessa área representa a região onde foram fotografadas as lâminas, tanto na condição intacta quanto sob carregamento. Todas as fotomicrografias foram obtidas na mesma direção, indicada na Figura 6.1.

Figura 6.1 –Níveis de carregamento considerados para a preparação e a análise das lâminas petrográficas. Ponto A: rocha intacta. Ponto B: 75-80% da resistência de pico. Ponto C: 90% da resistência de pico. Ponto D: final do ensaio

No caso das lâminas petrográficas associadas a amostras obtidas no fim do ensaio (D da Figura 6.1), o nível de dano acumulado na região central dos CPs poderia levar à ruptura dos mesmos durante a preparação. Para evitar este problema, os CPs foram submetidos à colagem após o ensaio. A área da colagem corresponde a uma linha preta, larga, centrada e paralela ao eixo de carregamento que se observa nas Figuras 6.6 (monzogranito) e 6.11 (mármore). Embora a colagem tenha sido necessária para a correta preparação das lâminas petrográficas no final do ensaio, ela impede a medição da espessura real da fissura macroscópica.

¹ As análises petrográficas foram realizadas pela geóloga e mestre em geotecnia Paola B. Arab.

6.1 Caracterização geológica das rochas em condição intacta

O mármore apresenta estrutura maciça/granulosa, textura granoblástica e alteração superficial incipiente, evidenciada pelo aspecto pulverulento dos cristais. A Tabela 6.1 apresenta o resumo da caracterização petrográfica do mármore.

Tabela 6.1 - Caracterização petrográfica do mármore

Mineralogia	Descrição	Modal (%)
Calcita	Clivagem romboédrica perfeita. Os cristais possuem dimensão média de 2,5 mm e apresentam contatos retilíneos a sinuosos e lobulados. O grau de microfissuramento dos cristais é baixo. Observa-se a presença de exsolução que ocorre como cristais de calcita com núcleos de dolomita.	100
Dolomita	Não distinguível da calcita nas lâminas petrográficas, porém, a existência de exsolução indica também a presença da dolomita.	TR
Diopsídio	Ocorre disperso na matriz rochosa, como pequenos cristais subhedrais a anhedrais micrométricos incolores, com alto relevo, hábito prismático e elevada birrefringência. Possui aspecto notavelmente corroído e desgastado, podendo apresentar microfissuras. Em seções basais, é possível observar 2 direções de clivagem.	TR
Epidoto	Ocorre pontualmente na rocha, como cristais incolores prismáticos bem alongados e de aspecto limpo. Às vezes, é possível observar 1 direção de clivagem paralela ao eixo c mineral. Observa-se alteração incipiente.	TR

A presença de diopsídio sugere médio a alto grau metamórfico, indicando formação da rocha em temperaturas entre 500 e 650° e pressão variável, a partir de 2 kbar e até 7 kbar. A presença de epidoto sugere retrometamorfismo em baixo grau metamórfico, com temperatura em torno de 360°C e pressão maior que 2,5 kbar.

O monzogranito apresenta estrutura maciça e textura fanerítica inequigranular, com granulação fina a média. Exibe alteração superficial incipiente, observada nos cristais de feldspato. Efeitos deformacionais são evidenciados pela ocorrência de extinção ondulante de média a alta intensidade, além de cristais, principalmente de feldspato e biotita, que ocorrem levemente arqueados/dobrados. A tabela 6.2 apresenta o resumo da caracterização mineralógica do monzogranito.

Tabela 6.2 - Caracterização petrográfica do monzogranito

Mineralogia	Descrição	modal (%)
Feldspato alcalino (Microclínio)	Ocorre como cristais anhedrais a subhedrais incolores, sendo que alguns apresentam tamanho de até 5 mm. Geralmente, apresenta geminação microclina e é muito frequente a presença de exsolução, como pertita e antipertita em filme. Extinção ondulante presente em todos os cristais. Dentre os minerais da rocha, é o que mais apresenta microfissuras.	32
Plagioclásio (oligoclásio /andesina)	Ocorre como cristais subhedrais a anhedrais incolores e com aspecto pulverulento devido à sericitização superficial. Geralmente, apresenta geminação polissintética, e alguns cristais possuem exsolução, com núcleos de microclínio. Alguns cristais ocorrem levemente arqueados. Extinção ondulante presente em todos os cristais. O tamanho máximo dos cristais é de 2,5 mm, sendo que os cristais maiores tendem a apresentar algumas microfissuras.	43
Quartzo	Ocorre recristalizado como agregados microcristalinos e com forte extinção ondulante. Os contatos entre os cristais são lobulados a irregulares. Raramente apresenta inclusões de outros minerais. Em alguns locais, ocorre como material de preenchimento de microfissuras no contato entre cristais de outros minerais ou cortando-os.	24
Biotita	Possui coloração castanha e forte pleocroísmo amarelo-esverdeado a castanho-avermelhado. Os cristais são anhedrais e placóides, com tamanho de até 1.3 mm e bordas bem irregulares. Apresenta aspecto corroído. Os minerais opacos sempre ocorrem associados à biotita. Vários cristais apresentam evidências de processos deformacionais, por estarem curvados ou formarem pequenas dobras.	1
Muscovita	Ocorre como cristais anhedrais placóides, incolores e com até 2.5 mm de diâmetro. Suas bordas encontram-se serrilhadas e bem irregulares. Geralmente, ocorre associada à biotita.	TR
Sericita	Ocorre como alteração do plagioclásio, frequentemente localizada no interior desses cristais e acompanhando as direções de clivagem. Apresenta-se geralmente como agregados microgranulares ou diminutos cristais placóides. Também ocorre formando pequenas dobras em bordas de cristais de plagioclásio.	TR
Clorita	Apresenta-se como mineral secundário, proveniente da alteração da biotita. Os cristais possuem coloração esverdeada, são anhedrais e ocorrem geralmente como agregados ou com hábito lamelar.	TR
Zircão, titanita apatita	Ocorrem como minerais acessórios, geralmente associados à biotita, formando halos pleocróicos. Apatita também ocorre como acessório, em menor quantidade.	TR
Outros	Minerais opacos	TR

O monzogranito pode ser considerado um granito tipo-I, gerado da fusão parcial de rochas meta-ígneas – rochas mais profundas, não envolvidas em processos de intemperismo. Sua temperatura de formação encontra-se entre 980 e 1.100°C.

6.2 Caracterização do microfissuramento natural e induzido nas rochas

6.2.1 Monzogranito

A Figura 6.2 mostra uma fotomicrografia do monzogranito intacto a nicois cruzados. A estrutura da rocha é maciça e os cristais apresentam-se imbricados. As microfissuras naturais (indicadas com setas brancas) são raras, muito finas e possuem baixo relevo.

Figura 6.2 – Fotomicrografia de monzogranito intacto a nicois cruzados (ponto A na Figura 6.1). Qz – quartzo, Mc – microclínio, PI – plagioclásio, Bt – biotita, Ms – muscovita

O início do processo de microfissuramento é observado a aproximadamente 90% do carregamento de pico, e é caracterizado por poucas microfissuras induzidas, as quais se encontram concentradas e subparalelas ao eixo de carregamento. Isto se baseia tanto em análises petrográficas quanto em emissão acústica (ver capítulos 7 e 8). As lâminas petrográficas preparadas a 90% do pico de carregamento mostram poucas diferenças em comparação àquelas preparadas na condição intacta. A Figura 6.3 mostra uma fotomicrografia obtida para esse nível de carregamento, em que as pequenas

microfissuras induzidas são indicadas com setas brancas e pretas. Todas as microfissuras induzidas são fechadas e exibem maior relevo (os contornos das fissuras induzidas são mais destacados do que os naturais) quando comparadas às microfissuras naturais da rocha. A maioria delas inicia-se nos cristais de quartzo e logo se propagam através dos cristais de plagioclásio e microclínio seguindo um caminho subparalelo à direção de carregamento. No entanto, este caminho de propagação das microfissuras é tortuoso devido às características intrínsecas dos cristais (Figuras 6.3 e 6.4). Identifica o ponto de início das microfissuras no quartzo porque o relevo e o traço delas está mais evidente em tais pontos. Na medida em que a fissura continua a se propagar através do quartzo em direção ao plagioclásio a fissura observa-se mais fina e com relevo baixo. De acordo como Dey e Wang (1981), quando dois minerais diferentes se encontram em contato efetivo e submetidos ao mesmo carregamento, o mineral mais rígido será submetido a tensões de tração adicionais nas bordas do contato, o qual pode causar fissuramento no mesmo. Na estrutura do monzogranito, o quartzo é o mineral mais rígido, portanto, onde deve ser iniciado o microfissuramento de acordo com Dey e Wang (1981). Apesar das suas duas direções de clivagem, o desenvolvimento de microfissuras não é frequente em cristais de plagioclásio e microclínio devido ao imbricamento dos minerais. A Figura 6.4 mostra uma microfissura induzida que se inicia dentro de um cristal de quartzo (seta preta) e logo se propaga através de um cristal de plagioclásio (seta branca).

Figura 6.3 –Microfissuras induzidas na condição de 90% do carregamento e pico no monzogranito (ponto C na Figura 6.1). Microfissuras indicadas com setas pretas e brancas

Figura 6.4 – Detalhe de uma microfissura que se inicia no interior de um cristal de quartzo no monzogranito (o retângulo em vermelho corresponde ao zoom da área na Figura 6.3)

A Figura 6.5 mostra uma microfissura passando por um cristal de quartzo e logo pelos cristais de plagioclásio e microclínio (setas pretas). Como se observa na Figura 6.5, a microfissura não se propaga através dos planos de clivagem dos cristais de plagioclásio e microclínio. Aliás, mostra-se uma das exceções em que uma microfissura se propagou pela borda dos cristais (seta branca).

Figura 6.5 – Microfissuras induzidas na condição de 90% do carregamento e pico no monzogranito (ponto C na Figura 6.1). Setas retas indicam uma microfissura que passa por cristais de quartzo, plagioclásio e microclínio. A seta branca indica a microfissura observada no limite entre cristais

A espessura das microfissuras naturais e induzidas é muito pequena, não tendo sido possível medi-las por meio de um microscópio petrográfico convencional.

A Figura 6.6 apresenta o padrão de microfissuramento no fim do ensaio no monzogranito (ponto D na Figura 6.1). Observa-se a fissura macroscópica e algumas fissuras secundárias no centro do CP ao longo do eixo de carregamento, enquanto o restante da rocha permanece praticamente intacta. A espessura da fissura principal parece ser maior do que a realidade devido ao processo prévio de colagem das metades do CP. Embora a fissura tenha percorrido um caminho essencialmente pela quebra dos cristais, não seguindo planos de fraqueza visíveis, em alguns trechos ela se propagou através dos planos de clivagem dos cristais de plagioclásio e microclínio, como se observa no fenocristal no canto inferior direito da Figura 6.6. Além disso, alguns fenocristais de microclínio mostram fissuras abertas e deslocamento relativo perto da fissura principal (Figura 6.7). Fissuras nas bordas dos minerais são raras.

Figura 6.6 – Fissura macroscópica principal e fissuras secundárias observadas no fim do ensaio no monzogranito (ponto D na Figura 6.1). A fissura macroscópica principal parece ter uma espessura maior devido à colagem das metades do CP antes da preparação das lâminas petrográficas

Figura 6.7 – Fissura aberta e deslocamento relativo em fenocristal de microclínio próximo à fissura macroscópica principal no final do ensaio no monzogranito (ponto D na Figura 6.1)

6.2.2 Mármore

A Figura 6.8 apresenta uma fotomicrografia de uma amostra intacta de mármore a nicois descruzados. Esta rocha praticamente monominerálica possui estrutura maciça e textura granoblástica. As setas pretas indicam as microfissuras naturais, as quais são tênues, finas, mostram baixo relevo e seguem os planos de clivagem dos cristais de calcita.

Figura 6.8 – Fotomicrografia de uma amostra de mármore intacto (ponto A na Figura 6.1). Cal – calcita

Os planos de clivagem da calcita tornam-se mais visíveis na medida em que o carregamento aumenta. No entanto, a Figura 6.9 mostra que até aproximadamente 75-80% do carregamento de pico o microfissuramento já se iniciou. Isto não é baseado apenas na observação das lâminas preparadas para 75-80% do carregamento de pico, mas também nas diferenças em relação às lâminas de rocha intacta. Como será explicado nos capítulos seguintes (7 e 8), as análises dos padrões de microfissuramento através da localização tridimensional das fontes de EA e dos parâmetros de EA (energia e contagem) mostram, consistentemente, que quando o carregamento chega até 75-80% do pico, o microfissuramento já tem se iniciado e progredido desde níveis de carregamento próximos a 50-60% do pico. A 75-80% do carregamento de pico, são visíveis microfissuras dispersas concentradas principalmente na região central do CP ao longo do eixo de carregamento. Além disso, as lâminas revelam uma zona de processos mais larga em comparação com o monzogranito. No mármore, a propagação de microfissuras não ocorre de forma linear, as microfissuras iniciam-se nos planos de clivagem, logo a propagação e nucleação acontece através da conexão delas. A nucleação acontece na forma de pequenos buracos nos minerais, cujas dimensões podem variar amplamente. As setas brancas e pretas na Figura 6.9 mostram a nucleação de microfissuras já descrita, a qual ocorre principalmente no interior dos cristais de calcita, porém também se observa nas bordas desses cristais. O processo de propagação e nucleação de microfissuras é mais acentuado quanto maior o carregamento aplicado. A Figura 6.19 mostra a coalescência de microfissuras através dos planos de clivagem de calcita observado para 90% do pico de carregamento.

Figura 6.9 – Nucleação de microfissuras induzidas até 75-80% do carregamento de pico no mármore (ponto B na Figura 6.1). Microfissuras indicadas com setas brancas

Figura 6.10 – Detalhe da nucleação de microfissuras através de planos de clivagem a 90% do carregamento de pico no mármore (ponto C na Figura 6.1)

A Figura 6.11 mostra o padrão de fissuramento no final do ensaio. Em nível microscópico, as fissuras se propagam preferencialmente através dos planos de clivagem dos cristais de calcita (setas pretas), porém em alguns trechos a propagação ocorre através das bordas desses minerais (setas brancas). Na escala macroscópica, a fissura progride seguindo a direção do eixo de carregamento. É importante lembrar que a fissura macroscópica observada na Figura 6.11 parece ter uma espessura maior devido ao processo de colagem das metades do CP prévio à preparação da lâmina.

Figura 6.11 – Fissura macroscópica observada no fim do ensaio no mármore (ponto D na Figura 6.1), a nicois cruzados. A fissura macroscópica principal parece ter uma espessura maior devido à colagem das metades do CP antes da preparação das lâminas petrográficas

O padrão de microfissuramento no mármore é mais regular e segue os planos de clivagem dos cristais de calcita, enquanto que no monzogranito as microfissuras seguem um padrão tortuoso preferencialmente através da quebra de cristais sem seguir planos de fraqueza visíveis. Além disso, as análises petrográficas mostram que a zona de processos no mármore é mais larga do que no monzogranito, o que é consistente com a estrutura de ambas as rochas.

Devido às características específicas das microfissuras induzidas no mármore e no granito, é difícil definir uma espessura de fissura representativa, mesmo porque seções petrográficas representam apenas um plano do CP, e não sua espessura como um todo. Para a obtenção de tais valores, seria necessário preparar diversas lâminas paralelas na região central do CP. Além disso, as medidas da espessura da fissura no final do teste não seriam representativas, devido à necessidade de colagem dos CPs.

7 ANÁLISES BASEADAS NOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

A aplicação da técnica de emissão acústica ao estudo do processo de microfissuramento no mármore e no monzogranito é feita através de diferentes abordagens. Tais abordagens referem-se à forma com que as emissões acústicas são coletadas, avaliadas e utilizadas com o objetivo de se definir os processos e os padrões de microfissuramento no mármore e no monzogranito. De acordo com o exposto no capítulo 3.7, os sinais de EA podem ser analisados de duas formas diferentes, i. e., através da extração dos parâmetros de EA (capítulo 2.7.1) e através da utilização das formas de onda (capítulo 3.7.2). As metodologias representam dois enfoques diferentes, porém complementares, de análise e acompanhamento do processo de microfissuramento ao longo dos ensaios de compressão diametral com controle do deslocamento u . Uma terceira abordagem é a localização tridimensional das fontes de EA, a qual também é complementar àquelas acima referidas. Neste capítulo, apresentam-se as análises baseadas nos parâmetros de EA e nas formas de onda. A localização tridimensional de fontes de EA é apresentada no capítulo seguinte.

7.1 Análises baseadas nos parâmetros EA

As análises aqui apresentadas baseiam-se nos conceitos definidos no item 2.7.1. Alguns dos parâmetros utilizados neste capítulo são amplamente utilizados nos estudos de EA, tais como energia absoluta e contagem. Outros parâmetros, como a frequência de iniciação e ângulo de subida, são menos utilizados na literatura, porém são consideradas muito importantes para os fins desta pesquisa. Estes dois últimos parâmetros são definidos indiretamente no item 2.7.1, já que são calculados combinando-se parâmetros já definidos.

Todos os parâmetros de EA dependem diretamente do LR. Portanto, a magnitude destes parâmetros, assim como a quantidade de sinais coletados usada para calcular tais parâmetros muda se o LR mudar. Nos itens 3.5 e 3.2.2, foi apresentada a influência do LR no problema de saturação na coleta de sinais de EA e a necessidade de se utilizarem valores diferentes deste parâmetro nos diferentes ensaios para evitar perda de informação nos ensaios. Nesses itens menciona-se, também, como a utilização de um LR muito alto traz como consequência que os sinais de baixa amplitude sejam desconsiderados na coleta. Pelo exposto, os ensaios realizados apresentam níveis diferentes de sinais

de EA e, portanto, de parâmetros de EA. Isto representa uma característica do processo de coleta de sinais que deve ser considerada nas análises.

A respeito da quantidade de sinais coletada para a extração dos parâmetros de EA, é importante notar que nos ensaios realizados o LR foi mantido constante ao longo de cada ensaio e somente foi modificado de um ensaio para outro. Desta forma é possível definir as tendências dos parâmetros de EA e logo comparar qualitativamente as envoltórias de comportamento entre ensaios. Embora os ensaios tenham sido feitos considerando-se diferentes valores para o LR, no processo de coleta de dados considerou-se a coleta não somente dos parâmetros de EA, mas também das formas de onda. Isto permitiu recalcular os parâmetros de EA para um único valor de LR definido neste caso em 45dB, igual para todos os ensaios. Desta forma, logra-se uma maior homogeneização em termos da magnitude de cada parâmetro de EA, facilitando-se, assim, as comparações de comportamento entre ensaios. Contudo, é importante lembrar que naqueles ensaios em que o LR foi definido como sendo maior do que 45dB alguns sinais de baixa intensidade foram desconsiderados, afetando especialmente a contagem. A energia absoluta é menos influenciada por pequenas mudanças no LR. Isto ocorre, pois em sinais de baixa intensidade a mesma é muito pequena quando comparada com a energia absoluta daqueles sinais de maior intensidade coletados. Quando uma porção importante de sinais é perdida na coleta de sinais de um ensaio (seja por saturação ou por utilização de LR muito alto), as análises comparativas associadas à contagem poderiam ser afetadas. Com o intuito de obter análises e comparações adequadas os dados daqueles ensaios são desconsiderados nas análises comparativas.

7.1.1 Contagem e energia absoluta acumulada

O registro de contagem e de energia absoluta permitem acompanhar o processo de microfissuramento ao longo de todo o ensaio, sendo que quando o material atinge a sua resistência máxima, os registros de contagem e de energia absoluta aumentam significativamente.

É importante ressaltar que a observação de tendências semelhantes entre a contagem acumulada e a energia absoluta acumulada não significa que a informação é redundante, mas sim coerente e complementar. Isto porque o registro de contagem define a quantidade de emissões, mas sem definir a amplitude destas, pois as emissões de baixa intensidade podem ter a mesma contagem que as emissões de grande intensidade, enquanto que o registro de energia acumulada fornece informações a respeito da amplitude do sinal como um todo, associado à intensidade do fissuramento.

Desta forma, os maiores registros conjuntos de contagem e energia absoluta sugerem processos de fissuramento de maior importância.

As Figuras 7.1 a 7.4 apresentam os resultados típicos de contagem e energia absoluta acumulada para os ensaios de compressão diametral com controle de deslocamento monotônicos e cíclicos no monzogranito e no mármore. Os registros acumulados apresentados aqui são definidos como a soma acumulada de todas as contagens (ou energias absolutas) dos sinais para todos os canais, dentro de um intervalo de tempo. Utiliza-se o registro acumulado porque este parâmetro representa de melhor forma as variações de comportamento ao longo do ensaio, independente da quantidade de sinais coletada. As Figuras apresentam o tempo no eixo das abscissas. Não seria prático utilizar o deslocamento u porque nos ensaios cíclicos os ramos de descarregamento e recarregamento introduzem uma variável não monotônica ao longo do ensaio. Com o intuito de se apresentarem as informações da mesma forma nos ensaios cíclicos e monotônicos, utiliza-se também o tempo no eixo das abscissas nos ensaios monotônicos.

Nas Figuras 7.1a a 7.4a e 7.1c a 7.4c adicionou-se a relação de força versus tempo associada às emissões. As linhas verticais destacam os trechos de carregamento nos ensaios cíclicos e os marcos importantes nos ensaios monotônicos. As Figuras 7.1b a 7.4b e 7.1d a 7.4d apresentam um zoom do estágio A de cada ensaio (ver definição em Figura 3.5), incluindo linhas verticais para a identificação de 4 pontos de controle associados aos seguintes estágios de carregamento: 50, 75, 90 e 100% do carregamento de pico. Estes pontos de controle foram também utilizados nas análises do capítulo 6 e serão utilizados no capítulo 8, pois auxiliam as análises conjuntas de comportamentos, incluindo EA (capítulos 7 e 8), petrografia (capítulo 7) e relações de força e rigidez (capítulo 6).

A Figura 7.1 mostra os registros de contagem e energia absoluta acumulados típicos de um ensaio monotônico em monzogranito. A relação força-tempo é representada pela linha contínua vermelha e os registros de contagem e energia absoluta acumulada estão como uma linha azul tracejada. Observa-se que as emissões são quase nulas até o ponto de controle 2 (75% do carregamento de pico), tendo-se um aumento leve até o ponto de controle 3 (90% do carregamento de pico), e deste ponto até o ponto de controle 4 (pico de carregamento) ambas as emissões acumuladas aumentam gradualmente. O incremento mais pronunciado na energia absoluta do que na contagem acumulada explica-se pela forma em que a primeira é definida. De acordo com a equação 2.5, a energia absoluta é calculada considerando-se o quadrado da voltagem, o que faz com que qualquer variação na intensidade dos sinais seja apropriadamente acentuada, ajudando na identificação dos padrões de comportamento.

Figura 7.1 – Contagem e energia absoluta acumuladas versus tempo em ensaios monotônicos no monzogranito.

a) Registro de contagem até o fim do ensaio. b) Zoom do registro de contagem no estágio A. c) Registro de energia absoluta até o fim do ensaio. d) Zoom do registro de energia absoluta no estágio A

Imediatamente depois de ser atingido o pico de carregamento, as curvas de contagem e energia acumulada crescem abruptamente, acompanhadas de uma drástica diminuição na resistência. A redução média de resistência neste trecho foi de 21% em 95 segundos, para todos os ensaios monotônicos feitos no monzogranito. A tendência observada na contagem e energia absoluta acumulada, assim como a perda de resistência no trecho pós-pico, sugere uma rápida propagação de microfissuras e acumulação de dano. Isto foi confirmado pela observação de uma fissura vertical central em uma das faces do CP e também pelas análises petrográficas (ver Figura 6.3 a 6.5). O trecho pós-pico é, também, o período mais exigente do ensaio do ponto de vista do controle de deslocamento e do sistema de EA. O controle de deslocamento é difícil, pois neste estágio a resistência diminui acentuadamente enquanto o deslocamento praticamente não muda. O sistema de coleta de sinais de EA é muito exigido neste período devido à grande quantidade de sinais emitida no interior do CP, existindo, assim uma maior probabilidade de saturação de placa de coleta de dados do equipamento (ver item 3.5). Após a estabilização do carregamento, ambos os registros de EA também se estabilizam, gerando emissões a uma taxa aproximadamente constante até o segundo ponto de

instabilidade registrado em todos os ensaios em monzogranito (segunda linha vertical nas Figura 7.1a e c). O rápido aumento conjunto na contagem e na energia absoluta é um claro sinal de propagação de microfissuras, o que confere com as observações do ensaio descritas no item 5.1 a respeito do aparecimento de uma fissura vertical central em uma das faces do CP. Depois do segundo ponto de instabilidade, os registros voltam a apresentar uma taxa constante de crescimento. Isso indica que o dano continua se acumulando, mas de forma gradativa e não explosiva.

A Figura 7.2 apresenta os registros de contagem e energia absoluta acumulada típicos de ensaios cíclicos em monzogranito. A relação força-tempo nos estágios A até F é representada pela linha contínua vermelha enquanto que os estágios I até V são representados pela linha contínua verde (ver definição de estágios na Figura 3.5). Adicionalmente, foram desenhadas linhas verticais ao longo do ensaio para identificar o início e o fim dos estágios A até F. Os registros de contagem e energia absoluta acumulada estão representados em linha azul tracejada.

Figura 7.2 – Contagem e energia absoluta acumuladas versus tempo em ensaios cíclicos no monzogranito. a) Registro de contagem até o fim do ensaio. b) Zoom do registro de contagem no estágio A. c) Registro de energia absoluta até o fim do ensaio. d) Zoom do registro de energia absoluta no estágio A

Pode-se observar na Figura 7.2 que no trecho pré-pico as tendências são iguais ao definido na Figura 7.1, de acordo com o esperado. Após o pico, os registros de contagem acumulada apresentam-

se escalonados, sendo que cada patamar representa o trecho de descarregamento e recarregamento de cada ciclo (estágios I até V). A redução média de resistência registrada imediatamente após ser atingido o pico de carregamento foi, em média, de 19% em 95 segundos, para todos os ensaios cíclicos feitos no monzogranito. Tal redução é próxima aos 21% registrados nos ensaios monotônicos para um mesmo período de tempo. O período de tempo médio utilizado para calcular a perda de resistência foi aquele registrado entre o ponto de controle 4 e o fim do estágio A. A comparação com os ensaios monotônicos somente poderia ser feita considerando-se um mesmo período de tempo, pois nesses ensaios o dano pode continuar a se acumular e a resistência a diminuir até a estabilização, o que não ocorre quando o CP é descarregado nos ensaios cíclicos. Observa-se que durante os estágios I a V não há emissão significativa de sinais de EA. Somente quando o carregamento se aproxima da curva virgem (estágios B até F) as emissões recomeçam, o que é compatível com o efeito Kaiser (LAVROV et al., 2002). O início do dano no CP em cada novo ciclo é definido através da mudança da curvatura nas curvas de contagem e energia absoluta acumulada, que ocorre quando são registradas altas taxas de emissões com altos níveis de liberação de energia. A rocha continua emitindo muitos sinais de EA de alta energia até o final do ensaio.

No item 5.1 mostrou-se que tanto nos ensaios monotônicos quanto nos cíclicos no monzogranito são observados dois instantes de instabilidade (observar as duas linhas verticais tracejadas nas Figuras 7.1a e c). Na Figura 7.2 observam-se, também, os seguintes instantes: o primeiro após o ponto de controle 4, no estágio A, e o segundo, no estágio E. Nesses dois instantes foi observada uma fissura vertical centrada em uma das faces do CP, em consistência com os ensaios monotônicos. Em ambos os instantes a contagem e a energia absoluta acumulada mostram um aumento significativo, porém, menos pronunciado do que o observado nos ensaios monotônicos. O comportamento frágil e explosivo do monzogranito, observado especialmente nos dois instantes de instabilidade citados, pode ser explicado pela estrutura imbricada dos minerais que o compõem. Este tipo de estrutura formada por minerais de diferentes características opõe resistência à propagação de microfissuras, tornando o processo mais difícil e localizado.

Nos ensaios monotônicos e cíclicos no monzogranito, nos dois instantes em que os registros de contagem e energia absoluta acumulada mostraram um aumento quase instantâneo e a resistência diminui abruptamente, o CP exibiu uma fissura em uma das faces do CP. Isto sugere que quando as tendências acima referidas são observadas nos sinais de EA, as mesmas são associadas a propagação e nucleação de microfissuras, coalescência e criação de fissuras macroscópicas.

A Figura 7.3 expõe os registros de contagem e energia absoluta acumulados típicos de um ensaio monotônico em mármore. A diferença em relação ao observado no monzogranito é que o registro de ambas as emissões nesta rocha não é explosivo e concentrado, mas sim gradativo. No

trecho pré-pico (pontos de controle 1 até 4), a contagem acumulada cresce gradualmente. O pico de carregamento (ponto de controle 4) caracteriza-se pela presença de um pequeno patamar em que a contagem aumentou a uma taxa maior, gerando um ponto de inflexão na curva. O registro de energia absoluta acumulada mostra níveis de liberação crescentes desde o começo do ensaio até o pico de carregamento (ponto de controle 4).

Figura 7.3 – Contagem e energia absoluta acumuladas versus tempo em ensaios monotônicos no mármore. a) Registro de contagem até o fim do ensaio. b) Zoom do registro de contagem no estágio A. c) Registro de energia absoluta até o fim do ensaio. d) Zoom do registro de energia absoluta no estágio A

No trecho pós-pico a resistência decresce em 25% em 284 segundos, quase três vezes mais lento que no monzogranito. Após o pico, a contagem acumulada cresce a uma taxa constante, mostrando uma pequena diminuição na taxa de crescimento no fim do ensaio. Consistentemente, a taxa de liberação de energia aumenta em relação ao trecho pré-pico. No trecho pós-pico observou-se o aparecimento de uma fissura vertical centrada em uma das faces do CP, em consistência com o aumento nas emissões. A taxa de energia absoluta acumulada se mantém aproximadamente constante no trecho pós-pico até o final do ensaio.

A Figura 7.4 expõe os registros de contagem e energia absoluta acumulados típicos de um ensaio cíclico em mármore. A notação utilizada para identificar as diferentes curvas é igual àquela

mostrada na Figura 7.2. Observa-se que no trecho pré-pico tanto a contagem acumulada quanto a energia absoluta acumulada seguem a mesma tendência que nos ensaios monotônicos. Após o pico de carregamento (ponto de controle 4), ambas as emissões mostram um aumento significativo. De forma análoga ao mostrado nos ensaios monotônicos, a resistência diminui gradualmente após o pico, tendo-se uma diminuição média de 27% em 284 segundos. Este período de tempo é o mesmo utilizado para avaliar a perda de resistência nos ensaios monotônicos, o qual permite a comparação entre ambos os casos. Pode-se observar como as diminuições de resistência são muito semelhantes em ambos os tipos de ensaio, sendo que pequenas diferenças podem ser associadas à heterogeneidade própria da rocha.

Figura 7.4 –Contagem acumulada versus tempo em ensaios cíclicos no mármore. a) Registro de contagem até o fim do ensaio. b) Zoom do registro de contagem no estágio A. c) Registro de energia absoluta até o fim do ensaio. d) Zoom do registro de energia absoluta no estágio A

Após o estágio A de carregamento, os registros de contagem e energia absoluta acumulada voltam a aumentar somente nos estágios B até F, i. e., quando o carregamento se aproxima da curva virgem, em consistência com o efeito Kaiser (LAVROV et al., 2002). A contagem acumulada nos estágios B a F mostra uma tendência de crescimento menor quando comparada com o estágio anterior. A energia absoluta acumulada apresenta uma tendência semelhante, porém, no caso particular do

ensaio apresentado na Figura 7.4, no estágio C observa-se um acréscimo na taxa de emissões. Este aumento sugere coalescência de microfissuras e formação de uma fissura macroscópica, o que foi confirmado pela observação do aparecimento de uma fissura vertical centrada em uma das faces do CP.

Os registros de EA no mármore tanto nos ensaios monotônicos quanto nos cíclicos são coerentes com processos de fissuramento constante e gradativo do material. Diferentemente do monzogranito, no mármore somente às vezes pode ser identificado um segundo instante de aumento na taxa das emissões que possa ser associado com o aparecimento de uma fissura vertical na outra face do CP. Isto pode ser explicado pela forma gradativa em que o microfissuramento progride no interior desta rocha (seguindo os planos de clivagem da calcita). No capítulo 8 é apresentada a localização tridimensional das fontes de EA, onde se mostra como a superfície de dano do CP tem sido definida durante o estágio A do carregamento. Após o estágio A, somente há aumento do dano nas mesmas regiões já danificadas, o que pode explicar o aparecimento da fissura vertical centrada na segunda face do CP, que nem sempre ocorre acompanhada de altas taxas de emissões no mármore. Pelo exposto, altas taxas de contagem e energia absoluta acumulada são indicativos da abertura de uma fissura macroscópica em alguma região do CP, porém, aumentos menos marcantes nas emissões também podem indicar abertura de tais fissuras, especialmente em rochas menos frágeis, como o mármore.

As Figuras 7.1 a 7.4 mostram as tendências típicas da contagem e da energia absoluta acumuladas ao longo dos ensaios monotônicos e cíclicos em ambas as rochas. Nestas Figuras, pode-se notar que o mármore e o monzogranito apresentam diferenças de comportamento ao longo dos ensaios. O estágio A de carregamento apresenta diferenças específicas de comportamento que podem ser relacionadas às características geológicas das rochas e, portanto, precisam ser salientadas. As Figuras 7.5 e 7.6 apresentam uma análise comparativa dos registros de contagem e energia absoluta característicos do estágio A. Nessas Figuras a informação de contagem e energia absoluta é apresentada versus o deslocamento adimensional u/u_p , definido no item 5.2.

A Figura 7.5 mostra a tendência típica da contagem acumulada e do carregamento versus o deslocamento adimensional u/u_p para o mármore e o monzogranito no estágio A de carregamento. A Figura 7.6 mostra a tendência típica da energia absoluta acumulada e do carregamento versus o deslocamento adimensional u/u_p para as duas rochas no estágio A de carregamento. Da mesma forma que as Figuras anteriores deste capítulo, as Figuras 7.5 e 7.6 apresentam quatro pontos de controle até o pico de carregamento com o intuito de se acompanhar e comparar a evolução do dano em ambas as rochas. O mármore (Figuras 7.5a e 7.6a) mostra um aumento gradual da contagem acumulada desde o início do ensaio, porém, a energia acumulada apresenta incrementos mais significativos antes do ponto

de controle 1. A taxa de incremento mostra-se aproximadamente constante entre os pontos de controle 1 e 2 e desde este ponto em diante ambas as emissões exibem uma taxa de incremento crescente, i. e., quanto mais próximo do pico de carregamento (ponto de controle 4), maior a taxa de incremento nas emissões, especialmente na energia absoluta. A tendência das emissões no mármore é consistente com o padrão da rigidez K_u comentado no capítulo 5.2 e observado na Figura 5.8, assim como com as análises petrográficas apresentadas no item 6.2.2 do capítulo 6 e nas Figuras 6.9 e 6.10. A localização tridimensional das fontes de EA apresentada no capítulo 8 também mostra consistência com as observações aqui apresentadas. Tendo em conta o acima exposto, o microfissuramento no mármore inicia-se antes do 50% do carregamento de pico (ponto de controle 1) e avança gradativamente até o pico, aumentando no pós-pico até o fim do estágio A. Em contraste, o monzogranito (Figuras 7.5b e 7.6b) mostra incrementos significativos na contagem acumulada e na energia absoluta entre os pontos de controle 2 e 3, porém o maior incremento é observado próximo do ponto de controle 4 (pico de carregamento). Este comportamento é consistente com as observações feitas a respeito da rigidez K_u no item 5.2 e a Figura 5.7. Também se observa consistência com as análises petrográficas apresentadas no item 6.2.1 do capítulo 6, especialmente nas Figuras 6.3 a 6.5, e com os resultados da localização tridimensional de fontes de EA que serão apresentados no capítulo 8. Baseado nas informações acima referidas, o início do microfissuramento no monzogranito acontece entre 75 e 90% de carregamento de pico (pontos de controle 2 e 3), mas se desenvolve mais visivelmente ao redor do pico de carregamento.

Figura 7.5 – Contagem acumulada versus deslocamento adimensional u/up típica no estágio A. a) Mármore; b) Monzogranito

Figura 7.6 – Energia absoluta acumulada versus deslocamento adimensional u/u_p típica no estágio A; a) Mármore; b) Monzogranito

Os padrões macroscópicos observados nas Figuras deste capítulo, assim como aqueles apresentados no item 5.3 podem ser explicados examinando-se as características microscópicas das rochas em estudo. A estrutura interna do monzogranito inclui um mineral mais rígido e mais tenaz sem planos de clivagem (quartzo), e outros minerais menos rígidos e menos tenazes que apresentam planos de clivagem (ver Tabela 6.2). Esses minerais contidos no monzogranito apresentam poucas microfissuras naturais, orientação aleatória e se dispõem em uma estrutura imbricada (ver fotomicrografia na condição intacta na Figura 6.2). O imbricamento do monzogranito lhe proporciona elevada resistência à propagação de microfissuras. O início do microfissuramento e a perda de rigidez somente ocorrem quando o carregamento se aproxima da resistência de pico (90% da carga de pico). Devido ao tipo de estrutura que esta rocha apresenta, as microfissuras crescem e se propagam através de uma estrutura imbricada que tenta freá-las. Como resultado, a propagação de microfissuras é frágil, explosiva, localizada e seguida de altos níveis de contagem registrada e energia absoluta liberada. Contrastando com o monzogranito, o mármore é uma rocha monominerálica, homogênea, sem imbricamento e que apresenta três planos de clivagem perfeita nos cristais de calcita (ver Tabela 6.1). Esse conjunto de características promove facilmente a propagação de microfissuras. A presença de diversas microfissuras naturais na calcita (ver fotomicrografia na condição intata na Figura 6.8) é um fator adicional que favorece mais ainda o início precoce do microfissuramento e a perda gradativa de rigidez. Como consequência deste conjunto de fatores, as microfissuras simplesmente seguem os planos de clivagem dos cristais de calcita e crescem gradualmente na medida em que o carregamento aumenta. Isso leva a um processo de propagação de microfissuras lento, estável, distribuído e seguido de baixos níveis de energia absoluta liberada.

Embora as Figuras 7.5 e 7.6 revelem que ambas as rochas apresentam níveis comparáveis de energia absoluta acumulada no final do estágio A, tais níveis são associados a processos de microfissuramento diferentes. A energia absoluta acumulada registrada no mármore é devida à soma de muitas microfissuras espalhadas ao longo da superfície de fratura do CP, as quais liberam pouca energia cada. Em contraste, níveis semelhantes de energia acumulada no final do estágio A no monzogranito são decorrentes de umas poucas microfissuras que liberam altos níveis de energia absoluta.

As Figuras 7.7 e 7.8 apresentam a evolução típica da contagem e a energia absoluta acumulada versus o deslocamento adimensional u/up até o final do ensaio no monzogranito e no mármore para ensaios monotônicos e cíclicos respectivamente. O número de ensaios considerado nas Figuras 7.7a e 7.8a é menor do que nas Figuras 7.7b e 7.8b, porque em alguns dos ensaios o LR considerado na coleta de dados não permitiu que os registros de contagem acumulada fossem comparáveis com os outros. Como exposto no início deste capítulo, o parâmetro de contagem é mais sensível ao LR do que a energia absoluta, pelo qual as Figuras 7.7b e 7.8b apresentam um número maior de ensaios. Com o intuito de se comparar o comportamento entre o mármore e o monzogranito, as tendências gerais obtidas para ambas as rochas são apresentadas em uma mesma Figura. Nestas Figuras, as linhas contínuas pretas mostram os ensaios feitos no monzogranito e as linhas vermelhas tracejadas os ensaios feitos no mármore. As duas linhas de ajuste linear representam a tendência média para ambas as rochas.

Figura 7.7 – Contagem acumulada (Figura a) e Energia Absoluta (Figura b) versus deslocamento adimensional u/up em ensaios monotônicos no monzogranito e no mármore

Figura 7.8 – Contagem acumulada (Figura a) e Energia Absoluta (Figura b) versus deslocamento adimensional u/up em ensaios cíclicos no monzogranito e no mármore

As Figuras 7.7 e 7.8 mostram que as tendências típicas na contagem e na energia absoluta dos ensaios monotônicos e cíclicos são semelhantes. Observa-se, também, que o monzogranito e o mármore exibem níveis parecidos de contagem e energia acumulada aproximadamente até o fim do estágio A, porém, durante os estágios B até F o monzogranito mostra níveis muito maiores de ambas as emissões. As relações entre a contagem acumulada até o fim do estágio A e o fim do ensaio são de 2,85% para os ensaios no monzogranito e de 23,14% para os ensaios no mármore. As relações para a energia acumulada absoluta, por sua parte, são de 0,8% para o monzogranito e de 15,36% para o mármore. Além disso, os níveis de contagem acumulada até o final do ensaio no monzogranito são aproximadamente 9 vezes maiores do que no mármore. Os níveis de energia acumulada até o final do ensaio no monzogranito são aproximadamente 50 vezes maiores do que no mármore. Estas relações consideram tanto ensaios cíclicos quanto monotônicos. A relação entre as inclinações das retas de ajuste da contagem acumulada no monzogranito e no mármore é de 17,2 para os ensaios monotônicos (Figura 7.7a) e de 25,4 para os ensaios cíclicos (Figura 7.8a). A mesma relação para as energias absolutas acumuladas é de 115,5 para os ensaios monotônicos (Figura 7.7b) e de 98,1 para os ensaios cíclicos (Figura 7.8b). Pelo exposto, é claro que o monzogranito tem liberado somente uma pequena porção de energia entre 90% do pico de carregamento (início do microfissuramento) e o fim do estágio A, mesmo incluindo neste trecho o pico de carga em que há uma grande perda de resistência. Nos estágios seguintes, B até F, o monzogranito ainda emite muita energia e contagem através do processo de microfissuramento, o que sugere que o processo de ruptura desta rocha é progressivo. No mármore a proporção de emissões registrada até o fim do estágio A revela que entre 25 e 50% do carregamento

de pico (início do microfissuramento) e o fim do estágio A tem-se desenvolvido uma porção importante do processo de fissuramento no CP, diferentemente do monzogranito. Nos estágios seguintes, B até F, os níveis de ambas as emissões continuam a crescer, mas com menor intensidade em comparação ao estágio A, o que sugere um processo de ruptura mais concentrado no primeiro estágio e não progressivo como no caso do monzogranito. As relações entre as inclinações das retas de ajuste obtidas entre o monzogranito e o mármore são um claro indicativo da diferença na quantidade de emissões que o monzogranito ainda emite após o pico (98,1 e 115,5 versus 17,2 e 25,4). Todas as diferenças aqui apresentadas são consistentes com os padrões de localização de fontes de EA apresentadas no capítulo 8.

7.1.2 Frequência de iniciação e ângulo de subida

A literatura tem apresentado alguns estudos qualitativos (AGGELIS, 2011; AGGELIS et al., 2012; CARPINTERI; CORRADO; LACIDOGNA, 2013; KORDATOS; AGGELIS; MATIKAS, 2012; OHNO; OHTSU, 2010) em que se usa uma combinação dos parâmetros de contagem, duração (t_d), tempo de subida (RT) e amplitude (A) para definir o ângulo de subida, $1/RA$, e a frequência média, AF. RA e AF têm sido utilizados pelos autores acima citados para definir os modos de ruptura que caracterizam o fissuramento, principalmente no concreto.

A Figura 7.9a apresenta um esquema em que se define o parâmetro RA e as Figura 7.9b e 7.9c apresentam a relação entre este fator e os modos de ruptura I e II.

Figura 7.9 – Parâmetro RA. a) Definição esquemática geral. b) Relação entre o modo de ruptura e a forma da onda

Fonte - Ohtsu (2010)

Segundo Kordatos et. al. (2012), as formas das ondas de EA são caracterizadas por microfissuras que se propagam no interior do material, através do qual fornecem informação sobre o modo de ruptura associado a elas. Quando fissuras de tração (modo I) se propagam, o movimento das ondas é essencialmente governado por ondas de compressão, as quais são as mais rápidas a se propagar. Portanto, a maior porção da energia liberada no processo de fissuramento registra-se bem cedo na forma de onda (trecho de registro de voltagem no tempo) registrada pelo equipamento de EA. Como consequência, o RT é curto e o $1/RA$ é grande (ver Figura 7.9b). Por outro lado, na propagação de fissuras de cisalhamento (modo II), a maior porção da liberação de energia ocorre na forma de ondas de cisalhamento, que são mais lentas do que as de compressão, atrasando a chegada da maior porção do sinal. Isso leva a RT mais longos e $1/RA$ menores do que no modo I (ver Figura 7.9c).

A Figura 7.10a apresenta a definição da frequência média AF. Estudos feitos em concreto mostram que a variação de AF de valores altos para valores baixos pode indicar variação do modo de ruptura de tração para cisalhamento (CARPINTERI; CORRADO; LACIDOGNA, 2013; OHNO; OHTSU, 2010). A respeito do uso deste parâmetro, considera-se uma pequena variação baseada na forma em que os sinais de EA são definidos. O início do sinal (forma de onda) contém as ondas emitidas diretamente da fonte (propagação de microfissuras) e o final dela contém as ondas refletidas muitas vezes antes de chegar ao sensor. O trecho de subida do sinal (desde o início da forma de onda até a amplitude máxima A) é formado pelas ondas refletidas em superfícies muito próximas ao sensor, enquanto que o trecho de descida (desde a amplitude máxima A até o fim da forma de onda) é formado pelas ondas refletidas em superfícies mais distantes do sensor, atenuadas pelo amortecimento próprio do material em que elas se propagam. Aliás, frequências mais altas atenuam-se mais rápido, portanto o conteúdo de frequências do trecho de descida do sinal deve ser menor. Pelo exposto, considera-se que a porção de subida da forma de onda pode representar melhor o efeito da propagação das microfissuras no interior do CP. Por isto, ao invés de se utilizar a frequência média AF do sinal, utiliza-se a frequência de iniciação IF, definida na Figura 7.10b.

Figura 7.10 – Parâmetros AF e IF. a) Frequência média AF. b) Frequência de iniciação IF

Pode-se ver na Figura 7.10a que AF caracteriza a frequência média do sinal inteiro, incluindo o trecho de descida do sinal, que contém maior amortecimento do sinal e atenuação das frequências mais altas. Já na Figura 7.10b mostra-se que IF caracteriza a frequência média apenas do trecho de subida do sinal (até a sua amplitude máxima), em que a influência do amortecimento do sinal e atenuação das frequências mais altas é menor. Observa-se na Figura 7.10b que a frequência de iniciação IF do sinal é definida da mesma forma que a frequência média AF, porém para o trecho de subida do sinal. Como o que se deseja avaliar é a informação do sinal na condição mais semelhante possível ao sinal gerado na fonte de EA, considera-se mais adequado utilizar IF em lugar de AF. Pela forma em que ambos os parâmetros são definidos, para um mesmo sinal AF deve ser menor que IF, pois incorpora o trecho de sinal mais atenuado, diminuindo a frequência média obtida. Além disso, IF é mais representativo do sinal original gerado na fonte produzida pela propagação de uma microfissura. Consistentemente, a frequência de iniciação IF considera o mesmo trecho do sinal que o ângulo de subida $1/RA$. A influência do meio e do equipamento no registro de frequências será discutido no item 7.2.2.

As Figuras 7.11 e 7.12 apresentam a variação típica da média móvel de IF e RA no tempo, registrada em ensaios monotônicos e cíclicos no monzogranito e no mármore. Nestas figuras, foi adicionada a curva de força versus tempo para visualizar melhor o avanço do ensaio. A Figura 7.11 apresenta o tempo no eixo das abscissas devido à dificuldade de apresentação das informações versus o deslocamento u não monotônico nos ensaios cíclicos.

A Figura 7.11a mostra a tendência de IF e RA para os ensaios monotônicos no monzogranito. As linhas verticais tracejadas identificam marcos importantes no decorrer do ensaio. A primeira linha vertical identifica 90% do carregamento de pico (ponto de controle 3 nas Figuras 7.1 a 7.6), a segunda linha vertical identifica o pico de carregamento (ponto de controle 4 nas Figuras 7.1 a 7.6) e a terceira identifica a segunda grande queda de resistência registrada nos ensaios.

O trecho inicial do ensaio até 90% do carregamento de pico deve ser analisado considerando-se as informações apresentadas no item 7.1.1. De acordo com o observado nas Figuras 7.1, 7.5 e 7.6, até o ponto de controle 2 (75% do pico) o nível de energia absoluta é quase nulo e entre os pontos de controle 2 e 3 (75-90% do pico) o nível de energia absoluta ainda é baixo em comparação aos níveis registrados após esse ponto, assim os poucos sinais coletados até esse instante não são representativos de processos importantes de microfissuramento, o que será confirmado nas análises no domínio das frequências no item 7.2. Níveis baixos de energia absoluta estão associados a sinais de muito baixa intensidade. Tais sinais são particularmente sensíveis à influência do LR na determinação do início do sinal. Isto afeta principalmente a estimativa do RT e do RA, mas não o IF. Pelo exposto, considera-se que as informações até 90% do pico de carregamento não estão

associadas a processos de microfissuramento e, portanto, não devem ser considerados nas tendências gerais do monzogranito. Observa-se, também, uma variação local e pronunciada do IF e do RA nos dois instantes de instabilidade do ensaio, os quais são seguidos de uma grande queda na resistência (2° e 3° linhas verticais na Figura 7.11a). Isto sugere uma transição de microfissuramento para macrofissuramento, o que é consistente com o aparecimento de fissuras macroscópicas verticais centradas na superfície do CP nesses dois instantes de instabilidade. Além disso, a característica explosiva nos processos de fissuramento no monzogranito pode explicar as grandes variações locais de ambos os parâmetros nos dois instantes de instabilidade acima referidos. Em termos gerais, o IF na Figura 7.11a é decrescente, enquanto a tendência do RA é crescente e anticíclica em relação à IF. Isto mostra a flexibilização da rocha ao longo do ensaio, assim como a mudança no modo de ruptura, semelhante ao observado em concreto por Aggelis (2011). A tendência crescente de RA sugere que o ensaio começa com predominância do modo de tração, mas na medida em que avança, o modo misto ou de cisalhamento devem aparecer. Este comportamento pode ser explicado porque após se ter fissuras macroscópicas no CP, o atrito entre as faces soma-se aos sinais de microfissuras de tração que ocorrem nas regiões ainda não rompidas.

Figura 7.11 – Frequência de iniciação média IF e RA médio versus tempo no monzogranito. a) Ensaio monotônico no monzogranito. b) Ensaio cíclico no monzogranito

A Figura 7.11b apresenta a variação típica da média móvel de IF e do RA no tempo, registrada em ensaios cíclicos em monzogranito. A primeira e a segunda linhas verticais identificam os mesmos

marcos que na Figura 7.11a (pontos de controle 3 e 4 nas Figuras 7.1 a 7.6). As linhas seguintes identificam os estágios de carregamento A até F (trecho virgem da curva). O trecho entre o início do ensaio e aproximadamente 90% do carregamento é desconsiderado nas análises de tendências pelas mesmas razões apresentadas no parágrafo anterior e associadas à Figura 7.11a. Observa-se na Figura 7.11b que a tendência geral dos parâmetros IF e RA nos trechos virgens dos ciclos de recarregamento (estágios A a F) é análoga à da Figura 7.11a. O comportamento observado nos trechos virgens dos ciclos de recarregamento nos ensaios cíclicos (Figura 7.11b) é consistente com o observado nos ensaios monotônicos (Figura 7.11a), pois nesses trechos virgens é onde deve progredir o dano, de acordo ao efeito Kaiser (LAVROV et al., 2002). A variação local do IF e do RA após o pico de carregamento e logo no meio do estágio E estão associadas à criação de fissuras macroscópicas nas superfícies do CP. Pode-se observar como as tendências locais e gerais nos ensaios cíclicos são consistentes com as observadas no ensaios monotônicos, portanto as afirmações feitas para a Figura 7.11a são válidas para a Figura 7.11b.

A Figura 7.12a mostra a tendência de IF e RA para os ensaios monotônicos no mármore. No caso do mármore o início de microfissuramento ocorre um pouco antes do 50% do carregamento de pico, (ver item 6.2.2, 7.1.1 e 8). As duas linhas verticais tracejadas identificam o 50% do carregamento de pico (ponto de controle 1 nas Figuras 7.1 a 7.6) e o pico de carregamento (ponto de controle 4 nas Figuras 7.1 a 7.6). A Figura 7.12b mostra a tendência de IF e RA para os ensaios cíclicos no mármore. Nesta Figura, as outras linhas identificam os estágios A a F do carregamento. O trecho entre o início do ensaio e aproximadamente 50% do carregamento é novamente desconsiderado nas análises pelas razões apresentadas nas explicações da Figura 7.11. Na Figura 7.12a observa-se que especialmente no início do ensaio os valores de RA estão fora da tendência esperada. Considera-se que esses valores altos de RA no início do ensaio e até aproximadamente 50% do carregamento de pico não são devidos a cisalhamento de microfissuras, pois o processo de dano não tem progredido o suficiente para se ter esse efeito. Assim, a informação do parâmetros RA no trecho inicial da Figura 7.12^a é desconsiderado. Contudo, no começo do ensaio, no caso do mármore, os níveis de energia absoluta são maiores do que no monzogranito, portanto o efeito do LR na estimativa do RT e o RA deve ser menor. A Figura 7.12 mostra tendências semelhantes àquelas obtidas na Figura 7.11, porém menos marcantes. Considera-se que o fato de o mármore apresentar ruptura menos frágil e explosiva do que o monzogranito faz com que a diminuição na IF após o pico seja gradativa, mesmo quando seguida da abertura de uma fissura vertical centrada em uma das faces do CP. A variação de ambos os parâmetros quando a fissura se abre na outra face do CP é, também, gradual. Este comportamento é consistente com a variação gradual de contagem e energia absoluta apresentada no item 7.1.1. A

respeito dos modos de ruptura, também se observa a mudança dos modos governados por tração para modos associados à tração e cisalhamento (menor predominância de tração).

A comparação entre as Figuras 7.11 e 7.12 mostra que IF e RA apresentam ordens de grandeza semelhantes em ambas as rochas, o que indica que as características próprias do processo de fissuramento prevalecem sobre as características da rocha. Isto é consistente com a hipótese inicial de se avaliarem os modos de ruptura através da análise do trecho de subida do sinal, não afetado pelos efeitos de amortecimento e múltiplas reflexões da onda no interior do CP. Além disso, a tendência decrescente no IF é mais marcante no mármore do que no monzogranito, o que é consistente com o início e propagação do microfissuramento mais precoce no mármore do que no monzogranito (níveis de carregamento menores). Esta tendência do IF ao longo do ensaio também mostra que a flexibilização é menor no monzogranito, o que é consistente com o processo de ruptura progressiva no monzogranito (ver capítulo 8). Este comportamento é analisado mais detalhadamente através das análises das formas de onda no domínio das frequências apresentado no item 7.2.

Figura 7.12 – Frequência de iniciação média IF e RA médio versus tempo no mármore. a) Ensaio monotônico no mármore. b) Ensaio cíclico no mármore

É importante lembrar que as frequências médias apresentadas neste capítulo não são frequências no sentido real, mas sim uma representação qualitativa das características gerais de cada onda. Isto porque IF é uma razão entre dois parâmetros (contagem ao pico e RT) representados por números inteiros positivos. Portanto, não é possível definir com este parâmetro o conteúdo de

frequências a cada instante em cada sinal coletado. Por outro lado, a detecção da chegada da onda P de cada sinal é feita de maneira simplificada através do LR, assim a estimativa do RT é também simplificada. Conforme já discutido, considera-se importante complementar estas análises com as análises das formas de onda coletadas nos ensaios, aplicando a transformada de Fourier para estimar as frequências. A taxa de aquisição das formas de onda foi de 1MHz (ver item 2.4.4).

Por outro lado, vale a pena ressaltar que as Figuras 7.11 e 7.12 apresentam a variação da média móvel de IF e RA ao longo de um ensaio, portanto, embora é possível analisar as tendências gerais de ambos os parâmetros e definir trechos de comportamento, a estimativa exata do início do microfissuramento não pode ser definida com eles. As definições mais exatas do início do microfissuramento são feitas por meio do uso da localização tridimensional de fontes de EA apresentado no capítulo 8.

7.2 Análises baseadas nas formas de onda no domínio das frequências

As análises apresentadas no item 7.1 foram feitas considerando-se alguns parâmetros representativos das formas de onda (contagem, energia absoluta, IF, RA), mas não a forma de onda inteira. A coleta das formas de onda permitiu uma maior homogeneização das informações coletadas nos diferentes ensaios utilizando valores diferentes para o LR. Contudo, há mais vantagens na coleta de forma de onda que vale a pena considerar. Uma das vantagens é a estimativa mais apropriada dos parâmetros necessários para a localização de fontes de EA (ver capítulo 8). Outra vantagem, a ser desenvolvida neste item, é a possibilidade de estudar o espectro de frequências contido nos sinais de EA. Pelo exposto, considera-se importante complementar as análises já feitas com as apresentadas neste item a fim de se obter uma caracterização abrangente do processo de microfissuramento através dos sinais de EA. Os dois tipos de análise apresentados neste capítulo serão, também, complementadas com as obtidas da localização tridimensional de fontes de EA no capítulo 8.

As análises no domínio das frequências são realizadas através da aplicação da transformada de Fourier às formas de onda coletadas. Para manter a informação no domínio do tempo e adicionar a informação no domínio das frequências, as análises são apresentadas através de espectrogramas. Assim, é possível estudar as variações nos padrões de frequências em conjunto com a curva de carga versus tempo, e desta forma, acompanhar o processo de microfissuramento na medida em que as frequências são desenvolvidas. Os conceitos gerais sobre a aplicação da transformada de Fourier e geração de espectrogramas apresentam-se a seguir.

7.2.1 Conceitos gerais da transformada de Fourier e geração de espectrogramas

Considera-se uma série discreta e aperiódica de dados $y = x(k \cdot T)$, em que y indica o valor da amostra coletada no instante $k \cdot T$ (amostra k -ésima), T é o período de amostragem, k é um índice que permite obter os tempos em que é feita a amostragem ($k = 0, 1, \dots, N-1$), $F_s = 1/T$ é a frequência de amostragem associada à coleta de dados da série e N é o número total de amostras. A série $y = x(k \cdot T)$ pode se decompor em uma soma ponderada de sinais senoidais simples com diferentes frequências f tais que $f = \frac{n}{N \cdot T} = \frac{n \cdot F_s}{N}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, através da transformada de Fourier, definida como:

$$x(k \cdot T) = \sum_{n=0}^{N-1} x(f) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / N} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7.1)$$

Em que os coeficientes espectrais ou coeficiente de Fourier $x(f)$ são:

$$x(f) = x\left(\frac{n}{N \cdot T}\right) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x(k \cdot T) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7.2)$$

Então, para analisar o conteúdo de frequência em uma série discreta no tempo, utiliza-se a transformada de Fourier. As frequências para as quais são calculados os coeficientes espectrais $x(f)$ são: $f = \frac{0 \cdot F_s}{N}, \frac{1 \cdot F_s}{N}, \frac{2 \cdot F_s}{N}, \dots, \frac{(N-1) \cdot F_s}{N}$. Os coeficientes definidos na equação 7.2 fornecem informação relacionada a como se combinam as ondas senoidais com diferentes frequência f para compor o sinal original $y = x(k \cdot T_s)$. O resultado da equação 7.2 é um número complexo que define o nível de semelhança entre o sinal original e o sinal senoidal cuja frequência $f = \frac{n}{N \cdot T}$ é definida pelo índice n . O termo $e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / N}$ da equação 7.2 pode ser escrito da seguinte forma:

$$e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / N} = \cos\left(\frac{-2 \cdot \pi \cdot k \cdot n}{N}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{-2 \cdot \pi \cdot k \cdot n}{N}\right) \quad (7.3)$$

A equação 7.3 permite mostrar como os coeficientes espectrais têm uma parcela real e uma imaginária. A parcela real de cada coeficiente espectral $x(f)$ representa a semelhança entre o sinal real e a função cosseno, enquanto a parcela imaginária representa a semelhança entre o sinal real e a função seno. Para levar em consideração ambas as parcelas na decomposição, utiliza-se a norma dos coeficientes espectrais $|x(f)|$ (SANCHO; VILDA; BERMÚDEZ, 1999):

$$|x(f)| = \sqrt{\text{real}^2 + \text{imaginária}^2} \quad (7.4)$$

Os valores de $|x(f)|$ na decomposição espectral de um sinal representam a intensidade de cada frequência no sinal. Estes coeficientes são adimensionais.

A Figura 7.13 apresenta, de forma esquemática, a representação gráfica da transformada de Fourier. A Figura 7.13a mostra o registro de voltagem no tempo $V = y = x(k \cdot T)$, de uma série qualquer que, neste caso é periódica. O sinal da Figura 8,13a é formado pela soma dos sinais senoidais apresentados na Figura 7.13b. Cada sinal da Figura 7.13b é periódico e possui uma frequência que o define (f_1 , f_2 e f_3). Aplicando a transformada de Fourier ao sinal da Figura 7.13a, teremos os coeficientes espectrais $|x(f)|$ apresentados na Figura 7.13c. No caso do exemplo o sinal é composto somente pelos três sinais da Figura 7.13b, portanto, é claro que os coeficientes espectrais terão valores não nulos para estes sinais. As frequências (f_1 , f_2 e f_3) são as frequências contidas no sinal. Sinais de outras frequências não compõem o sinal original. A magnitude $|x(f)|$ obtida na transformada de Fourier representa a importância de cada onda (definida através de uma única frequência f) no sinal original. Na figura 7.13c pode-se observar como o sinal de frequência f_3 é a mais importante no sinal, seguida das frequências f_1 e f_2 em importância.

Figura 7.13 – Representação conceitual da Transformada de Fourier

Os sinais de EA são aperiódicos e se caracterizam por apresentarem um trecho de subida muito menor do que de descida, em que o amortecimento atenua o sinal. A Figura 7.14a apresenta um sinal típico de EA coletado durante o processo de microfissuramento de um CP. O eixo das ordenadas representa a voltagem e o eixo das abscissas representa o tempo. Essa informação corresponde à série $y = x(k \cdot T)$ definida nos parágrafos anteriores. Lembrando que nos ensaios de compressão diametral foi utilizada uma taxa de amostragem de 1MSPS e um comprimento de 1k para cada trecho de onda coletada (ver definição dos parâmetros em item 3.4.4), têm-se 1024 amostras em cada sinal de EA, coletadas cada $1\mu s$, portanto, o tempo de um sinal é de $1024 \cdot 10^{-6} = 0,001024s \approx 1ms$, como se pode ver na Figura 7.14a. A Figura 7.14b apresenta a transformada de Fourier do sinal, sendo que no eixo das abscissas têm-se as frequências e no eixo das ordenadas os coeficientes espectrais. A faixa de frequências considerada é de até 500kHz, pois para uma taxa de amostragem de 1MSPS essa é a máxima frequência que poderia ser coletada (ver teorema de amostragem de Nyquist-Shannon no item

3.4.4). Observa-se que as frequências mais importantes no sinal encontram-se entre 100 e 200kHz, especialmente ao redor de 150kHz.

Figura 7.14 – Transformada de Fourier e espectrograma para um sinal de EA

A transformada de Fourier aplicada ao sinal (Figura 7.14a) fornece o espectro de frequências (Figura 7.14b). No entanto, o gráfico de intensidade $|x(f)|$ versus frequências como o apresentado na Figura 7.14b não fornece o conteúdo de frequências associado a cada trecho do sinal, mas o espectro de frequências contido no sinal inteiro. Assim, com o objetivo de se obter o espectro de frequências contido nos diferentes estágios de tempo do sinal, utiliza-se a transformada de Fourier em tempo curto (*Short-time Fast Fourier transform*, STFFT) para a geração de espectrogramas. Dessa maneira, podem ser avaliados os espectros de frequências contidos no sinal, mas sem perder a informação ao longo do tempo. O sinal é dividido em pequenos trechos ou janelas ao longo do tempo, e cada janela é associada ao mesmo intervalo de tempo no sinal original. Aplica-se a transformada de Fourier a cada janela de sinal, obtendo-se o espectro de frequências para cada uma delas sem perder a informação ao longo do tempo. Este procedimento é chamado de transformada de Fourier em tempo curto (STFFT) e permite a geração de espectrogramas.

Os espectrogramas são gráficos tridimensionais, tendo em um eixo o tempo, no outro eixo as frequências e no terceiro os coeficientes espectrais $|x(f)|$. Para maior facilidade de visualização, os espectrogramas são apresentados como na Figura 7.14c, em que no eixo das abscissas mostra-se o tempo e no eixo das ordenadas mostram-se as frequências. Os coeficientes espectrais para cada par

(tempo, frequência) são representados em escala logarítmica $\log|x(f)|$. colorida como a mostrada à direita na Figura 7.14c. Estes coeficientes representam uma maior ou menor predominância das diferentes frequências em cada trecho de sinal. Pode-se observar como os diferentes valores de $\log|x(f)|$ geram uma superfície colorida, em que os picos maiores ressaltam-se na cor vermelha escura ($\log|x(f)| = -100$) e representam as frequências predominantes no sinal. A diminuição gradativa na intensidade da cor, de vermelho a laranja até amarelo, verde e azul, representa a diminuição também gradativa na importância com que se apresentam as frequências para cada par (tempo, frequência) do sinal. Assim, as frequências não predominantes mostram na cor azul ($\log|x(f)| = -300$). A explicação e definição dos espectrogramas apresentada aqui são válidas para todos os espectrogramas mostrados nas Figuras 7.16 e 7.18.

A Figura 7.14c mostra o espectro de frequências para cada trecho do sinal mostrado na Figura 7.14a. Observa-se que o trecho de subida do sinal é onde há as maiores intensidades dos coeficientes espectrais, assim como a maior faixa de frequências contidas no sinal (as cores vermelhas ocupam a faixa de frequências desde aproximadamente 50kHz até 500kHz). Este aspecto é típico de sinais de EA, como será discutido nos itens 7.2.2 e 7.2.3. Além disso, o espectrograma mostra como no trecho de descida do sinal a faixa de frequências vai se estreitando, o que reflete o amortecimento do sinal. No trecho final do sinal, observa-se como a faixa de frequências fica ainda mais estreita, chegando a um valor aproximado de 150kHz no final dela. O comportamento do sinal em frequências sugere que a frequência observada no final do sinal é a frequência característica do sistema de EA.

Com o intuito de se avaliar a frequência de 150kHz observada no final dos sinais de EA nos ensaios de compressão diametral, foram feitos testes de quebra de grafite em aço, monzogranito e mármore, de forma semelhante ao descrito no item 2.3. Os registros das formas de onda coletadas foram analisados através da geração de espectrogramas. Considerou-se a utilização de diferentes tipos de grafite, com dureza entre 4H e 2B e diâmetros entre 0.7mm e 0.3mm. Os espectrogramas obtidos nos três materiais, considerando-se diferentes tipos de grafite, mostraram uma frequência predominante de aproximadamente 150kHz, igual à resposta típica observada na Figura 7.14c. Pelo exposto, considera-se que essa frequência representa as características próprias do equipamento.

7.2.2 Influência do meio, do sensor e do processador no registro de frequências

Os sinais de EA gerados no interior dos CPs viajam através do material em que são gerados (meio), chegam ao sensor e logo são processadas no sistema de recepção de sinais. Esta cadeia de

elementos apresenta características próprias que modificam o sinal inicialmente originado (ver Figura 7.15). As ondas elásticas originadas no interior da rocha chegam ao sensor, onde são transformadas em sinais elétricos que logo são processados e salvos pelo equipamento de EA. Neste processo tanto o meio, quanto o sensor e o processador incorporam suas características próprias, afetando em algum nível, a forma e o conteúdo de frequências da onda original. Desta maneira o sinal finalmente coletado contém informação da fissura gerada, da rocha e do equipamento (sensor e processador).

A Figura 7.15 mostra de forma esquemática o efeito das características em frequência que cada elemento tem e como somando estes efeitos todos se obtém o sinal realmente recebido e analisado nesta pesquisa. Os sinais de EA próximos à fonte têm a forma semelhante a um pulso, como se mostra esquematicamente na borda inferior esquerda na Figura 7.15. Este tipo de sinal caracteriza-se por ter um espectro de banda larga em frequências, i. e., a fonte emite energias em praticamente todas as frequências (ABENDI, 2011). Esta condição é representada por uma transformada de Fourier praticamente constante para todas as frequências (esquema superior esquerdo na Figura 7.15).

Figura 7.15 – Modificação das ondas de EA pelo meio e pelo sensor

Quando este sinal impulsivo viaja através do CP, a sua faixa de frequências é modificada pelas características mecânicas e geométricas do mesmo. A transformada de Fourier do meio é apresentada apenas de forma esquemática na Figura 7.15, visto que esta depende de cada meio de propagação em particular. A propagação das ondas elásticas através do meio faz com que algumas das frequências inicialmente contidas no sinal sejam atenuadas e outras acentuadas, modificando tanto a forma do sinal quanto o seu espectro de frequências. Visto que as características associadas ao meio alteram-se local e globalmente na medida em que o CP é danificado e a sua rigidez diminui, o seu espectro de frequências característico não é tão fácil de determinar. Quando as ondas chegam ao sensor, ele também impõe suas características próprias ao sinal, as quais a modificarão em maior ou menor medida de acordo com o tipo de sensor utilizado. Qualquer sensor utilizado para coletar sinais de EA, embora seja de banda larga, não apresenta a mesma sensibilidade para todas as frequências. Por isso,

algumas frequências apresentam-se mais atenuadas do que outras. O sensor é estimulado com sinais de diferentes frequências, registrando-se a amplitude com que este recebe cada sinal. Desta forma, a sensibilidade do sensor é definida através dos registros da amplitude com que o sensor recebe os sinais de diferentes frequências, chamados de curva de calibração (ver curva de calibração típica dos sensores utilizados na pesquisa na Figura 3.3). No caso desta pesquisa, o tipo de sensor utilizado é de banda larga, o qual é representado de forma esquemática na Figura 7.15 e em escala real na Figura 3.3. Desta forma, o sensor representa o sinal recebido com alta fidelidade sem introduzir alguma frequência preferencial no sinal. De acordo com o mostrado na Figura 3.3, a faixa de recepção dos sensores utilizados é aproximadamente de 130kHz a 900kHz. Lembrando-se que a frequência máxima utilizada nas análises é de 500kHz, a faixa de recepção dos sensores permite a coleta de sinais até o máximo de frequências em estudo, mas atenua as frequências menores que 130kHz. Após serem recebidos pelo sensor, os sinais elétricos são filtrados pelo processador. Este processo de filtragem inclui os filtros passa alta e passa baixa, assim como a capacidade de recepção da placa de coleta de sinais do equipamento. Segundo foi explicado no item 3.4.2, a faixa de frequências mais restritiva obtida entre a capacidade da placa e os filtros passa baixa e passa alta é a faixa de frequências que o processador pode coletar (ver esquema da filtragem imposta pelo processador na borda superior direita da Figura 7.15). Todas as frequências que ficam fora desta faixa imposta pelo processador são atenuadas. O sinal finalmente salvo no equipamento para ser analisado é aquele obtido na saída do processador, e a sua forma característica é apresentada de forma esquemática na borda inferior direita da Figura 7.15 e em sua escala real na Figura 7.14a.

Em relação ao fenômeno de atenuação das frequências inferiores a 130kHz na recepção dos sinais pelos sensores, propõe-se uma correção simples com o objetivo de diminuir este efeito. A metodologia considera a utilização da curva de calibração de cada sensor para corrigir os espectrogramas obtidos utilizando-se os sinais originais. Os valores da intensidade com que o sensor recebe cada frequência são normalizados dividindo-se cada um deles pelo valor máximo de intensidade registrado na curva de calibração. Tem-se, então, para cada valor de frequência um valor associado na curva de calibração normalizada, com valores entre 0 e 1, em que os valores menores estão associados às frequências mais atenuadas pelo sensor. Utilizam-se estes valores entre 0 e 1 para ponderar os coeficientes espectrais nos espectrogramas, dividindo-se cada coeficiente $|x(f)|$ pelo valor associado à mesma frequência na curva de calibração normalizada. Desta forma, diminui-se a atenuação dos coeficientes espectrais devida ao sensor. A aplicação da correção pela sensibilidade do sensor mostrou uma extensão da banda de frequências para aquelas menores do que 130kHz.

7.2.3 Caracterização do fissuramento através de espectrogramas

Para cada instante em que houve emissões no interior do CP há um registro de voltagem no tempo (forma de onda) que o processador deve ler e salvar. Para cada um desses instantes, o equipamento de EA salva a informação associada à força aplicada, o tempo e a forma de onda. Usando este tipo de informação ao longo do ensaio, têm-se tantos espectrogramas quanto formas de onda coletadas. Isto quer dizer que para cada forma de onda pode-se obter gráficos semelhantes aos da Figura 7.14a e 7.14c, mas para muitos trechos do sinal ao longo do ensaio.

As Figuras 7.16 a 7.18 apresentam os espectrogramas obtidos para os ensaios monotônicos e cíclicos no mármore e no monzogranito. Os espectrogramas apresentados foram obtidos segundo o procedimento explicado no item 7.2.1 e corrigidos segundo o procedimento definido no item 7.2.2. É importante citar que nestas Figuras são apresentados espectrogramas semelhantes aos da Figura 7.14, mas reunindo-se muitas formas de onda ao longo do ensaio todo. Nestas Figuras, cada espectrograma apresenta a relação da força versus o deslocamento e o registro de voltagem no tempo (formas de onda). A informação é disposta dessa forma para facilitar a sua compreensão, assim como para permitir o acompanhamento do processo de microfissuramento ao longo do ensaio.

A Figura 7.16 apresenta os espectrogramas corrigidos típicos obtidos nos ensaios monotônicos no monzogranito. As linhas verticais tracejadas identificam marcos importantes ao longo do ensaio. A primeira linha vertical identifica o pico de carregamento (ponto de controle 4 nas Figuras 7.5 a 7.6) e a segunda identifica a segunda grande queda de resistência registrada nos ensaios no monzogranito (ver capítulo 6). Os espectrogramas nesta figura foram obtidos para três ensaios diferentes que apresentam distintos níveis de saturação na coleta de formas de onda. A saturação nos espectrogramas pode ser observada pelos trechos brancos (sem sinal) ao longo do ensaio. No item 3.5 foi explicado o problema da saturação na coleta das formas de onda quando a quantidade de sinais emitidos pelo CP excede a capacidade do processador. Isto acontece especialmente após a coleta de grandes quantidades de emissões em muito pouco tempo (altas taxas de EA). Após os marcos importantes definidos em linha tracejada na Figura 7.16, ocorre uma rápida diminuição da resistência quase sem aumento no deslocamento u , comportamento associado à abertura de fissuras macroscópicas verticais centradas nas faces do CP. Tais processos de fissuramento geram grande quantidade de emissões que podem saturar o sistema de coleta de sinais de EA. Por isso, muda-se o LR até o sistema não apresentar saturação. Devido à grande taxa de emissões no monzogranito, o LR deve ser muito alto para evitar saturação, causando a perda dos sinais de baixa amplitude. Por isso, a utilização conjunta dos

registros de vários ensaios com diferentes níveis de saturação e LR é a melhor forma de analisar as tendências reais neste caso.

Figura 7.16– Espectrogramas corrigidos em ensaios monotônicos no monzogranito. a) Monzogranito com alta saturação. b) Monzogranito sem saturação

A Figura 7.16a apresenta o espectrograma de um ensaio em que o LR foi baixo e, portanto, observa-se bastante saturação na coleta de formas de onda. No pico de carregamento (primeira linha vertical tracejada) e após o mesmo, houve saturação na coleta de formas de onda, o que se observa pelos pequenos trechos sem sinal (trecho em branco) no espectrograma. Após o pico, houve muitos instantes em que se registrou perda de sinal e logo o sistema voltou a coletar alguma porção de formas de onda. A saturação foi observada aproximadamente entre 2000 e 3000 segundos, sendo mais perceptível após 2500 segundos. Isto foi confirmado porque o equipamento de EA pode ler as emissões, mas não pode salvá-las. Neste período as janelas de perda são muito pequenas e a saturação no espectrograma da Figura 7.16a é somente perceptível pela menor intensidade nas cores do espectrograma (informação para gerar espectrogramas produz poucos dados no tempo, fazendo com que em algumas regiões as cores pareçam mais atenuadas do que em outras). Após a segunda grande redução de resistência (segunda linha vertical tracejada), o equipamento mostra novamente saturação, a qual é mais evidente do que aquela observada após o pico de carregamento. Os

pequenos trechos sem sinal (trechos brancos) começam aproximadamente em 4000 segundos e são muito evidentes ao redor dos 4500 segundos, quando se observa uma faixa de tempo sem sinal nenhum. Pode-se observar na Figura 7.16b como não existe perda de sinal pela saturação das placas (não há trechos brancos após as linhas verticais).

A observação conjunta das Figuras 7.16a e b mostra diferenças nas faixas de frequência predominantes antes e depois de pico de carregamento. Pode-se notar como no início do ensaio há poucas emissões, o que é consistente com a observação dos parâmetros de EA apresentados no item 7.1. A Figura 7.16 a apresenta mais emissões do que a Figura 7.16b, pois o ensaio desta última Figura foi feito considerando-se um LR maior para evitar saturação. As frequências predominantes no trecho pré-pico concentram-se na faixa 100-150 kHz, com baixa intensidade. O exposto no item 7.2.2 e os resultados da localização das fontes de EA apresentados no capítulo 8, sugerem que as poucas emissões coletadas neste período devem-se ao atrito ou ruído proveniente do contato entre o CP e o berço. Portanto, nos estágios iniciais do ensaio há um ajuste na aplicação de carregamento entre o CP e o berço que gera emissões de baixa frequência e intensidade como as observadas no trecho pré-pico nas Figuras 7.16a e b. Tais emissões exibem as características do sensor, do processador e da rocha, mas não estão associadas a processos de microfissuramento no interior do CP. Na medida em que o carregamento se aproxima do pico, a faixa de frequências predominantes emitidas é estendida, ocupando quase toda a banda que o equipamento permite coletar (ver Figura 7.16a). Estas emissões de banda larga que começam um pouco antes do pico de carregamento e continuam ao longo do ensaio até o final caracterizam o processo de microfissuramento. O início deste processo de dano (aproximadamente a 90% do pico de carregamento) é consistente com as observações dos item 5.2, 7.1 e com o capítulo 8.

A Figura 7.17 apresenta os espectrogramas corrigidos típicos dos ensaios cíclicos no monzogranito para três diferentes níveis de saturação na coleta de formas de onda. As linhas verticais tracejadas identificam marcos importantes ao longo do ensaio. A primeira linha vertical identifica o pico de carregamento (ponto de controle 4 nas Figuras 7.5 a 7.6) e as linhas seguintes permitem identificar os estágios A até F (curva virgem). Os estágios A até F apresentam-se em linha contínua vermelha na curva de força versus tempo e de voltagem versus tempo, enquanto os estágios I até V apresentam-se em linha contínua verde (ver definição de estágios em Figura 3.5). Apresentam-se três níveis de saturação com o intuito de se mostrar as características dos sinais nos estágios I até V, o que fica mais claro quando o LR não é muito alto, tendo-se algum nível de saturação.

Figura 7.17– Espectrogramas corrigidos em ensaios cíclicos no monzogranito. a) Monzogranito com alta saturação. b) Monzogranito com saturação média. c) Monzogranito sem saturação

Nos espectrogramas da Figura 7.17, mostra-se novamente o efeito da saturação na perda de informação, mas também é possível perceber que a tendência conjunta dos espectrogramas é consistente com o comportamento descrito na Figura 7.16. A Figura 7.17a mostra vários trechos de perda de sinal devido à saturação. Consistentemente, isto ocorre apenas nos estágios B até F, em que o sistema de coleta de EA é mais exigido. Observa-se, também, como não apenas a maior parte dos sinais concentra-se nos ciclos de carregamento, mas também aqueles sinais de maior amplitude. Isto é coerente com os registros de energia absoluta e contagem apresentados na Figura 7.2. A observação conjunta do estágio A nas Figuras 7.17 a, b e c revela o mesmo comportamento que o observado na Figura 7.16. Nos ciclos seguintes, observam-se diferenças nas faixas de frequência predominantes entre os estágios B até F e I até V. Nos estágios I até V a faixa de frequências é estreita e as amplitudes são baixas, semelhante ao observado no trecho pré-pico do estágio A. Nos estágios A a F (trecho de carregamento virgem), observam-se novamente emissões de banda larga, semelhantes ao observado no pico e após o pico no estágio A. Isto revela que o processo de microfissuramento é representado por ondas do tipo impulsiva de banda larga e ocorre apenas nos trechos de carregamento virgem do ensaio, consistentemente com o efeito Kaiser (LAVROV et al., 2002). A separação entre os estágios de carregamento no trecho virgem é muito clara na Figura 7.17c, porém a faixa de frequências geradas no carregamento é um pouco menor. Isso ocorre porque as amplitudes baixas, que contêm as frequências maiores, devem ser desconsideradas na coleta de dados para evitar saturação (LR alto desconsidera sinais de baixa amplitude).

Na Figura 7.18 são apresentados os espectrogramas corrigidos típicos obtidos nos ensaios monotônicos e cíclicos no mármore. Nesta rocha a taxa de emissões foi menor, assim, não houve saturação das placas, mesmo para LR baixo. A tendência geral neste material é semelhante à obtida no monzogranito. A maior diferença ocorre no começo do ensaio, em que se registram emissões de banda larga, indicando já o início do fissuramento desde aproximadamente 50 a 60% do pico. Este comportamento é concordante com o início cedo de microfissuramento nesta rocha (ver itens 5.2, 7.1 e capítulo 8).

Comparando os espectrogramas obtidos para o monzogranito e o mármore, observa-se que para ambas as rochas a faixa de frequências é de banda larga nos trechos em que ocorre microfissuramento. No entanto, a Figura 7.18 mostra que, no mármore, na medida em que o ensaio avança a presença das frequências mais altas vai diminuindo, o que não se observa no monzogranito.

Figura 7.18– Espectrogramas corrigidos em ensaios monotônicos e cíclicos no mármore. a) Monotônico. b) Cíclico

Como foi descrito no item 7.2.2, no processo de propagação as ondas viajam através da rocha até o sensor. Neste percurso, a onda é atenuada, sendo que a atenuação é menor quando o CP encontra-se pouco danificado e maior na medida em que o dano aumenta e a rigidez da rocha diminui. Além disso, as frequências mais altas são atenuadas mais rapidamente que as frequências baixas. Por outro lado, no item 7.1 e no capítulo 8 mostra-se como a maior parte do dano no mármore ocorre aproximadamente durante o estágio A, sendo definida a superfície de ruptura. Assim, se o dano está já distribuído ao longo do plano todo de ruptura, todas as fontes de EA associadas ao microfissuramento vão ser afetadas na mesma medida pelo dano acumulado e a perda de rigidez, fazendo com que todos os sinais mostrem maior atenuação das frequências altas. Este comportamento é consistente com o observado na Figura 7.18, em que após o estágio A (em alguns casos no meio do estágio B) a faixa de frequências não chega até 500kHz, diminuindo em cada ciclo a máxima frequências alcançada. Este comportamento é também consistente com a tendência decrescente observada no parâmetro IF na Figura 7.12. No monzogranito a ruptura é progressiva, com definição da superfície de ruptura ao longo do ensaio (ver item 7.1 e capítulo 8). O dano nesta rocha é localizado, assim, ao longo do ensaio, mesmo havendo diminuição da rigidez, está é localizada, portanto a atenuação das frequências altas

não ocorre em todos os sinais de EA, mas em parte deles (algumas ondas viajam através de regiões do CP mais danificadas do que as outras). Isto faz com que a tendência de flexibilização do CP ao longo do ensaio não seja tão claramente revelada nos espectrogramas do monzogranito da mesma forma que ocorre no mármore. Este comportamento não contradiz a tendência decrescente do parâmetro IF mostrado na Figura 7.11, porque existe, em média, atenuação das frequências maiores.

As conclusões aqui obtidas são coerentes com as pesquisas realizadas por McLaskey, Glaser e Grosse (2007) em concreto. A respeito das pesquisas feitas por He, Miao e Feng (2010), Ji et al. (2012) e Ohnaka e Mogi (1982), os resultados não se contrapõem. Isso porque mesmo tendo sido detectadas faixas predominantes de frequências (faixas largas), houve também registro de frequências fora delas (nos casos em que os autores apresentaram os espectrogramas). Aliás, as faixas predominantes registradas podem ser explicadas pela impressão das características do material ensaiado e dos sensores utilizados por eles.

8 LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS FONTES DE EMISSÃO ACÚSTICA

8.1 Localização através do software AEwin

8.1.1 Aspectos teóricos da localização de fontes de EA

A literatura considera a estimativa do foco das emissões acústicas através da solução de um sistema não linear que deve conter, pelo menos, o mesmo número de equações e incógnitas. A solução se baseia no cálculo da distância entre a fonte (x_0, y_0, z_0) e cada um dos sensores dispostos na superfície do CP. O método necessita do conhecimento das coordenadas (x_i, y_i, z_i) de cada sensor i , dos tempos relativos de chegada da onda P a cada sensor $\Delta T_{i,obs}$ e da velocidade de propagação de ondas do material v_p . Os sensores são considerados pontuais e as coordenadas (x_i, y_i, z_i) são definidas em seu centro. Quando o primeiro sensor recebe um sinal de EA, o sistema é ativado. Este momento é considerado o gatilho e o instante de chegada da onda no mesmo o tempo zero. As coordenadas do sensor gatilho foram definidas como (x_t, y_t, z_t) . Quando os outros sensores recebem o sinal de EA da fonte, são registrados os tempos de chegada $\Delta T_{i,obs}$ a cada sensor i (medidos a partir do instante em que o gatilho foi ativado). Gera-se, assim, o conjunto de equações que calculam o erro definido entre os intervalos de tempo registrados $\Delta T_{i,obs}$ e os calculados $\Delta T_{i,calc}$, considerando-se a velocidade de propagação de ondas do material v_p , as coordenadas dos sensores, (x_i, y_i, z_i) , e da fonte, (x_0, y_0, z_0) , na da seguinte equação:

$$\Delta T_{i,calc} = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - \sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2 + (z_t - z_0)^2}}{v_p} \quad (8.1)$$

A relação 8.1 apresenta três incógnitas que são as coordenadas da fonte (x_0, y_0, z_0) , e considera que a velocidade de propagação de ondas v_p é constante e igual em todas as direções assim como antes e depois do microfissuramento (em que há pouca variação).

Tem-se um $\Delta T_{i,obs}$ e um $\Delta T_{i,calc}$ para cada sensor i que recebe o sinal, com exceção do sensor gatilho que é considerado em cada um dos $\Delta T_{i,calc}$. A partir dos $\Delta T_{i,obs}$ e um $\Delta T_{i,calc}$ para cada sensor i , calcula-se o erro ε_i :

$$\varepsilon_i = \Delta T_{i,obs} - \Delta T_{i,calc} \quad (8.2)$$

Minimizando-se a soma dos quadrados dos erros ε_i obtidos para cada um dos sensores, as coordenadas da fonte (x_0, y_0, z_0) podem ser determinadas:

$$E = \sum_{i=1}^{N-1} (\varepsilon_i)^2 \quad (8.3)$$

Em que N é o número de sensores dispostos para localização. No caso tridimensional de localização, é preciso a utilização de um mínimo de quatro sensores (três sensores e o gatilho). O algoritmo de minimização do erro E variando as coordenadas da fonte, utilizado pelo software AEwin para o caso tridimensional em estudo, é o método simplex (MAROS, 2003; PRESS et al., 1992).

8.1.2 Determinação da velocidade de propagação de ondas P - v_p

A localização por meio do software AEwin requer a definição de v_p antes do início do ensaio. Seu valor médio é determinado considerando-se o CP intacto. Admite-se a hipótese de que seu valor se mantém constante ao longo do ensaio.

Com o intuito de se obter a localização precisa das fontes de EA, a velocidade v_p média foi determinada para cada CP em particular, utilizando-se a mesma configuração de sensores definida para a realização do ensaio. O procedimento de quebra de grafite (ver item 2.3) foi utilizado para a geração de fontes fictícias e padronizadas de EA na superfície do CP ao lado de cada sensor. O procedimento considera a utilização de pares de sensores, de maneira que um sensor se localize em uma face do CP e o outro sensor se localize na face oposta do CP. É feita uma quebra de grafite ao lado de um dos sensores; esse sinal vai ser recebido por esse mesmo sensor e pelo outro sensor localizado na face oposta do CP. O tempo em que a onda P do sinal originado ao lado de um dos sensores chega a esse sensor é considerado o instante inicial t_{inicial} de saída do sinal e o tempo em que a onda P chega até o outro sensor localizado na face oposta do CP é considerado o instante final do percurso da onda t_{final} . A trajetória reta entre ambos os sensores é utilizada para calcular a distância entre eles e a diferença $t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}$ é o tempo que demora a onda P em percorrer a trajetória reta entre ambos os sensores. Assim, considerando-se a distância entre os sensores e a diferença de tempo da chegada da onda P antes definida, calcula-se a velocidade v_p para cada trajetória. As trajetórias consideradas para a estimativa da velocidade v_p média foram apenas as que incluíram um sensor em cada face, a fim de se garantir que a propagação da onda fosse através do volume do CP e não da sua superfície.

De acordo com a definição dada no item 3.2, os ensaios foram feitos utilizando-se 3 sensores em cada face, dispostos da maneira como mostram as Figuras 3.1 e 3.2. Portanto, existem 9 diferentes trajetórias a serem consideradas para a estimativa de um valor médio representativo da velocidade v_p do CP.

8.1.3 Padrão de microfissuramento em monzogranito

A Figura 8.1 mostra o comportamento força versus tempo (linha azul contínua) e energia acumulada versus tempo (linha vermelha tracejada) típico em um ensaio de compressão diametral em monzogranito. A energia definida nesta Figura não é a mesma apresentada no capítulo 7. A energia aqui apresentada corresponde àquela definida na equação 2.4. Esta mudança no tipo de energia utilizada nos resultados associados à localização tridimensional de fontes de EA feita com o software AEwin deve-se ao fato de que nele somente é possível a geração de caixas de cluster utilizando-se essa magnitude e não a energia absoluta. Foram acrescentados dez pontos de controle que representam os estágios em que será apresentado o padrão de microfissuramento através das fontes de EA na Figura 8.2. Os pontos de controle 1 a 4 estão associados aos seguintes estágios de carregamento: 50, 75, 90 e 100% em relação ao do carregamento de pico. O ponto de controle 5 corresponde ao fim do estágio A e os pontos de controle 6 a 10 representam o fim dos estágios B a F.

Figura 8.1 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em monzogranito

A Figura 8.2 mostra a localização tridimensional acumulativa típica das fontes de EA nos pontos de controle definidos na figura 8.1. Para cada ponto de controle definido na Figura 8.1 apresenta-se o padrão de localização acumulativo, ou seja, mostram-se todas fontes de EA localizadas desde o início do ensaio até cada um dos pontos de controle. Essa informação é válida para todas as figuras em que sejam apresentados os padrões de localização para diferentes pontos de controle. As fontes de EA nesta Figura foram obtidas através do software AEwin. Cada imagem de localização apresenta o contorno de um disco de 50mm de espessura e 100mm de diâmetro que representa o CP ensaiado. Isto permite uma melhor visualização do padrão de microfissuramento obtido através do software AEwin. Nesta Figura inclui-se uma fotografia do CP rompido após o ensaio, e o sistema de coordenadas utilizado em todas as imagens da Figura. Foram adicionados números de identificação nas faces do CP afim de se especificar a disposição dos sensores de EA durante o ensaio. As faces do CP são identificadas pelo número dos três sensores dispostos em cada face. Desta forma, a face em que foram dispostos os sensores 1, 2 e 3 identifica-se como face 123; e a face em que foram dispostos os outros três sensores identifica-se como face 456. Esta notação foi utilizada em todas as figuras seguintes quando da apresentação da localização de fontes de EA.

O software AEwin atribui a cada fonte de EA a energia calculada utilizando-se o sinal recebido pelo sensor mais próximo da fonte, i.e. o sensor gatilho. Devido à atenuação do sinal no percurso entre a fonte e o sensor gatilho e ao fato de que cada fonte se encontra a uma distância diferente do gatilho, a atribuição da energia do sensor mais próximo a cada uma dessas fontes introduz um erro na magnitude real da energia do sinal produzida na fonte. No entanto, considerando-se o tamanho dos CPs utilizados, o maior percurso possível de um sinal em trajetória reta é de aproximadamente 112mm. Em testes de quebra de grafite feitos nas rochas em estudo observou-se que para distancias pequenas como 112mm, a diminuição na amplitude máxima dos sinais que se propagam no interior do CP é pequena. Assim, a atenuação dos sinais nos CPs também deve ser baixa. Contudo, na medida em que o dano aumenta no CP o efeito da atenuação também deve aumentar. A variação da energia entre a fonte e o sensor gatilho devido a esse efeito de atenuação pelo dano no CP não foi considerado nesta pesquisa.

Sempre que uma fonte de EA é localizada e a sua energia ultrapassa um determinado nível, o sistema desenha uma caixa de cluster ao redor dessa fonte. Se uma segunda fonte é localizada próxima a alguma outra previamente localizada, esta é incorporada no interior da mesma caixa de cluster e as energias das fontes são somadas. No capítulo 7 foi mostrado como níveis maiores de energia são indicativos de microfissuramento mais prováveis, mesmo a energia sendo adimensional (equação 2.4) ou absoluta (equação 2.5). Como já dito, os clusters são criados a fim de se ter uma melhor visualização do padrão de microfissuramento. As cores de cada caixa de cluster dependem da

energia acumulada no momento. Os níveis de energia para cada caixa de cluster encontram-se definidos no canto inferior direito da Figura 8.2, sendo a cor cinza associada às energias menores e as cores vermelha e preta às energias maiores. O software AEwin utiliza a energia adimensional definida na equação 2.4 para criar os clusters, processo no qual se utiliza a magnitude acumulada deste parâmetro na Figura 8.1.

Figura 8.2 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em um CP de monzogranito obtido com o software AEwin

A imagem 1 da Figura 8.2 mostra que quando o carregamento atinge 50% do carregamento de pico somente poucas fontes de EA são localizadas, sendo que todas encontram-se perto da região de contato entre o CP e o berço. A localização das fontes de EA e o baixo nível de energia associado a elas (ver Figura 8.1) sugerem que essas fontes estão relacionadas ao ajuste local das irregularidades da superfície do CP no contato com o berço ao longo do eixo de carregamento. A imagem 2 (75% do pico) mostra mais algumas fontes de EA localizadas na mesma região de contato entre o CP e o berço.

As Imagens 3 e 4 (90 e 100% do pico) mostram algumas fontes de EA distribuídas no volume do CP no plano vertical que contém o eixo de carregamento. O padrão obtido na imagem 3 é consistente com o observado na lâmina petrográfica correspondente a 90% do carregamento de pico (ver Figura 6.3). Isto e os baixos níveis de energia sugerem microfissuramento disperso e de pouca intensidade.

A estrutura imbricada que o monzogranito apresenta, assim como sua distribuição aleatória dos minerais que contêm planos de fraqueza (ver Figura 6.2), tem como consequência que esta rocha possui percursos pré-definidos para a propagação de microfissuras. Isto permite explicar a dificuldade de propagação de microfissuras no interior do monzogranito e as altas taxas de energia liberadas toda vez que este processo ocorre (crescimento de microfissuras). Após o pico, o padrão das fontes de EA mostra uma mudança em relação às configurações obtidas no trecho pré-pico. Nesta rocha, a maior parte do microfissuramento desenvolve-se após atingido o pico de carregamento, e ocorre de forma instável, o que indica que o pico de carga não define a ruptura do CP. A imagem 5 da Figura 8.2 mostra uma região de acúmulo de fontes de EA, sugerindo fissuramento no centro de uma das faces do CP. O exame visual do CP no fim do estágio A (imagem 5) mostrou uma fina fissura vertical centralizada em uma das faces do CP, em consistência com o padrão de fontes de EA registrado no mesmo estágio. Além disso, o acréscimo da energia é consistente com o aparecimento de uma fissura macroscópica. Como a fissura observada é muito fina e a instrumentação disposta no CP dificulta o processo de fotografar em detalhe a fissura existente (a instrumentação para registro dos deslocamentos u e v passa pela região central das faces do CP), não foi possível obter uma imagem apropriada desta fissura para ser incorporada neste trabalho. Até o fim do estágio A não foi observado o aparecimento de uma fissura macroscópica na outra face do CP, em consistência com o padrão de localização de fontes de EA obtido para esse estágio. A falta de confinamento nas faces do CP pode favorecer o aparecimento de microfissuras nas faces antes do centro do CP. Por outro lado, a heterogeneidade própria da rocha pode explicar o aparecimento de microfissuras em uma face antes da outra, assim como a progressão do dano através do centro do CP até a outra face. Do total das fontes de EA localizadas até o fim do ensaio, somente 0.3% foi registrado até o ponto de controle 4 (pico de carregamento); esse valor quadruplica quando o ensaio atinge o ponto de controle 5 (fim do estágio A).

O comportamento observado durante o estágio A (pontos de controle 1 a 5), especialmente o pico e o trecho pós-pico, indica que entre os pontos de controle 4 e 5 é que ocorre a primeira fissura macroscópica, porém esta não compromete a integridade do CP.

As imagens 6 a 10 da Figura 8.2 mostram a localização das fontes de EA até o fim do estágio F. De forma semelhante ao mostrado no capítulo 7 para os ensaios cíclicos, o acréscimo de energia acumulada reinicia quando o carregamento se aproxima da curva virgem (efeito Kaiser), o que também ocorre com o processo de microfissuramento. O microfissuramento concentra-se em um plano ZY com $X=0$ (ver sistema de coordenadas na Figura 8.2). Já na imagem 8 pode-se observar como o microfissuramento progride até a outra face do CP, o que é confirmado pelo aparecimento de uma fina fissura vertical centralizada nessa face.

A distribuição das fontes de EA durante os estágios A a F mostram que no monzogranito o processo de fissuramento progride desde a escala microscópica até a macroscópica de forma progressiva, o que é consistente com o padrão de liberação de energia acumulada apresentado na Figura 8.1 assim como com os padrões de energia absoluta acumulada observados para esta rocha no item 7.1.1. Durante o processo de dano progressivo em um CP de monzogranito, há áreas não danificadas que explicam a liberação de muita energia até o final do ensaio.

Com o intuito de esclarecer a distribuição das fontes de EA e as energias durante o estágio A (pontos de controle 1 a 5 na Figura 8.1), a Figura 8.3 mostra a distribuição da energia acumulada típica ao longo do eixo Y na Figura 8.2. É importante lembrar que as energias consideradas nesta Figura são as mesmas consideradas nas Figuras 8.1 e 8.2. Devido à configuração simétrica do ensaio, no eixo das abscissas são apresentados os valores absolutos da coordenada Y, adimensionalizados pelo raio r do CP. Para cada ponto de controle foi calculada a energia acumulada total até o fim desse ponto de controle; a porcentagem da energia acumulada em relação ao total de energia acumulada ao longo do eixo diametral desde $Y=-r$ até $Y=r$ também foi calculada e disposta no eixo das ordenadas.

A Figura 8.3 mostra que para o ponto de controle 1 quase toda a energia acumula-se na vizinhança dos apoios entre o CP e o berço (menos de 10% da energia acumulada para $|Y|/r < 0,71$). Os pontos de controle 2 a 4 mostram o aumento gradativo da parcela de energia acumulada na região central do CP (aproximadamente 53% da energia acumulada para $|Y|/r < 0,73$ no ponto de controle 4). De acordo com o padrão apresentado na Figura 8.2, a distribuição da energia muda no ponto de controle 5, tendo-se a maior parte da energia acumulada na região central do CP (aproximadamente 83% da energia acumulada para $|Y|/r < 0,73$). No entanto, até o ponto de controle 5 a energia acumulada próxima do centro do CP é ainda baixa (aproximadamente 35% da energia acumulada para $|Y|/r < 0,2$). Isto significa que o fissuramento total ao longo do diâmetro do CP ainda não tem-se desenvolvido, o que é indicativo de ruptura progressiva no monzogranito.

Figura 8.3 - Distribuição típica da energia acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controle 1 a 5 do estágio A apresentado na Figura 8.1. Resultados obtidos com o software AEwin

A Figura 8.4 mostra a configuração final do ensaio apresentado na Figura 8.2, com a condição danificada do CP junto à localização das fontes de EA no final do ensaio. A região danificada do CP caracteriza-se por uma fina fissura vertical que atravessa a espessura do mesmo (eixo Z na Figura 8.2) e uma zona de processos muito estreita (tal como mostrado na fotomicrografia da Figura 6.6). Isto faz com que a superfície de fissuramento seja pouco visível nas Figuras 8.4a e 8.4d. Assim, as Figuras 8.4b e 8.4e mostram em detalhe e em escala ampliada a região central fissurada no final do ensaio. A fim de se melhorar a visualização da região danificada, decidiu-se passar sobre as faces do CP uma camada fina de pó de giz branco, o qual aumenta o contraste entre as áreas fissuradas e intactas.

As Figuras 8.4a, b e c mostram o padrão de fissuramento observado, o zoom da região central danificada e a localização das fontes de EA da face identificada como 123 na Figura 8.2. As Figuras 8.4d, e e f apresentam a mesma comparação, mas para a face identificada como 456. As Figuras 8.4a e c, assim como as Figuras 8.4d e f mostram boa concordância entre a condição final danificada do CP e o padrão definido pelas fontes de EA obtido com o software AEwin.

Figura 8.4 – Localização típica de fontes de EA na condição danificada final do CP em monzogranito. a) CP Condição final do CP na face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. d) Condição final do CP na face identificada como 456. e) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. f) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456

O microfissuramento apresentado na Figura 8.2 mostra uma distribuição não simétrica do dano, o que foi observado em todos os ensaios realizados, incluindo os monotônicos. O padrão mostrado foi obtido para um dos ensaios cíclicos feitos em monzogranito com o berço curvo. Os resultados dos ensaios feitos com o berço plano são semelhantes.

Nos ensaios monotônicos em monzogranito pode-se obter maiores níveis de energia e um acúmulo maior de dano entre os pontos de controle 4 e 5, o que não é devido a mudanças no comportamento da rochas, mas sim à condição de execução do ensaio. Nos ensaios cíclicos, após o ponto de controle 4, o carregamento diminui até um determinado nível em que o CP é descarregado,

porém nos ensaios monotônicos não há descarregamento neste estágio, permitindo ao CP continuar com o processo de microfissuramento e dano até se estabilizar. Isto faz com que a rocha possa desenvolver maior nível de dano no trecho pós-pico, mas não muda a tendência geral do padrão de microfissuramento em relação aos ensaios cíclicos. Portanto, nos ensaios monotônicos observa-se, também, um aumento progressivo do dano, mantendo-se o padrão observado nos ensaios cíclicos.

8.1.4 Padrão de microfissuramento no mármore

A Figura 8.5 apresenta a mesma informação que a Figura 8.1, porém para um ensaio de compressão diametral em mármore. De forma análoga ao apresentado na Figura 8.1, utiliza-se a energia adimensional calculada de acordo com a equação 2.4.

Figura 8.5 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em mármore

A tendência típica observada na energia acumulada (aumento gradativo desde quase o início do ensaio) é semelhante à energia absoluta acumulada apresentada no item 7.1.1 e na Figura 7.4, mas um pouco menos marcante. Isto é devido à forma como as duas expressões de energias são definidas (ver equações 2.4 e 2.5). Observa-se novamente que a energia somente apresenta aumento nos estágios A até F, que correspondem aos trechos em que o carregamento se aproxima da curva virgem. Contudo, em cada estágio a taxa de incremento na energia acumulada é menor do que aquela observada no estágio anterior. Observa-se, também, que tanto na energia absoluta acumulada apresentada no item 7.1.1 quanto na energia acumulada apresentada nas Figuras 8.1 e 8.5 há

diferenças entre resultados do mármore e do monzogranito. Nas Figuras 8.1 e 8.5 observa-se que no final do ensaio a energia acumulada no mármore é aproximadamente dez vezes menor do que no monzogranito. Estas diferenças são consistentes com o apresentado no item 7.1.1, especialmente na comparação de comportamento entre mármore e monzogranito (ver Figura 7.8).

A Figura 8.6 mostra os resultados da localização tridimensional acumulativa típica das fontes de EA do CP de mármore para os pontos de controle 1 a 10 da Figura 8.5. O software AEwin foi utilizado para o cálculo das fontes de EA. O formato desta Figura é o mesmo da Figura 8.2, porém a escala de cores associada aos níveis de energia foi modificada para ajustá-la aos níveis registrados no mármore. Cada nível de escala de energia mostrado na Figura 8.6 corresponde a um décimo daquela apresentada na Figura 8.2.

A imagem 1 da Figura 8.6 mostra um comportamento semelhante ao observado na imagem 1 da Figura 8.2. Em ambos os casos houve apenas poucas fontes de EA localizadas perto da região de contato entre o berço e o CP, devido ao processo de ajuste das irregularidades ao longo do eixo de carregamento. O início do microfissuramento no mármore foi registrado entre os pontos de controle 1 e 2, aproximadamente a 60% do carregamento de pico. A distribuição de fontes de EA para este estágio inicial de dano segue o mesmo padrão da imagem 2. O CP mostra um aumento gradativo das fontes de EA entre 60% e 100% do carregamento de pico. Essas fontes encontram-se distribuídas no volume do CP, porém concentradas em um plano aproximadamente central YZ (observar o sistema de coordenadas na Figura 8.6). A configuração obtida é consistente com as lâminas petrográficas preparadas para 75-80% e 90% do carregamento de pico (ver Figuras 6.9 e 6.10).

O padrão disperso das fontes de EA no mármore, diferentemente do monzogranito, mostra a influência da estrutura interna de cada rocha no processo de microfissuramento. As análises petrográficas das lâminas preparadas de CPs intactos (ver tabelas 6.1 e 6.2 e Figuras 7.2 e 6.2 e 6.8) mostram que o mármore é uma rocha praticamente monominerálica que contém cristais de calcita com três planos de clivagem perfeitos, enquanto que o monzogranito é formado por diferentes minerais dispostos em estrutura imbricada. Nesta rocha, os cristais prismáticos do plagioclásio e do microclínio mostram planos de orientação aleatória. Essas características, aliadas ao fato de que o mármore apresenta maior quantidade de microfissuras naturais, permitem explicar o início precoce do microfissuramento nos ensaios feitos nesta rocha, assim como a maior facilidade na propagação de fissuras.

Figura 8.6 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em um CP de mármore obtido com o software AEwin

A porcentagem de fontes de EA localizadas até os pontos de controles 4 (pico de carregamento) e 5 (fim do estágio A) foi de 8.6% e 25% da totalidade das fontes de EA localizadas até o fim do ensaio. O acréscimo relativo entre pontos 4 e 5 foi menor no mármore.

A imagem 4 da Figura 8.6 mostra que o padrão de dano através da espessura do CP é definido até o pico de carregamento, embora exiba ainda níveis baixos de energia. No pico de carregamento, as fontes de EA localizadas distribuem-se em um plano YZ aproximadamente centralizado e ao longo da

espessura do CP. Ainda neste estágio, observa-se que as microfissuras distribuem-se pelo volume do CP seguindo o percurso das microfissuras pré-existent, diferentemente do monzogranito, em que o processo é mais localizado. Considerando-se que a estrutura do mármore é formada por cristais romboédricos de calcita com orientação cristalográfica aleatória, a propagação de microfissuras é favorecida através dos planos de clivagem de qualquer um dos cristais que se encontre na vizinhança do plano central YZ (região onde se têm as tensões máximas). Isto explica o padrão distribuído de dano e uma zona de processos mais larga (observar zona de processos na Figura 8.8). A imagem 5 mostra como a distribuição das caixas de cluster e as fontes de EA apresentam-se mais localizadas em uma das faces do CP. Além disso, observa-se um acréscimo na taxa de aumento da energia acumulada, o que é consistente com o aparecimento de uma fissura macroscópica vertical centralizada em uma das faces do CP. Isto foi confirmado através da inspeção visual do CP. As Imagens 6 a 10 mostram que no final dos estágios B a F o padrão de microfissuramento é semelhante ao obtido para o monzogranito, porém com níveis de energia menores e menor quantidade de fontes de EA. No mármore, a maior parte do dano desenvolve-se entre 50% do carregamento de pico e o fim do estágio A, especialmente próximo ao carregamento de pico. Isso explica os níveis menores de EA nos estágios seguintes B a F, que ocorre porque a estrutura interna do mármore favorece a propagação de microfissuras através dos planos de clivagem. Neste processo a liberação de energia é menor do que no monzogranito, em que o trabalho para propagar cada microfissura é maior porque as mesmas não seguem nenhum plano preferencial de fraqueza e devem romper os cristais rígidos e resistentes de quartzo no processo.

A Figura 8.7 mostra a distribuição de energia acumulada típica ao longo do eixo de carregamento (coordenada Y na Figura 8.6) para o mármore. Observa-se que até o ponto de controle 1 a maior parte da energia acumula-se próxima da região de contato entre o berço e o CP (menos de 4% de energia para $|Y|/r < 0,4$ e mais de 85% da energia acumulada para $|Y|/r < 0,75$). Entre os pontos de controle 2 e 4 observa-se um incremento na proporção da energia liberada na região central do CP (aproximadamente 50% da energia para $|Y|/r < 0,5$ até o ponto de controle 4). Vistas as diferenças no processo de microfissuramento entre o monzogranito e o mármore, espera-se que desde o ponto de controle 2 o acúmulo de energia na região central do CP seja maior no mármore do que no monzogranito. Além disso, no ponto de controle 5 (fim do estágio A) tem-se no mármore a maior porção da energia concentrada no centro do CP (aproximadamente 63% da energia para $|Y|/r < 0,2$ e quase 90% da energia para $|Y|/r < 0,6$). Essa distribuição confirma o padrão observado na Figura 8.5, i.e., entre os pontos de controle 4 e 5 define-se a superfície de ruptura no mármore.

Figura 8.7: Distribuição típica da energia acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A apresentado na Figura 4. Resultados obtidos com o software AEwin

A Figura 8.8 mostra fotografias das duas faces do CP de mármore na condição danificada no final do ensaio e a localização das fontes de EA feitas com o software AEwin. A região danificada no CP de mármore caracteriza-se por apresentar uma fissura macroscópica fina que segue os planos de clivagem dos cristais de calcita (ver fotomicrografia na Figura 6.11) assim como uma zona de processos mais larga do que a observada no monzogranito. A Figura 8.8 segue os mesmos padrões definidos para a Figura 8.4, com exceção da cor do pó de giz utilizado. Devido à cor natural da rocha, decidiu-se utilizar pó de giz rosa para aumentar o contraste. As Figuras 8.8a, b e c (face identificada como 456) e as Figuras 8.8d, e e f (face identificada como 123) mostram boa concordância entre os dados obtidos do monitoramento com EA e a condição real do CP no final do ensaio. A comparação é mais clara nas Figuras 8.8b e e, em que se apresenta uma fotografia de detalhe da região danificada em ambas as faces do CP.

Embora o padrão mostrado na Figura 8.6 tenha sido obtido para um dos ensaios cíclicos feitos em mármore (todos eles foram feitos com o berço plano), o padrão de dano nos ensaios monotônicos nesta rocha é semelhante àquela apresentada para os ensaios cíclicos.

Figura 8.8 – Localização típica de fontes de EA na condição danificada final do CP em mármore. a) CP Condição final do CP da face identificada como 456. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456. d) Condição final do CP da face identificada como 123. e) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. f) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123

8.1.5 Deficiências observadas no algoritmo de localização do software AEwin

O processo de localização através do software AEwin forneceu resultados consistentes com as análises petrográficas, os parâmetros de EA e com a configuração final do CP danificado após o ensaio. Uma vantagem do uso deste software é que o algoritmo de localização utilizado permite o acompanhamento em tempo real dos padrões de microfissuramento no interior do CP. No entanto, para isso são utilizados algoritmos de otimização e metodologias para a estimativa da chegada da onda P

mais simples. Além disso, diminui-se o número de incógnitas a serem calculadas considerando-se a velocidade de propagação da onda v_p como um valor constante a ser considerado como input para permitir a localização das fontes de EA.

O algoritmo de minimização utilizado pelo software para a localização tridimensional é o método simplex (PRESS et al., 1992). Este método de busca direta somente requer a avaliação da função objetivo (função a minimizar que neste caso é a definida pela equação 8.3) e não utiliza o gradiente analítico ou numérico para definir a direção de busca do valor ótimo da fonte de EA. Isto faz com que o algoritmo seja simples, porém pouco eficiente.

Por outro lado, a localização de fontes feita com o software AEwin foi obtida por meio do método FTC (*first threshold crossing*) para a estimativa da chegada da onda P a cada sensor. O método FTC simplesmente define como instante de chegada da onda P, em cada sinal, o instante em que a voltagem ultrapassa o LR. Como consequência, a exatidão na estimativa vai depender diretamente do valor do LR e não do sinal em si, o que introduz um erro potencial que pode afetar significativamente o processo de minimização e, portanto, a localização das fontes de EA. Carpinteri et al. (2012) indicam que o método FTC é muito impreciso e às vezes pode não ser apropriado seu uso em sinais de baixa intensidade (baixa amplitude) ou que contenham muito ruído. De acordo com Carvalho (1999), um dos maiores problemas na localização de fontes de EA é que a sua exatidão depende muito da exatidão na estimativa da chegada da onda P a cada sensor. Assim, uma estimativa mais precisa da chegada da onda P é necessária. Neste processo se requer uma metodologia que leve em consideração as características próprias de cada sinal e não de um simples parâmetro constante definido antes do ensaio como é o LR.

Como descrito no item 8.1.1, o algoritmo de localização utilizado pelo software AEwin considera a velocidade de propagação de ondas v_p constante no volume do CP, assim como ao longo do ensaio. Desconsiderando-se as suas variações espaciais e temporais na medida em que o ensaio avança, o carregamento cresce e as tensões e deformações no interior do CP mudam suas propriedades mecânicas. Pelas características do tipo de ensaio realizado o dano é localizado em uma região bem definida do CP, a qual é pequena em relação ao volume do CP. Isto pode ser observado nas lâminas petrográficas dos CPs após o ensaio (ver Figuras 6.6. e 6.11), especialmente no monzogranito, em que a zona de processos é mais estreita e o dano mais localizado. Em consequência, as propriedades mecânicas do CP devem mudar menos nas regiões afastadas do plano de ruptura, fazendo com que a velocidade v_p média no volume do CP não apresente uma variação tão grande ao longo do ensaio. Contudo, isto pode não acontecer com outros tipos de ensaios em que o dano é mais distribuído e envolve grande parte do volume do CP em estudo. Desta forma, considera-se que em ensaios de compressão diametral os padrões de microfissuramento obtidos considerando-se a

velocidade v_p constante durante o ensaio devem ser próximos da realidade, porém em outras condições de carregamento o erro induzido considerando-se esta suposição pode ser ainda maior. Em consequência, é necessário avaliar a real influência desta hipótese nos padrões de microfissuramento.

Considera-se necessário aprimorar o processo de criação de caixas de clusters, incorporando-se o parâmetro de energia real, que incorpore unidades próprias de energia ou que seja adimensionalizado por um valor representativo do fenômeno de microfissuramento (por exemplo energia máxima registrada no ensaio ou energia acumulada total do ensaio) em lugar de se utilizar valores associados ao processo de amostragem do equipamento de EA. Embora o uso do parâmetro de energia adimensional (definida na equação 2.4) para a criação de caixas de clusters seja representativo da intensidade dos processos de microfissuramento, considera-se mais adequado utilizar o cálculo de energia absoluta. Cabe ressaltar que dificuldade não está no uso de um parâmetro adimensional, mas na forma em que ambos os parâmetros estão definidos. A energia absoluta representa a energia real de sinais de EA (PAC, 2005) e é definida em unidades de energia (aJ). Além disso, a energia adimensional considera a integral da voltagem pelo tempo enquanto que a energia absoluta considera a integral do quadrado da voltagem pelo tempo. Assim, o quadrado da voltagem considerado na faz com que energia absoluta forneça um maior contraste entre fontes de maior e menor intensidade e, portanto, permite salientar com maior clareza as regiões de maior dano. O software AEwin calcula a energia absoluta dos sinais, porém não permite a criação de caixas de clusters utilizando-se a energia absoluta (equação 2.5) em lugar da energia (equação 2.4). Assim, a utilização da energia absoluta na criação das caixas de clusters é um ganho de informação do programa desenvolvido em relação ao software AEwin.

Os primeiros três aspectos anteriormente definidos podem induzir a erros na localização, assim propõe-se aqui um método de localização que incorpore um aprimoramento de cada um deles. A melhora proposta para o último aspecto (uso de energia absoluta na criação de clusters) busca a fornecer uma melhor visualização dos padrões de microfissuramento. No item 8.2 descreve-se o desenvolvimento do programa proposto (Crack Location by Acoustic emission with P Wave Velocity determination, CLAPWaVe), o qual será chamado de agora em diante de programa desenvolvido (CLAPWaVe).

8.2 Desenvolvimento do programa de localização proposto – programa desenvolvido (CLAPWaVe)

De forma semelhante ao software AEwin, outras pesquisas têm feito localização tridimensional de fontes de EA (BUNGER et al., 2015; CARVALHO, 1999; CHEN et al., 2011; HAN et al., 2015; INCE et al., 2009; IVERSON; KAO; LABUZ, 2007; JIAN-PO et al., 2015a; 2015b; KUNDU, 2014; XU; LACIDOGNA; CARPINTERI, 2013). Contudo, algumas dessas pesquisas apresentam metodologias simplificadas para a estimativa da chegada da onda P ou algoritmos pouco eficientes para determinação das fontes e em nenhuma delas é considerado o cálculo da velocidade de propagação de ondas para cada fonte de EA. Ciampa e Meo (2010), Niri e Salamone (2012) e Yan e Tang (2015) incorporam no algoritmo de localização de fontes de EA o cálculo da velocidade de propagação das ondas do material, mas apenas aplicado ao caso bidimensional. Salinas et al. (2010) incorporou o cálculo da velocidade de propagação de ondas na localização tridimensional de fontes de EA, porém, a utilizam apenas para auxiliar no processo de ajuste do tempo de chegada da onda P a cada sensor. Dong e Li (2013) e Li e Dong (2014) também incorporam o cálculo da velocidade de propagação de ondas na localização tridimensional de fontes, porém a proposta deles não inclui o cálculo dos tempos de chegada da onda P aos sensores. Além disso, os autores não apresentam alguma validação dos resultados a partir de resultados experimentais. Pelo exposto, o desenvolvimento de um programa de localização tridimensional de fontes de EA que seja aprimorado nos aspectos acima expostos (estimativa da chegada da onda P, algoritmos de busca de fontes de EA mais eficientes e cálculo da velocidade de propagação das ondas), é um avanço no estado da arte na utilização da técnica de monitoramento do processo de microfissuramento em rochas.

A metodologia básica de abordagem do problema de localização tridimensional utilizado no programa desenvolvido (CLAPWaVe) segue os mesmos lineamentos definidos no item 8.1.1. A formulação geral deste tipo de problema é também aplicada no programa desenvolvido (CLAPWaVe), porém adicionam-se as melhoras mencionadas no item 8.1.4. As equações 8.1 a 8.3 que definem o problema de minimização ainda são válidas, porém as incógnitas consideradas são quatro em lugar das três consideradas até agora pela literatura e incorporadas no software AEwin. Assim, às coordenadas da fonte (x_0 , y_0 , z_0), soma-se uma quarta incógnita que corresponde a velocidade de propagação de ondas P, definida como v_p . Nos itens seguintes definem-se em detalhe os aspectos considerados no programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização.

8.2.1 A velocidade de propagação das ondas P - v_p

A velocidade de propagação de ondas no interior de um CP é um parâmetro imprescindível para a localização de um foco de emissão acústica. No entanto, na medida em que o carregamento é aplicado, o microfissuramento e o dano aumentam, alterando também a velocidade de propagação de ondas no CP. Assim, para um instante qualquer do ensaio há uma velocidade média de propagação de ondas no volume do CP, mas no instante seguinte há uma outra devido às mudanças nos estados de tensão e deformação no volume do CP e ao dano acumulado. Além disso, em ensaios de compressão diametral o dano é induzido de forma localizada no CP, fazendo com que este rompa através de um plano vertical aproximadamente centralizado YZ tal como mostram as Figuras 8.4 e 8.8 do item 8.2. Desta forma, a distribuição da velocidade de propagação de ondas no CP varia não apenas no tempo, mas também espacialmente. Assim, é de interesse obter esta informação para cada ensaio. Como já explicado, ao contrário dos programas de localização existentes até agora, contempla-se a incorporação da velocidade de propagação de ondas no volume do CP como uma incógnita a ser calculada para cada foco de EA no ensaio. Assim sendo, as incógnitas do processo de minimização consideradas são quatro: as três coordenadas de cada fonte de EA (x_0 , y_0 , z_0) e a velocidade de propagação de ondas média v_p associada a essa fonte. Desta forma, não apenas se obtém uma estimativa mais ajustada das fontes de EA, mas também é possível fornecer informações sobre a variação no tempo das velocidades de propagação de ondas no volume do CP e no tempo.

8.2.2 O algoritmo de minimização utilizado

Devido à natureza não linear da função a ser minimizada é importante utilizar algoritmos mais eficientes e robustos para localização da fonte. Carvalho (1999) utiliza o algoritmo Levenberg-Marquardt, que realiza a minimização de funções não lineares por meio do método dos mínimos quadrados, utilizando-se tanto a função objetivo quanto suas derivadas. Outros algoritmos baseados nesse método e que também utilizam a função objetivo e as suas derivadas são os chamados algoritmos baseados na região de confiabilidade ou *trust region algorithms* (COLEMAN; LI, 1996). Vanden (2004) comparou o algoritmo Levenberg-Marquardt aos algoritmos baseados na região de confiabilidade (*trust region algorithm*) e concluiu o seguinte: 1) Ambos os algoritmos apresentam velocidade de convergência quadrática perto da solução. 2) Quando o ponto de início se encontra

longe da solução, o método Levenverg-Marquardt apresenta aproximação menos eficiente (mais lenta) do que os métodos de região de confiabilidade, pois esses últimos chegam mais rápido até a região de interesse, próxima da solução, por meio do aumento do tamanho do passo. O autor indica que os algoritmos baseados na região de confiabilidade representam uma evolução em relação ao algoritmo Levenverg-Marquardt.

Pelo exposto, foi implementado no programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização um algoritmo baseado na região de confiabilidade. Utilizou-se o software ®Matlab para a implementação do algoritmo de minimização. O uso da metodologia de minimização permite incorporar a função de erro a ser minimizada, assim como algumas restrições que permitem limitar a busca de fontes de EA. Foram incorporados valores extremos (máximos e mínimos) para a velocidade v_p e para as coordenadas (x_0, y_0, z_0) das fontes de EA.

8.2.3 Utilização das formas de onda salvas durante monitoramento com EA

O algoritmo de localização próprio requer os trechos de registro de voltagem no tempo (formas de onda). Como foi descrito no item 8.2.2, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) é implementado no software ®Matlab, assim é necessário exportar as formas de onda coletadas pelo sistema de EA e logo importá-las no Matlab. Como as formas de onda são coletadas durante o ensaio, mas somente podem ser exportadas após o ensaio, a localização das fontes de EA não é feita em tempo real. Contudo, a utilização das formas de onda na localização em lugar dos hits é uma vantagem, porque fornece ao programa de localização os registros de voltagem no tempo, permitindo assim o cálculo mais acurado da chegada da onda P e da energia absoluta do sinal.

O software AEwin permite exportar formas de onda coletadas e salvas durante um ensaio por meio da criação de um arquivo de texto (.txt) para cada um desses trechos de sinal. Portanto, têm-se tantos arquivos individuais quanto formas de onda coletadas pelo equipamento de EA. Considerando-se que a quantidade de sinais coletada nos ensaios oscila entre 80.000 e 780.000, dependendo do tipo de rocha e do LR utilizado, o carregamento de cada um desses arquivos separadamente no software ®Matlab é inviável manualmente. Por isso, foi necessário o desenvolvimento de um programa auxiliar próprio para o carregamento dessas informações em um arquivo geral e com a extensão própria dos arquivos de Matlab (.mat).

8.2.4 Metodologias para a estimativa da chegada da onda P

O instante de chegada da onda P em um sinal de EA poderia ser feito por meio da simples observação deste sinal, determinando-se o primeiro instante em que o mesmo apresenta uma variação no padrão de ruído inicial e mostra um pequeno aumento de voltagem que representa a chegada da onda emitida no interior da rocha ao sensor. Este processo poderia ser feito para alguns sinais, porém, a quantidade de sinais coletados por meio do monitoramento com EA faz necessária a automatização do processo. Qualquer metodologia criada para automatizar esse processo introduz erro na estimativa, portanto, procura-se aquele que apresente a maior exatidão no conjunto de dados em estudo.

A literatura apresenta diferentes metodologias para a estimativa da chegada da onda P. Muitas delas são adaptações provenientes da sismologia, devido às semelhanças entre ambas as áreas de estudo. A metodologia mais simples é o FTC, utilizado pelo software AEwin e definido no item 8.1.4. Outras metodologias são apresentadas a seguir.

8.2.4.1 TC – Threshold Criterion

Este método é uma versão aprimorada do método FTC; foi definido por Carvalho (1999). Inicialmente, calcula-se a chegada da onda P por meio do método FTC. O LR deve ser definido de forma que ultrapasse o nível de ruído do sinal, o que já representa uma dificuldade porque o nível de ruído nos sinais não é conhecido antes do ensaio e é diferente para cada sinal coletado. O tempo definido utilizando-se o método FTC divide o sinal em duas porções, considerando-se que a primeira caracteriza o ruído do sinal. Os parâmetros estatísticos do ruído do sinal (média e desvio padrão) são utilizados para calcular um novo limiar LR_{TC} definido como:

$$LR_{TC} = média \pm 4 \cdot desvio\ padrão \quad (8.4)$$

O tempo de chegada da onda P é sujeito às seguintes verificações: 1) A voltagem ultrapassa o LR_{TC}

pelo menos 4 vezes nos seguintes $2\mu s$ após a chegada da onda P; 2) A voltagem muda de sinal (atravessa o nível de voltagem igual a zero) pelo menos 5 vezes nos seguintes $5\mu s$ após a chegada da onda P.

A maior vantagem desta metodologia é que permite incorporar algumas características próprias de cada sinal no LR_{TC} , ajustando-se segundo o nível de ruído de cada um deles. Contudo, o método ainda depende da definição do LR constante inicial e definido antes do conhecimento dos sinais emitidos, sendo possível obter diferentes estimativas do tempo de chegada da onda P para diferentes LR.

Como o método TC depende da definição do LR, cada vez que este método é utilizado, o mesmo é identificado com o nome do método junto ao valor do limiar LR utilizado, em decibéis. Desta forma, se a estimativa é feita com o método TC utilizando um limiar LR de 35dB, então a identificação do método é TC35; se o LR for 45 a identificação será TC45, e assim para qualquer valor de LR utilizado. Os valores mais comuns utilizados para os LR são 35dB e 45dB. Além disso, nos ensaios feitos em monzogranito se observou que o LR de 55dB é aplicável quando a rocha é muito frágil e gera sinais de EA a uma taxa muito alta.

8.2.4.2 MER – Maximum Energy Ratio

Esta metodologia, definida por Carvalho (1999), baseia-se na relação R_p entre as energias calculadas antes e depois da chegada da onda P, definida como:

$$R_p = \frac{\sum_{i=p+1}^{p+M} V_i^2}{\sum_{i=p-M}^{p-1} V_i^2} \quad (8.5)$$

Em que i é o elemento i -ésimo do sinal (lembrando que o sistema de EA faz a coleta digital dos sinais), p é o elemento p -ésimo do sinal que a divide em duas parcelas, V_i^2 é o quadrado a voltagem do sinal em cada elemento i -ésimo e M é o tamanho da janela utilizada para o cálculo da relação R_p . Calcula-se a variação da relação R_p ao longo do sinal, para os diferentes elementos p -ésimos do sinal, definindo-se que o tempo de chegada da onda P é aquele instante em que essa relação apresenta seu valor máximo. Nesse instante a relação entre $\sum_{i=p+1}^{p+M} V_i^2$ e $\sum_{i=p-M}^{p-1} V_i^2$ é máxima, o indica que quando a chega a onda P as voltagens do sinal coletado são maiores do que o registro de voltagens feito antes disso, pois a partir desse instante a onda gerada no interior do CP chegou realmente ao sensor. Antes disso, tinha-se apenas ruído e algumas refrações e reflexões de sinais já recebidas, cujas voltagens são muito menores em comparação às devidas a uma onda que acabou se se produzir no CP.

8.2.4.3 AIC

A estimativa da chegada da onda P através do método AIC considera o uso das funções de autorregressão (AR) e o critério de informação de Akaike. Para entender o procedimento de obtenção do tempo de chegada da onda P, considera-se um sinal no tempo cujos valores discretos de voltagem são definidos como uma série $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, em que o “n” representa o número de valores discretos de voltagem nesse sinal. A série é dividida em dois trechos: o primeiro trecho contém o sinal desde o começo até X_k , e o segundo trecho contém o restante do sinal, entre X_{k+1} e X_n . Desta forma, o elemento k-ésimo dentro da serie X (chamado de agora em diante como ponto k do sinal) a separa em dois trechos. Procura-se ajustar cada tramo segundo um modelo AR de ordem M, que considera a estimativa de cada X_i por meio dos valores conhecidos $\{X_{i-1}, \dots, X_{i-M}\}$ e de uma serie não determinística (ruído) e_i , segundo a seguinte relação:

$$X_i = \sum_{m=1}^M (a_m \cdot X_{i-m}) + e_i \quad (8.6)$$

Considerando-se como hipótese que a serie e_i é gaussiana, com média zero, podem ser ajustados os fatores a_m por meio de regressão linear com múltiplas variáveis (i.e. minimização da diferença quadrática entre os valores reais da série e os valores estimados da mesma). Desta forma são definidas as funções de autorregressão AR_1 e AR_2 , que fornecem o melhor ajuste para os trechos 1 e 2 do sinal, respectivamente.

Para cada valor de k são calculados os fatores a_m de cada trecho e logo a variação σ^2 associada à função de distribuição gaussiana de cada um deles. Utiliza-se a função de distribuição do ruído e a sua variação para determinar a qualidade de ajuste conjunta dos dois trechos do sinal. A verossimilitude ou probabilidade conjunta de ajuste dos dois trechos do sinal aos dados reais é aplicada para definir essa qualidade de ajuste. O processo antes mencionado é realizado para cada valor de k que divide o sinal em dois trechos.

Aplicando-se o critério de informação de Akaike (AIC) compara-se a qualidade de ajuste conjunta para cada valor de k, segundo:

$$AIC = -2 \cdot \ln(L) + 2 \cdot P \quad (8.7)$$

Em que L é o valor maximizado da verossimilitude para um determinado valor de k e P é o número de parâmetros dos modelos de autorregressão AR_1 e AR_2 .

Quando AIC é mínimo, a qualidade de ajuste é a melhor. Isso define a separação ótima entre os dois trechos da série e é interpretado como instante de chegada da onda P (AKAIKE, 1970;

BOZDOGAN, 1987; CARPINTERI et al. 2012; COSTA PEREIRA, 2003; CUNAT, 2006; EMILIANO et al., 2010; KITAGAWA; AKAIKE, 1978; KURZ; GROSSE; REINHARDT, 2005; SLEEMAN; VAN ECK, 1999; ZHANG; THURBER; ROWE, 2003).

Para este método funcionar com maior eficiência, deve-se definir um trecho de sinal para a busca do valor AIC mínimo. Para isso, pode-se utilizar outro método mais simples para fazer uma estimativa grosseira do tempo de chegada da onda P e logo definir a janela de busca (trecho de sinal) em que será aplicado o método AIC. Carpinteri et al. (2012) e Niccolini et al. (2012) propõem a estimativa preliminar da chegada da onda P por meio da comparação da média do valor absoluto da voltagem do sinal entre (X_1, X_k) e (X_{k+1}, X_{k+10}) , i.e., entre o trecho de dados até o ponto k e os seguintes 10 dados após isso. A relação proposta por eles é a seguinte:

$$\left(\sum_{i=k+1}^{k+10} |X_i|\right)/10 \geq 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^k |X_i|\right)/k \quad (8.8)$$

Definido o valor preliminar da chegada da onda P como $X_{p_preliminar}$, o trecho em que será aplicado o AIC será entre $(1, X_{p_preliminar})$.

A metodologia de definição da janela de aplicação do método AIC proposta por Carpinteri et al. (2012) e Niccolini et al. (2012) foi incorporada nesta pesquisa com algumas modificações. Obtiveram-se resultados mais ajustados utilizando-se o quadrado da voltagem no lugar do seu valor absoluto. Portanto, utiliza-se a seguinte relação:

$$\left(\sum_{i=k+1}^{k+10} X_i^2\right)/10 \geq 30 \cdot \left(\sum_{i=1}^k X_i^2\right)/k \quad (8.9)$$

O ajuste da equação 8.9 foi feito considerando-se os sinais coletados nos ensaios feitos nesta pesquisa. A utilização do quadrado da voltagem na equação 8.9 acentua as diferenças entre aquelas mais baixas e mais altas, assim, a variação entre o trecho de ruído do sinal (voltagens menores) e o trecho que contém a energia da onda originada pelo microfissuramento no CP (voltagens maiores) é definido com maior exatidão do que com a equação 8.8. O valor da chegada da onda P obtida por meio da equação 8.9 é utilizado para definir uma janela de aplicação do método AIC, porém considerando-se alguns pontos antes e depois deste tempo, i.e., a janela de busca é centrada no ponto de chegada preliminar da onda P. Além disso, e com o intuito de se ter certeza de que a janela de busca é a correta e que não se tem valores menores de AIC (equação 8.7) fora da janela de busca, aplica-se uma condição adicional. Caso o valor mínimo de AIC seja obtido em um dos limites da janela de busca (os pontos de início ou fim da janela), a janela é deslocada na direção do valor mínimo para continuar a busca até se obter o valor mínimo fora dos limites da mesma.

A Figura 8.9 mostra um exemplo da obtenção do tempo de chegada da onda P em uma forma de onda. Na cor preta se apresenta o registro da forma de onda, em azul a variação de AIC no trecho

analisado e a linha vertical vermelha indica o instante de chegada da onda P. A Figura 8.9a mostra a forma de onda completa e a Figura 8.9b mostra um zoom da região inicial do sinal, em que se observa com maior clareza a variação de AIC e o instante definido da chegada da onda P.

Embora na pesquisa feita por Carvalho (1999) o método AIC tenha mostrado ser menos preciso do que os métodos TC e MER, o método AIC é incorporado na presente pesquisa porque permite fazer uma estimativa da chegada da onda P sem a definição prévia de um LR. No método AIC são analisadas com maior detalhe as características de cada sinal para se avaliar o LR a ser utilizado na busca da chegada da onda P, enquanto que no método MER o LR é definido de maneira mais arbitrária. O método TC, embora inclui na estimativa do LR_{TC} a análise de cada sinal, necessita da estimativa de um valor inicial para LR_{TC} (definição do LR constante e definido antes do início do ensaio). Assim, a precisão do LR_{TC} e a estimativa da chegada da onda P são dependentes desse valor inicial. Em contraste, a aplicação do método AIC não requer da definição de um LR. Além disso, diversas pesquisas o consideram um método apropriado para a estimativa da chegada da onda P (CARPINTERI et al., 2012; HENSMAN et al., 2010; KURZ, GROSSE, REINHARDT, 2005; NICCOLINI et al., 2012; ; SEDLAK et al., 2009; SLEEMAN; VAN ECK, 1999; ST-ONGE, 2011), pois em relação à estimativa manual o método AIC tem fornecido melhores resultados experimentais na estimativa da chegada da onda P do que as outras metodologias.

Figura 8.9 – Exemplo de cálculo da chegada da onda P em de um sinal através do método AIC. Curva preta representa a variação de AIC em linha vermelha indica o instante de chegada da onda P. a) Detecção da onda P em um sinal inteiro . b) Zoom da região próxima à detecção da onda P do sinal apresentado em a

8.2.4.4 AIC-TC

As ondas longitudinais ou P são as que viajam pelo material em maior velocidade, portanto são as primeiras a aparecerem nos sinais de EA registrados pelos sensores. No entanto, a amplitude dessas ondas é pequena em comparação ao restante do sinal. O pequeno aumento de amplitude associado à chegada da onda P deve vir após o trecho de ruído do sinal. A chegada da onda P define o início da emissão real originada no interior do CP. O Método AIC tem uma base teórica robusta para separar o ruído do sinal, porém na determinação da chegada da onda P é necessário registrar o primeiro aumento de voltagem após o trecho de ruído. Como consequência, o método AIC define como a chegada da onda P o instante em que o padrão do sinal muda, o que ocorre um pouco antes do incremento de voltagem associado à real chegada da onda P. A diferença de tempo é muito pequena, da ordem de microssegundos ou menos, mas quando se trabalha com sinais tipo pulso, de pouca duração e que contêm frequências altas, tais diferenças de tempo podem ser significativas. Pequenas diferenças de tempo na estimativa da chegada da onda P induzem erros tanto na localização de fontes de EA quanto na velocidade de propagação de ondas v_p . Assim, propõe-se um método alternativo para a estimativa da chegada da onda P que utiliza as vantagens do método AIC em termos de separação do ruído do sinal.

O AIC-TC considera que a chegada da onda P ocorre no primeiro instante em que a voltagem ultrapassa os níveis máximos de voltagem registrados no trecho de ruído. Desta forma, AIC-TC utiliza o tempo de chegada da onda P definido pelo método AIC para caracterizar o trecho inicial de ruído do sinal, calculando a máxima amplitude (positiva e negativa) do ruído, definida como $A_{ruído}$. Assim, utiliza-se o conceito de LR variável para cada sinal e definido por meio das suas características próprias, porém consideram-se os valores máximos do sinal e não a sua média e desvio padrão. Desta forma, o LR variável do método AIC-TC é definido da seguinte forma:

$$LC_{AIC-TC} = A_{ruído} \cdot F \quad (8.10)$$

Em que F é um fator que amplifica o valor da amplitude a fim de garantir que o sinal ultrapasse os níveis máximos de ruído da forma de onda. O método busca o primeiro instante em que a voltagem ultrapassa os níveis máximos de ruído, pelo qual o fator F deve ser apenas maior do que 1. Se o fator fosse muito grande, o limiar LR variável seria muito alto e o conceito teórico por trás do método perderia todo sentido. Dois valores têm sido considerados para o fator F , $F=1.1$ e $F=1.25$. Para identificar o fator F utilizado no método AIC-TC define-se o seguinte: quando $F=1.1$ o método é identificado como AIC-TC1.1, quando o $F=1.25$ o método é identificado como AIC-TC1.25. Esta

notação é válida daqui em diante para todas as Figuras ou análises em que seja apresentado o método AIC-TC. A equação 8.10 mostra a estimativa proposta nesta pesquisa para a determinação do LR dos sinais, considerando-se a estimativa preliminar obtida com o método AIC.

A Figura 8.10 apresenta um exemplo da aplicação do método AIC-TC para a estimativa do tempo de chegada da onda P em uma forma de onda e a comparação com o método AIC. O registro de voltagem no tempo apresenta-se na cor preta, a chegada da onda P de acordo ao método AIC mostra-se com um círculo verde. O asterisco vermelho e o quadrado azul mostram a chegada da onda P de acordo com os métodos AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25, respectivamente. A Figura 8.10a mostra a forma de onda completa, em que se pode observar como todas as estimativas estão na mesma região. A Figura 8.10b mostra um zoom da região inicial do sinal, em que se observam as diferenças entre o método AIC e AIC-TC. Pode-se observar como nesse caso a estimativa feita para AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25 é a mesma. Isso acontece em alguns casos devido à coleta analógica dos sinais. A voltagem em um ponto do sinal pode ser inferior ao limiar variável e no seguinte ponto a voltagem ultrapassa ambos os limiares definidos pelo AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25, tendo-se a mesma estimativa da chegada da onda P.

As diferenças na estimativa da chegada da onda P entre os métodos AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25 são pequenas. Por isso, a seleção de uma delas para sua incorporação no programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização de fontes de EA dos ensaios de compressão diametral foi feita a partir dos resultados obtidos na validação do programa, que será apresentada no item 8.4.

Figura 8.10 – Exemplo de cálculo da chegada da onda P em de um sinal através dos métodos AIC e AIC-TC. a) Detecção da onda P em um sinal inteiro . b) Zoom da região próxima à detecção da onda P do sinal apresentado em a

É importante advertir que a aplicação do método de detecção já descrito representa uma melhoria teórica a respeito do cálculo feito pelo método FTC, utilizado pelo software AEwin, assim como uma melhoria na prática em relação à estimativa manual para cada sinal. Esta última, mesmo sendo ainda mais exata do que o método apresentado é impraticável pela quantidade de sinais coletada em cada ensaio (a quantidade de sinais coletada nos ensaios oscila entre 80000 e 780000, dependendo do tipo de rocha e do LR utilizado).

8.2.5 Criação de caixas de clusters

No capítulo 7 foi apresentada a avaliação do processo de microfissuramento por meio dos parâmetros de EA. Dentre esses parâmetros, a energia absoluta foi um bom indicador da intensidade do sinal emitido no processo de microfissuramento e, portanto, é um indicador do nível de dano no CP.

A criação de caixas de cluster é uma ferramenta muito útil utilizada pelo software AEwin, porque permite salientar as regiões de maior acúmulo de fontes de EA. O uso de um parâmetro que represente a intensidade dos sinais coletados através do monitoramento fornece informação tanto das regiões de acúmulo de fontes de EA quanto da intensidade conjunta desses sinais. Pelo exposto, esta ferramenta foi incorporada no programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização.

O software AEwin faz a identificação das regiões de maior dano no volume do CP ao longo do ensaio por meio do parâmetro de energia. Considera-se que o parâmetro de energia absoluta (medido em aJ) é um parâmetro mais apropriado, pois permite salientar mais adequadamente as regiões de maior dano. Por isso, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização utiliza a energia absoluta para criar as caixas de clusters que auxiliam na definição dos padrões de microfissuramento e dano.

8.3 O Algoritmo do programa de localização desenvolvido (CLAPWaVe)

8.3.1 Parâmetros utilizados

O programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização utiliza os seguintes parâmetros: raio (r) e espessura (h) do CP, localização dos sensores dispostos no CP, tempo de chegada da onda P e

energia absoluta de cada sinal coletado em cada um dos sensores. O programa permite a utilização dos tempos de chegada da onda P definidos de acordo com qualquer método. No caso deste trabalho, utilizam-se os tempos obtidos com o método AIC-TC1.1 definido em item 8.2.4.4.

Em adição, a velocidade de propagação de ondas v_p do CP intacto é utilizada apenas para alguns cálculos iniciais que serão explicados a seguir. Utilizam-se os parâmetros auxiliares $d_{\min}$ e $d_{\max}$, $V_{\min}$ e $V_{\max}$ e as coordenadas $(x_{0\min}, y_{0\min}, z_{0\min})$ e $(x_{0\max}, y_{0\max}, z_{0\max})$ que serão explicados nos itens 8.3.2.2, 8.3.3.1 e 8.3.3.2.

8.3.2 Procedimento geral do programa e fases de iteração incorporadas

Como já explicado nos itens 8.1.1 e 8.2, é necessária a obtenção das diferenças de tempo entre o sensor gatilho e os outros sensores $\Delta T_{i,obs}$. Para se obter os $\Delta T_{i,obs}$ é necessário definir quais os sensores que realmente registraram o sinal gerado no interior do CP. O conjunto de sensores que registraram o sinal vindo de uma mesma fonte de EA e chamado de grupo, Gp. Tem-se tantos grupos como fontes de EA localizadas.

Uma vez que os grupos Gp são definidos, utilizam-se os tempos de chegada da onda P a cada um deles para calcular as diferenças de tempo $\Delta T_{i,obs}$. Esta informação, junto às coordenadas dos sensores permitem definir um sistema de equações que resolve o problema da localização. Como o número de incógnitas é 4, o número mínimo de equações para resolver o sistema é também 4. Sabendo-se que cada valor de $\Delta T_{i,obs}$ é definido em relação ao sensor gatilho, é necessário que pelo menos 5 sensores tenham registrado o sinal. Como consequência, os grupos Gp a serem utilizados no programa de localização devem conter pelo menos 5 sensores. O número de sensores utilizado nos ensaios desta pesquisa é de 6, pois foram utilizados grupos Gp de 5 ou 6 sensores.

No software AEwin o número de incógnitas é 3, pois o sistema pode resolver o problema da localização tridimensional considerando grupos Gp de 4, 5 ou 6 sensores. Isso possibilita ao software AEwin a localização de mais fontes de EA, porém, fornece menos informação e, provavelmente, maior erro de minimização.

O procedimento de localização proposto considera diferentes iterações, nas quais é aplicado o algoritmo de minimização apontado no item 8.2.2. Com o intuito de aprimorar a localização incluem-se duas fases de iteração. Para definir a precisão de ajuste, é utilizado o erro de minimização ε_i para cada sensor do grupo Gp (equação 8.2), assim como o erro médio (média de todos os ε_i para cada sensor

do grupo G_p). A primeira fase de iteração é aplicada a todas as fontes de EA e utiliza o erro médio como parâmetro de decisão entre as soluções obtidas. A segunda fase de iteração apenas pode ser aplicada naqueles grupos G_p formados por 6 sensores e utiliza o erro ε_i como parâmetro de decisão. O procedimento geral de criação de grupos G_p é explicado no item 8.3.2.1 e as fases de iteração 1 e 2 são explicadas nos itens 8.3.2.2 e 8.3.2.3. O procedimento utilizado para a primeira fase de iteração não tem sido aplicado em algoritmos de localização apresentados na literatura, já a segunda fase de iteração foi incorporada por Carvalho (1999). Ambas as fases de iteração permitem obter uma maior qualidade de ajuste na estimativa das fontes de EA e a velocidade de propagação de ondas v_p .

No APÊNDICE A apresenta-se o fluxograma do algoritmo de localização das fontes de EA com o programa CLAPWaVe. A descrição e as vantagens da aplicação de cada uma das fases é apresentada a seguir.

8.3.2.1 Criação de grupos - G_p

Para definir o grupo de sensores G_p que registrou a emissão de cada fonte de EA é necessário conhecer o tempo em que esses sinais chegaram a cada um deles (tempo de chegada da onda P). Este processo é teoricamente simples, porém, considerando-se que em poucos segundos podem ser registrados muitos sinais em cada sensor, não há forma de discriminar com exatidão os sinais emitidos por cada uma das fontes de EA. Portanto, a aplicação prática não é simples. Assim, aplicam-se os lineamentos de uma metodologia já utilizada em outros programas de localização (por exemplo no software AEwin) para criação dos grupos G_p , baseada na ordem temporal de chegada da onda P a cada sensor e de um tempo de espera, t_{espera} , definido a seguir.

Dado o instante de tempo em que o sensor gatilho registra um sinal, $t_{gatilho}$, espera-se que os outros sensores registrem o sinal da mesma fonte em um período de tempo Δt após o registro no sensor gatilho. O tempo em que o sinal deve chegar em cada sensor é diferente e vai depender da sua localização. Por isso, um período de tempo Δt máximo é definido - t_{espera} - durante o qual se considera que os sinais vêm da mesma fonte ($\Delta t \leq t_{espera}$). Este parâmetro é definido como:

$$t_{espera} = \frac{d}{v_p} \quad (8.11)$$

Em que d é a distância máxima que um sinal pode percorrer entre uma fonte de EA e um dos sensores, e v_p é a velocidade de propagação de ondas média característica do CP ao longo do ensaio. A distância d pode ser definida utilizando-se a geometria do CP e a distribuição dos sensores.

Como v_p é uma das variáveis no processo de minimização do programa de localização proposto, utiliza-se para a criação de cada grupo G_p o valor mais próximo do instante em que se deseja calcular a nova fonte de EA. A razão para se utilizar esse valor é que o mesmo é considerado mais apropriado do que aquele obtido antes do ensaio com o CP intacto. No entanto, cada fonte apresenta uma velocidade v_p associada ao local do CP (coordenadas da fonte) em que foi localizada e não necessariamente a seguinte fonte localizada foi originada na mesma região. Assim, a velocidade v_p de uma fonte pode ou não ser semelhante à associada à seguinte fonte localizada, pois vai depender das coordenadas de ambas as fontes. Pelo exposto, considera-se adequado utilizar um conjunto de dados de fontes localizadas para se obter o valor médio de velocidade que possa ser utilizado na estimativa do seguinte grupo G_p . No programa desenvolvido (CLAPWaVe), decidiu-se utilizar como valor de v_p médio aquele obtido da localização das 25 fontes de EA prévias. A utilização de 25 valores prévios foi considerada adequada para os casos em estudo, porém, a quantidade pode ser aumentada ou diminuída conforme requerido.

No início do ensaio não se tem informação de fontes prévias. Por isso, o cálculo do G_p para as primeiras 25 fontes de EA é feito utilizando-se o valor da velocidade média v_p do CP intacto obtido por meio de quebras de grafite entre sensores (procedimento exposto no item 8.1.2). Como o valor da velocidade v_p associada ao CP intacto é utilizada apenas para a determinação do G_p das primeiras 25 fontes de EA (pouco dano induzido), considera-se que o erro introduzido no processo de localização é pequeno. A velocidade v_p do CP intacto é somente utilizada para auxiliar na determinação do grupo G_p , mas ainda é incorporada no processo de minimização como uma variável. Portanto, dispõe-se das coordenadas da fonte de EA e da velocidade v_p média associada ao mesmo, para todo o ensaio, incluindo as primeiras 25.

8.3.2.2 Fase 1 de iteração

Dependendo da localização da fonte de EA, a distância máxima d entre a fonte e os sensores pode variar, podendo mudar o parâmetro t_{espera} e, por consequência, o grupo G_p associado à fonte. Se o t_{espera} for muito grande, o grupo G_p pode incorporar tempos associados a uma outra fonte de EA. Caso o t_{espera} seja muito pequeno, o grupo G_p pode deixar fora sensores que realmente receberam o

signal. Para diminuir esta fonte de erro, consideram-se no cálculo de cada fonte diferentes valores do parâmetro d . Consideram-se 9 valores para d definidos entre $d_{\min}$ e $d_{\max}$. Dos 9 valores para t_{espera} , seleciona-se aquele em que o grupo G_p permite a localização com o menor erro médio (erro de minimização menor). Os valores de $d_{\min}$ e $d_{\max}$ são definidos antes de aplicar o programa de localização proposto e devem ser definidos de acordo às dimensões e à geometria do CP em estudo. Considera-se apropriado utilizar um valor de $d_{\max}$ próximo da maior dimensão do CP. Por exemplo, para um CP de geometria de disco de 50mm de espessura e 100 de diâmetro, a distância na diagonal maior seria de 111,8mm, assim, $d_{\max}$ pode ser definido como sendo 112mm. A distância $d_{\max}$ devia ser quem forneça o grupo G_p com menor erro de ajuste em casos em que a fonte seja gerada muito próxima de alguns sensores e longe dos outros, como no caso de fontes geradas próximo das faces do CP. A definição do valor de $d_{\min}$ deve ser um valor próximo da distância menor que se poderia ter entre uma fonte e o sensor mais afastado. Para definir $d_{\min}$ considera-se, por exemplo, o caso de fontes localizadas no centro do CP, em que a distância entre a fonte e qualquer um dos sensores é de aproximadamente 43mm, mantendo-se as mesmas dimensões do CP do exemplo anterior. Os exemplos acima citados estão associados especificamente ao caso dos CPs utilizados nos ensaios desta pesquisa, porém os valores de $d_{\min}$ e $d_{\max}$ podem ser modificados conforme requerido.

A fase 1 de iteração permite a avaliação de mais tempos de espera t_{espera} e, permitindo assim, uma busca mais apurada do grupo G_p associado a cada fonte. Assim, se o grupo G_p for o adequado para cada fonte, as fontes são localizadas com maior exatidão.

8.3.2.3 Fase 2 de iteração

Esta fase é aplicada em cada iteração da Fase 1, na qual o grupo G_p é formado por 6 sensores. Se o erro ε_i associado a um dos sensores é maior do que os outros, a qualidade de localização pode ser afetada. Quando o grupo G_p é formado por 6 sensores ainda é possível calcular o foco eliminando-se a informação associada ao sensor que fornece o maior erro ε_i . Compara-se, assim, o erro médio obtido utilizando-se a informação fornecida pelos 6 sensores com aquele obtido com a informação dos 5 sensores, e seleciona-se aquele que apresenta o menor erro médio.

A fase 2 de iteração permite a eliminação de possíveis dados de sinais que possam não pertencer a uma mesma fonte. Essa fase também permite a eliminação de sinais cujo tempo de chegada da onda P não é consistente com a informação fornecida pelos restantes sensores. Em consequência, a fase 2 fornece uma ferramenta para avaliar a coerência entre as informações

recebidas nos diferentes sensores, permitindo desconsiderar informação que não contribui à localização, o que reflete em erros de ajuste menores.

8.3.3 Filtragem de dados

As fontes de EA (x_0, y_0, z_0) e as velocidades de propagação de ondas v_p associadas podem ser filtradas tanto durante o processo de localização quanto depois. Aplica-se a filtragem durante o processo de localização apenas para desconsiderar aqueles dados com erro de minimização muito grande e que possam afetar o cálculo das fontes seguintes de EA. Esta filtragem será chamada daqui em diante de filtragem básica. Depois de finalizado o processo de localização, aplicam-se filtrações adicionais a fim de se aprimorar os resultados e obter um padrão de microfissuramento mais ajustado. Esta filtragem será chamada daqui em diante de filtragem rigorosa.

8.3.3.1 Filtragem pelas velocidades v_p

Durante o processo de localização (filtragem básica), a busca da velocidade v_p que minimiza o erro é restrita a uma faixa de velocidades entre $V_{\min}$ e $V_{\max}$. Os valores de $V_{\min}$ e $V_{\max}$ podem ser definidos para cada rocha. Se em alguma das fontes de EA a velocidade obtida for igual aos valores extremos $V_{\min}$ ou $V_{\max}$, significa que a minimização não foi efetiva. Por isso, as fontes de EA cujo valor de velocidade for $V_{\min}$ ou $V_{\max}$ são desconsiderados.

Após a localização ser finalizada (filtragem rigorosa), podem ser filtradas as fontes de EA cuja velocidade v_p seja muito baixa ou muito alta. No entanto, valores pequenos de velocidade podem representar regiões muito danificadas, em que o percurso dos sinais foi influenciado por fissuras se propagando em espessura e comprimento. Valores maiores de velocidade podem sugerir regiões de maior confinamento danificadas ou não danificadas. Assim, preferiu-se manter os dados de velocidade obtidos na localização sem filtragem após o ensaio.

8.3.3.2 Filtragem pela geometria do CP

Durante o processo de localização (filtragem básica), restringiu-se a busca das coordenadas das fontes de EA a uma faixa de valores entre $(x_{0min}, y_{0min}, z_{0min})$ e $(x_{0max}, y_{0max}, z_{0max})$. Consideraram-se como valores extremos (mínimos e máximos) para cada coordenada os seguintes: $(x_{0min}, y_{0min}, z_{0min}) = -1.2 \cdot (r, r, h/2)$ e $(x_{0max}, y_{0max}, z_{0max}) = 1.2 \cdot (r, r, h/2)$, em que r e h são o raio e a espessura do CP. Considerou-se a utilização do fator 1.2 com o intuito de incorporar uma folga na faixa de valores iniciais para as coordenadas das fontes, permitindo assim a busca de fontes com de EA erro razoável na proximidade dele.

Logo após a fonte ter sido localizada, aplica-se uma filtragem geométrica adicional, porém contida dentro do processo de filtragem básica. Sabe-se que em qualquer processo de localização há erro envolvido. Por isso, é necessário definir uma região de folga que permita incorporar a tendência daquelas fontes de EA que mesmo sendo localizadas fora do volume do CP encontram-se próximo a ele (na vizinhança). Define-se, então, um volume de CP admissível para aceitação das fontes de EA considerando uma folga de 11 mm adicionais ($\text{max_erro_mm}=5\text{mm}$) no diâmetro e na espessura do CP. As fontes localizadas fora do volume admissível são desconsideradas na filtragem básica

Após a localização ter finalizado (filtragem rigorosa), aplicou-se uma filtragem adicional às fontes de EA. Define-se, agora, uma folga de 5mm adicionais no diâmetro e na espessura do CP para aceitação das fontes de EA. O procedimento de filtragem é análogo ao explicado no parágrafo anterior, porém a folga considerada é menor, de 5mm em lugar dos 11mm utilizados na filtragem básica. As fontes localizadas fora do volume admissível são desconsideradas na localização.

Tanto o fator de 1.2 quando as folgas de 11 e 5 mm utilizados nas filtrações básica e rigorosa das fontes de EA foram definidos de forma interativa, rodando programa desenvolvido (CLAPWaVe) varias vezes para o mesmo conjunto de dados e avaliando com quais fatores se obtêm os resultados mais coerentes. Contudo, ambos os fatores podem ser modificados conforme requerido para se ajustar a busca de fontes a qualquer outro caso de análise.

8.3.3.3 Filtragem pelo erro de minimização

Em adição à filtragem pelas coordenadas das fontes de EA, aplica-se a filtragem pelo erro médio dos tempos de chegada, lembrando-se que o erro médio é a média dos erros ε_i (equação 8.2)

definidos em unidades de tempo. A literatura representa o erro de localização associado às fontes de EA em unidades de distância, i.e., o erro médio multiplicado pela velocidade de propagação de ondas v_p , previamente definida e constante. Então, se a velocidade for definida como um valor menor, o erro também pode ser menor, o qual não é representativo de uma melhora real na localização. Aliás, no programa desenvolvido (CLAPWaVe) a velocidade é calculada para cada foco e pode variar na medida em que o ensaio avança e o dano aumenta. Por isso, nos casos em que a velocidade v_p for menor (pelo dano no CP) ou maior (por efeito do aumento do confinamento em regiões do CP) o erro medido em unidades de distância iria refletir a mudança na velocidade v_p e não a real qualidade de minimização. Dessa maneira, considera-se mais apropriado avaliar o erro de localização utilizando o erro médio, parâmetro que reflete de forma direta a qualidade da minimização e não é influenciado pelos valores de velocidade.

Durante o processo de localização (filtragem básica), as fontes de EA que apresentaram um erro ε_i médio maior que $1 \cdot 10^{-5}$ segundos foram desconsideradas ($\max_erro_dT = 1 \cdot 10^{-5}$).

Após o processo de localização ter finalizado (filtragem rigorosa), o erro ε_i médio foi reduzido a $1 \cdot 10^{-6}$ segundos nos ensaios feitos em mármore e monzogranito (ver item 8.5). A razão para aplicar a filtragem do erro ε_i médio em dois estágios é observar a distribuição do erro após a primeira filtragem a fim de se avaliar a porção dos dados que seriam desconsiderados caso a filtragem fosse mais rigorosa. Em itens posteriores desta pesquisa (item 8.5.3.1) conclui-se que a qualidade de ajuste na localização das fontes de EA é muito influenciada pelo algoritmo de minimização utilizado, porém pouco influencia pelo tipo de rocha, no caso de rochas aproximadamente isotrópicas como as aqui utilizadas. Assim, logo após de serem avaliadas as distribuições do erro ε_i médio em ambas as rochas, considerou-se apropriado adotar o mesmo valor do erro ε_i médio para o mármore e para o monzogranito, tanto na filtragem básica quando na filtragem rigorosa.

8.4 Validação do programa desenvolvido (CLAPWaVe) – testes em alumínio

Com o intuito de testar tanto o algoritmo do programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização tridimensional proposto (item 8.3) quanto às metodologias de cálculo da chegada da onda P (item 8.2.4), considerou-se a realização de testes na superfície de um CP de alumínio. Escolheu-se esse material pela sua homogeneidade.

As metodologias utilizadas para a estimativa da chegada da onda P são: AIC, AIC-TC1.1, AIC-TC1.25, TC35, TC45, TC55 e MER. A identificação destas metodologias é definida nos itens 8.2.44 (AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25) e 8.2.4.1 (TC35, TC45 e TC55).

Antes de avaliar o programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização, diferentes metodologias para a estimativa da chegada da onda P foram consideradas, por meio do cálculo direto da velocidade de propagação de ondas v_p . O CP de alumínio possui velocidade de propagação de ondas v_p de 6100m/s. A montagem utilizada para os testes de cálculo direto da velocidade de propagação de ondas v_p e os resultados obtidos podem ser observados no item 8.4.1.

Após o cálculo direto da velocidade de propagação de ondas, apresenta-se nos itens 8.4.2 e 8.4.3 a avaliação da capacidade do programa desenvolvido (CLAPWaVe) para localizar fontes de EA geradas pela quebra de grafite em locais definidos no CP de alumínio. Visto que o programa desenvolvido (CLAPWaVe) permite a obtenção das coordenadas das fontes de EA e da velocidade v_p é possível comparar os valores obtidos na localização com aqueles obtidos pelo método direto nos testes do item 8.4.1. Essa comparação é apresentada no item 8.4.2. No item 8.4.3 comparam-se os resultados da localização obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) com os obtidos utilizando o software AEwin.

8.4.1 Influência da metodologia de estimativa da chegada da onda P na velocidade de propagação de ondas - v_p

A Figura 8.11 mostra a montagem dos sensores em um CP de alumínio de geometria cilíndrica, com 100mm de diâmetro e 140,2mm de comprimento. Foi definido um sistema de coordenadas centralizado no CP, em que o eixo Z representa a localização ao longo do comprimento do CP e os eixos X e Y representam a localização em planos paralelos às faces de CP. Foram dispostos 3 sensores em cada face do CP (plano XY), distribuídos de forma que os sensores 1, 3, 5 apresentaram as mesmas coordenadas X e Y dos sensores 2, 4, 6 e somente diferiram na coordenada Z.

Figura 8.11 – Montagem dos sensores para o cálculo de velocidade de propagação de ondas v_p em um CP de alumínio

Utilizando-se a distribuição dos sensores antes definida, o cálculo da velocidade de propagação de ondas v_p foi feito apenas entre os pares de sensores 1-2, 3-4 e 5-6 em que a trajetória mais curta da onda entre eles é a distância medida no eixo Z, i.e., o comprimento do CP. Assim, obtiveram-se 3 trajetórias paralelas utilizadas para o cálculo da velocidade v_p .

A capacidade dos sensores de ler e registrar sinais de EA é a utilizada nesta pesquisa para o monitoramento do processo de microfissuramento. No entanto, os sensores podem ser receptores ou emissores de sinais segundo a necessidade. O cálculo direto da velocidade de propagação de ondas v_p utiliza ambas as capacidades dos sensores, emitindo-se um pulso em um dos sensores do par e registrando sua chegada no outro.

Com a aplicação das diferentes metodologias para a estimativa da chegada da onda P, foi calculada a diferença de tempo entre a emissão do sinal e a sua chegada no outro sensor do par. Tendo-se o tempo que demora em viajar o sinal entre pares de sensores e a distância entre eles, foi calculada a velocidade de propagação de ondas v_p .

Foram emitidos 40 pulsos em cada sensor de cada par, obtendo-se 80 valores de velocidade de propagação da onda v_p para cada uma das 3 trajetórias paralelas axiais. A Figura 8.12 apresenta os valores médios obtidos para a velocidade de propagação de ondas v_p e a Figura 8.13 apresenta o coeficiente de variação (desvio padrão dividido pela média, expresso em porcentagem), que representa a variabilidade obtida para esse parâmetro.

Figura 8.12 – Velocidade de propagação de ondas v_p média obtido em alumínio utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P

A Figura 8.12 mostra que o método MER fornece os valores médios mais afastados da tendência geral definida pelas outras metodologias (especialmente na direção axial 3-4) e a Figura 8.13 mostra que esse método apresenta, também, a maior variabilidade. Além disso, em ambas as Figuras observa-se que os valores de velocidade v_p obtidos entre os pares de sensores 1-2 e 5-6 são um pouco maiores e apresentam maior variabilidade do que aqueles obtidos na direção 3-4. As diferenças observadas podem ser explicadas pela maior influência da reflexão nas superfícies do CP nos sinais emitidos e registrados pelos sensores dispostos mais próximos das bordas do CP. As ondas P emitidas pelos sensores são ondas volumétricas que viajam em todas direções e que se refletem toda vez que chegam a alguma superfície. Por isso, quanto menor for o CP e mais próximos estiverem os sensores das bordas do mesmo, maior deve ser o efeito das reflexões e refrações na superfície do CP nos sinais registrados. O par de sensores 3-4 encontra-se centralizado no eixo Z do CP, sendo o mais afastado das bordas do mesmo. Como consequência, os dados de velocidade v_p obtidos com o par de sensores 3-4 devem ser os menos afetados pelos efeitos de refração e reflexão. Assim, os dados de velocidade v_p da direção axial 3-4 são os utilizados para caracterizar o CP.

As Figuras 8.12 e 8.13 mostram que os dados de velocidade v_p da direção axial 3-4 obtidos com os métodos AIC-TC (AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25) e TC (TC35, TC45 e TC55) são os que apresentam menor dispersão, resultando em coeficientes de variação da ordem de 2%, menos do que a metade do coeficiente de variação obtido com o método AIC. Pelo já dito, considera-se que os métodos AIC-TC e TC são os que possibilitaram os melhores resultados em termos de cálculo direto da

velocidade de propagação de ondas v_p e o método MER é o que forneceu os resultados mais dispersos. Os valores médios da velocidade de propagação de ondas v_p obtidos para aqueles métodos considerados os mais confiáveis são 5935m/s, 5941m/s, 5972m/s, 5955m/s, 5956m/s para os métodos AIC-TC1.1, AIC-TC1.25, TC35, TC45 e TC55, respectivamente.

Figura 8.13 – Coeficiente de variação obtido no cálculo da velocidade de propagação de ondas v_p em alumínio utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P

8.4.2 Influência da metodologia utilizada na estimativa da chegada da onda P na localização

Como no programa desenvolvido (CLAPWaVe) proposto podem ser utilizados os dados da estimativa da chegada da onda P obtidos por meio de qualquer metodologia, é possível incorporar as estimativas de cada um deles para avaliar a influência da metodologia utilizada na qualidade da localização.

Para se ter uma adequada localização das fontes de EA a distribuição dos sensores deve ser modificada em relação à utilizada para o cálculo da velocidade de propagação de ondas. Dispõem-se 4 sensores no perímetro do CP e um sensor no centro de cada uma das faces do mesmo. A Figura 8.14 apresenta duas fotografias em que se mostra a montagem dos sensores utilizada na localização de fontes de EA.

Figura 8.14 – Montagem dos sensores para testes de localização de fontes de EA em um CP de alumínio

A validação da localização é feita por meio da avaliação da capacidade do programa de localizar fontes de EA fictícias geradas na superfície do CP em 4 locais específicos e conhecidos. As fontes fictícias são geradas por meio de quebras de grafite feitas de acordo com as características definidas no item 2.3. Induziram-se 10 fontes fictícias em cada local.

A avaliação do programa desenvolvido (CLAPWaVe) utilizando-se as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P é feita de 4 formas: 1) comparação gráfica entre a localização das fontes geradas e a localização obtida pelo programa, 2) comparação do erro de minimização ε_i médio, 3) comparação do erro (mm) de localização por meio do cálculo da distância entre as fontes fictícias geradas e as localizadas pelo programa e 4) comparação da velocidade de propagação de ondas v_p obtida pelo programa de localização com os valores obtidos com o método direto (ver item 8.4.1).

A Figura 8.15 mostra os resultados da localização de fontes de EA após os processos de filtragem definidos em 8.3.3. Apresentam-se 8 imagens do CP cilíndrico, tendo-se na primeira delas (imagem superior esquerda) a localização dos 4 locais onde foram induzidas fontes fictícias de EA. As fontes fictícias são chamadas de agora em diante de focos gerados e mostradas nas imagens com um círculo vermelho. Os focos gerados são identificados como F_1 , F_2 , F_3 e F_4 . Nas imagens restantes foram adicionados aos 4 focos gerados os resultados da localização obtidos utilizando o programa desenvolvido (CLAPWaVe) (definido em 8.2) para os mesmos casos estudados no item 8.4.1. Cada imagem é identificada segundo o nome de cada metodologia para a estimativa da chegada da onda P no canto superior esquerdo.

A visualização das fontes de EA da Figura 8.15 mostra que o método MER fornece os resultados de localização menos ajustados aos focos gerados. O método AIC mostra muitas fontes ajustadas aos focos gerados, porém apresenta também muitas outras fontes dispersas no CP (pontos pretos fora da região dos focos gerados e das caixas de clusters). Os métodos AIC-TC e TC mostram os resultados mais bem ajustados e com menos fontes dispersas no CP fora da região dos focos gerados. Dos métodos AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25 o primeiro mostra os resultados mais bem ajustados aos 4 focos gerados, especialmente no caso do foco F_4 . Os métodos TC35, TC45 e TC55 também mostram menos ajuste no foco F_4 do que o método AIC-TC1.1. O método TC35 é o que mostra o ajuste mais pobre dos métodos TC, especialmente no foco gerado F_2 . Dentre os métodos AIC-TC e TC não é possível definir qual mostra melhor ajuste pela simples visualização das fontes de EA da Figura 8.15, por isso é necessário avaliar a qualidade de ajuste de forma quantitativa.

A Figura 8.16a mostra que embora os métodos AIC e AIC-TC1.1 apresentem valores levemente superiores do erro ε_i médio, todos eles apresentam valores semelhantes (da mesma ordem de grandeza). A Figura 8.16b mostra que o desvio padrão do erro médio é menor nos métodos AIC-TC1.1 e TC35. Contudo, observa-se que todos os valores do desvio padrão são significativos, o que pode ser explicado pela influência das fontes de EA localizadas fora da região dos focos gerados. O padrão das fontes localizadas (Figura 8.15) e os valores altos de desvio padrão do erro ε_i médio (Figura 8.16b) indicam a localização de fontes de EA bem ajustadas às fontes fictícias geradas (erro ε_i médio pequeno) e de outras com ajuste mais pobre (erro ε_i médio maior). Isso sugere que as fontes cuja localização é mais ajustada são obtidas a partir de sinais que chegam diretamente aos sensores após a fonte ser gerada, enquanto que aquelas menos ajustadas são devidas a sinais que contêm maior influência das reflexões nas bordas do CP. A semelhança nos resultados associados ao erro ε_i de minimização pode ser explicada porque embora em cada um dos casos tenha sido usada uma metodologia diferente para a estimativa do tempo de chegada da onda P, todas as localizações foram feitas utilizando o mesmo algoritmo de minimização. Isto sugere que o tipo de algoritmo de minimização utilizado é tão importante no ajuste da localização quanto o método de cálculo da chegada da onda P. Esta hipótese será confirmada no item 8.4.3.

Figura 8.15 –Localização de fontes de EA obtidas utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P

Figura 8.16 – Erro ϵ_i de minimização médio utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P. a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro

A Figura 8.17 mostra o erro da localização medido em termos da distância média entre as fontes de EA localizadas e os focos gerados pela quebra de grafite. Os resultados obtidos nesta Figura confirmam que o método MER apresenta a menor qualidade de ajuste, seguido do método AIC. Os métodos TC35, TC45 e TC55 mostram valores de erro médio (mm) semelhantes, porém, TC45 mostra menor dispersão. Dos métodos AIC-TC, embora os resultados dos dois apresentem o menor erro médio (mm) e o menor desvio padrão, o método AIC-TC1.1 apresenta os melhores resultados.

Figura 8.17 – Erro de localização entre os focos gerados e os focos calculados utilizando as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P. a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro

A avaliação apresentada na Figura 8.16 busca analisar a capacidade geral de minimização do algoritmo de localização utilizado, incluindo tanto as coordenadas da fonte quanto a velocidade de propagação de ondas v_p média associada a cada fonte. Já as avaliações do programa apresentadas nas Figuras 8.15 e 8.17 estão associadas apenas à capacidade do programa de localizar adequadamente as coordenadas das fontes de EA. Para completar a análise da influência do método de estimativa da chegada da onda P nos resultados obtidos, apresenta-se na Figura 8.18 a avaliação da velocidade de propagação de ondas v_p obtida com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Considerando-se que os testes foram feitos induzindo fontes fictícias de EA em um CP de alumínio, a velocidade de propagação de ondas nele não deve mudar porque o CP não é danificado durante o processo. Isto permite calcular um valor médio representativo de velocidade v_p obtido com o programa que pode ser comparado com aqueles valores pelo método direto apresentado no item 8.4.1.

Figura 8.18 - Comparação da velocidade de propagação de ondas v_p obtida por meio do cálculo direto e da localização de fontes de EA para as diferentes metodologias de estimativa da chegada da onda P. a) Média da velocidade de propagação de ondas P. b) Coeficiente de variação associado à velocidade de propagação de ondas v_p

A Figura 8.18a mostra como os valores médios de velocidade v_p obtidos com o programa de localização são consistentes com os obtidos por meio do método direto. Observa-se que os métodos AIC-TC1.1 e AIC-TC1.15 mostram valores médios aproximadamente iguais entre ambos os métodos. A Figura 8.18b mostra o coeficiente de variação calculado para os dados de velocidade obtidos por meio do programa e pelo método direto. Conforme esperado, os dados obtidos pelo método indireto (por

meio do programa de localização) mostram maior dispersão do que os dados obtidos pelo método direto. A comparação dos coeficientes de variação das velocidades v_p mostrou que os métodos TC45 e TC55 são os que apresentam menor variação. Contudo, se o LR for modificado nesse método (TC35) a variabilidade aumenta. Não é possível fazer uma comparação dessa informação com o software AEwin porque nele a velocidade deve ser ingressada antes do início do ensaio, mantendo-se constante.

Todas as avaliações da metodologia de cálculo da chegada da onda P na qualidade de ajuste do programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização mostraram o seguinte: O método MER é o menos ajustado em todos os casos avaliados. O método AIC mostrou ser o segundo método menos ajustado nos casos avaliados. O método TC mostrou boa qualidade de ajuste, porém, seus resultados são muito dependentes do LR utilizado, tendo-se em alguns casos melhor ajuste utilizando LR de 35dB (método TC35), em outros com LR de 45dB (TC45) e em outros como LR de 55db (TC55). O método AIC-TC mostrou boa qualidade de ajuste em ambos os casos avaliados, tendo-se, em geral, resultados mais ajustados do que com o método TC. As diferenças na qualidade de ajuste obtidas com os métodos AIC-TC1.1 e AIC-TC1.25 são pequenas, no entanto, tais diferenças sugerem que o método AIC-TC1.1 é que apresenta, no geral, os melhores resultados.

Vista a comparação entre os diferentes métodos e considerando-se que a metodologia AIC-TC é mais robusta teoricamente do que a metodologia TC, o método AIC-TC1.1 é escolhido como a melhor alternativa a utilizar. Portanto, no programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização será incorporado o esse método de cálculo do tempo de chegada da onda P. Os resultados do programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização apresentados daqui em diante serão feitos considerando o método AIC-TC1.1.

8.4.3 Comparação dos resultados de localização entre software AEwin e programa desenvolvido (CLAPWaVe)

Depois da avaliação das diferentes metodologias de cálculo da chegada da onda P e a seleção do método AIC-TC1.1 para ser incorporado no programa desenvolvido (CLAPWaVe), é necessário comparar o programa proposto com o software AEwin. As diferenças entre ambos os métodos foram definidas nos itens 8.1.5 e 8.2, pelo que aqui são apresentados apenas os resultados obtidos nos testes de localização. Os testes utilizados neste item são os mesmos definidos no item 8.4.2, utilizando-se a montagem de sensores definida na Figura 8.14. As fontes fictícias de EA são, também, as mesmas F_1 , F_2 , F_3 e F_4 chamadas de focos gerados e apresentadas no item 8.4.2.

O software AEwin precisa da definição prévia da velocidade de propagação de ondas v_p , pois é avaliada a influência do uso de diferentes valores para este parâmetro na qualidade da localização. Comparam-se esses resultados com os obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização. No caso de testes como o aqui apresentado, em que não há dano induzido ao CP, a velocidade de propagação de ondas v_p não deve mudar durante o teste, pois pode não fazer sentido a incorporação de resultados de localização com velocidades diferentes da real. No entanto, em ensaios reais o processo de carregamento induz microfissuramento e dano no CP assim como regiões de maior confinamento que também afetam a velocidade de propagação de ondas v_p . Como consequência, a velocidade média do CP intacto considerada inicialmente será menos adequada na medida em que o ensaio avança. Este efeito seria semelhante a considerar o problema de localização definindo uma velocidade média v_p diferente da real. Esse efeito tenta ser representado por meio da utilização de velocidades de propagação diferentes do valor real definido no item 8.4.1

De forma análoga ao apresentado no item 8.4.2, a comparação da qualidade de ajuste será feita considerando a visualização gráfica das fontes de EA, o erro ε_i médio de minimização e o erro (mm) médio de ajuste entre os focos gerados (imagem superior esquerda na Figura 8.15) e as fontes de EA localizadas.

A Figura 8.19 mostra a visualização gráfica dos focos gerados e das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e com o software AEwin. As diferentes velocidades de propagação de ondas v_p utilizadas na localização com o software AEwin são: 5000m/s, 5500m/s, 6000m/s, 6500m/s e 7000m/s. A identificação de cada método é feita adicionando a magnitude da velocidade utilizada ao nome do software da seguinte forma: AEwin5000, AEwin5500, AEwin6000, AEwin6500 e AEwin7000. No canto superior esquerdo de cada imagem apresenta-se a identificação de cada método utilizado. Observa-se que os resultados da localização obtidos no item 8.4.2 com o método AIC-TC1.1 são replicados aqui a fim de permitir uma comparação visual mais direta.

A Figura 8.19 mostra que o software AEwin não localizou o foco F4 em nenhum dos casos apresentados, mesmo no caso em que a velocidade utilizada confere com o valor representativo do CP. Observa-se, também, que na medida em que a velocidade aumenta, em relação à velocidade real do CP o número de fontes de EA localizadas pelo software AEwin diminui, tendo-se quase nenhuma localização de fontes no caso AEwin7000. De forma semelhante, quando a velocidade diminui em relação ao valor real, se observa uma diminuição das fontes localizadas, especialmente no foco gerado F2. Tendo em conta que a velocidade real do CP é aproximadamente 6100m/s, um aumento em 1000m/s (16,4%) diminui significativamente a qualidade de ajuste. Diminuições dessa ordem de grandeza podem ocorrer em um ensaio real em que o carregamento induz dano no CP, pois esse efeito

é muito importante e somente pode ser incorporado se a velocidade é calculada junto das coordenadas da fonte. Conforme esperado, o software AEwin entrega seus melhores resultados de localização quando a velocidade utilizada é a real (AEwin6000). Contudo, considerando-se os 4 focos gerados o método AIC-TC1.1 mostrou resultados mais bem ajustados do que o AEwin.

Figura 8.19 – Localização de fontes de EA obtidas para o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin. Apresentam-se os resultados do software AEwin para 5 diferentes valores da velocidade de propagação de ondas v_p

A Figura 8.20a mostra que o programa desenvolvido (CLAPWaVe) apresenta um erro ε_i médio de minimização significativamente menor do que todos os dados obtidos com o software AEwin. Além disso, a Figura 8.20b mostra que a dispersão dos dados é também menor no caso do programa desenvolvido (CLAPWaVe). Além da média e do desvio padrão, a moda dos dados localizados com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) ($1,27 \cdot 10^{-21}$ segundos) é muito menor do que a obtida com o software AEwin (valores de moda entre $7,7 \cdot 10^{-8}$ e $3,02 \cdot 10^{-8}$ segundos). A informação da moda não é apresentada graficamente porque as diferenças de ordem de grandeza entre ambos os programas não permitem a visualização apropriada. A informação apresentada na Figura 8.20 e os dados da moda obtida em ambos os programas demonstram que o algoritmo de minimização utilizado no programa desenvolvido (CLAPWaVe) permite atingir níveis muito menores de erro ε_i médio. Conforme esperado, o algoritmo incorporado no programa proposto é mais eficiente.

Figura 8.20 – Erro ε_i médio de minimização na localização obtido para o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin. Apresentam-se os resultados do software AEwin para 5 diferentes valores da velocidade de propagação de ondas v_p . a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro

Os resultados obtidos na Figura 8.21 confirmam a tendência favorável obtida para o programa desenvolvido (CLAPWaVe), tendo-se que tanto o erro médio quanto o desvio padrão são menores no programa proposto.

A respeito da influência da velocidade de propagação de ondas v_p na localização obtida com o software AEwin, a Figura 8.20 mostra que variações de 1000m/s da velocidade em relação ao valor real podem aumentar o erro ε_i médio entre 16,15 e 25,87%. Em adição, a Figura 8.21 mostra que tais variações na velocidade podem aumentar o erro (mm) médio entre 45,84% e 56,07%.

Figura 8.21 –Erro (mm) de localização entre os focos gerados e as fontes localizadas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin. Apresentam-se os resultados do software AEwin para 5 diferentes valores da velocidade de propagação de ondas v_p . a) Média do erro. b) Desvio padrão do erro

8.5 Resultados obtidos com o programa de localização desenvolvido (CLAPWaVe)

Depois da avaliação favorável do programa desenvolvido (CLAPWaVe) apresentada no item 8.4, utiliza-se o mesmo programa para se obter a localização das fontes EA e as velocidades v_p médias nos ensaios de compressão diametral feitos em rocha. Apresentam-se aqui os resultados típicos obtidos para os ensaios monotônicos e cíclicos em mármore e monzogranito após o processo de filtragem de dados definido no item 8.3.3. As formas de onda consideradas nas análises a seguir são aquelas coletadas com um LR mínimo de 45 dB. Valores de LR menores do que esse valor introduzem muitos sinais de tipo ruído, que podem alterar os padrões reais de microfissuramento associados às fontes de EA e aumentar o erro ε_i médio da localização. Tanto para o mármore quanto para o monzogranito a informação obtida na localização é apresentada e analisada segundo três perspectivas diferentes: 1) Visualização gráfica dos padrões de microfissuramento no volume do CP, incluindo a distribuição espacial e temporal; 2) Visualização gráfica da distribuição espacial e temporal de cada valor médio de velocidade de propagação de ondas v_p associada a cada fonte de EA; e 3) Visualização da variação da média móvel da velocidade de propagação de ondas associada a cada fontes de EA em 4 regiões no interior do CP (região do centro do CP, região dos apoios entre o CP e o berço, região centralizada das faces do CP, região das bordas do CP fora dos apoios).

A respeito da perspectiva 1, deve-se notar que embora o programa desenvolvido (CLAPWaVe) tenha mostrado melhores resultados do que software AEwin nos testes de quebra de grafite, é necessário comparar a localização obtida nos ensaios reais em ambos os programas. Na localização feita com o software AEwin utiliza-se a velocidade de propagação de ondas v_p do CP em condição intacta. Além disso, a visualização gráfica dos resultados da localização fornecida pelo software AEwin apresenta as seguintes diferenças em relação ao programa desenvolvido (CLAPWaVe) de localização: 1) O CP não é desenhado junto às fontes de EA; 2) O gráfico que mostra a localização das fontes apresenta a escala dos eixos coordenados distorcida, impedindo a visualização das reais proporções do CP e as fontes de EA; e 3) utiliza-se a energia adimensional em lugar da energia absoluta na criação de caixas de clusters. Estas diferenças na visualização gráfica dos dados impedem a comparação direta deles caso se mantivesse a forma de apresentação de dados definida pelo software AEwin. Por isso, para fazer uma comparação adequada os resultados da localização obtida com o software AEwin devem ser extraídos desse programa e levados ao programa $\text{\textcircled{R}}$ Matlab. Extraem-se as coordenadas, o tempo e a energia absoluta associada a cada fonte de EA. Após este processo, os dados do AEwin são sujeitos à mesma análise gráfica que é aplicada aos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Este processo é feito para que ambos os conjuntos de dados possam ser visualizados da mesma forma, incluindo a geração de caixas de clusters de acordo com o parâmetro de energia absoluta (aJ).

Na perspectiva 1, além da comparação gráfica das fontes de EA, inclui-se a comparação da qualidade do ajuste dos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e com o software AEwin. Diferentemente do apresentado nos testes do item 8.4, que incluem geração de fontes fictícias de EA, em ensaios reais as fontes de microfissuramento são desconhecidas (procura-se estimá-las por meio do monitoramento com EA). Por isso, o erro (mm) calculado no item 8.4 entre as fontes reais e calculadas com o programa de localização não pode ser determinado. Assim, nos casos reais a avaliação da qualidade de ajuste da localização é feita em termos de erro ε_i médio de minimização.

As perspectivas 2 e 3 apresentam a evolução da velocidade de propagação de ondas ao longo do ensaio, visto que não é possível a comparação direta com o software AEwin. Estas análises somente puderam ser obtidas por meio da incorporação da velocidade como uma variável no processo de busca de fontes de EA, pois representam um avanço em relação ao já feito em termos de localização e monitoramento com EA.

8.5.1 Ensaios monotônicos em monzogranito

Em diferentes capítulos deste documento tem sido mencionado o comportamento frágil do monzogranito e as consequências que isso traz em termos de coleta de formas de onda. O problema da saturação na coleta de formas de onda foi tratado no item 2.5 e observou-se que ocorre principalmente após o pico de carregamento nesta rocha. Por isso, se o LR é aumentado perde-se informação a respeito do início do microfissuramento. Se o LR for definido baixo o suficiente para coletar informação inicial a respeito do início do microfissuramento, ocorrerá saturação após o pico, tendo-se que o padrão de microfissuramento deste ponto em diante fica distorcido pela perda de porções de informação. Pelo exposto, propõe-se apresentar os padrões de microfissuramento utilizando-se dois ensaios feitos na mesma rocha, mas a coleta de formas de onda foi feita com diferentes LR. Desta forma, apresenta-se o padrão de microfissuramento no estágio A de carregamento e logo apresenta-se o padrão de microfissuramento geral, dos estágios A a F, porém com menor informação no trecho inicial do ensaio. Este procedimento permite utilizar a informação que é possível coletar em rochas tão frágeis quanto o monzogranito para obter um padrão completo de microfissuramento, incluindo seu avanço no tempo e no espaço (volume do CP).

8.5.1.1 Padrão de microfissuramento tridimensional

Os dados apresentados nas Figuras 8.22 a 8.25 mostram o avanço do ensaio apenas até o fim do estágio A, pois se deseja definir o início do microfissuramento e mostrar o seu padrão durante o primeiro estágio do ensaio.

Os resultados do estágio A são apresentados dentro das análises feitas em ensaios monotônicos em monzogranito, porém são válidas também para ensaios cíclicos. Como o primeiro ciclo de descarregamento e recarregamento é aplicado após o pico, até o fim do estágio A os ensaios cíclicos são iguais aos monotônicos.

A Figura 8.22a mostra o comportamento força versus tempo típico durante o estágio A de um ensaio de compressão diametral em monzogranito. Sabe-se que a quantidade de informação registrada pelo equipamento de EA depende das emissões originadas no CP, portanto, em rochas como o monzogranito a informação é pouca nos estágios iniciais dos ensaios. Assim, foram utilizados os dados de força e tempo registrados pela prensa servocontrolada. Tais dados são coerentes com os fornecidos pelo equipamento de EA, porém há informação desde o início de ensaio. A Figura 8.22b mostra a

energia absoluta acumulada típica das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), até o fim do estágio A. É importante salientar que os valores de energia absoluta apresentados aqui não são iguais aos apresentados nas Figuras 7.1d e 7.2d. As energias absolutas da Figura 8.22b são as obtidas a partir do sinal mais próximo da fonte, já as energias acumuladas das Figuras 7.1d e 7.2d são as energias obtidas de todos os sinais registrados pelo equipamento de EA. Como esperado, ambas as energias mostram a mesma tendência, porém representam conceitos ligeiramente diferentes. A primeira representa a evolução das energias localizadas em cada fonte de EA, enquanto a segunda representa os níveis de energia registrados em todos os sensores durante o processo de microfissuramento. Contudo, o uso da energia das fontes de EA considera-se mais consistente para complementar a representação espacial e temporal das fontes de EA na definição do início do microfissuramento (Figuras 8.23 e 8.24). Foram adicionados pontos de controle que representam os estágios em que são apresentados os padrões de microfissuramento definidos por meio das fontes de EA nas Figuras 8.23 e 8.24. Os pontos de controle 1 a 4 estão associados aos seguintes estágios de carregamento: 50, 75, 90 e 100% do carregamento de pico. O ponto de controle 5 corresponde ao fim do estágio A. A Figura 8.22b mostra que o aumento na energia acumulada nas fontes de EA é praticamente nulo até o ponto de controle 2. No ponto de controle 2 observa-se um leve aumento na energia absoluta acumulada, quase imperceptível. Entre os pontos de controle 2 e 3, aproximadamente a 85% do carregamento de pico, observa-se o primeiro incremento significativo na energia absoluta das fontes de EA. Já no ponto de controle 4 (pico de carregamento) a taxa de aumento da energia absoluta acumulada é máxima, tendência que se mantém no trecho pós pico até o ponto de controle 5.

Figura 8.22 – Força e energia absoluta acumulada versus tempo no estágio A em ensaios em monzogranito. a) Força obtida das leituras da prensa servocontrolada. b) Energia absoluta acumulada das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)

A Figura 8.23 mostra os padrões típicos de microfissuramento acumulativo em monzogranito até o fim do estágio A para os pontos de controle definidos na Figura 8.22. Tais padrões são definidos por meio da representação espacial das fontes de EA localizadas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). A criação das caixas de clusters apresentadas nesta Figura segue os mesmos lineamentos definidos no item 8.1.3, porém, utilizando a energia absoluta como parâmetro para sua criação (ver item 8.2.5). No canto inferior direito da Figura 8.23 é apresentada a escala de cores que caracteriza os diferentes níveis de energia absoluta acumulando-se no interior do CP. Como os dados apresentados nessa Figura somente mostram o estágio A do ensaio, os níveis de energia acumulada nas caixas de clusters são ainda baixos, tendo-se apenas uma caixa de maior energia no centro do CP. Este comportamento é coerente com a hipótese de microfissuramento progressivo no monzogranito, observada nos capítulos 6 e 7 assim como no item 8.1. Em todas as Imagens desta Figura observam-se três pontos no apoio inferior do CP, junto da coordenada $X=0\text{mm}$, porém eles não representam fontes de EA localizadas, mas simplesmente são o resultado de um efeito visual do desenho tridimensional do CP em contato com o eixo de coordenadas X . Este efeito visual no contato do CP com o eixo X para $Z=25\text{mm}$ ocorre cada vez que o CP é apresentado nesta orientação, portanto, é observado nas Figuras 8.24, 8.28, 8.29, 8.39, 8.40, 8.49, 8.50, 8.59 e 8.60.

Figura 8.23 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA no estágio A em ensaios em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe)

A Imagem 1 da Figura 8.23 mostra somente algumas fontes de EA, sem acúmulo de energia definido. Na Imagem 2 observa-se a criação da primeira caixa de cluster localizada no centro do CP, definindo-se neste instante o primeiro acúmulo de fontes de EA. A Figura 8.22b mostra que o nível de energia acumulado até este instante é ainda muito pequena. A criação de uma caixa cluster no centro do CP com níveis de energia muito baixos sugere o início do microfissuramento muito leve para o 75% do carregamento de pico. A Imagem 3 mostra que a caixa de cluster no centro do CP aumenta tanto em tamanho quanto em número de fontes de EA e a Figura 8.22b mostra que há um aumento significativo de energia acumulada. Isto sugere que quando o carregamento atinge 90% do carregamento de pico o processo de microfissuramento foi iniciado. A avaliação conjunta das Imagens 2 e 3 da Figura 8.23 e a Figura 8.22b sugere que os primeiros indícios do início de microfissuramento ocorrem a 75% do carregamento de pico, porém, quando o carregamento atinge aproximadamente 85% da carga de pico o processo de propagação de microfissuras progride com maior intensidade. Assim, considera-se que o início do microfissuramento em monzogranito é aproximadamente na faixa 75-85% do carregamento de pico. Considerando-se que esta informação foi obtida com o programa de localização proposto, tem-se a primeira diferença em relação aos padrões de microfissuramento obtidos com o software AEwin utilizando-se a metodologia definida e apresentada no item 8.1 (definição do início do microfissuramento a 90% do carregamento de pico).

Na Imagem 3 da Figura 8.23 observa-se, também, o aparecimento de algumas fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. Visto o nível de carregamento na Imagem 3, as fontes na região de contato estão, provavelmente, associadas ao efeito de transferência de carregamento do berço ao CP e ao confinamento produzido nesta região. Estas hipóteses serão analisadas em maior detalhe nos itens 8.5.1.2 e 8.5.1.3, em que serão apresentados os resultados da variação da velocidade de propagação de ondas ν_p obtida na localização. Ainda na Imagem 3, observa-se o acúmulo de fontes de EA (aparecimento de uma caixa de cluster) em uma das faces do CP, o que é consistente com o início do microfissuramento em regiões menos confinadas do mesmo. As Imagens 4 e 5 mostram a extensão dos três padrões observados na Imagem 3, i. e., caixas de clusters em uma das faces do CP, na região dos apoios e no centro do CP, além de algumas fontes de EA dispersas (sem criação de caixas de clusters) nessas regiões. Cabe ressaltar que neste ensaio o sistema de coleta das formas de onda pode registrar e salvar todos os sinais gerados apenas até o ponto de controle 4 (pico de carregamento) porém, após o pico houve perda de sinais pela saturação do sistema (ver item 2.5). Isso pode ser considerado uma limitação do sistema no caso dos ensaios em rochas como o monzogranito, em que a taxa de EA é muito alta perto do pico de carregamento. Por isto, a Imagem 5 da Figura 8.23 mostra menos fontes de EA do que deveria, tendo-se uma pequena distorção no padrão de microfissuramento desde o ponto de controle 5. Pelo exposto, o padrão de

microfissuramento deste ensaio somente é apresentado até o ponto de controle 5. O padrão de microfissuramento complementar ao apresentado na Figura 8.23 é apresentado na Figura 8.28.

Com o intuito de se comparar os resultados da localização obtida com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin, apresenta-se na Figura 8.24 a localização de fontes de EA em monzogranito obtida com o software AEwin para os pontos de controle definidos em 8.22, até o fim do estágio A. A Figura 8.24 é análoga à Figura 8.23, diferindo apenas na metodologia utilizada para efetuar a localização. A informação utilizada para obter ambas as Figuras é exatamente a mesma (formas de onda). Além disso, de acordo ao explicado no começo do item 8.1, a informação obtida com o software AEwin é processada a fim de se obter uma apresentação gráfica das fontes de EA análoga à Figura 8.23.

Figura 8.24 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA no estágio A em ensaios em monzogranito. Utilização do software AEwin

De forma semelhante à Imagem 1 da Figura 8.23 (programa desenvolvido CLAPWaVe), a Imagem 1 da Figura 8.24 (software AEwin) mostra poucas fontes de EA sem acúmulo de energia. No entanto, na Imagem 1 da Figura 8.24 as fontes de EA foram localizadas próximas da região de apoio entre o CP e o berço. A Imagem 2 da Figura 8.24 mostra o primeiro acúmulo de fontes de EA

localizado ainda região próxima dos apoios. Diferentemente do observado na Imagem 2 da Figura 8.23, a Imagem 2 da Figura 8.24 não mostra início do microfissuramento. A Imagem 3 da Figura 8.24 mostra o acúmulo de fontes de EA na região dos apoios, nas faces do CP e no centro, o que sugere o início do microfissuramento a 90% do carregamento de pico. Comparando-se os resultados das Imagens 2 e 3 das Figuras 8.23 e 8.24, pode-se observar como o software AEwin mostra que o início do microfissuramento ocorre para níveis de carregamento um pouco maiores do que o observado com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Até o ponto de controle 3 as fontes de EA obtidas com o software AEwin mostram-se mais distribuídas no CP ao longo do eixo de carregamento, já o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra um padrão muito mais localizado no centro do CP.

De acordo com as expressões teóricas propostas por Hertz (1895) e logo modificadas por Hondros (1959) para um disco bidimensional de material homogêneo sob compressão diametral, as maiores tensões de tração ocorrem no centro do disco. Isto é consistente com o padrão do início do microfissuramento obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Por outro lado, as análises teóricas tridimensionais desenvolvidas por Chau e Wei (2001) e Wei e Chau (2013) para um disco homogêneo em compressão diametral, mostraram que as tensões ao longo da espessura do CP (eixo Z nas Figuras 8.23 e 8.24) não são constantes. Os autores modelaram o contato entre o CP e o berço de acordo a uma distribuição de tensão não uniforme entre materiais elásticos deformáveis (contato de Hertz). Segundo esses autores, as maiores tensões no eixo Z centralizado ($X=Y=0$) não ocorrem no centro, mas sim em uma região próxima das faces do CP. Isto é consistente com o acúmulo de microfissuramento próximo de uma das faces, obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Os autores indicam, também, que o padrão de distribuição de tensões para diferentes distâncias radiais desde o centro do CP são semelhantes ao caso bidimensional. As conclusões obtidas por Chau e Wei (2001) e Wei e Chau (2013) indicam que as maiores tensões estão localizadas ao longo do eixo Z centralizado do CP ($X=Y=0$). Além disso, no eixo Y de carregamento, os autores mostram a presença de trações menores e compressões maiores na medida em que o valor absoluto da coordenada Y aumenta, i.e., maior proximidade da região dos apoios. Em consequência, em materiais homogêneos espera-se que o início do microfissuramento seja definido pela maior concentração de fontes de EA e energia absoluta no centro e nas faces do CP. Esses padrões de início do microfissuramento são observadas com maior clareza nas localizações feitas com o programa desenvolvido, CLAPWaVe, (Figura 8.23) do que com o software AEwin. O monzogranito mostrou acúmulo de fontes de EA em uma das faces antes da outra, o que sugere que embora esta rocha tenha um comportamento geral homogêneo, sempre há pequenas heterogeneidades locais que farão que a mesma não se comporte como um material linear elástico e homogêneo perfeito.

A Imagem 4 da Figura 8.24 mostra uma extensão do mesmo padrão observado na Imagem 3, tendo-se o cluster de maior acúmulo de energia na região do apoio inferior do CP. Já na imagem 5 observa-se um grande acúmulo de fontes de EA assim como caixas de cluster de alta energia no centro do CP. Observa-se, também, o acúmulo de fontes de EA e caixas de cluster de menor energia ainda distribuído ao longo do eixo de carregamento, diferentemente do padrão mais localizado no centro do CP obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). O acúmulo de energia em uma das faces é observado na Imagem 5 da Figura 8.24, o que também ocorre na localização feita com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). O acúmulo de caixas de cluster em uma das faces sugere o acúmulo de dano, que é consistente com o aparecimento de uma fissura macroscópica vertical e centralizada na face do CP.

Com o objetivo de auxiliar a comparação dos padrões de localização obtidos para o estágio A no monzogranito com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e com o software AEwin, apresenta-se nas Figuras 8.25a e 8.25b a distribuição da energia acumulada típica ao longo do eixo Y nas Figuras 8.24 e 8.23, respectivamente. A Figura 8.25 segue o mesmo formato e estrutura que a Figura 8.3, porém a energia considerada é a energia absoluta, em consistência com o apresentado nas Figuras 8.23 e 8.24. Lembra-se que no eixo de abscissas apresentam-se os valores absolutos da coordenada Y, adimensionalizados pelo raio r do CP. No eixo das ordenadas apresenta-se a porcentagem da energia absoluta acumulada em relação ao total de energia absoluta acumulada ao longo do eixo diametral desde $Y=-r$ até $Y=r$.

A Figura 8.25 mostra como na localização feita com o software AEwin o maior acúmulo de energia ocorre na região dos apoios do CP e na medida em que o carregamento avança, o nível de energia na região central do CP aumenta. No entanto, o aumento de energia no centro é pequeno ainda no ponto de controle 5 (fim do estágio A). A distribuição da energia absoluta obtida com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra uma tendência semelhante, porém, o aumento de energia na região central do CP é bem definido, especialmente a partir do ponto de controle 3. No ponto de controle 4 da Figura 8.25b, observa-se o acúmulo de energia absoluta mesmo no centro do CP (aproximadamente um 38% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,2$). Ainda nessa Figura, mas no ponto de controle 5 o acúmulo de energia no centro do CP continua a crescer (aproximadamente 48% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,2$). O padrão mais focalizado na região central do CP mostrado pelo programa desenvolvido (CLAPWaVe) (considerando toda a espessura do CP) é ainda mais consistente com a literatura (CHAU; WEI, 2001; HONDROS, 1959; WEI; CHAU, 2013) do que o padrão obtido com o software AEwin.

Por outro lado, após o acúmulo de energia absoluta no centro do CP, os pontos de controle 4 e 5 da Figura 8.25b mostram um patamar no trecho aproximado de $0,05 < |Y|/r < 0,44$ e logo um aumento

da energia absoluta na região próxima dos apoios entre o CP e o berço. O padrão na distribuição da energia antes dito sugere que mesmo havendo dano no CP após o pico, a ruptura do CP em toda sua espessura ao longo do eixo de carregamento ainda não é bem desenvolvida.

Figura 8.25: Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controle 1 a 5 do estágio A em ensaios em monzogranito. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)

É importante salientar que das análises dos padrões de microfissuramento obtidos até o fim do estágio A os resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) não contradizem as conclusões gerais obtidas no item 8.1 (localização com o software AEwin utilizando energia e não energia absoluta), mas sim reforçam algumas e outras as aprimoram e incrementam. Embora nas Figuras 8.22b e 8.23 observou-se o início do microfissuramento entre 75 e 85% do carregamento de pico, um pouco antes do que o concluído no item 8.1, a distribuição da energia absoluta da Figura 8.25b ainda confere com a hipótese de ruptura progressiva do monzogranito definida no item 8.1. Além disso, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) indicou que ao padrão de microfissuramento focalizado em uma das faces, obtido com ambos os programas, soma-se o microfissuramento focalizado no centro do CP. Pelo exposto, as conclusões e relações entre o processo de microfissuramento e as características geológicas das rochas (minerais e estrutura) apresentadas no item 8.1 e nos capítulos prévios, ainda são válidas.

O início do microfissuramento pôde ser avaliado utilizando-se informação de ensaios feitos com LR baixo (não menor do que 45dB), porém após o pico no monzogranito há perda de informação, porque a taxa de emissões ultrapassa a capacidade de processamento do equipamento de EA. Dessa

maneira, após a avaliação e comparação dos padrões de microfissuramento durante o estágio A, apresenta-se agora a informação até o fim do ensaio, considerando-se um LR maior. A seguir são expostos os resultados de um ensaio monotônico em monzogranito em que o LR utilizado permitiu que não houvesse perda de informação por saturação. No entanto, no ensaio exibe-se menos informação relacionada aos possíveis processos de microfissuramento de baixa intensidade (amplitude menor do que o LR).

A Figura 8.26 mostra o comportamento força versus tempo típico em um ensaio de compressão diametral monotônico em monzogranito. Foram adicionados dez pontos de controle que representam os estágios em que será apresentado o padrão de microfissuramento através de fontes de EA nas Figuras 8.28 e 8.29.

Figura 8.26 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em monzogranito

A Figura 8.27 mostra a tendência típica da energia acumulada nas fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para o ensaio da Figura 8.26, até o fim do estágio A. Esta Figura é análoga à Figura 8.22b, cujo objetivo foi mostrar as variações de energia absoluta durante o primeiro estágio de carregamento e auxiliar na definição do início do microfissuramento. Do item 7.1.1 sabe-se que o monzogranito libera altos níveis de energia absoluta até o fim do ensaio, pois as variações iniciais deste parâmetro não são visíveis. Portanto, embora o ensaio da Figura 8.26 seja apresentado até o fim, as energias absolutas das fontes de EA são apresentadas até o fim do estágio A.

A Figura 8.27 mostra a mesma tendência que a Figura 8.22b, diferindo apenas na magnitude da energia absoluta acumulada em cada ponto de controle. A razão disto é que o LR utilizado no ensaio da Figura 8.26 teve que ser muito maior do que o utilizado no ensaio da Figura 8.22a, para

evitar saturação. Como consequência disso uma parte importante de sinais de menor intensidade foi desconsiderada na coleta, diminuindo a quantidade de fontes de EA localizadas e, portanto, a energia absoluta acumulada. Contudo, este aspecto não impede a análise dos padrões de microfissuramento do CP, especialmente depois do ponto de controle 4 (pico de carregamento) e até o fim do ensaio.

Figura 8.27 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo em ensaios monotônicos em monzogranito

Vale a pena ressaltar que na Figura 8.27 a maior taxa de acréscimo de energia absoluta acumulada ocorre entre os pontos de controle 4 e 5 (trecho pós-pico) em lugar de no ponto de controle 4. Isso pode ser explicado pela forma em que o deslocamento u é registrado e utilizado pela prensa servocontrolada para a execução do ensaio. Como o deslocamento u utilizado para o controle do ensaio é medido no eixo diametral horizontal do CP, se a ruptura do CP ocorrer levemente deslocada do eixo diametral horizontal do CP, o registro de deslocamento u não irá mostrar esse deslocamento, mas o que se tem no eixo diametral do mesmo. Assim, na detecção da ruptura o deslocamento registrado pode ser um pouco diferente daquele que se teria na região em que o microfissuramento fissura começou. Isto pode ser considerado uma limitação imposta pela instrumentação utilizada para o registro dos deslocamentos, mas não um erro na execução do ensaio ou no processo de propagação do dano no CP.

A Figura 8.28 mostra os padrões de microfissuramento acumulativos típicos em um ensaio monotônico para os pontos de controle definidos na Figura 8.26. A localização de fontes de EA apresentada na Figura 8.28 foi obtida com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) proposto. O formato e estrutura desta Figura segue os mesmos lineamentos que a Figura 8.23. A escala de cores que caracteriza os diferentes níveis de energia absoluta das caixas de clusters apresenta-se no centro

da borda inferior da Figura 8.28. No canto inferior direito adiciona-se uma fotografia do CP em uma orientação semelhante às Imagens 1 a 10, incluindo-se o sistema de coordenadas utilizado nelas. A fotografia mostra o CP na condição final após o ensaio, em cujas faces dispuseram-se rótulos para a identificação dos sensores durante o monitoramento com EA.

A Imagem 1 da Figura 8.28 mostra somente duas fontes de EA localizadas na região próxima do apoio interior entre o CP e o berço. A localização dessas fontes sugere que elas são devidas ao processo de ajuste inicial entre o CP e o berço. Este efeito não foi visto na Figura 8.23, pois se considera que o ajuste inicial na região pode não ser observado, dependendo do nível de irregularidades na superfície de contato do CP com o berço. Em coerência com o observado na Imagem 2 da Figura 8.23, na Imagem 2 da Figura 8.28 observa-se o aparecimento de fontes de EA na região central do CP.

Na Imagem 3 da Figura 8.28 observa-se o aumento das fontes de EA na região próxima do apoio entre o CP e o berço. Lembrando-se que o nível de carregamento na Imagem 3 é de 90% do carregamento de pico, as fontes de EA localizadas na região do apoio devem estar relacionadas tanto ao efeito combinado do ajuste na transferência de carga e do confinamento induzido no CP pelo berço. Este efeito também foi observado na Imagem 3 da Figura 8.23, porém com menor intensidade. Devido ao LR considerado no ensaio da Figura 8.26, a quantidade de fontes de EA na região central do CP nas Imagens 2 e 3 da Figura 8.28 é menor do que na Figura 8.22a, pois o acúmulo de fontes não é suficiente para a criação de uma caixa de cluster. A visualização conjunta das Imagens 2 e 3 e da Figura 8.28 mostram que apesar de haver menos fontes de EA na região do centro do CP, o padrão de início do microfissuramento ainda é visível e consistente com o observado na Figura 8.23 (início do microfissuramento entre 75 e 85% do carregamento de pico).

A imagem 4 da Figura 8.28 mostra o maior acúmulo de energia absoluta no centro do CP (caixa de cluster na cor azul), o que confirma que as poucas fontes localizadas nessa região definem o início do microfissuramento. Observa-se também na Imagem 4 um pequeno incremento nas fontes de EA na região dos apoios. A Imagem 5 da Figura 8.28 mostra como as fontes de EA se acumulam no centro do CP, em uma das faces do CP e na região dos apoios. O acúmulo localizado em uma das faces (face 456) é coerente com a observação do aparecimento de uma fissura macroscópica vertical centralizada nessa face.

Figura 8.28 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe)

Conforme esperado, o padrão observado na Imagem 5 da Figura 8.28 é semelhante ao observado na Imagem 5 da Figura 8.23, porém apresenta maior definição. A razão desta diferença na definição do padrão é que na Figura 8.28 não há perda de sinais por saturação após o pico de carregamento, o que permite visualizar o padrão de microfissuramento mais próximo da realidade. O padrão da Imagem 5 acentua-se na Imagem 6. Desde o ponto de controle 6 em diante, observa-se como as fontes de EA continuam a aumentar, concentrando-se não apenas em uma das faces e no centro do CP, mas também atravessando a espessura do CP até a outra face. Entre as Imagens 7 e 8 observou-se o aparecimento de uma fissura macroscópica vertical centralizada na outra face do CP, em coerência com o acúmulo de caixas de clusters de alta energia absoluta nessa face. As Imagens 9 e 10 mostram a extensão do padrão observado na Imagem 8, tendo-se um acréscimo nas fontes de EA, nas caixas de clusters e na energia absoluta acumulada no centro e ambas as faces do CP ao longo do eixo de carregamento.

No monzogranito observa-se como a localização de fontes de EA progride através da espessura do CP ao longo de eixo de carregamento, tendo-se em cada ponto de controle uma região adicional danificada que pode liberar ainda muita energia absoluta. Este processo é observado até o fim do ensaio, confirmando a hipótese de microfissuramento progressivo nessa rocha.

A Figura 8.29 mostra a localização acumulativa típica das fontes de EA obtida com o software AEwin, para o ensaio definido na Figura 8.26. O formato e as informações apresentadas na Figura 8.29 é análogo ao da Figura 8.28, o que permite a comparação direta da localização obtida utilizando ambos os programas.

As Imagens 1 a 3 da Figura 8.29 mostram a localização de fontes de EA na região próxima dos apoios entre o CP e o berço, porém não há fontes localizadas na região central do CP. A ausência dessas fontes de EA representa uma diferença importante entre o padrão de localização obtido com o programa desenvolvido CLAPWaVe (Figura 8.28) e com o software AEwin (Figura 8.29). Como consequência, a localização com o software AEwin não mostra o início do microfissuramento até o ponto de controle 3. A Imagem 4 da Figura 8.29 mostra um padrão mais próximo à Imagem 4 da Figura 8.28. No entanto, mesmo havendo algumas fontes de EA localizadas na região central do CP, não se observa a criação de uma caixa de cluster. A Imagem 5 da Figura 8.29 mostra o acúmulo de fontes de EA em uma das faces do CP, porém o acúmulo de fontes de EA no centro do CP não mostra tanta energia absoluta quanto na Figura 8.28. Desde o ponto de controle 5 em diante o padrão de microfissuramento avança através da espessura do CP até a outra face. O padrão acima referido também foi observado na Figura 8.29, porém o acúmulo de fontes de EA no centro do CP é sempre menos marcante do que na Figura 8.28.

Figura 8.29 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização do software AEwin

A Figura 8.30 mostra a distribuição típica da energia absoluta ao longo do eixo Y do CP para os 5 primeiros pontos de controle do ensaio 8.26. O formato da Figura 8.30 é análogo ao apresentado na Figura 8.25. Apresentam-se os resultados obtidos com o software AEwin e com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Semelhante ao observado na Figura 8.25, na Figura 8.30 mostra-se como no início do ensaio o maior acúmulo de energia absoluta ocorre na região dos apoios, e logo avança gradativamente para a região central do CP. Além disso, ambas as Figuras mostram como o aumento de energia absoluta na região central do CP ocorre antes nas localizações feitas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Assim sendo, a Figura 8.30b mostra como o programa desenvolvido (CLAPWaVe) apresenta maior acúmulo de fontes de EA na região central do CP desde o ponto de controle 2, o que confere com a faixa de carregamento associada ao início do microfissuramento no monzogranito. O acúmulo de fontes de EA nessa região é observado apenas desde o ponto de controle 4 na Figura 8.30a. Desde o ponto de controle 4, observa-se o acúmulo de fontes de EA no centro do CP na Figura 8.30b (aproximadamente 13,5% e 38% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,1$, para os pontos de controle 4 e 5, respectivamente). Já na Figura 8.30a o acúmulo no centro do CP é muito menor ou inexistente (0% e aproximadamente 11% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,1$, para os pontos de controle 4 e 5, respectivamente).

Conforme esperado, até o ponto de controle 4 a tendência das Figuras 8.25b e 8.30b é análoga. Observam-se algumas variações menores próprias do comportamento de dois CPs semelhantes, porém não idênticos (devido a pequenas heterogeneidades próprias da rocha), submetidos a um mesmo tipo de ensaio. No ponto de controle 5 há uma pequena diferença entre ambos os ensaios. O patamar observado no trecho $0,05 < |Y|/r < 0,44$ da Figura 8.25b é menos visível na Figura 8.30b e encontra-se deslocado no trecho $0,3 < |Y|/r < 0,62$. Tais diferenças não estão associadas a comportamentos inconsistentes de ambos os CPs, mas podem ser devidas a duas razões: 1) à quantidade de informação perdida por saturação do sistema no ensaio da Figura 8.22b e 2) à perda de resistência mais marcante e instantânea exibida entre os pontos de controle 4 e 5 do ensaio da Figura 8.26 (curva de força versus tempo). A respeito da razão número 2, o ensaio da Figura 8.22a mostrou uma diminuição de 34,7% da resistência em 150 segundos, enquanto que no ensaio da Figura 8.26 a diminuição foi de 39% em apenas 96 segundos. Embora as diferenças na perda de resistência sejam pequenas, o tempo foi muito menor no ensaio da Figura 8.26, o qual sugere que o processo de propagação de microfissuras ocorreu com intensidade e velocidade um pouco maior do que na Figura 8.22a. Isso pode explicar o acúmulo um pouco maior de energia absoluta no trecho $0,05 < |Y|/r < 0,44$ da Figura 8.30b. Contudo, a tendência apresentada na Figura 8.30b e os padrões de microfissuramento da Figura 8.28 ainda refletem o processo de ruptura progressiva no monzogranito.

Figura 8.30- Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controle 1 a 5 do estágio A em ensaios monotônicos em monzogranito. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)

A Figura 8.31 mostra a configuração final do ensaio realizado no CP de monzogranito da Figura 8.26. De forma semelhante ao apresentado na Figura 8.4, na Figura 8.31 apresenta-se a condição danificada do CP junto da localização das fontes de EA no final do ensaio. Inclui-se a localização feita tanto com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) quanto com o software AEwin. A região danificada do CP é análoga ao observado na Figura 8.4 e consistente com a fotomicrografia da Figura 6.6. As Figuras 8.31a e c mostram as duas faces do CP na condição final danificada. Foram adicionadas às Figuras 8.31b e d fotografias de detalhe e em escala ampliada da região central fissurada no final do ensaio. O tratamento da superfície do CP com pó de giz branco após o ensaio é aplicado da mesma forma que na Figura 8.4, permitindo maior contraste entre áreas fissuradas e intactas e melhor visualização da região danificada. As Figuras 8.31e e f mostram o padrão de localização obtido pelo programa desenvolvido (CLAPWaVe) e as Figuras 8.31g e h mostram a localização final obtida com o software AEwin. Conforme o observado nas Figuras 8.28 e 8.29, ambos os programas mostram suas maiores diferenças no padrão de microfissuramento definido pelas fontes de EA durante o estágio A de carregamento. As diferenças diminuem na medida em que o ensaio avança, obtendo-se um padrão geral semelhante às caixas de clusters no final do mesmo, embora algumas diferenças se mantenham.

Os padrões das fontes de EA das Figuras 8.31e e g e das Figuras 8.31f e h apresentam uma distribuição geral de dano semelhante. No entanto, a maior parte de caixas de clusters na cor preta nas Figuras 8.31e e f do que nas Figuras 8.31g e h indica que há maior concentração de energia absoluta nas localizações feitas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Isso ocorre porque o programa

desenvolvido (CLAPWaVe) consegue localizar um maior número de fontes de EA e a distribuição das mesmas é mais localizada. Desta forma, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra uma maior concentração de fontes de EA na região dos apoios e no centro do CP. Contudo, há boa concordância entre a condição final danificada do CP e o padrão definido pelas fontes de EA obtido com ambos os programas.

Figura 8.31 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaio monotônico em monzogranito. a) CP Condição final do CP na face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP na face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. h) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456

O padrão de microfissuramento obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou-se mais coerente em relação às expressões teóricas existentes na literatura (CHAU; WEI, 2001; HONDROS, 1959; WEI; CHAU, 2013). Além disso, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) tem-se mostrado mais completo do que o software AEwin, fornecendo informação adicional a respeito do início do microfissuramento e da distribuição do dano. Com o objetivo de complementar a comparação entre ambos os programas, apresenta-se na Figura 8.32 a distribuição típica do erro ε_i médio de minimização obtido para cada um das fontes de EA localizadas, de forma semelhante ao item 8.4.3. O erro ε_i médio é o único fator que permite avaliar quantitativamente a qualidade de ajuste de cada fonte, tendo-se que quanto menor o erro ε_i médio, melhor deve ser o ajuste.

No item 8.3.3 descreveu-se o processo de filtragem das fontes de EA, definindo-se uma filtragem básica aplicada durante o processo de localização e uma filtragem rigorosa adicional aplicada após os dados das fontes de EA serem obtidos. Na filtragem básica são desconsideradas apenas as fontes sem sentido físico ou com muito erro ε_i de minimização. Já a filtragem rigorosa, aplicada depois que o programa de localização fez a minimização, é mais restritiva. Na filtragem rigorosa são desconsideradas as fontes de EA com erro ε_i médio maior do que $1 \cdot 10^{-6}$ segundos (ver item 8.3.3.3) e que se encontrem fora do volume do CP admissível (ver item 8.3.3.2). A filtragem básica somente pode ser aplicada aos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), sendo desconhecida a quantidade de fontes de EA que o software AEwin desconsidera antes de apresentar seus resultados. De qualquer forma, como os dados disponíveis são apenas aqueles que o software AEwin entrega no saída final (*output*), considera-se que há um processo de filtragem inicial e que pode ser até mais restritivo do que o aplicado na filtragem básica. Assim, se houver diferença, somente deve ser favorável ao AEwin.

As Figuras 8.32a e b apresentam os histogramas do erro ε_i médio filtrados somente antes da localização (filtragem básica). As Figuras 8.32c e d apresentam os histogramas do erro ε_i médio filtrados antes e depois da localização (filtragem rigorosa). Embora, os dados utilizados para a análise e caracterização do microfissuramento sejam aqueles obtidos após a filtragem rigorosa, considera-se interessante mostrar a tendência das fontes de EA sem a citada filtragem. Isto permite aferir a capacidade de minimização do algoritmo de localização de ambos os programas.

Figura 8.32 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios monotônicos em monzogranito. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa

A comparação das Figuras 8.32a e 8.32b mostra claramente que no programa desenvolvido (CLAPWaVe) a maior concentração de fontes de EA ocorre para um valor do erro ϵ_i médio muito menor do que no software AEwin. As Figuras 8.32c e 8.32d mostram que quando são comparados os dados após a filtragem rigorosa, a diferença é ainda mais favorável ao programa desenvolvido (CLAPWaVe). Os dados do erro ϵ_i médio obtidos com software AEwin apresentam-se acumulados perto de 4.5×10^{-7} segundos e sua distribuição pode ser ajustada a algumas distribuições de probabilidade. As distribuições de probabilidade Beta, Weibull e Lognormal mostraram bom ajuste dos dados obtidos com AEwin, tanto dos dados filtrados com a filtragem básica quanto dos obtidos com a filtragem rigorosa.

Em relação aos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), a sua distribuição se caracteriza por apresentar a maior parte deles concentrada perto de $8,47 \cdot 10^{-22}$ segundos e a menor parte distribui-se entre esse valor e aproximadamente $3 \cdot 10^{-6}$ segundos. Desta forma, a maior parte dos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra maior qualidade de ajuste do que o software AEwin (menor erro de minimização). No entanto, as características anteriormente citadas fazem com que seja difícil ajustar uma função de distribuição aos dados. Contudo, as distribuições de probabilidade Beta e Exponencial mostraram o melhor ajuste aos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe).

8.5.1.2 *Velocidade média associada ao processo de localização tridimensional*

No item 8.5.1.1 foram apresentados os padrões de microfissuramento obtidos com o programa de localização desenvolvido e as comparações com o software AEwin. Tais comparações não envolvem diretamente a quarta variável (velocidade de propagação de ondas v_p) introduzida na minimização feita com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). De acordo com o item 8.1.1, o software AEwin considera na localização das fontes de EA uma velocidade de propagação v_p constante, pois não é possível comparar os resultados de ambos os programas. No entanto, avalia-se aqui se a hipótese de velocidade constante e igual à obtida com o CP intacto é apropriada.

O procedimento de análise para o monzogranito neste item é análogo ao 8.5.1.1. Foram utilizados os resultados de dois ensaios feitos com LR diferentes a fim de se obter o padrão geral de comportamento da variável em estudo. No item 8.5.1.1 as variáveis em estudo foram as coordenadas das fontes de EA (x_0, y_0, z_0), e neste item a variável em estudo é a velocidade de propagação de ondas v_p . Para cada fonte de EA, v_p representa o valor médio de velocidade de propagação de ondas do CP que minimiza o erro E definido na equação 8.3 (soma do quadrado dos erros ε_i). A informação utilizada na localização são as coordenadas dos sensores que registraram o sinal emitido pela fonte e os tempos de chegada da onda P a cada um deles, v_p . Considerando-se essas informações tem-se que v_p caracteriza as propriedades médias do volume do CP envolvido pelas trajetórias entre a fonte localizada e cada um dos sensores que a registraram. Desta forma, as fontes localizadas no centro do CP vão apresentar valores de v_p que caracterizam o seu núcleo central. As fontes localizadas na região dos apoios fornecem valores de v_p que caracterizam principalmente a região dos apoios e uma parte do centro do CP e as fontes localizadas na região das faces do CP fornecem valores de v_p que

caracterizam principalmente essa região. Assim sendo, cada valor de v_p obtido caracteriza uma região do CP não o CP inteiro, o que permite visualizar as variações deste parâmetro no tempo e no espaço.

Apresentam-se nas Figuras 8.33 e 8.34 as variações acumulativas típicas no tempo e no espaço da velocidade de propagação de ondas v_p . Na Figura 8.33 apresentam-se as informações para o estágio A de carregamento e na Figura 8.34 apresentam-se os resultados até o fim do ensaio. Com o objetivo de visualizar as variações na velocidade de propagação de ondas v_p dentro do CP, define-se uma escala de cores em que cada cor representa uma faixa de valores de velocidade. As faixas de velocidade utilizadas são apresentadas na escala de cores mostrada no canto inferior direito da Figura 8.33 e no canto inferior central na Figura 8.34. A visualização das variações da velocidade de propagação de ondas v_p no tempo é feita considerando-se diferentes instantes ao longo do ensaio, de maneira semelhante às Figuras 8.23, 8.24, 8.28 e 8.29 para as coordenadas da fonte de EA (x_0 , y_0 , z_0). Desta forma, nas Figuras 8.33 e 8.34 apresenta-se a informação da velocidade v_p para os pontos de controle definidos nas Figuras 8.22a e 8.26, respectivamente. A distribuição das velocidades por faixas é apresentada nas Figuras 8.33 e 8.34 considerando-se a visualização no plano XY (perspectiva frontal das faces do CP), já que se trata da visualização geral mais esclarecedora. No entanto, no final dos ensaios a quantidade de informação é muito grande, pois a superposição de fontes de EA no plano XY pode impedir a visualização das variações de v_p na região interna do CP. Para resolver esta dificuldade, adiciona-se no canto inferior direito da Figura 8.34 uma vista no plano YZ (perspectiva lateral ao longo da espessura do CP) da distribuição de v_p no final do ensaio. Não se considera necessário adicionar a vista YZ na Figura 8.33.

A Imagem 1 da Figura 8.33 mostra duas fontes de EA no CP, dos quais apenas um apresenta velocidade inferior ao valor obtido para o CP intacto (4659 m/s). De acordo com as informações do item 8.5.1.1, tais fontes de EA não são consideradas como o início do microfissuramento. A razão disso é que a liberação de energia absoluta no ponto de controle 1 é quase nula e manteve-se dessa forma até o ponto de controle 2, em que se observa o primeiro acréscimo de energia e acúmulo de fontes que indicam o início do processo de microfissuramento. O uso da energia absoluta para auxiliar na definição do início do microfissuramento baseia-se na estrutura interna do monzogranito. Os minerais que compõem o monzogranito e a estrutura imbricada em que ele se apresenta opõe muita resistência à propagação de microfissuras. Tais características fazem com que a propagação de microfissuras seja um processo violento e acompanhado de muita liberação de energia. Portanto, fontes de EA com energia tão baixa devem estar relacionadas a processos de ajuste no interior do CP, anteriormente ao início da propagação de microfissuras. A imagem 1 da Figura 8.34 não mostra fontes de EA no centro do CP antes do ponto de controle 2. As Figuras 8.33 e 8.34 mostram que desde o ponto de controle 2 em diante acumulam-se na região central do CP fontes de EA com v_p menor ao valor obtido na

condição intacta, o que se associa ao efeito do dano induzido nessa região. Quando há descontinuidades no percurso da onda emitida pela fonte até os sensores, a trajetória é alterada e a onda demora mais em chegar aos sensores. Como consequência disso, os tempos de chegada das emissões são maiores e a velocidade v_p diminui. No caso dos CPs, as pequenas microfissuras geram descontinuidades que podem explicar os valores baixos de velocidade, principalmente nas regiões de maior acúmulo de dano. A Figura 8.34 mostra como ao longo do ensaio cria-se um núcleo central danificado, cujas velocidades são sempre muito menores do que a registrada na condição intacta. No canto inferior direito da Figura 8.34 apresenta-se a Imagem 10 no plano YZ (vista lateral), que mostra a distribuição das velocidades no final do ensaio. A visualização dessa Imagem permite ver claramente um núcleo central danificado e com velocidades mais baixas, enquanto que na região dos apoios o confinamento induz velocidades maiores.

Figura 8.33 – Distribuição típica da velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA durante o estágio A de um ensaio em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe)

Figura 8.34 – Distribuição típica da Velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito

Na Imagem 3 da Figura 8.33 (90% do carregamento de pico), especificamente na região dos apoios do CP, observam-se algumas fontes na cor amarela e azul claro, e logo nas Imagens 4 e 5 (100% do carregamento de pico e fim do estágio A, respectivamente) adicionam-se algumas fontes nas cores azul, roxo e vermelho. Até o ponto de controle 4 na Figura 8.34, a região dos apoios mostra fontes nas cores amarela, azul claro, verde e azul, todas associadas a velocidades v_p inferiores ou iguais à obtida para a condição intacta. As Imagens 2 a 4 das Figuras 8.33 e 8.34 mostram tendências semelhantes, já a Imagem 5 da Figura 8.34 mostra predominância de fontes nas cores roxo, vermelho e preto. A diferença entre as Imagens 5 de ambas as Figuras é devida à perda de sinais no ensaio da Figura 8.33, que ocorreu pela saturação do equipamento na coleta. Embora isso impeça a visualização do padrão inteiro, é possível a visualização do início do microfissuramento, tornando as Figuras 8.33 e 8.34 complementares.

Em ambas as Figuras (Figuras 8.33 e 8.34), a existência de fontes de EA com velocidade inferior, semelhante e superior àquela na condição intacta do CP (4659m/s) sugere que há mais de um efeito agindo na região: 1) O processo de transferência de carregamento entre o CP e o berço pode gerar algumas fontes de EA devido ao ruído produzido por pequenas irregularidades na superfície de contato ou até mesmo devido a microfissuramento local na região de contato; 2) O processo de confinamento produzido pelo berço na região próxima do apoio pode produzir fontes de EA que vão viajar por uma região mais confinada, exibindo maior velocidade v_p do que a obtida em condição intacta; 3) Ruptura local da região menos confinada dos apoios em estágios avançados de dano no CP. A respeito do efeito número 2 a literatura fornece a seguinte informação: as expressões teóricas obtidas por Chau e Wei (2001) e por Hondros (1959) para um material homogêneo, assim como as modelagens computacionais desenvolvidas por Li e Wong (2013) no mesmo tipo de material, mostram que as tensões no eixo X são de compressão na região próxima dos apoios. Além disso, desde a perspectiva da mecânica dos sólidos tem-se o seguinte: quando é aplicado o carregamento de compressão no eixo Y (eixo de carregamento do ensaio), a maior rigidez e coeficiente de Poisson do aço do berço ($E=210\text{GPa}$ e $\nu=0.3$) em relação ao CP de monzogranito ($E_{\text{médio}}=48,58\text{GPa}$ e $\nu_{\text{médio}}=0.33$) induz tensões de compressão no eixo Z (ao longo da espessura) na região dos apoios do CP. Em conclusão, o efeito 2 define uma região de confinamento tridimensional perto dos apoios que aumenta na medida em que o carregamento cresce. Assim sendo, o aumento no confinamento diminui o tempo de percurso das ondas nessa região e aumentando, por sua vez, a velocidade v_p . O efeito número 3 deve ocorrer quando o ensaio encontra-se nos seus estágios finais. Quando o núcleo central que concentrava as maiores trações se encontra danificado, ocorre uma redistribuição das tensões no interior do CP. Desta forma, as regiões menos danificadas ao longo do eixo de carregamento (com maior resistência) vão receber uma proporção maior da carga aplicada. Como no eixo de carregamento

o núcleo encontra-se danificado, a região dos apoios, menos danificada, receberá maiores níveis de tensão. Isso pode levar à ruptura do CP na região mais externa dos apoios, em que o efeito do confinamento é menor. Além disso, as arestas do CP são regiões concentradoras de tensão, o que faz com que as arestas localizadas no contato entre o berço e o CP sejam susceptíveis de se romper. No efeito 3, as fontes de EA são emitidas em uma região com menor confinamento e uma porção delas é propagada através de um volume de rocha com níveis de dano variáveis e confinamento menor. Como consequência, os tempos de chegada da onda P aumentam e as velocidades de propagação v_p obtidas diminuem.

Na região dos apoios da Imagem 3 nas Figuras 8.33 e 8.34 o aparecimento de fontes de EA de velocidade v_p menor ou igual àquela obtida na condição intacta, sugere que o efeito predominante é o efeito número 1 citado no parágrafo anterior. Nas Imagens 4 e 5 de ambas as Figuras observa-se o começo do efeito número 2 citado no parágrafo anterior, embora seja mais marcante na Imagem 5 da Figura 8.34. Desde a Imagem 5 em diante, observa-se o efeito número 2 acima referido, principalmente no apoio superior do CP. No entanto, desde a Imagem 7 em diante observa-se em uma das arestas do apoio inferior do CP o acúmulo de fontes de EA nas cores amarelo, verde e azul claro. A localização dessas fontes (em uma das bordas do apoio inferior do CP), assim como a magnitude das velocidades associadas a elas, sugerem que elas são devidas ao efeito número 3 citado no parágrafo anterior.

8.5.1.3 *Análise espacial das fontes de EA associadas ao processo de localização tridimensional*

As análises apresentadas no item 8.5.1.2 mostraram que as fontes de EA distribuem-se em diferentes regiões de acordo com a sua velocidade e localização no interior do CP. Observou-se que as fontes com velocidades v_p menores estão concentradas no núcleo central e as fontes com velocidades maiores estão concentradas na região dos apoios. Observa-se, também, que após o pico são geradas algumas fontes de EA com velocidades variáveis e dispersas na região das bordas do CP ao longo do eixo diametral horizontal X. Em adição, a perspectiva lateral da Imagem 10 da Figura 8.34 (canto inferior direito) mostra o acúmulo de fontes com velocidade maior do que o núcleo central nas faces dos CP. Assim, identificam-se quatro zonas a serem analisadas separadamente. 1) fontes localizadas na região dos apoios entre o CP e o berço, chamada de agora em diante de região dos apoios (Figura 8.35a); 2) fontes localizadas na região central do CP, chamada de agora em diante de núcleo central (Figura 8.35b); 3) fontes localizadas na região central do CP, próximo das faces, chamada de agora em

diante de núcleo externo (Figura 8.35c); 4) fontes localizadas nas bordas do CP, fora da região dos apoios, chamada de agora em diante de região das bordas (Figura 8.35d).

A informação obtida no item 8.5.1.1 mostrou que o microfissuramento avança através da espessura do CP, desde uma das faces até a outra. Além disso, observou-se que o acúmulo de fontes de EA pode ser maior em um dos apoios do que no outro. A fim de se analisar esses padrões, as fontes da região dos apoios (definidas na cor azul na Figura 8.35a), das bordas (definidas na cor rosa na Figura 8.35d) e do núcleo externo (definidas na cor verde na Figura 8.35c), são separadas de acordo aos eixos de simetria do CP. Utilizam-se as cores azul claro e escuro, verde claro e escuro e rosa claro e escuro para diferenciar a separação das fontes de cada região, como mostrado nas Figuras 8.35a a 8.35d. As Figuras 8.35e a 8.35h apresentam a energia absoluta acumulada nas fontes de EA para as regiões definidas nas Figuras 8.35a a 8.35d, respectivamente. A fim de se facilitar a visualização da informação, utilizam-se as mesmas cores das fontes de EA nos gráficos das energias absolutas. Adiciona-se a cada gráfico de energia absoluta acumulada, a relação da força versus o tempo do ensaio (o mesmo da Figura 8.26).

A observação conjunta das Figuras 8.35e a 8.35h mostra que as energias acumuladas até o fim do ensaio nas quatro regiões apresentam diferentes ordens de grandeza. Isto pode ser devido a diferentes níveis de energia liberados nas fontes de EA de cada região, ao maior acúmulo de fontes com níveis semelhantes de energia ou ao efeito combinado de ambos. O primeiro caso sugere que as fontes localizadas em algumas regiões não são devidas ao microfissuramento. Com o objetivo de se analisar esta possibilidade, utilizam-se as informações a respeito das quais se tem certeza. O conhecimento da superfície de ruptura do ensaio realizado assim como as análises petrográficas realizadas nesta rocha indicam que as fontes localizadas na região do núcleo central do CP são devidas a processos de microfissuramento. Portanto, as energias liberadas nessa região podem ser associadas a tais processos de propagação de microfissuras e podem ser utilizadas para conferir as energias liberadas em outras regiões. Sabendo-se que o monzogranito tem uma distribuição interna de minerais macroscopicamente homogênea, a propagação de microfissuramento em qualquer região deve ser acompanhada por níveis de energia absoluta semelhantes aos registrados no núcleo central. Desta forma, fontes de EA com energias absolutas muito menores do que as obtidas no núcleo central tem uma probabilidade muito menor de serem associadas a processos de microfissuramento. Considerando-se a quantidade total de fontes de EA a energia acumulada total para cada uma das quatro regiões definidas na Figura 8.35, calculam-se as energias absolutas médias associadas às fontes de EA apresentadas na Tabela 8.1. Adicionam-se as porcentagens associadas à quantidade de fontes de EA localizadas nas mesmas quatro regiões.

Figura 8.35 – Variação típica da energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo externo do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP. e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d

Conforme esperado, a Tabela 8.1 mostra que o maior acúmulo de fontes de EA ocorre no núcleo central do CP. A região dos apoios acumula a segunda maior porção das fontes, seguida do núcleo externo e, finalmente, a região das bordas. Essa tendência se manteve em todos os ensaios feitos em monzogranito assim como em aqueles feitos em mármore (ver itens 8.5.3 e 8.5.4). A Tabela 8.1 mostra níveis semelhantes de energia absoluta média nas quatro regiões antes citadas, o que sugere a existência de processos de propagação de microfissuras nas quatro regiões. Portanto, mesmo as fontes de EA registradas na região das bordas representam microfissuramento.

Tabela 8.1 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio monotônico em monzogranito. Definição das zonas de acordo à Figura 8.35

Zona	Proporção do total de fontes de EA (%)	Energia absoluta média (aJ)
Apoios	28,44	4,700E+05
Núcleo central	54,60	3,412E+05
Núcleo externo	15,34	6,812E+05
Bordas	1,62	5,853E+05

Em relação à distribuição da energia absoluta ao longo do tempo nos apoios, a Figura 8.35e mostra que antes do pico de carregamento a energia acumulada no apoio inferior do CP é muito baixa (quase desprezível quando comparada com as energias da Tabela 8.1). Isso sugere que essas fontes não representam microfissuramento, mas que são devidas ao efeito das irregularidades na transferência de carregamento, em coerência com o observado no item 8.5.1.2. Após o pico, observa-se um pequeno acréscimo na energia absoluta acumulada no apoio inferior, enquanto que no apoio superior a energia acumulada apresenta uma taxa de acréscimo muito maior. Logo após a estabilização da energia absoluta acumulada no apoio inferior (na vizinhança dos 3000 segundos, aproximadamente o ponto de controle 7 definido na Figura 8.26 e Imagem 7 nas Figuras 8.28 e 8.34), começa o aumento na taxa de energia acumulada no apoio inferior. De acordo com a curva de força versus tempo apresentada junto às curvas de energia, o aumento de energia no apoio inferior começa junto com o aparecimento da fissura vertical centralizada na segunda face do CP (grande perda de resistência entre 3000 e 4000 segundos). A tendência observada na Figura 8.35e sugere que o processo de microfissuramento começa com maior intensidade no apoio superior e quando o dano encontra-se muito avançado nesse apoio começa o dano no apoio inferior, em consistência com o observado na Figura 8.28.

Coerentemente com o observado na Figura 8.28, a Figura 8.35f mostra que o aumento na taxa de energia acumulada começa um pouco antes de ser observada a resistência de pico do CP. A tendência crescente se mantém deste ponto em diante até o fim do ensaio. Isso mostra que o início do microfissuramento ocorre nesta região, mas também que o núcleo central do CP continua a se romper progressivamente até o fim do ensaio, em coerência com todo o antes observado nos itens 8.1, 8.5.1.1. e 8.5.1.2.

Conforme observado nas Figuras 8.28 (localização feita com o programa desenvolvido CLAPWaVe), 8.2 e 8.29 (localização feita com o software AEwin), a Figura 8.35g mostra claramente o avanço do processo de microfissuramento desde uma face até a outra. A energia absoluta acumulada no plano XY para $Z=-25\text{mm}$ (fontes na cor verde claro) começa a aumentar no pico de carregamento e se estabiliza um pouco antes do aparecimento da fissura vertical centralizada na segunda face do CP. Observa-se, então, o início do acúmulo de energia no plano XY para $Z=25\text{mm}$ (fontes na cor verde escuro). Conforme esperado, alguns instantes após o início do microfissuramento na segunda face observa-se o aparecimento da fissura antes citada. Dai em diante, observa-se o acúmulo de energia no plano XY para $Z=25\text{mm}$, enquanto no plano XY para $Z=-25\text{mm}$ as energias se mantêm aproximadamente estáveis. O comportamento observado na região do núcleo externo apresenta o mesmo padrão observado na região dos apoios, em consistência com a ruptura progressiva do CP. Em adição, tais padrões refletem o processo de redistribuição das tensões nas regiões mais danificadas às menos danificadas, permitindo a propagação do dano através de toda a superfície de ruptura do CP.

De acordo com as análises feitas utilizando-se a informação da Tabela 8.1, as fontes de EA registradas na região das bordas também representam processos de microfissuramento. As Figuras 8.35 e 8.36h mostram o aparecimento de tais fontes desde o ponto de controle 5 em diante. O ponto de controle 5 ocorre após o pico de carregamento e representa o instante de estabilização na carga logo após o aparecimento da primeira fissura vertical centralizada em uma das faces do CP. Portanto, as poucas fontes de microfissuramento observadas (menos de 2% do total de fontes de EA no CP) podem ser associadas a processos de microfissuramento secundários, produzidos como consequência do processo de dano primário no plano central vertical do CP. No ponto de controle 5 uma parte do plano de ruptura tem sido definida, pois as duas metades do CP não se encontram completamente unidas. O aumento na deformação e no carregamento nesta condição pode gerar flexão na região da borda exterior do CP ao longo do eixo horizontal X. A flexão das metades do CP induz microfissuramento por tração na região das bordas, conforme mostrado na Figura 8.35d.

O aparecimento de um número maior de microfissuras em uma das bordas do CP, em um dos apoios ou em uma das faces do CP ocorreu nos diferentes ensaios feitos, sendo que em alguns deles o acúmulo ocorre no apoio inferior, ou na outra face. Portanto, este efeito não pode ser associado a

assimetrias induzidas na execução dos ensaios. As pequenas heterogeneidades microscópicas no interior de CPs macroscopicamente homogêneos podem explicar as assimetrias no início do microfissuramento.

A Figura 8.34 apresentou a distribuição das velocidades de propagação v_p associadas a cada fonte de EA localizada no CP. Lembrando-se que os cálculos de velocidade são obtidos de forma indireta com o programa de localização e que são aplicados em um CP que se encontra em constante processo de dano, espera-se que haja dispersão na distribuição das velocidades (ver Figura 8.34). Embora exista a variabilidade na distribuição das velocidades no interior do CP, observaram-se alguns padrões que serão analisados em outra perspectiva na Figura 8.36. Com o intuito de se diminuir a visualização da variabilidade na velocidade de propagação de ondas v_p e acentuar as tendências médias deste parâmetro em cada região, utiliza-se a metodologia aplicada por Aggelis (2001) para salientar padrões. Desta forma, apresenta-se na Figura 8.36 a média móvel das velocidades para as regiões definidas na Figura 8.35. A janela de dados utilizados para a obtenção da média móvel foi definida como sendo 1% do total de dados do ensaio (do total de fontes de EA localizadas). Essa informação é válida tanto para a Figuras 8.36 quando para as Figuras 8.46, 8.56 e 8.66 dos seguintes itens. Aplicaram-se janelas formadas por uma porcentagem do total de dados localizados em cada ensaio em lugar de um janelas formadas por um número constante de fontes de EA, pois em cada ensaio o número de fontes localizadas é diferente e um valor constante de fontes poderia não ser representativo. A fim de se facilitar a visualização da informação da velocidade média móvel nas diferentes regiões (Figuras 8.36e a h), inclui-se nas Figuras 8.36a a d a localização das fontes de EA em cada região. A estrutura e a representação das fontes por cores na Figura 8.36 segue as mesmas regras que na Figura 8.35.

A Figura 8.36e mostra a variação da velocidade média móvel ao longo do tempo para os apoios superior e inferior do CP. Os primeiros valores fornecidos pelas fontes de EA geradas no apoio inferior mostram velocidades semelhantes à velocidade calculada para o CP intacto. No mesmo apoio inferior (cor azul claro), observa-se uma tendência crescente da velocidade média móvel até antes do pico de carregamento, o que reflete o começo do efeito do confinamento no aumento da velocidade de propagação de ondas nessa região. Após o ensaio atingir sua resistência de pico, a velocidade média móvel no apoio inferior mostra uma pequena diminuição, provavelmente devida ao aumento do dano em uma das faces do CP (aparecimento da fissura vertical centralizada em uma das faces). Deste ponto em diante a tendência observada é aproximadamente constante, porém seu valor se mantém superior ou igual à velocidade de propagação do CP intacto. Na medida em que o CP é carregado, o dano aumenta, diminuindo a integridade estrutural do mesmo. Desta forma, se o CP fosse descarregado em algum instante para calcular sua velocidade média, era de se esperar uma magnitude

menor que o registrado antes do começo do ensaio. Portanto, mesmo quando o microfissuramento induz dano na região, o registro de valores de velocidade média móvel iguais ou superiores à calculada na condição intacta são claros indicativos do efeito do confinamento agindo na mesma. O apoio superior mostra valores de velocidade média móvel semelhantes aos registrados no apoio inferior. Além disso, observa-se em ambos os apoios uma diminuição na velocidade média móvel no instante em que aparece uma fissura vertical centralizada na segunda face do CP. A visualização dessa fissura reflete o crescimento do plano de ruptura do CP através da sua espessura até a outra face. Este instante representa um marco importante no ensaio, em que a integridade estrutural do CP diminui quase instantaneamente (grande perda de resistência em apenas uns segundos).

Pelo exposto no parágrafo anterior, embora o efeito do confinamento continue agindo na região dos apoios, no restante do percurso das ondas geradas na região até os sensores houve um aumento expressivo no nível de dano, o que aumenta o tempo de chegada das ondas e diminui as velocidades calculadas.

A Figura 8.36f apresenta a variação da média móvel das fontes localizadas no núcleo central do CP. Esta região apresenta duas características importantes que vale a pena salientar. A primeira é que o início do microfissuramento ocorre nesta região, portanto, é a primeira e maior região de acúmulo de dano. A segunda característica possui relação com a localização dos sensores em relação ao núcleo central.

Figura 8.36 – Variação típica da velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo externo do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d

A respeito da segunda característica, o sistema de EA apresenta os melhores resultados quando as emissões se encontram dentro do volume interno definido pelos sensores. Para evitar maiores problemas e reflexão e refração das ondas nas bordas do CP, os sensores foram dispostos a uma distância radial de aproximadamente 67% do raio do CP, já o núcleo central foi definido considerando-se uma distancia radial de 55% do raio do CP. Como consequência, todas as fontes de EA originadas no núcleo central viajaram através da região mais danificada do CP para chegar a qualquer dos sensores. Isso representa uma diferença em relação às fontes geradas em qualquer outra região do CP, em que se mistura uma região mais danificada com uma outra menos danificada e/ou mais confinada. Aliás, Levando-se que qualquer descontinuidade no percurso de uma onda irá afetar significativamente o seu percurso e o tempo de chegada aos sensores, espera-se que o efeito se acentue quando o nível de descontinuidades é maior. Pelo exposto, espera-se que as velocidades médias móveis sejam as menores de todas as regiões em análise. Consistentemente, a Figura 8.36f mostra os maiores valores de velocidade média móvel no período do pico de carregamento. Deste ponto em diante observam-se trechos de acréscimo e decréscimo ate o fim do ensaio, porém as oscilações ocorrem sempre na mesma faixa de velocidades. Baseado na distribuição de fontes de EA e caixas de cluster observada na Figura 8.28, considera-se que, mesmo na região mais danificada do CP, o efeito progressivo do microfissuramento nesta rocha induz a tendência oscilante. Desta forma, na medida em que uma pequena região dentro do núcleo central é danificada, a tendência das velocidades diminui, logo o processo de microfissuramento avança localmente até outra pequena região dentro do núcleo central ainda não danificada, fazendo com que a velocidade média aumente. Assim, na medida em que a seguinte pequena região é danificada a velocidade volta a diminuir. Este processo ocorre uma e outra vez em diferentes regiões do núcleo central até seu rompimento. Na realidade, este efeito poderia explicar a tendência oscilante observada na Figura 8.36g assim como a leve tendência oscilante exposta na Figura 8.36e.

A Figura 8.36g mostra uma tendência oscilante, porém decrescente no tempo, para ambas as faces do CP. Os níveis de velocidade obtidos indicam que mesmo havendo microfissuramento na região, o percurso das ondas inclui áreas fora da superfície de ruptura, as quais permanecem quase intactas ao longo do ensaio (ver fotomicrografia na condição final do CP na Figura 6.6). Como consequência, observam-se velocidades próximas do valor médio na condição intacta. Vale a pena salientar que mesmo tendo-se valores semelhantes na região do núcleo externo e dos apoios, eles se devem a condições diferentes na propagação das ondas. Os apoios apresentam bastante microfissuramento induzido e, diferentemente do núcleo central, as ondas geradas nos apoios percorrem uma trajetória através de regiões danificadas, porém uma parte do percurso é favorecida pelo confinamento das placas do berço, aumentando as velocidades associadas. Por outro lado,

conforme esperado, a perda quase instantânea de integridade do CP pelo aparecimento da fissura vertical na sua segunda face, diminui a velocidade média móvel na região do núcleo central.

A Figura 8.36h apresenta a variação da média móvel obtida das fontes de EA localizadas na região das bordas. As fontes nesta região somente aparecem após a criação de uma parte importante da superfície de ruptura do CP, o que faz com que as metades do mesmo não se encontrem completamente unidas. Neste caso, considera-se que o carregamento do CP induz flexão das metades do CP, produzindo microfissuramento incipiente nas bordas externas do mesmo. Pela forma como o CP rompe e pelo pouco microfissuramento observado fora do eixo de carregamento (ver fotomicrografias na Figura 6.6), espera-se que as ondas geradas viajem principalmente através de um volume de rocha quase intacto. Como consequência, os valores obtidos devem ser semelhantes ao obtido na condição intacta. Por outro lado, se cada metade do CP encontra-se em flexão nas bordas do CP, a região interna de cada metade (região central) deve estar em compressão. Este efeito pode confinar verticalmente (eixo Y) uma parte do percurso da onda, aumentando os valores de velocidade. Os resultados obtidos na Figura 8.36h apresentam maior coerência se for considerado o efeito da compressão na região interna da cada metade do CP.

Em resumo, as Figuras 8.33 a 8.36 permitem observar a distribuição não homogênea do dano no CP ao longo do ensaio, o que induz anisotropia ao mesmo. Além disso, essas Figuras permitem observar regiões dentro do CP nas quais agem efeitos diferentes e que mudam significativamente as características do CP em relação à sua condição inicial intacta. Pelo exposto, o uso da velocidade de propagação de ondas v_p constante e igual à condição intacta não é apropriado no processo de localização.

8.5.2 Ensaios cíclicos em monzogranito

No item 8.5.1 foram utilizados os dados obtidos com o programa de localização desenvolvido para caracterizar o processo de microfissuramento em ensaios monotônicos em monzogranito. A caracterização foi obtida considerando-se os resultados de dois ensaios feitos com diferente LR. O ensaio feito com LR menor permitiu uma caracterização aprimorada da maior parte do estágio A do ensaio (até o pico). Já o ensaio feito com LR maior permitiu a caracterização do microfissuramento até o fim do ensaio, assim como a complementação dos resultados obtidos até o fim do estágio A.

Como indicado no item 8.5.1, os resultados obtidos até o fim do estágio A, especialmente as informações obtidas até o pico de carregamento, não apresentam diferença nenhuma entre ensaios

monotônicos e cíclicos. Portanto, as observações a respeito dos padrões e microfissuramento obtidas até o pico de carregamento no item 8.5.1 ainda são válidas neste item. Assim, apresentam-se a seguir apenas as informações de um ensaio cíclico em monzogranito considerando-se um LR alto o suficiente para permitir a coleta de formas de onda sem saturação do equipamento de EA. Cabe ressaltar que as informações aqui obtidas são complementares às aquelas obtidas do ensaio da Figura 8.22a.

A estrutura de apresentação de resultados neste item é a mesma utilizada no item 8.5.1. Desta forma, primeiro é analisada a localização das fontes de EA (item 8.5.2.1), e logo é avaliada a distribuição espacial e temporal das velocidades de propagação das ondas associadas a cada fonte de EA (item 8.5.2.2). Finalmente, é apresentada a análise espacial da energia absoluta e da velocidade média móvel ao longo dos ciclos de carregamento e descarregamento do ensaio (item 8.5.2.3).

8.5.2.1 Padrão de microfissuramento tridimensional

A Figura 8.37 mostra a relação típica de força versus tempo para um ensaio de compressão diametral cíclico em monzogranito. Foram adicionados dez pontos de controle que representam os estágios em que são apresentados os padrões de microfissuramento definidos por meio das fontes de EA nas Figuras 8.39 e 8.40. Os pontos de controle 1 a 4 são definidos da mesma forma que na Figura 8.26 (50, 75, 90, 100% do carregamento de pico). Os pontos de controle 5 a 10 representam o fim dos estágios de carregamento A a F (ver Figura 3.5b), respectivamente.

Figura 8.37 - Força versus tempo típico em ensaios cíclicos em monzogranito

A Figura 8.38 mostra a energia acumulada típica das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para o ensaio da Figura 8.37, até o fim do estágio A. Esta Figura é análoga às Figuras 8.22b e 8.28 e também tem o objetivo de salientar as variações de energia absoluta durante o primeiro estágio de carregamento. Observa-se que a tendência da energia absoluta acumulada na Figura 8.38 é semelhante à Figura 8.27, porém nesse caso o acúmulo de energia absoluta das primeiras fontes de EA começa depois do ponto de controle 2. Observa-se, também, que a maior parte do acúmulo de energia ocorre entre os pontos de controle 3 e 5, em consistência com o observado nas Figuras 8.22b e 8.28. Por outro lado, pela natureza dos materiais geológicos, espera-se que haja algumas variações menores nos níveis de energia de microfissuramento entre um CP e outro da mesma rocha, porém mantendo-se a mesma ordem de grandeza. Assim, os níveis de energia associados ao microfissuramento em monzogranito fornecidos pela Tabela 8.1 podem ser utilizados como base para definir-se se um conjunto de fontes é ou não resultado de processos de microfissuramento. Considerando-se essas informações, os níveis de energia absoluta registrados até o ponto de controle 3 sugerem que embora pouco visíveis na Figura 8.38, tais fontes são devidas a processos de microfissuramento. No item 8.5.2.3 serão apresentados os níveis de energia absoluta associados ao microfissuramento no CP do ensaio da Figura 8.37, os quais confirmam a conclusão antes referida.

Figura 8.38 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo no estágio A em ensaios cíclicos em monzogranito

De forma análoga ao apresentado na Figura 8.28, a Figura 8.39 mostra a localização acumulativa típica das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para um ensaio cíclico em monzogranito. O padrão de microfissuramento é apresentado para os pontos de controle definidos na Figura 8.37. Igual à Figura 8.28, na Figura 8.39 inclui-se a escala de cores

associada à energia absoluta das caixas de clusters no meio da borda inferior da mesma e uma fotografia do CP com a identificação da disposição dos sensores no canto inferior direito.

Figura 8.39 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de programa desenvolvido (CLAPWaVe)

Como mostrado na Figura 8.38, não há fontes de EA localizadas nas Imagens 1 e 2 da Figura 8.39. Isso indica que neste caso o nível de energia dos sinais emitidos até o ponto de controle 2 foi menor que o LR utilizado, pois não foi possível a detecção do início do microfissuramento entre 75 e 85% do carregamento de pico. No entanto, esse fato não contradiz as observações prévias a esse respeito, apenas é consequência esperada devido ao uso de LR maiores a fim de se obter registros completos após o pico. Embora até o ponto de controle 3 da Figura 8.39 a quantidade de fontes de EA seja pequena, sua localização na região próxima dos apoios e no centro do CP confere com o observado na Figura 8.28. Dessa maneira, a coerência do padrão observado na Imagem 3 de ambas as Figuras confirma o que foi explicado acima em relação à influência do LR nos registros de localização. A Imagem 4 da Figura 8.39 mostra o acúmulo de fontes de EA no centro do CP em uma das faces do CP e na região dos apoios, em coerência com as observações feitas no item 8.5.1. A Imagem 5 da Figura 8.39 mostra um padrão semelhante ao da Imagem 4, porém o acúmulo de fontes de EA e caixas de clusters no centro do CP e em uma das faces do mesmo é muito mais marcante. A comparação do padrão de microfissuramento obtido em ensaios monotônicos (Figura 8.28) e cíclicos (Figura 8.39) até o fim do estágio A mostra que embora ambos os tipos de ensaios exibam o mesmo padrão geral, nos ensaios cíclicos a quantidade de fontes de EA e níveis de energia são menores. A principal razão dessa diferença é o instante em que se define o fim do estágio A em ambos os tipos de ensaios. Nos ensaios monotônicos o fim do estágio A é definido como o instante em que o carregamento se estabiliza após o pico. Já nos ensaios cíclicos, o fim do estágio A é definido quando se aplica o primeiro ciclo de descarregamento e recarregamento ao CP (estágio I), o que ocorre antes de ser observada a estabilização do carregamento no mesmo, a que ocorre acompanhada de maior nível de dano acumulado. Portanto, espera-se que nos ensaios cíclicos o nível de dano induzido entre os pontos de controle 4 e 5 seja menor que nos ensaios monotônicos. As Figuras 8.26 e 8.37 mostram a relação força versus tempo típica para ensaios monotônicos e cíclicos, nas quais se observa claramente a diferença acima referida. Como nos ensaios em monzogranito o trecho pós-pico é uma das fases de maior acúmulo de dano, a aplicação do primeiro ciclo de descarregamento e recarregamento após o pico diminui o acúmulo de dano durante esse período. No entanto, o dano induzido é suficiente para a geração da fissura macroscópica vertical em uma das faces do CP (observada em inspeção visual do CP), em consistência com o padrão da Imagem 5. Além disso, a aplicação de ciclos de descarregamento e recarregamento, especialmente o primeiro ciclo, retarda o processo de propagação de microfissuras através da espessura do CP até quase o fim do ensaio. Como consequência, a fissura vertical centralizada na segunda face do CP é observada apenas no estágio F de carregamento no ensaio da Figura 8.37. Consistentemente, o acúmulo de caixas de clusters na segunda face do CP começa na Imagem 9 da Figura 8.39. Contudo, o padrão de

microfissuramento obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) em ensaios cíclicos em monzogranito apresenta a mesma tendência do que os monotônicos.

A Figura 8.40 mostra a localização acumulativa típica das fontes de EA obtidas com o software AEwin para o ensaio definido na Figura 8.37. O formato e as informações apresentadas na Figura 8.40 são análogos ao da Figura 8.39, o que permite a comparação direta da localização obtida utilizando ambos os programas. Conforme esperado, não há localização de fontes de EA até o ponto de controle 2. Diferentemente do observado com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), a Imagem 3 da Figura 8.40 mostra que as fontes de EA localizadas pelo software AEwin não se encontram no centro nem nos apoios do CP. Na realidade, estas primeiras fontes localizadas não apresentam ainda um padrão definido. A Imagem 4 da Figura 8.40 mostra uma fonte de EA localizada na região próxima dos apoios entre o CP e o berço. Ainda na Imagem 4, observa-se também a localização de algumas fontes de EA distribuídas ao longo do eixo de carregamento e a formação da primeira caixa de clusters na região do núcleo central do CP. Embora a perspectiva apresentada pareça mostrar o acúmulo de energia no centro do CP, este é na realidade localizado na região do núcleo central, deslocado do centro. O aspecto antes descrito é importante porque representa uma diferença nos padrões de localização obtidos com software AEwin e com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), pois nesse último há criação de caixas de clusters no centro do CP. O padrão das fontes de EA obtido com o software AEwin foi mais distribuído (ao longo do eixo de carregamento) do que com programa desenvolvido (CLAPWaVe), diferença que também foi observada nos ensaios monotônicos. Como explicado no item 8.5.1, o padrão obtido com o software AEwin é menos coerente com as expressões teóricas para a distribuição de tensões em um CP em compressão diametral, pois nelas as maiores tensões de tração são definidas ao longo do eixo central Z (ver sistema de coordenadas nas Figuras 8.39 e 8.40), i. e., no centro e ao longo da espessura do CP.

A Imagem 5 da Figura 8.40 mostra o maior acúmulo de energia no centro do CP, porém ainda não se observa o acúmulo em uma das faces do CP. Isto representa uma outra diferença no padrão de localização obtido com o software AEwin e com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Além disso, a falta de acúmulo de fontes de EA em uma das faces do CP mostrada na Figura 8.40 não é consistente com a observação a olho nu do fissuramento macroscópico em uma das faces do CP nesse estágio de carregamento. Desde o ponto de controle 6, os padrões de microfissuramento das Figuras 8.39 e 8.40 mostram maior semelhança, embora o software AEwin tenha mantido um acúmulo menor de fontes de EA e energias absolutas na região central do CP. Essa diferença de comportamento entre ambos os programas foi também observada nas análises dos ensaios monotônicos apresentadas no item 8.5.1.

Figura 8.40 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização do software AEwin

Como descrito no parágrafo anterior, a perspectiva apresentada nas Figuras 8.39 e 8.40 pode dificultar a visualização do padrão de microfissuramento do CP, especialmente no estágio A, em que ainda não há suficientes fontes de EA localizadas para permitir a definição das regiões de acúmulo de dano desde qualquer perspectiva. Com o objetivo de se esclarecer a visualização de tais regiões de dano durante o estágio A, apresenta-se na Figura 8.41 a distribuição da energia absoluta acumulada típica ao longo do eixo Y do CP para os 5 primeiros pontos de controle do ensaio da Figura 8.37. As Figuras 8.41a e 8.41b mostram as informações relativas às fontes de EA obtidas com o software AEwin e o programa desenvolvido (CLAPWaVe), respectivamente. O formato da Figura 8.41 é análogo ao apresentado na Figura 8.30.

Como os sinais coletados permitem a localização de fontes de EA a partir do ponto de controle 3, a Figura 8.41 não consegue mostrar com total clareza o avanço da região de maior acúmulo de energia absoluta desde os apoios para a o centro do CP. No entanto, a tendência antes referida ainda existe e é especialmente visível entre os pontos de controle 4 e 5 para ambos os programas de localização utilizados. Comparando-se ambos os programas, tem-se que desde o ponto de controle 3 o programa desenvolvido (CLAPWaVe) exibe um acúmulo de energia na região central do CP, enquanto o software AEwin o mostra desde o ponto de controle 4. Observa-se, também, que as localizações feitas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostram o acúmulo de energia absoluta mais focalizado no centro do CP do que o software AEwin. Assim, no ponto de controle 4 o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra acúmulo de fontes de EA desde o centro do CP (aproximadamente 15% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,06$), o que não ocorre com os dados fornecidos pelo AEwin. O software AEwin somente mostra acúmulo de energia absoluta no centro do CP no fim do estágio A (ponto de controle 5), embora o acúmulo seja menor do que o observado com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) (aproximadamente 20% e 3,5% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,06$ para o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin, respectivamente). No fim do estágio A observa-se, também, que na faixa aproximada $0,2 < |Y|/r < 0,7$ as fontes obtidas com o software AEwin acumulam níveis maiores de energia absoluta do que aquelas obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Este padrão apresentado pelo software AEwin não mostra consistência com os resultados obtidos com software AEwin nos ensaios monotônicos (ver Figura 8.30a). Como já descrito, o fim do estágio A nos ensaios monotônicos ocorre no instante de estabilização do carregamento, permitindo o acúmulo de níveis maiores de dano no CP em relação aos ensaios cíclicos. Por isso, espera-se que a curva de energia absoluta acumulada para o ponto de controle 5 mostre um acúmulo menor na região central do CP no ensaio cíclico (Figura 8.41) do que no ensaio monotônico (Figura 8.30). Na faixa aproximada $0,2 < |Y|/r < 0,7$, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra-se consistente com o acima descrito, mas os resultados obtidos com o software AEwin mostram uma

tendência oposta ao esperado. Pelo exposto, considera-se que também nos ensaios cíclicos o padrão de microfissuramento obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) é mais coerente em relação à teoria e as observações experimentais do que o software AEwin.

Figura 8.41: Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A em ensaios cíclicos em monzogranito. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)

De forma análoga à Figura 8.31, a Figura 8.42 mostra a configuração final do ensaio cíclico da Figura 8.37. Apresenta-se a condição danificada do CP junto da localização das fontes de EA no final do ensaio. As Figuras 8.42a e c mostram as duas faces do CP na condição final danificada e as Figuras 8.42b e d mostram fotografias de detalhe e em escala ampliada da região central fissurada no final do ensaio. As fotografias da face 456 do CP danificado (Figuras 8.42c e d) mostram uma região azul ao redor da fissura, porém não se trata de uma condição pré-existente da rocha que possa ter afetado os resultados do ensaio. Na tentativa de aumentar o contraste em regiões fissuradas e intactas após o ensaio, utilizou-se azul de metileno na fissura. Os resultados não foram satisfatórios, porém a amostra ficou tingida na face 456. Após tal tentativa, aplicou-se o tratamento da superfície do CP com pó de giz branco, da mesma forma que na Figura 8.31, pois esta técnica permitiu a melhor visualização da região danificada. As Figuras 8.42e e f mostram o padrão de localização obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e as Figuras 8.42g e h mostram a localização final obtida com o software AEwin.

Figura 8.42 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaios cíclicos em monzogranito. a) CP Condição final do CP, face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP, face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. h) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456

Igual ao observado nas Figuras 8.28 e 8.29, nas Figuras 8.39 e 8.40, as maiores diferenças entre os programas de localização utilizados ocorrem durante o estágio A. Apesar disso, nos seguintes estágios o programa desenvolvido (CLAPWaVe) continua a mostrar uma distribuição de fontes de EA mais localizada que o software AEwin. Assim, as Figuras 8.42e e f mostram que o programa

desenvolvido (CLAPWaVe) apresenta uma maior concentração de fontes de EA e energia absoluta no centro do CP e na região dos apoios, embora o acúmulo nos apoios seja menor do que na região central. Já as Figuras 8.42g e h mostram a maior concentração de fontes de EA e energia absoluta em uma região localizada entre os apoios e o centro do CP, porém quase não há acúmulo de dano no centro do mesmo. O padrão obtido com o software AEwin pode ser devido à utilização de uma velocidade de propagação de ondas v_p pouco representativa das condições variáveis de dano no CP. Isso pode gerar níveis maiores de erro de ajuste, portanto, as fontes em lugar de serem localizadas na região central dos apoios do CP, ficam em uma região intermediária entre as duas.

A respeito da coerência entre o padrão de microfissuramento no CP no final do ensaio e a distribuição das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e com o software AEwin, observa-se que, em termos gerais, ambos os programas definem satisfatoriamente a superfície de ruptura do CP.

A Figura 8.43 apresenta os histogramas típicos do erro ε_i médio obtidos na localização de fontes de EA com o software AEwin e com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). A estrutura e a informação mostradas na Figura 8.43 são análogas à Figura 8.32, mas para um ensaio cíclico em monzogranito. As Figuras 8.43a e b mostram a distribuição do erro considerando-se apenas a filtragem básica, enquanto as Figuras 8.43c e d mostram a informação após a filtragem rigorosa (ver item 8.3.3 a respeito do processo de filtragem). Cabe ressaltar que as Figuras 8.43c e d representam os histogramas do erro ε_i médio dos dados utilizados na caracterização do microfissuramento neste item. A comparação entre as Figuras 8.43a e b assim como entre as Figuras 8.43c e d mostra a mesma tendência favorável ao programa desenvolvido (CLAPWaVe) que na Figura 8.32. Igual às Figuras 8.32a e c, as Figuras 8.43a e c mostram como os dados do erro ε_i médio obtidos com software AEwin apresentam-se acumulados perto de $5 \cdot 10^{-7}$ segundos, podendo-se ajustar às distribuições de probabilidade Beta, Weibull e Lognormal. Em relação ao programa desenvolvido (CLAPWaVe), a distribuição dos dados nos histogramas mostra a maior parte dos dados concentrada perto de $1,69 \cdot 10^{-21}$ segundos e a menor parte distribui-se entre esse valor e aproximadamente $8 \cdot 10^{-6}$ segundos. Portanto, igual ao observado no item 8.5.1, nos ensaios cíclicos a maior parte dos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) também mostram maior qualidade de ajuste que o software AEwin. A respeito da forma dos histogramas fornecidos pelo programa desenvolvido (CLAPWaVe), as distribuições de probabilidade Beta e Exponencial novamente mostraram o melhor ajuste.

Figura 8.43 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios cíclicos em monzogranito. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa

8.5.2.2 Velocidade média associada ao processo de localização tridimensional

De forma análoga ao feito no item 8.5.1.2 para os ensaios monotônicos em monzogranito, apresentam-se na Figura 8.44 as variações acumulativas típicas no tempo e no espaço da velocidade de propagação de ondas v_p para ensaios cíclicos na mesma rocha. Devido às características da rocha, a coleta de formas de onda é susceptível a saturação. Por isso, as análises do monzogranito foram realizadas utilizando-se os resultados complementares de dois ensaios feitos com LR diferentes. O LR

menor foi utilizado para analisar o trecho inicial do ensaio até o pico de carregamento, enquanto o LR maior foi utilizado para se obter a tendência geral ao longo do ensaio, especialmente após o pico de carregamento. Visto que os resultados dos ensaios cíclicos e monotônicos são iguais até o pico de carregamento, as observações e análises feitas no item 8.5.1.2 para este trecho do ensaio são também válidas aqui. Desta forma, os resultados antes apresentados na Figura 8.33 complementam aos da Figura 8.44.

A Figura 8.44 mostra os resultados até o fim do ensaio, de maneira semelhante ao mostrado na Figura 8.34. A sua estrutura e apresentação também é igual à Figura 8.34, incluindo a escala de cores para se visualizar as variações na velocidade de propagação de ondas v_p dentro do CP. A visualização ao longo do tempo das variações da velocidade de propagação de ondas v_p foi realizada utilizando-se os mesmos pontos de controle definidos na Figura 8.37.

Como descrito no item 8.5.2.1, neste ensaio não houve localização de fontes de EA até o ponto de controle 2. Já na Imagem 3 da Figura 8.44, observam-se 2 fontes de EA localizadas na região central do CP, em coerência com a região de início do microfissuramento definida na Figura 8.33. Conforme esperado, tais fontes apresentam uma velocidade v_p inferior ao valor obtido para o CP intacto (47795m/s), devido ao efeito do dano induzido nessa região. O tamanho dessas fontes foi aumentado na imagem 3, apenas com o objetivo de facilitar sua visualização. A tendência dessas fontes em termos de velocidade v_p se manteve na região central do CP ao longo do ensaio (Imagens 4 a 10), gerando-se um núcleo central danificado igual ao observado na Figura 8.33, cujas velocidades são menores do que a registrada na condição intacta. Na vista lateral do CP (plano YZ), apresentada na Imagem 10 do canto inferior direito da Figura 8.44, mostra-se claramente este efeito. A terceira fonte de EA da Imagem 3 da Figura 8.44 localiza-se na região dos apoios, também em coerência com o padrão definido na Figura 8.33. Acompanhando a tendência da Figura 8.33 antes referida, a localização de fontes de EA nessa região continua a aumentar nas Imagens 4 a 10 da Figura 8.44, tendo-se velocidades v_p inferiores, iguais e superiores ao valor obtido para o CP (4779m/s). Até o ponto de controle 4, a maior parte das fontes localizadas na região dos apoios mostra velocidades v_p inferiores àquela obtida na condição intacta do CP. Deste ponto em diante, as fontes com velocidades v_p iguais ou superiores mostram-se em maior proporção, igual ao observado na Figura 8.33. A vista lateral do CP (plano YZ) no fim do ensaio na Figura 8.44 mostra o acima referido. No item 8.5.1.2 indicou-se que as diferentes magnitudes de velocidade média v_p na região dos apoios era devida principalmente a três efeitos. Os detalhes de cada um dos efeitos foram definidos no item 8.5.1.2, mas a fim de se facilitar as análises aqui desenvolvidas, os mesmos serão indicados a seguir.

Figura 8.44 – Distribuição típica da velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de programa desenvolvido (CLAPWaVe)

O efeito número 1 é associado ao processo de transferência de carregamento entre o CP e o berço. O efeito número 2 é relativo ao processo de confinamento induzido pelo berço na região próxima do apoio e que produz velocidades v_p médias maiores ou iguais àquela obtida em condição intacta. O efeito número 3 é associado à ruptura local da região menos confinada dos apoios. Assim, os padrões de velocidade das fontes de EA localizadas na região dos apoios da Figura 8.44 também podem ser associados aos três efeitos acima citados. As fontes localizadas na região dos apoios da Imagem 3 refletem o efeito número 1, as da Imagem 4 refletem a combinação dos efeitos 1 e 2, enquanto que na Imagem 5 o efeito número 2 é predominante. Desde o ponto de controle 5 em diante acentua-se o efeito número 2, especialmente no apoio superior. Na Imagem 5 observa-se, também, o acúmulo de fontes nas cores amarelo e verde na região compreendida entre o centro do CP e o apoio. Essas fontes estão associadas ao acúmulo de dano em uma das faces do CP e não a algum dos efeitos na região dos apoios. Por outro lado, a vista lateral do CP (plano XZ) no fim do ensaio é apresentada na Imagem 10 do canto inferior direito da Figura 8.44 mostra o acúmulo de fontes de EA com velocidades v_p baixas nas arestas dos apoios inferior e superior do CP. Assim, na região próxima de $Z=-25\text{mm}$ na aresta do apoio inferior observa-se um acúmulo de fontes nas cores verde e amarelo e, na região próxima de $Z=25\text{mm}$, na aresta do apoio superior, observa-se um acúmulo de fontes na cor amarela. As características de ambas as regiões das arestas e a sua localização ($Z=-25\text{mm}$ e $Z=25\text{mm}$) são indicativos do efeito número 3. Embora as fontes de EA associadas ao efeito número 3 sejam claramente visíveis apenas no fim do ensaio, o começo deste efeito ocorre entre os pontos de controle 7 e 8.

Conforme esperado, os padrões de distribuição das velocidades v_p médias observados na Figura 8.44 e a sua relação com os diferentes processos que induzem microfissuramento no CP são análogos ao mostrados e analisados na Figura 8.33.

8.5.2.3 *Análise espacial das fontes de EA associadas ao processo de localização tridimensional*

De forma análoga ao observado nos itens 8.5.1.1 e 8.5.1.2, nos itens 8.5.2.1 e 8.5.2.2 também puderam ser identificadas quatro regiões no interior do CP com características médias e localizações semelhantes. As quatro regiões: 1) região dos apoios, 2) núcleo central, 3) núcleo externo, e 4) região das bordas, definidas no item 8.5.1.3, são identificadas nas Figuras 8.45a, b, c e d, respectivamente. As Figuras 8.45e a h mostram a energia absoluta acumulada nas fontes de EA ao longo do ensaio, para as regiões acima definidas. Para facilitar as análises, foram adicionadas a cada Figura a curva

força versus tempo do ensaio (mesma Figura 8.37). A estrutura e a apresentação das informações da Figura 8.45 segue os mesmos lineamentos que a Figura 8.35, portanto, as explicações em relação ao seu formato que foram apresentadas para a Figura 8.35 são válidas para a Figura 8.45.

As Figuras 8.45e a h mostram que os acréscimos de energia absoluta ocorrem nos estágios A a F (quando o carregamento se aproxima da curva virgem), enquanto que nos estágio I a V a energia absoluta se manteve constante (em coerência com o efeito Kaiser). Assim, desconsiderando-se os estágios I a V, observa-se que as Figuras 8.45e a h apresentam a mesma tendência que as Figuras 8.35e a h, inclusive no que se refere às diferentes ordens de grandeza registradas nas quatro regiões. Para esclarecer se tais diferenças são devidas a níveis maiores de energia em cada fonte de EA ou a um maior acúmulo de fontes em algumas das quatro regiões, comparam-se as energias absolutas médias para as quatro regiões. Essa informação é apresentada na Tabela 8.2 e complementada com a informação a respeito das porcentagens associadas à quantidade de fontes de EA localizadas nessas quatro regiões. Conforme esperado, os resultados fornecidos pela Tabela 8.2 são semelhantes aos fornecidos pela Tabela 8.1 (ensaio monotônico em monzogranito). Além disso, a Tabela 8.2 mostra que as energias absolutas médias associadas às fontes de EA nas quatro regiões exibem as mesmas ordens de grandeza entre elas, pois são devidas principalmente a processos de microfissuramento. Em consequência, as diferenças nos níveis totais de energia absoluta no final do ensaio nas quatro regiões do CP são devidas a um maior acúmulo de fontes em algumas das regiões, especialmente no núcleo central. Portanto, embora o sistema tenha registrado alguns sinais por causa de reflexões de outros sinais primários ou sinais tipo ruído (sinais de menor intensidade), eles não alteraram a definição dos padrões de microfissuramento nos CPs. Todas as conclusões obtidas para os ensaios cíclicos conferem com o observado nos ensaios monotônicos (Tabela 8.1).

As Figuras 8.45e, g e h mostram que o processo de microfissuramento avança progressivamente no interior do CP, porém a Figura 8.45f mostra que o maior acúmulo de dano ocorre no núcleo central do CP, região em que o microfissuramento progride até o fim do ensaio. A Figura 8.45e mostra que o apoio superior do CP apresenta o maior acúmulo de energia até o fim do ensaio, em coerência com o padrão de microfissuramento observado nas Figuras 8.39 e 8.42. A Figura 8.45g mostra que o dano se acumulou em uma das faces e logo atravessou a espessura do CP até a outra face. No entanto, o acúmulo de energia na segunda face se manteve muito baixo em comparação ao registrado na primeira face, aumentando apenas no estágio F de carregamento. Consistentemente, nesse último estágio observa-se o aparecimento de uma fissura vertical centralizada na segunda face do CP.

Figura 8.45 – Variação típica da energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo externo do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d

Tabela 8.2 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio cíclico em monzogranito. Definição das zonas de acordo a Figuras 8.45 e 8.46

Zona	Proporção do total de fontes de EA (%)	Energia absoluta média (aJ)
Apoios	34,21	7,009E+04
Núcleo central	44,34	8,026E+04
Núcleo externo	20,96	1,438E+05
Bordas	0,49	1,116E+05

A respeito das fontes localizadas na região das bordas, no item 8.5.1.3 foi definido que elas podem ser devidas à flexão das metades do CP após o rompimento da maior parte do seu plano central vertical. Desta forma, quanto mais avançado estiver o ensaio no momento da criação da maior parte da superfície de ruptura (estágios de carregamento próximos ao fim do ensaio), menor deve ser o efeito da flexão das metades. Como visto nos padrões de localização definidos nos itens 8.5.1.1 e 8.5.2.1, o aparecimento da fissura na segunda face do CP é indicativo da criação da maior parte da superfície de ruptura no CP. No ensaio da Figura 8.45, o aparecimento da fissura na segunda face do CP ocorre no último estágio do ensaio (um pouco antes do ponto de controle 10), enquanto no ensaio da Figura 8.35 a fissura é observada muito antes, aproximadamente na metade do ensaio (entre pontos de controle 7 e 8). Além disso, a comparação entre as Figuras 8.35h e 8.45h e entre as Tabelas 8.1 e 8.2 mostra que tanto os níveis de energia absoluta acumulada quanto à proporção de fontes de EA são menores na Figura 8.45. Esta informação sugere que o efeito do microfissuramento por flexão das metades do CP é menor no ensaio da Figura 8.45, conforme esperado.

Apresenta-se na Figura 8.46 a média móvel das velocidades para as regiões definidas na Figura 8.45. A estrutura e a representação da informação nessa Figura são análogas ao apresentado na Figura 8.36, porém para o ensaio cíclico da Figura 8.37.

A Figura 8.46a mostra as fontes de EA localizadas na região dos apoios e a Figura 8.46e mostra a variação da média móvel ao longo do ensaio para essas fontes. Observa-se como no apoio superior (linha azul escuro) tanto os valores médios de velocidade registrados quanto a sua tendência no tempo são semelhantes aos da região dos apoios no ensaio monotônico da Figura 8.36e. O registro dessas fontes começa após o pico de carregamento em que há dano induzido no CP, portanto, os valores de velocidade próximos da calculada na condição intacta refletem o efeito do confinamento que age na região. Como descrito no item 8.5.1.3, na medida em que o ensaio avança, o aumento progressivo do dano no CP soma-se ao efeito do confinamento tridimensional na região dos apoios, gerando uma tendência aproximadamente constante da velocidade média móvel. Por outro lado, a

comparação entre os valores de velocidade média no apoio inferior (linha azul claro) e superior (linha azul escuro) mostram que nos estágios iniciais do ensaio os primeiros são menores. A respeito desta diferença, considera-se a informação fornecida pelas Imagens 4 e 5 das Figuras 8.39 e 8.44, em específico a região compreendida entre o centro do CP e o apoio inferior. No item 8.5.2.2 se estabeleceu que as primeiras fontes de EA localizadas nessa região (Imagem 4 nas Figura 8.39 e 8.44) são devidas à combinação dos efeitos número 1 e 2. Desta forma, os valores mais baixos de velocidade v_p média devidos ao efeito número 1 somam-se aos devidos ao efeito número 2, diminuindo os valores da velocidade média móvel no pico de carregamento. Após o pico, a avaliação conjunta da Imagem 5 das Figuras 8.39 e 8.44 mostra um acúmulo de fontes de EA na metade inferior de umas das faces do CP (face no plano $Z=-25\text{mm}$). Como tais fontes foram localizadas na face do CP próximas da região dos apoios, definida desde uma distância radial de 55% do raio do CP até o contato entre o CP e o berço, uma parte dessas fontes é associada ao apoio inferior na Figura 8.46a. Em consequência, o efeito do dano da face do CP nesse estágio influencia os valores de velocidade v_p média considerados como sendo pertencentes ao apoio inferior. Desde o ponto de controle 5 em diante, o aumento das fontes de EA na região do apoio fora das faces faz com que o efeito do confinamento seja mais visível, aumentando assim os valores médios da velocidade na região. Isso pode explicar a tendência crescente da velocidade média móvel até o estágio C de carregamento.

A Figura 8.46f apresenta a variação da média móvel das fontes localizadas no núcleo central do CP. As características observadas nos trechos virgens de carregamento (estágios A e F) dessa Figura são as mesmas observadas na Figura 8.36f para o núcleo central de um ensaio monotônico. Em consequência, todas as análises e conclusões definidas no item 8.5.1.3 a respeito da velocidade média móvel no núcleo central são válidas aqui.

A Figura 8.46g mostra a variação da média móvel obtida para as faces do CP. Considerando-se os trechos de carregamento virgens do ensaio da Figura 8.46f (estágios A a F), pode-se notar uma tendência geral análoga à Figura 8.36f. As explicações apresentadas no item 8.5.1.3 a respeito da magnitude e da tendência das velocidades médias móveis registradas são também válidas aqui. Contudo, vale notar o efeito do aparecimento da fissura vertical centralizada na segunda face do CP (o que ocorre quase no fim do ensaio), no comportamento das velocidades médias móveis em ambas as faces. Na Figura 8.46f observa-se claramente que desde o estágio A até o estágio E a face do plano $Z=-25\text{mm}$ apresenta velocidades médias móveis menores do que a outra face, e no estágio F a tendência se inverteu. Nesse ensaio o aparecimento de uma fissura vertical centralizada na primeira das faces dos CP ocorre no fim do estágio A (face do plano $Z=-25\text{mm}$), enquanto que na segunda face do CP (face do plano $Z=25\text{mm}$) a fissura é observada apenas no estágio F.

Figura 8.46 – Variação típica da velocidade média móvel associada às fontes de EA em ensaios cíclicos em monzogranito. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região dos apoios do CP. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA no núcleo central do CP. d) Fontes de EA na região das bordas do CP e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d

Assim, o processo de dano inicia-se na face do plano $= -25\text{mm}$, progredindo mais intensamente nessa face do que na outra. Em consequência, o maior dano no núcleo externo da primeira face (linha verde claro) pode explicar as velocidades médias móveis menores até o fim do estágio E.

A Figura 8.46h apresenta a variação da média móvel obtida das fontes de EA localizadas na região das bordas. Conforme estabelecido após a análise da Figura 8.45h, o efeito da flexão nas bordas do CP é menor do que no ensaio da Figura 8.35h. Portanto, a quantidade de informação registrada nas bordas do CP que é utilizada no cálculo da velocidade média móvel é também menor. Apesar disso, a tendência média apresentada na Figura 8.46h é semelhante à observada na Figura 8.35h.

Pelo exposto neste item e no item 8.5.1, conclui-se que o processo de microfissuramento progride da mesma forma em ensaios monotônicos e cíclicos em monzogranito. As diferenças menores observadas estão associadas com a restrição ao avanço do dano imposta principalmente pelo estágio de descarregamento I após o pico de carregamento. Todas as análises realizadas nos itens 8.5.1 e 8.5.2 evidenciam a anisotropia induzida pelo dano nos CPs de monzogranito.

8.5.3 Ensaios monotônicos em mármore

Neste item são apresentados os resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para um ensaio monotônico em mármore, seguindo a mesma estrutura do item 8.5.1 para os ensaios monotônicos em monzogranito. Desta forma, no item 8.5.3.1 é analisada a localização das fontes de EA, no item 8.5.3.2 é avaliada a distribuição espacial e temporal das velocidades de propagação das ondas associadas a cada fonte de EA e no item 8.5.3.3 é apresentada a análise espacial da energia absoluta e da velocidade média móvel ao longo do ensaio.

Nos ensaios feitos em mármore a taxa de emissões acústicas geradas no interior do CP foi menor do que no monzogranito, portanto, não houve saturação do equipamento na coleta dos sinais (ver item 2.5). Pelo exposto, as análises dos processos de dano em mármore podem ser feitos considerando-se as informações de um único ensaio, coletadas com um LR baixo o suficiente para registrar o início do microfissuramento.

8.5.3.1 Padrão de microfissuramento tridimensional

A Figura 8.47 mostra o comportamento típico de força versus tempo para um ensaio de compressão diametral monotônico em mármore. Foram adicionados dez pontos de controle que representam os estágios em que são apresentados os padrões de microfissuramento definidos por meio das fontes de EA nas Figuras 8.49 e 8.50. Os pontos de controle 1 a 5 representam 50, 75, 90, 100% do carregamento de pico e o fim do estágio A. Como no mármore a diminuição de resistência após o pico de carregamento é menos dramática do que no monzogranito, a completa estabilização do carregamento ocorre muito tempo após o pico de resistência (aproximadamente 3500 segundos após o pico). Por isso, a fim de se acompanhar o processo de microfissuramento durante o ensaio de forma mais apurada, o fim do estágio A é definido como o instante em que termina o trecho com a maior taxa de diminuição da resistência (ver definição do ponto de controle 5 na Figura 8.47). Os pontos de controle 6 a 10 representam diferentes instantes ao longo do ensaio, definidos como se mostra na Figura 8.47.

Figura 8.47 – Força versus tempo típico em ensaios monotônicos em mármore

A Figura 8.48 mostra a energia absoluta acumulada das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), até o fim do estágio A no mármore. Como esperado, a sua tendência é consistente com a observada na Figura 8.5, lembrando-se que nesta última utiliza-se a energia adimensional em lugar da energia absoluta. No item 8.5.1 foi explicada a diferença entre ambas as energias assim como as razões para se ter tendências semelhantes. A Figura 8.48 mostra que a

energia absoluta começa a incrementar já desde antes do ponto de controle 1 (aproximadamente 30% do carregamento de pico), e depois a taxa de energia liberada começa a aumentar. Isso sugere que o início do microfissuramento nesta rocha ocorre quando o carregamento é aproximadamente 25-30% do carregamento de pico. Desde o início do microfissuramento em diante observa-se um aumento gradativo da energia até o ponto de controle 4 (pico de carregamento). Entre o pico de carregamento e o fim do estágio A (pontos de controle 4 e 5), observa-se que o aumento na energia ocorre a uma taxa maior do que no trecho pré-pico, em coerência com o maior acúmulo de dano no trecho pós-pico. A comparação da variação da energia absoluta no mármore (Figura 8.48) e no monzogranito (Figura 8.22b) mostra claramente que o microfissuramento no mármore começa antes do que no monzogranito, sendo, também, mais gradativo. Além disso, observa-se que embora no monzogranito a liberação de energia comece no ponto de controle 3 e no mármore no ponto de controle 1, os níveis de energia absoluta acumulada até o fim do estágio A são semelhantes em ambas as rochas. Considerando-se as características próprias de cada rocha (estrutura interna e composição mineralógica), tais diferenças eram de se esperar. Assim, no monzogranito o processo de microfissuramento é mais explosivo e com maior resistência à propagação de microfissuras, o que produz muita energia absoluta liberada próximo do carregamento de pico. Já no mármore, a existência de planos de clivagem promove a propagação constante de microfissuras, produzindo-se a liberação de níveis menores de energia absoluta. Nesta rocha, tais níveis vão se acumulando desde instantes mais precoces do ensaio, resultando em níveis de energia absoluta acumulada total no fim do estágio A semelhantes aos obtidos no monzogranito.

Figura 8.48 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo em ensaios monotônicos em mármore

De forma semelhante ao apresentado nas Figuras 8.23 e 8.28 para um ensaio monotônico em monzogranito, a Figura 8.49 mostra a localização acumulativa típica das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para um ensaio monotônico em mármore. O padrão de microfissuramento é apresentado para os pontos de controle definidos na Figura 8.47. Inclui-se, também, a escala de cores associada à energia absoluta das caixas de clusters, no meio da borda inferior da mesma, e uma fotografia do CP com a identificação da disposição dos sensores no canto inferior direito. Observa-se que as ordens de grandeza das energias absolutas registradas nesta rocha são de 10 a 20 vezes menores do que as registradas para o monzogranito. Essas diferenças são esperadas, pois a estrutura interna e a composição de ambas as rochas definem a resistência que elas opõem à propagação de microfissuras.

A Imagem 1 da Figura 8.49 já mostra um acúmulo importante de fontes de EA localizadas região central do CP. Baseado na informação fornecida pela Figura 8.48, foi avaliado o padrão das fontes de EA para níveis de carregamento inferiores a 50% do pico, confirmando-se que para o mármore o início do microfissuramento ocorre aproximadamente na faixa 25-30% do carregamento de pico. A imagem 1 também mostra algumas fontes de EA e caixas de cluster na região dos apoios, embora o maior acúmulo de energia ocorra na região central. A Imagem 2 da Figura 8.49 mostra o aumento de fontes de EA localizadas na região central e nos apoios do CP assim como o aparecimento de fontes de EA e de caixas de clusters em uma das faces do CP. Desde o ponto de controle 2 em diante, observa-se o acúmulo de fontes de EA e caixas de clusters de maior energia na região central do CP, especialmente no seu centro. Além disso, as Imagens 2 a 4 mostram o acúmulo de fontes de EA e de caixas de clusters na região dos apoios e em uma das faces do CP. Em termos de distribuição do dano no CP, o mármore apresenta uma mudança de padrão desde o ponto de controle 5. Assim, entre os pontos de controle 1 a 4, observam-se fontes de EA e caixas de clusters distribuídas ao longo do eixo de carregamento, embora o maior acúmulo de energia ocorra no centro do CP. Já desde o ponto de controle 5 (fim do estágio A), observa-se o acúmulo de dano na região compreendida entre a região central do CP e uma das faces, aproximadamente $-25\text{mm} \leq Z \leq 10\text{mm}$. Nessa região de dano considera-se $Z \leq 10\text{mm}$ e não $Z \leq 0\text{mm}$, pois a região central danificada também o inclui. O padrão de dano é consistente com o registro visual do aparecimento de uma fissura vertical centralizada na face $Z = -25\text{mm}$ do CP entre os pontos de controle 4 e 5. Neste CP não se observa o aparecimento de uma fissura vertical centralizada na outra face, o que confere com o padrão de microfissuramento predominante no plano YZ com $-25\text{mm} \leq Z \leq 10\text{mm}$. Observa-se que desde o ponto de controle 5 (fim do estágio A) não há mudança no padrão de microfissuramento, mas apenas um maior acúmulo de fontes de EA e energia absoluta nas mesmas regiões danificadas durante o estágio A. Isto mostra que no mármore até o fim do estágio A a superfície final de ruptura deste CP já é definida, o que confere

com as observações feitas a respeito deste CP na Figura 8.48. O acúmulo do dano próximo de uma das faces do CP nem sempre acontece da forma em que ocorreu neste CP, sendo mais típica a criação de uma superfície de ruptura em que o dano atravessa o plano central do CP até a outra face. No entanto, o tipo de superfície de ruptura visualizado no CP da Figura 8.49 permite validar o ajuste do programa de localização desenvolvido em condições de ruptura um pouco diferentes.

A comparação da Figura 8.39 (localização em monzogranito) com a Figura 8.49 (localização em mármore) mostra que as regiões de acúmulo de dano no CP de mármore são as mesmas que nos CPs de monzogranito (apoios, faces e região central do CP), porém, o aparecimento das fontes de EA nas três regiões é mais precoce no mármore (desde antes do ponto de controle 1). Além disso, observa-se que o aparecimento precoce de microfissuramento no mármore traz como consequência a formação também precoce da superfície de ruptura do CP. Considerando-se as informações fornecidas pelas Figuras 8.38 e 8.48, tem-se que ambas as rochas apresentam níveis semelhantes de energia absoluta até o fim do estágio A, porém daí em diante a energia liberada no monzogranito é muito maior do que no mármore (ver Figuras 7.7 e 7.8). Isso sugere que o mármore acumula energia absoluta a uma taxa menor entre o fim do estágio A e o fim do ensaio, do que durante o estágio A, diferente do monzogranito. Assim, depois do fim do estágio A deve haver uma quantidade menor de processos de microfissuramento progredindo no interior do mármore. Tais diferenças sugerem que no monzogranito o processo de ruptura é progressivo, enquanto no mármore ocorre concentrada no estágio A.

Figura 8.49 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe)

A Figura 8.50 mostra a localização acumulativa típica das fontes de EA obtidas com o software AEwin para o ensaio definido na Figura 8.47. O formato e as informações apresentadas na Figura 8.50 são análogos ao da Figura 8.49, o que permite a comparação direta da localização obtida utilizando-se ambos os programas. Diferente do observado na Figura 8.49, na Figura 8.50 mostra-se apenas uma fonte de EA até o ponto de controle 1, localizada próxima da região do apoio superior. A Imagem 2 da Figura 8.50 mostra diversas fontes de EA distribuídas ao longo do eixo de carregamento, porém não há acúmulo na região central do CP. Na Imagem 3 observa-se uma quantidade maior de fontes de EA localizadas ao longo do eixo de carregamento, tendo-se o maior acúmulo de caixas de clusters e energia absoluta na região dos apoios e apenas uma caixa de cluster na região central do CP. Assim, os padrões de distribuição de fontes de EA entre os pontos de controle 1 e 3 mostram que o software AEwin consegue registrar alguns indícios de início do microfissuramento apenas a partir do ponto de controle 2 (e não desde o ponto de controle 1 como ocorre com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)), consistente com a informação de localização apresentada no item 8.1.4. A Imagem 4 da Figura 8.50 mostra um maior acúmulo de energia absoluta na região dos apoios do CP. Além disso, há fontes de EA na região central, porém encontram-se distribuídas e sem um acúmulo no centro do CP. Na Imagem 5 da mesma Figura se observa o acúmulo de fontes de EA e caixas de cluster na região central do CP, porém as maiores quantidades de energia são ainda registradas na região dos apoios. A comparação das Imagens 1 a 5 das Figuras 8.49 e 8.50 revelam que os padrões de distribuição das fontes de EA obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin são muito diferentes, especialmente no que diz respeito ao início do microfissuramento. Observa-se que as duas localizações registram o início do microfissuramento em pontos de controle diferentes.

A respeito do referido no parágrafo anterior, como explicado no item 8.5.1, as análises teóricas desenvolvidas por Chau e Wei (2001), por Hondros (1959) e por Wei e CHau (2013), para discos de material homogêneo sob compressão diametral, mostram que o início do microfissuramento deve ocorrer no centro e nas faces do CP. Assim, tendo-se que os CPs de mármore utilizados nesta pesquisa podem ser considerados homogêneos, o padrão de início do microfissuramento obtido com o programa desenvolvido CLAPWaVe (Figura 8.49) é mais coerente com as observações dos autores acima citados do que o obtido com o software AEwin. O padrão de início de microfissuramento associado às observações teóricas acima referidas, sugere que o dano continue a se acumular na região central do CP, o qual somente é observado na localização feita pelo programa desenvolvido (CLAPWaVe). A partir da Imagem 5 os padrões de distribuição de fontes de EA das Figuras 8.49 e 8.50 apresentam maior semelhança do que os das Imagens 1 a 5 de ambas as Figuras, porém o acúmulo de dano no centro do CP é sempre mais evidente na localização feita com o programa desenvolvido (CLAPWaVe).

Figura 8.50 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização do software AEwin

De forma análoga ao feito para o monzogranito nos itens 8.5.1 e 8.5, apresenta-se na Figura 8.51 a comparação dos padrões de localização típicos obtidos para o estágio A no mármore, com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e com o software AEwin. A Figura 8.51 segue o mesmo formato e estrutura das Figuras 8.25, 8.30 e 8.41, tendo-se no eixo de abscissas os valores absolutos da coordenada Y, adimensionalizados pelo raio r do CP, e no eixo das ordenadas a porcentagem da energia absoluta acumulada em relação ao total de energia absoluta acumulada ao longo do eixo diametral desde $Y=-r$ até $Y=r$.

A Figura 8.51a mostra que na localização feita com o software AEwin o maior acúmulo de energia ocorre na região dos apoios do CP, mas na medida em que o carregamento avança, o nível de energia na região central do CP aumenta. A Figura 8.51b também mostra que na localização feita com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) manteve-se a tendência acima descrita, porém, o começo do acúmulo de energia na região central do CP ocorre mais precocemente. No ponto de controle 1 o software AEwin não apresenta fontes de EA na região central do CP, enquanto que o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra aproximadamente 30% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,1$. Nos seguintes pontos de controle ainda se observa um acúmulo maior de energia absoluta na região central do CP com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Assim, no fim do estágio A (o ponto de controle 5), em que há registro visual do aparecimento de uma fissura vertical centralizada em uma das faces do CP, o software AEwin e o programa desenvolvido (CLAPWaVe) acumulam aproximadamente 8% e 32% de energia absoluta para $|Y|/r < 0,1$, respectivamente. Ainda no ponto de controle 5, o acúmulo de energia no núcleo central do CP ($|Y|/r < 0,55$), obtido com o software AEwin aumenta (aproximadamente 42% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,55$), porém, ainda é menor do que o obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) (aproximadamente 64% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,55$). Já na região dos apoios, as diferenças na distribuição da energia absoluta são um pouco menos marcantes (aproximadamente 78% e 90% da energia absoluta acumulada para $|Y|/r < 0,85$ para o software AEwin e o programa desenvolvido (CLAPWaVe), respectivamente).

Em relação ao avanço progressivo do dano ao longo do ensaio, tanto a Figura 8.51a quanto a Figura 8.51b mostram pouca variação nas curvas de energia acumulada obtidas para os diferentes pontos de controle, especialmente a última Figura. Assim, a Figura 8.51b mostra claramente que desde o ponto de controle 3 as energias distribuem-se quase iguais, o que sugere que desde 90% do carregamento de pico há uma parte importante da superfície final de dano já definida. Dessa maneira, diferentemente do que ocorre no monzogranito (ruptura progressiva), o mármore define a sua superfície de ruptura final durante o estágio A de carregamento, pois as curvas de distribuição de energia quase não mudam entre os pontos de controle 1 a 5.

Figura 8.51 - Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A em ensaios monotônicos em mármore. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)

A Figura 8.52 mostra a configuração final do ensaio feito no CP de mármore da Figura 8.47. O formato e a estrutura da Figura 8.52 é análoga às Figuras 8.31 e 8.42, apresentadas nos itens 8.5.1 e 8.5.2, respectivamente. Dessa forma, as Figuras 8.52a e c mostram as duas faces do CP na condição final danificada, e as Figuras 8.52b e d mostram as fotografias de detalhe e em escala ampliada da região central fissurada no final do ensaio. O tratamento da superfície do CP com pó de giz após o ensaio é aplicado da mesma forma que na Figura 8.8, mas neste caso utiliza-se pó de giz rosa, a fim de se conseguir maior contraste entre áreas fissuradas e intactas e melhor visualização da região danificada. As Figuras 8.52e e f mostram o padrão de localização obtido pelo programa desenvolvido (CLAPWaVe), e as Figuras 8.52g e h mostram a localização final obtida com o software AEwin. A região danificada do CP é semelhante à observada na Figura 8.8, sendo também consistente com a fotomicrografia da Figura 6.11.

Figura 8.52 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaios monotônicos em mármore. a) CP Condição final do CP, face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP, face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. h) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456

As Figuras 8.52a, b, c e d mostram que a superfície de ruptura está muito bem definida na face 456, porém, na face 123 não é visível, em coerência com o aparecimento da fissura vertical centralizada apenas na face 456 durante o ensaio. Não foi observado o aparecimento de fissura vertical centralizada na face 123. Além disso, a condição final danificada do CP é também consistente com o

padrão de microfissuramento obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), em que o maior acúmulo de caixas de clusters de alta energia absoluta localiza-se na região compreendida entre o plano YZ com $Z=10\text{mm}$ e o plano YZ com $Z=-25\text{mm}$ (a face 456). Como visto nas Figuras 8.49 a 8.52, no mármore o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin apresentam as suas maiores diferenças na localização de fontes de EA durante o estágio A de carregamento, igual ao observado no monzogranito. Embora as diferenças tenham diminuído na medida em que o ensaio avançou, foram mantidas alguma diferenças no padrão de acúmulo de dano. Assim, utilizando-se o programa desenvolvido (CLAPWaVe) obteve-se uma região fissurada (definida pelas caixas de clusters) melhor definida e consistente com a condição real final do CP. Além disso, a maior quantidade de caixas de clusters na cor preta nas Figuras 8.52e e f em relação às Figuras 8.52g e h, indica uma maior concentração de energia absoluta nas localizações feitas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). As razões para essas diferenças são as mesmas explicadas no item 8.5.1 e 8.5.2 para o monzogranito, pois esse padrão é observado tanto no mármore quanto no monzogranito. Assim, em consistência com o observado nas Figuras 8.49 e 8.50, a Figura 8.52 mostra que o programa desenvolvido (CLAPWaVe) apresenta uma distribuição de fontes de EA é mais localizada, o que ocorre desde o início do microfissuramento. Por outro lado, observa-se que o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra uma maior concentração de fontes de EA na região dos apoios e no centro do CP. Assim, o padrão obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra-se mais ajustado à condição real do CP. Contudo, o software AEwin também mostra uma concordância razoável entre a condição final danificada do CP e o padrão definido pelas fontes de EA.

Da mesma forma que ocorreu com o monzogranito, no mármore o padrão de microfissuramento obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou-se mais coerente em relação às expressões teóricas existentes na literatura (CHAU; WEI, 2001; HONDROS, 1959; WEI; CHAU, 2013). Além disso, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) apresenta resultados mais completos em comparação ao software AEwin, fornecendo-se maior e melhor informação a respeito do início do microfissuramento e da distribuição do dano. Contudo, é necessário avaliar se os melhores resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) são acompanhados de maior qualidade de ajuste. Como erro ε_i médio é o único fator que permite avaliar quantitativamente a qualidade de ajuste de cada fonte de EA, utiliza-se essa informação para comparar o software AEwin e o programa desenvolvido (CLAPWaVe). A Figura 8.53 apresenta os histogramas de distribuição típica do erro ε_i médio de minimização obtido para cada fonte de EA localizada, de forma semelhante ao mostrado nos itens 8.5.1 e 8.5.2. O formato e a estrutura da Figura 8.53 é a mesma das Figuras 8.32 e 8.43. Assim, nas Figuras 8.53a e b apresentam-se os histogramas do erro ε_i médio das fontes filtradas apenas antes

da localização (filtragem básica). Já nas Figuras 8.53c e d apresentam-se os histogramas do erro ε_i médio das fontes filtradas antes e depois da localização (filtragem rigorosa).

Figura 8.53 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios monotônicos em mármore. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa

Em termos gerais, os resultados obtidos para o mármore são análogos aos obtidos para o monzogranito, tanto em ensaios monotônicos quanto cíclicos. De forma análoga ao observado no monzogranito, no mármore os histogramas obtidos com as fontes de EA localizadas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostram a sua maior concentração para um valor do erro ε_i médio muito

menor do que no software AEwin, seja no caso da aplicação da filtragem básica (Figuras 8.53a e b) ou da filtragem rigorosa (Figuras 8.53c e d). Assim, no mármore os dados do erro ε_i médio obtidos com software AEwin apresentam-se acumulados perto de $4.9 \cdot 10^{-7}$ segundos, e a sua distribuição também pode ser ajustada às distribuições de probabilidade Beta, Weibull e Lognormal. Da mesma forma, os dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para o mármore mostram uma distribuição análoga à obtida para o monzogranito, tendo-se a maior parte dos erros ε_i médios concentrados perto de $2,1 \cdot 10^{-21}$ segundos, e a menor parte distribui-se entre esse valor e aproximadamente $3 \cdot 10^{-6}$ segundos. Em termos de distribuição de probabilidade, as funções Beta e Exponencial novamente mostraram o melhor ajuste aos dados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Pode-se observar que independentemente da rocha utilizada, as distribuições do erro ε_i médio obtidas utilizando o mesmo programa de localização são semelhantes. Como dito em itens anteriores, todas as comparações entre ambos os softwares foram feitas utilizando-se a mesma informação inicial do ensaio. Assim, as diferenças entre eles são devidas ao algoritmo de minimização aplicado e à forma em que se utiliza a informação fornecida. Pelo exposto, conclui-se que no caso de rochas aproximadamente isotrópicas como as rocha aqui estudadas, a qualidade de ajuste obtida é independente do tipo de rocha ensaiada, sendo definida principalmente pela forma em que o programa de localização realiza a busca (algoritmo e uso da informação fornecida).

8.5.3.2 *Velocidade média associada ao processo de localização tridimensional*

De forma análoga ao apresentado nos itens 8.5.1.2 e 8.5.2.2 para ensaios monotônicos e cíclicos em monzogranito, apresentam-se aqui as análises das variações acumulativas típicas da velocidade de propagação de ondas v_p no tempo e no espaço, para ensaios monotônicos em mármore. Como nos ensaios em mármore não houve saturação durante a coleta de formas de onda, a variação de velocidades v_p associada às fontes de EA pode ser estudada utilizando-se um único ensaio. Assim, a Figura 8.54 mostra os resultados até o fim do ensaio, de maneira semelhante ao mostrado na Figura 8.34. A sua estrutura e apresentação também são iguais à Figura 8.34, incluindo-se a escala de cores para se visualizar as variações na velocidade de propagação de ondas v_p dentro do CP. A visualização ao longo do tempo das variações da velocidade de propagação de ondas v_p foi realizada utilizando-se os mesmos pontos de controle definidos na Figura 8.47.

Diferentemente do observado no monzogranito, no mármore o processo de microfissuramento inicia-se precocemente. Assim, desde o ponto de controle 1 observam-se fontes de EA localizadas na

região central do CP, em coerência com a região de início do microfissuramento entre 45 e 50% do carregamento de pico, definida no item 8.5.3.1. Como esperado, tais fontes apresentam uma velocidade v_p inferior ao valor obtido para o CP intacto (4355m/s), devido ao efeito do dano induzido nessa região. Observa-se, também, que a partir do ponto de controle 1 (Imagens 1 a 10) a quantidade de fontes de EA localizadas na região central do CP aumenta e a região danificada se estende, sugerindo que o dano inicia-se no centro do CP e progride em direção aos apoios, seguindo o eixo de carregamento. Assim, as fontes de EA da região central do CP de mármore geram um núcleo central danificado semelhante ao observado nas Figuras 8.33, 8.34 e 8.44 para o monzogranito, porém mais marcante. Na vista lateral do CP (plano YZ), apresentada na Imagem 10 do canto inferior direito da Figura 8.54, mostra-se claramente este efeito. Pode-se observar que o padrão de dano observado no núcleo central desta rocha também é consistente com a região de máxima tensão de tração obtidas em análises teóricas em materiais homogêneos e isotrópicos (CHAU; WEI, 2001; HONDROS, 1959; WEI; CHAU, 2013). Além das fontes de EA localizadas na região central do CP, observa-se a partir do ponto de controle 1 o aparecimento de fontes na região dos apoios do CP. Até o ponto de controle 4 (pico de carregamento) no mármore, igual ao monzogranito, a maior parte das fontes localizadas na região dos apoios mostra velocidades v_p inferiores àquela obtida na condição intacta do CP (4355m/s). Deste ponto em diante, as fontes com velocidades v_p iguais ou superiores mostram-se em maior proporção, igual ao observado no monzogranito. Nos itens 8.5.1.2 e 8.5.2.2 foram expostos e explicados três efeitos associados às diferentes magnitudes de velocidade média v_p na região dos apoios, os quais são enunciados a seguir: 1) transferência de carregamento entre o CP e o berço, 2) confinamento induzido pelo berço na região próxima do apoio e 3) ruptura local da região menos confinada dos apoios. Destes três efeitos, o segundo produz velocidades v_p médias maiores ou iguais àquela obtida em condição intacta, enquanto que o primeiro e o terceiro produzem velocidades menores que aquela obtida em condição intacta. Os padrões de velocidade das fontes de EA localizadas na região dos apoios no mármore podem ser associados aos três efeitos acima citados, da mesma forma que no monzogranito. As fontes localizadas na região dos apoios da Imagem 3 refletem o efeito número 1, as da Imagem 4 refletem a combinação dos efeitos 1 e 2, enquanto que na Imagem 5 o efeito número 2 é predominante.

A distribuição do dano ao longo do tempo em CPs de mármore e monzogranito são análogas, tanto na região central do CP quanto na região dos apoios. Isso sugere a existência de um padrão geral nas regiões de acúmulo de microfissuramento, sendo definidas predominantemente pelas características de aplicação de carregamento ao CP e menos pelo tipo de rocha.

Figura 8.54 – Distribuição típica da velocidade V_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore

Cabe ressaltar que embora haja regiões de acúmulo de dano no CP comuns entre ambas as rochas (núcleo do CP, apoios, faces), isso não significa que o dano se propague da mesma forma nessas regiões. Portanto, as observações aqui apresentadas em relação às regiões de acúmulo de dano nos CPs não contradizem todas as diferenças já descritas a respeito da forma em que o microfissuramento se propaga no interior de ambas as rochas. Essas conclusões são apenas válidas para rochas consideradas isotrópicas e homogêneas, como as rochas aqui utilizadas.

A vista lateral do CP (plano YZ) no fim do ensaio é apresentada na Imagem 10 da Figura 8.54 mostra o acúmulo de algumas fontes de EA com velocidades v_p baixas (na cor amarela) na aresta direita do apoio superior do CP. As características dessas fontes localizadas na região próxima de $Z=25\text{mm}$ e $Y=50\text{mm}$, são indicativos do efeito número 3. Como esperado no mármore, as fontes de EA associadas ao efeito número 3 começam a se acumular desde os pontos de controle 4 e 5, pois todos os processos de propagação de microfissuramento são mais precoces nesta rocha.

É importante notar que o efeito 3 é menos marcante no CP de mármore do que nos CPs de monzogranito. Além disso, no caso do CP aqui analisado, em que o dano concentra-se entre o centro do CP e uma das faces, o efeito 3 observa-se em uma das arestas próxima da face menos danificada e não na região que apresenta maior dano. A comparação do efeito 3 entre o mármore e o monzogranito sugere que tal efeito de ruptura das arestas é mais marcante em rochas que possuem maior resistência à propagação de microfissuramento. A distribuição do efeito 3 no mármore sugere que em rochas que possuem menor resistência à propagação de microfissuramento, o efeito ocorre com menor intensidade e localizado naquelas arestas próximas de regiões menos danificadas. Isto pode ser explicado porque em rochas mais fracas, homogêneas e isotrópicas, como o mármore, o dano vai se propagar primeiro pelas regiões de maior concentração de tensão e menor resistência (mais danificadas), e logo progride até regiões com maior integridade estrutural (menos danificadas). No CP de mármore tem-se o maior nível de dano acumulado na região compreendida entre $Z=10\text{mm}$ e $Z=-25\text{mm}$, portanto, a região compreendida entre $Z=10\text{mm}$ e $Z=25\text{mm}$ apresenta maior integridade estrutural. Da região mais danificada, a região central é provavelmente a mais susceptível a continuar e rompendo-se, portanto, as arestas desta região podem não concentrar muito dano. Já, na parte menos danificada do CP, regiões como as arestas do CP serão as mais susceptíveis de apresentar dano, devido a sua alta concentração de tensão e baixo confinamento.

8.5.3.3 *Análise espacial das fontes de EA associadas ao processo de localização tridimensional*

De forma análoga ao apresentado nos itens 8.5.1 e 8.5.2, apresentam-se as análises das quatro regiões no interior do CP com características médias e localizações semelhantes. As quatro regiões: 1) região dos apoios, 2) núcleo central, 3) núcleo externo, e 4) região das bordas, são identificadas nas Figuras 8.55a, b, c e d, respectivamente. As Figuras 8.55e a h mostram a energia absoluta acumulada nas fontes de EA ao longo do ensaio, para as regiões acima definidas. Foram adicionadas a cada Figura a curva força versus tempo do ensaio (mesma curva da Figura 8.47).

A estrutura e a apresentação das informações da Figura 8.55 seguem os mesmos lineamentos que a Figura 8.35, portanto, as explicações em relação ao seu formato são válidas para a Figura 8.55.

Igual ao observado no monzogranito, a observação conjunta das Figuras 8.55e a 8.55h no mármore mostra que as energias acumuladas até o fim do ensaio nas quatro regiões apresentam diferentes ordens de grandeza. A fim de se esclarecer se tais diferenças são devidas a uma maior proporção de fontes de EA, como ocorre no monzogranito, foram comparadas as energias absolutas médias nas quatro regiões. A Tabela 8.3 apresenta a comparação das energias absolutas médias e das porcentagens associadas à quantidade de fontes de EA localizadas nas quatro regiões acima referidas. Das análises petrográficas apresentadas no item 6.2.2 é evidente que as fontes de EA localizadas no núcleo central do CP estão associadas a processos de microfissuramento. Assim, igual ao feito no monzogranito, a energia média registrada no núcleo central do CP de mármore foi considerada como um parâmetro para definir se as fontes das outras regiões estão também associadas a processos de microfissuramento. A Tabela 8.3 mostra valores semelhantes de energia média no núcleo central, externo e apoios e um pouco menores na região das bordas, porém, eles ainda se mantêm na mesma ordem de grandeza. Além disso, a distribuição de fontes de EA mostrada na Tabela 8.3 mostra que no núcleo central localizam-se a maior parte das emissões. A região com a segunda maior proporção das fontes de EA localizadas é a região dos apoios e a última é a região das bordas, igual ao observado no monzogranito. Assim, considera-se que as fontes de EA das quatro regiões estão associados a processos de microfissuramento, tendo-se que níveis de energia acumulada maiores são devidos apenas a maior quantidade de fontes de EA localizadas na região.

Figura 8.55 – Variação típica da Energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região central próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. h) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d.

Tabela 8.3 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio monotônico em mármore. Definição das zonas de acordo a Figuras 8.55 e 8.56

Zona	Proporção do total de fontes de EA (%)	Energia absoluta média (aJ)
Apoios	29,61	8,130E+03
Núcleo central	63,33	8,490E+03
Núcleo externo	6,05	1,447E+04
Bordas	1,01	1,479E+03

Contudo, a comparação das Tabelas 8.1 a 8.3 mostra que tanto a proporção de fontes de EA quanto a magnitude da energia absoluta média em cada região são diferentes no mármore e no monzogranito. Os níveis muito menores de energia absoluta média registrados no mármore são esperados, pois a estrutura e a composição do mármore promove a propagação de microfissuras, com menor liberação de energia no processo. Considera-se que as diferenças na proporção de fontes de EA no mármore e no monzogranito podem estar relacionadas à forma em que o dano progride em ambas as rochas. Assim, o processo de dano progressivo no monzogranito faz com que no final do ensaio este apresente maior integridade do que o mármore (lembra-se que foi considerado o mesmo nível de deformação ϵ para finalizar os ensaios). Portanto, depois do fim do ensaio ainda é possível que o monzogranito acumule dano no seu núcleo central, aumentando a proporção de fontes de EA nessa região. Em contraste, o mármore define sua superfície de ruptura durante o primeiro estágio de carregamento (estágio A), danificando o seu núcleo central em maior quantidade e mais precocemente do que o monzogranito. No final do ensaio, tentou-se separar as metades dos CP a serem utilizadas na preparação das lâminas petrográficas, porém este processo foi muito difícil no monzogranito e em alguns casos não foi possível, enquanto que no mármore este processo requereu um mínimo de força. Os resultados qualitativos obtidos nesse processo confirmam os diferentes níveis de dano nos CPs de mármore e monzogranito no fim dos ensaios. Isso sustenta a hipótese acima descrita e que explica as diferentes proporções de fontes de EA no núcleo central em ambas as rochas. Essas informações também sugerem que no ensaio feito em mármore, embora o microfissuramento se encontra concentrado em uma região do CP ao longo do eixo de carregamento (entre $Z=10\text{mm}$ e $Z=-25\text{mm}$), o nível de dano nesta rocha é muito maior do que o registrado nos ensaios feitos em monzogranito. No entanto, a concentração não simétrica do dano no CP de mármore pode condicionar a distribuição das energias acumuladas e das velocidades v_p associadas às fontes de EA, especialmente daquelas fontes que dependem da formação da superfície de ruptura do CP, como são as fontes localizadas na região das bordas.

Após ser estabelecido que as fontes de EA das quatro regiões acima definidas são principalmente associadas a processos de microfissuramento, foram analisadas as diferenças entre as energias absolutas acumuladas nelas e a sua relação com o avanço do dano no CP. Embora as ordens de grandeza sejam diferentes no mármore e no monzogranito, as tendências obtidas nas Figuras 8.35 e 8.55 são semelhantes. Assim, as Figuras 8.55e, f, g e h mostram que o processo de microfissuramento avança progressivamente no interior do CP, tendo-se o maior acúmulo de dano no seu núcleo central, onde progride até o fim do ensaio. Em coerência com o padrão de microfissuramento observado na Figura 8.49, a Figura 8.55e mostra um acúmulo maior de energia absoluta no apoio superior do CP até o fim do ensaio. A Figura 8.55g mostra claramente que o acúmulo ocorre preferencialmente em apenas uma das faces, o que pode ser associado a pequenas heterogeneidades próprias da rocha, que condicionaram a ruptura de uma região mais do que a outra. Consistentemente, neste ensaio observa-se o aparecimento de uma fissura vertical centralizada só em uma das faces do CP.

A respeito das fontes localizadas na região das bordas, nos itens 8.5.1.3 e 8.5.2.3 explicou-se que elas podem ser devidas à flexão das metades do CP após o rompimento da maior parte do seu plano central vertical. Contudo, a ruptura não simétrica do CP de mármore aqui estudado pode ter influenciado a forma em que ocorre a flexão das suas metades. A proporção de fontes de EA registrada na região das bordas no ensaio feito em mármore é semelhante à observada nos ensaios feitos em monzogranito. Considerando-se o nível maior de dano no CP de mármore, esperava-se que o efeito fosse mais marcante nesta rocha, porém isto não foi observado. Uma possível explicação disso é que o efeito combinado da ruptura não simétrica do CP e a menor resistência que esta rocha opõe frente a propagação de microfissuras tenha como consequência uma proporção menor de sinais com intensidade suficiente para ultrapassar o LR, sendo assim registrada, coletada e localizada pelo programa desenvolvido (CLAPWaVe).

Logo após ser apresentada e analisada a distribuição de energia absoluta acumulada nas quatro regiões principais de dano no CP, apresenta-se a análise das velocidades médias móveis ao longo do ensaio, da mesma forma que nos itens 8.5.1.3 e 8.5.2.3. Apresenta-se na Figura 8.56 a média móvel das velocidades v_p para as regiões definidas na Figura 8.55. A estrutura e a representação da informação são análogas ao apresentado na Figura 8.36.

A Figura 8.56a mostra as fontes de EA localizadas na região dos apoios e a Figura 8.56e mostra a variação da média móvel ao longo do ensaio para essas fontes. A comparação entre a Figura 8.36e a Figura 8.56e mostra que no mármore tanto o aumento da velocidade v_p (que ocorre a partir de 25-30% do carregamento de pico e se estende até aproximadamente o fim do estágio A), quanto o decréscimo da velocidade v_p (que ocorre após o estágio A) são mais marcantes do que no

monzogranito. Isto ocorre tanto nas fontes localizadas na região do apoio superior quanto no apoio inferior do CP. O fato de o mármore apresentar início e propagação mais precoce de microfissuramento faz com que o trecho inicial com registro de sinais e localização de fontes seja maior, tendo-se uma tendência ao acréscimo mais evidente. Além disso, a definição da superfície de ruptura mais precocemente no mármore explica a tendência decrescente mais marcante das velocidades v_p após o estágio A. Consistentemente, no núcleo externo (Figura 8.56g) e região das bordas (Figura 8.56h), observa-se uma tendência semelhante no CP de mármore. Maiores detalhes sobre este efeito são explicados a seguir.

A respeito da magnitude das velocidades v_p na região dos apoios ao longo do ensaio (Figura 8.56e), observa-se que no início do microfissuramento as velocidades são menores do que o valor calculado para o CP na condição intacta (4355m/s). Nesta rocha o processo de transferência de carregamento entre o berço e o CP nos estágios iniciais do ensaio gera mais fontes de EA do que no monzogranito (efeito 1 definido no item 8.5.3.2). Assim, a mistura das fontes de EA devidas à transferência de carregamento (velocidades menores à condição intacta) e ao confinamento (velocidade iguais e maiores à condição intacta) podem gerar velocidades médias móveis menores do que o calculado na condição intacta do CP.

Além disso, o início do microfissuramento nesta rocha também começa no núcleo central, pois os primeiros registros de velocidade v_p na região dos apoios já são influenciados pelo dano induzido no CP, pois a sua condição não é igual à condição inicial intacta. Esse efeito também pode explicar os valores iniciais de velocidade inferiores à condição intacta do CP. Como esperado, perto do pico de carregamento os valores da velocidade média móvel são iguais ou maiores do que o valor calculado na condição intacta, pois o efeito do confinamento (efeito 2 definido no item 8.5.3.2) é predominante na região dos apoios. Ainda na região dos apoios, a tendência ao acréscimo se manteve aproximadamente até depois do fim do estágio A. Após isso, a velocidade média móvel nas regiões do apoio inferior e superior apresenta uma tendência decrescente, porém as suas magnitudes ainda são superiores à registrada na condição intacta do CP. As magnitudes superiores à condição intacta do CP sugerem que na região dos apoios do CP estão agindo simultaneamente o microfissuramento e o confinamento tridimensional (descrito no item 8.5.1.3). A tendência decrescente da velocidade média móvel reflete a maior perda de integridade estrutural do CP de mármore em comparação com monzogranito, pois a propagação e acúmulo de dano é maior e mais precoce nela.

Figura 8.56 – Variação típica da velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios monotônicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região central próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d.

A Figura 8.56f apresenta a variação da média móvel das fontes localizadas no núcleo central do CP. Observa-se que as velocidades registradas nesta região são menores do que aquelas obtidas para o monzogranito, o que reflete o maior acúmulo de dano no núcleo central do CP assim como sua rigidez menor. As velocidades calculadas nessa região são também menores do que aquelas registradas em qualquer outra região do CP, pois é aqui onde se acumula a maior parte do dano, igual ao que ocorre nos CPs de monzogranito. Também igual ao monzogranito, observa-se, no mármore, uma tendência leve ao decréscimo na velocidade média móvel no núcleo central, porém, a sua tendência oscilante diminui ao longo do tempo. No item 8.5.1.3 foi explicada em detalhe uma hipótese que pode explicar a tendência oscilante da velocidade média móvel nas regiões do CP. Assim, foi dito que mesmo na região mais danificada do CP de monzogranito, o efeito progressivo do microfissuramento nessa rocha induz a tendência oscilante. Como no mármore a definição da superfície de ruptura do CP ocorre durante o estágio A, o dano progride nela muito mais rápido do que no monzogranito. Assim, na medida em que o ensaio avança há menos regiões não danificadas, portanto, a oscilação diminui. Na Figura 8.56f observa-se que a maior oscilação na velocidade média móvel ocorre entre o pico de carregamento e o fim do estágio A (aproximadamente entre 1200 e 2000 segundos), assim, as oscilações são cada vez menores, tendo-se quase nenhuma oscilação aproximadamente a partir de 4000 segundos. Em adição ao já dito, as características do mineral que compõe esta rocha (3 planos de clivagem perfeitos) favorecem a propagação de microfissuras de forma conjunta em varias regiões dentro do núcleo central em que as tensões superem a resistência. Em consequência, o núcleo central danifica-se de forma mais distribuída do que no monzogranito, diminuindo os aumentos de velocidade associados ao microfissuramento das regiões menos danificadas.

A Figura 8.56g mostra que na região do núcleo externo a velocidade média móvel apresenta o mesmo tipo de oscilação decrescente observado nas regiões do núcleo central e apoios. Observa-se, também, que a maior parte das fontes encontram-se localizadas na face do plano XY com $Z=-25\text{mm}$ (linha na cor verde claro), em coerência com o maior acúmulo de dano entre $Z=10\text{mm}$ e $Z=-25\text{mm}$. Como explicado no item 8.5.1.3, o percurso das ondas geradas nesta região inclui áreas fora da superfície de ruptura, que permanecem quase intactas ao longo do ensaio no caso de rochas cuja zona de processos seja muito estreita, como no monzogranito. No mármore a zona de processos é mais larga (ver fotomicrografia na condição final do CP na Figura 6.11), portanto, as regiões fora do plano de ruptura encontram-se mais danificadas do que no monzogranito. Assim, velocidades menores que a obtida na condição intacta são esperáveis nas fontes de EA localizadas na região de maior acúmulo de dano i.e., entre $Z=10\text{mm}$ e $Z=-25\text{mm}$ (linha verde claro). Já nas fontes de EA localizadas na região menos danificada i. e., entre $Z=10\text{mm}$ e $Z=25\text{mm}$ (linha verde escuro), esperam-se valores iguais ou

maiores que os obtidos na região mais danificada. No entanto, a pouca quantidade de dados nessa região menos danificada faz com que seja difícil a definição de um padrão bem definido.

A Figura 8.56h apresenta a variação da média móvel obtida das fontes de EA localizadas na região das bordas. Como ocorre com as fontes de EA localizadas na face menos danificada da região do núcleo externo, a tendência das velocidades médias móveis também é obtida com pouca quantidade de dados. De forma semelhante ao observado no monzogranito, as velocidades médias móveis são maiores que o valor obtido na condição intacta do CP. A explicação apresentada no item 8.5.1.3 para tais magnitudes calculadas também poderia ser aplicada aqui. Assim, ao ocorrer flexão nas bordas do CP (região externa das metades do CP), a região interna de cada metade (região central) deve estar em compressão, o que pode gerar confinamento vertical nessa região, aumentando-se os valores de velocidade. Como o mármore apresenta uma zona de processos mais larga do que o monzogranito, a região interna de cada metade do CP encontra-se mais danificada, portanto, embora haja confinamento vertical na região interna das metades do CP, as velocidades médias móveis devem ser proporcionalmente menores que as registradas para o monzogranito. A comparação das Figuras 8.36h e 8.56h mostra que a média das velocidades médias móveis na região das bordas no monzogranito é aproximadamente 29% maior do que a velocidade média registrada na condição intacta do CP, enquanto que no mármore o aumento é de aproximadamente 15%. Essas informações sustentam a hipótese acima descrita, a respeito das tendências na velocidade média móvel na região das bordas em ambas as rochas.

8.5.4 Ensaios cíclicos em mármore

No item 8.5.3 apresentaram-se os resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para um CP de mármore ensaiado em compressão diametral monotônica. De forma análoga ao apresentado no item 8.5.3, expõem-se aqui os resultados obtidos com um CP de mármore, porém, ensaiado em compressão diametral cíclica. Os resultados obtidos, em termos de localização, distribuição do dano, padrão de microfissuramento e velocidade v_p média, são praticamente iguais, com exceção de algumas pequenas variações devidas às diferenças próprias entre dois CPs de rocha. Por isso, apresenta-se a seguir o conjunto de resultados obtidos para um ensaio cíclico em mármore, mantendo-se a mesma estrutura do item 8.5.3 e o mesmo formato para todas as suas Figuras. Adicionam-se alguns comentários apenas nos casos em que haja alguma pequena diferença de comportamento, devida às características próprias do CP em estudo.

8.5.4.1 Padrão de microfissuramento tridimensional

A Figura 8.57 mostra a relação típica de força versus tempo para um ensaio de compressão diametral cíclico em mármore. Foram adicionados dez pontos de controle que representam os estágios em que são apresentados os padrões de microfissuramento definidos por meio das fontes de EA nas Figuras 8.59 e 8.60. Os pontos de controle 1 a 4 foram definidos da mesma forma que na Figura 8.47 (50, 75, 90, 100% do carregamento de pico). Os pontos de controle 5 a 10 representam o fim dos estágios de carregamento A a F (ver Figura 3.5b), respectivamente. Observa-se que até o fim do estágio A, o comportamento do ensaio cíclico apresentado nesta Figura é análogo ao observado na Figura 8.47, pois no mármore a perda de resistência após o pico é gradativa. Assim, a aplicação do primeiro ciclo de descarregamento e recarregamento ocorre para níveis de dano semelhantes aos obtidos para o ponto de controle 5 na Figura 8.47.

Figura 8.57 – Força versus tempo típica em ensaios cíclicos em mármore

A Figura 8.58 mostra a energia absoluta acumulada típica das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), até o fim do estágio A no mármore. Como esperado, a tendência é igual à observada na Figura 8.48, pois até o fim do estágio A não há diferenças significativas na realização de ensaios monotônicos e cíclicos nesta rocha. Assim, todas as análises feitas a respeito da Figura 8.48, incluindo o início do microfissuramento, são também válidas para a Figura 8.58, portanto, não se considera necessário repeti-las.

Figura 8.58 - Energia absoluta acumulada das fontes de EA versus tempo em ensaios cíclicos em mármore

A Figura 8.59 mostra a localização acumulativa típica das fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) para um ensaio cíclico em mármore. O formato e estrutura da Figura é o mesmo apresentado na Figura 8.49 para um ensaio monotônico na mesma rocha. Igual ao observado na Figura 8.49, as ordens de grandeza das energias absolutas registradas mantiveram-se 10 a 20 vezes menores do que aquelas registradas para o monzogranito. As razões para tais diferenças foram apresentadas no item 8.5.3.1. A Imagem 1 da Figura 8.59 mostra fontes de EA localizadas na região central do CP e na região dos apoios. Embora seja observada uma quantidade maior de caixas de clusters na região do apoio superior, o maior acúmulo de fontes do CP ocorre na sua região central, em consistência com o padrão obtido na Imagem 1 da Figura 8.49 e com a definição do início do microfissuramento entre 25 e 30% do carregamento de pico. Já a partir da Imagem 2 da Figura 8.59, é claro o maior acúmulo de energia no centro do CP, assim como o acúmulo de fontes de EA nos apoios superior e inferior do CP.

Figura 8.59 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe)

Igual ao ensaio monotônico em mármore, no ensaio cíclico houve aparecimento de uma fissura vertical centralizada na primeira face do CP no ponto de controle 5, em consistência com o acúmulo de energia nessa face observado na Imagem 5 da Figura 8.59 (face do plano XY para $Z=-25\text{mm}$). No entanto, diferente do observado no ensaio monotônico, entre os pontos de controle 9 e 10 foi observado o aparecimento de uma fissura vertical centralizada na segunda face do CP, também em consistência com o acúmulo de energia na outra face, observado nas Imagens 9 e 10 da Figura 8.59 (face do plano XY para $Z=25\text{mm}$). Isso mostra que o microfissuramento se propaga através da espessura do CP desde uma face até a outra, semelhante ao que ocorre nos CPs de monzogranito. Contudo, o aparecimento da fissura na segunda face do CP no ensaio cíclico e não no monotônico, não significa que haja diferenças significativas na forma em que se desenvolve o processo de propagação de microfissuramento em ambas as rochas, pois o padrão geral se manteve. Portanto, essa diferença deve ser associada a heterogeneidades próprias da rocha.

As Imagens 1 a 10 mostram que o padrão geral de início e propagação de microfissuramento nesta rocha é semelhante ao observado na Figura 8.49, porém, neste caso a ruptura do CP foi mais simétrica. A mudança no padrão de microfissuramento no ponto de controle 5 se manteve como no ensaio monotônico. Além disso, a Figura 8.59 também mostra que no mármore a superfície final de ruptura deste CP já tem sido definida até o fim do estágio A, em coerência com todas as observações prévias feitas a respeito disso.

Cabe ressaltar que em outros ensaios feitos em mármore, o incremento na energia absoluta acumulada assim como o aparecimento das primeiras fontes de EA no centro do CP ocorre um pouco antes ou um pouco depois do mostrado nas Figuras 8.49 e 8.59. Isso ocorre porque mesmo em CPs obtidos de um único bloco de rocha não há nenhum CP exatamente igual a um outro. Assim, espera-se que haja pequenas diferenças entre eles. Contudo, a tendência geral no padrão de microfissuramento se manteve em todos eles. Levando-se o acima exposto em consideração, define-se que, em média o início do microfissuramento em mármore ocorre na faixa 25-30% do carregamento de pico.

A Figura 8.60 mostra a localização acumulativa típica das fontes de EA obtidas com o software AEwin para o ensaio definido na Figura 8.57. O formato e as informações apresentadas na Figura 8.50 são análogos ao da Figura 8.59, o que permite a comparação direta da localização obtida utilizando ambos os programas. As diferenças entre o padrão de microfissuramento obtido com o software AEwin e o programa desenvolvido (CLAPWaVe) são essencialmente as mesmas citadas para o ensaio monotônico em mármore (item 8.5.3.1). Assim, de novo o software AEwin só consegue registrar alguns indícios de início do microfissuramento a partir do ponto de controle 2, consistente com a informação de localização apresentada no item 8.1.4. A partir daí, o software AEwin apresenta um padrão de microfissuramento muito mais distribuído ao longo do eixo de carregamento do que o obtido com o

programa desenvolvido (CLAPWaVe), em que não se observa o esperado acúmulo preferente na região central do CP.

Figura 8.60 – Localização tridimensional acumulativa típica de fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização do software AEwin

A Figura 8.61 mostra a comparação dos padrões de localização típicos obtidos para o estágio A no mármore com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e com o software AEwin. A Figura 8.61 segue o mesmo formato e estrutura que a Figura 8.51, tendo-se no eixo de abscissas os valores absolutos da coordenada Y, adimensionalizados pelo raio r do CP, e no eixo das ordenadas a porcentagem da energia absoluta acumulada em relação ao total de energia absoluta acumulada ao longo do eixo diametral desde $Y=-r$ até $Y=r$. Observa-se que tanto as diferenças entre ambos os programas de localização, quanto a tendência obtida com cada programa são análogas às obtidas para o ensaio monotônico em mármore apresentado na Figura 8.51. Contudo, observa que na Figura 8.51b o acúmulo de energia até a o fim do estágio A é um pouco menor do que o observado na Figura 8.61b. Isto pode ser devido à ruptura não é simétrica do CP da Figura 8.51b, deixando muito menos danificada uma região do CP ao longo do eixo de carregamento. Já no CP da Figura 8.61b, a superfície de ruptura é mais simétrica, acumulando-se dano em toda a sua espessura, gerando maiores níveis de energia ao longo do eixo de carregamento.

Figura 8.61 - Distribuição típica da energia absoluta acumulada ao longo do eixo de carregamento (eixo Y) para os pontos de controles 1 a 5 do estágio A em ensaios cíclicos em mármore. a) Resultados obtidos com o software AEwin. b) Resultados obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe)

A Figura 8.62 mostra a configuração final do ensaio feito no CP de mármore da Figura 8.57. O formato e a estrutura da Figura 8.62 é análoga à Figura 8.52. As Figuras 8.62a e c mostram as duas faces do CP na condição final danificada e às Figuras 8.62b e d mostram fotografias de detalhe e em escala ampliada da região central fissurada no final do ensaio. As Figuras 8.62e e f mostram o padrão de localização obtido pelo programa desenvolvido (CLAPWaVe) e as Figuras 8.62g e h mostram a

localização final obtida com o software AEwin. Como esperado, a superfície de ruptura está muito bem definida em ambas as faces do CP de mármore (ver Figuras 8.62 a, b, c e d), pois a ruptura deste CP foi mais simétrica, atravessando a espessura do CP. Embora ambos os programas consigam definir a superfície de ruptura ao longo do eixo de carregamento, o padrão obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou-se mais ajustado à superfície de ruptura real do CP. O programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou-se, também, mais consistente com a teoria (HONDROS, 1959; CHAU; WEI, 2001). Em realidade, as diferenças no padrão de dano no final do ensaio entre o programa desenvolvido (CLAPWaVe) e o software AEwin são as mesmas citadas no item 8.5.3.1, portanto, todas as análises e comparações apresentadas nesse item são válidas aqui.

De forma análoga ao apresentado no item 8.5.3.1, a Figura 8.63 mostra os histogramas de distribuição típica do erro ε_i médio de minimização obtido para cada fonte de EA localizada, mantendo-se o formato e a estrutura da Figura 8.53. A Figura 8.63 mostra resultados praticamente iguais aos obtidos na Figura 8.53, tanto nos histogramas do erro ε_i médio das fontes filtradas apenas antes da localização (filtragem básica), quanto nos histogramas do erro ε_i médio das fontes filtradas antes e depois da localização (filtragem rigorosa). Estes resultados são consistentes e esperáveis, pois no item 8.5.3.1 concluiu-se que em ensaios iguais feitos sob CPs de rocha homogênea, a qualidade de ajuste está definida, predominantemente, pelo algoritmo de minimização utilizado e pela forma em que se utiliza a informação fornecida e não pelo tipo de rocha.

O restante das comparações e análises feitas a respeito dos histogramas do erro ε_i médio foram apresentados no item 8.5.3.1, pelo que não se considera necessário repeti-las aqui.

Figura 8.62 – Localização de fontes de EA típica na condição danificada final do CP em ensaios cíclico em mármore. a) CP Condição final do CP, face identificada como 123. b) Zoom da área no dentro do retângulo definido em a. c) Condição final do CP, face identificada como 456. d) Zoom da área no dentro do retângulo definido em c. e) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 123. f) Fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) na face identificada como 456. g) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 123. h) Fontes de EA obtidas com o software AEwin na face identificada como 456

Figura 8.63 – Distribuição típica do erro de minimização em ensaios cíclicos em mármore. a) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem básica. b) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), aplicando filtragem básica. c) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o software AEwin, aplicando filtragem rigorosa. d) Histograma associado as fontes de EA obtidas com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) aplicando filtragem rigorosa

8.5.4.2 Velocidade média associada ao processo de localização tridimensional

A Figura 8.64 apresenta as análises das variações acumulativas típicas da velocidade de propagação de ondas v_p no tempo e no espaço, para um ensaio cíclico em mármore, igual ao exposto no item 8.5.3.2 para um ensaio monotônico na mesma rocha. A visualização das variações da

velocidade de propagação de ondas v_p ao longo do tempo é realizada utilizando-se os pontos de controle definidos na Figura 8.57. A estrutura e apresentação são iguais à Figura 8.54.

Os ensaios das Figura 8.47 e 8.57 foram feitos no mesmo tipo de rocha, mas no ensaio da segunda Figura foram aplicados ciclos de descarregamento e recarregamento. Como o mármore apresenta perda de resistência gradativa e após o pico de carregamento (e mais estável do que no monzogranito), o efeito da aplicação do primeiro ciclo de descarregamento quase não muda as condições de propagação de microfissuramento no CP. Além disso, nos ciclos de descarregamento e recarregamento o microfissuramento recomeça apenas quando o carregamento atinge a curva virgem (estágio B a F), de acordo ao efeito Kaiser (LAVROV et al., 2002). Pelo exposto, o comportamento nos ensaios cíclicos e monotônicos em mármore deve ser quase igual. Como esperado, a Figura 8.64 mostra uma distribuição de velocidades v_p nos diferentes pontos de controle praticamente igual à Figura 8.54. Assim, observa-se a mesma distribuição das velocidades v_p inferiores á obtida na condição intacta (4056m/s), gerando-se um núcleo central mais fraco no CP. Na região dos apoios, observa-se a presença dos três efeitos descritos no item 8.5.3.1, os quais se apresentam da mesma forma que na Figura 8.54. Assim, o efeito 1 é preponderante na região dos apoios até a Imagem 3 da Figura 8.64, a Imagem 4 dessa Figura mostra a mistura dos efeitos 1 e 2, enquanto que desde a Imagem 5 em diante o efeito número 2 é predominante. Igual ao observado na Figura 8.54, as fontes de EA associadas ao efeito número 3 começam a se acumular desde os pontos de controle 4 e 5, porém, o acúmulo ocorre predominantemente na aresta inferior do CP, na face em que $Z=-25\text{mm}$. A vista lateral do CP (plano YZ) no fim do ensaio, apresentada na Imagem 10 da Figura 8.64, mostra o acúmulo dessas fontes de EA com velocidades v_p baixas (na cor amarela) na região próxima de $Z=-25\text{mm}$ e $Y=-50\text{mm}$.

Figura 8.64 – Distribuição típica da velocidade v_p média associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore

8.5.4.3 *Análise espacial das fontes de EA associadas ao processo de localização tridimensional*

A Figura 8.65 apresenta a energia absoluta acumulada nas fontes de EA ao longo de um ensaio cíclico em mármore, para as quatro regiões definidas no item 8.5.1.3 (região dos apoios, núcleo central, núcleo externo e região das bordas). A estrutura e a apresentação das informações da Figura 8.65 são análogas à Figura 8.55, portanto, as explicações em relação ao seu formato são também válidas aqui.

Como dito no item 8.5.4.2, o microfissuramento ocorre apenas nos estágios A a F, portanto, os acréscimos de energia absoluta ocorrem apenas nos estágios A a F, enquanto que nos estágios I a V a energia absoluta se mantém constante (em coerência com o efeito Kaiser). Assim, desconsiderando-se os estágios I a V, observa-se que as Figuras 8.65 e 8.55 apresentam tendências semelhantes, especialmente na região dos apoios e do núcleo central, em consistência com o comportamento observado em ambos os ensaios nos itens 8.5.4.1 e 8.5.4.2.

A Figura 8.65e mostra um acúmulo maior de energia absoluta no apoio superior do CP até o fim do ensaio, em coerência com o padrão de microfissuramento observado na Figura 8.59. A tendência dos estágios A a F da Figura 8.65f mostra-se igual à Figura 8.55f. Diferente da Figura 8.55g, a Figura 8.65g mostra o acúmulo de energia absoluta ocorre nas duas faces do CP, em consistência com a sua superfície de ruptura mais simétrica. Como observado na Figura 8.59, o dano concentra-se em uma das faces do CP (face 456 na Figura 8.62), e logo atravessa a espessura do CP até a outra face (face 123 na Figura 8.62). Assim, as maiores energias absolutas ocorrem primeiro na face 456 (identificada com uma linha na cor verde claro na Figura 8.65g) e logo após o dano ter progredido nela começa o microfissuramento na face 123 (identificada com uma linha na cor verde escuro na Figura 8.65g). Consistentemente, neste ensaio observa-se o aparecimento de fissuras verticais centralizadas em ambas as faces do CP.

Figura 8.65 – Variação típica da Energia absoluta acumulada das fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região central próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em a. f) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em b. g) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em c. h) Energia absoluta das fontes de EA identificadas em d.

A Tabela 8.4 mostra que as ordens de grandeza das energias registradas nas quatro regiões do CP são semelhantes entre si, assim como são semelhantes às apresentadas na Tabela 8.3. Portanto, as fontes de EA calculadas para as quatro regiões podem ser associadas a processos de microfissuramento. As Tabelas 8.3 e 8.4 mostram que a proporção de fontes de EA nas quatro regiões são semelhantes, porém na região das bordas observa-se uma proporção maior no CP de mármore da Figura 8.57. Considerando-se que o CP de mármore da Figura 8.57 apresentou uma ruptura muito mais simétrica do que naquele da Figura 8.47, a separação das metades do CP é mais definida através da sua espessura. Assim, o processo de microfissuramento por flexão das metades dos CP desenvolve-se de forma mais apropriada, aumentando a proporção de fontes de EA na região das bordas e a energia acumulada (ver Figura 8.65h).

Tabela 8.4 - Energia absoluta média das fontes de EA e proporção de fontes por zonas para um ensaio cíclico em mármore. Definição das zonas de acordo a Figuras 8.65 e 8.66

Zona	Proporção do total de fontes de EA (%)	Energia absoluta média (aJ)
Apoios	27,44	3,951E+03
Núcleo central	65,50	5,778E+03
Núcleo externo	5,33	5,705E+03
Bordas	1,74	1,444E+03

A Figura 8.66 apresenta a média móvel das velocidades para as regiões definidas na Figura 8.65. A estrutura e a representação da informação são análogas ao apresentado na Figura 8.56. Desconsiderando-se os estágios I a V, as Figuras 8.56 e 8.66 apresentam as mesmas tendências, incluindo as magnitudes das velocidades em cada região. Por isso, as explicações e análises feitas no item 8.5.3.3 são válidas aqui. Contudo, é importante ressaltar que como o CP de mármore desta Figura rompe de forma mais simétrica, a quantidade de fontes de EA calculadas em cada face da região das bordas é também semelhante. Isto permite observar com maior facilidade o comportamento semelhante das velocidades médias móveis na região.

Figura 8.66 – Variação típica da velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA em ensaios cíclicos em mármore. Utilização de Programa desenvolvido (CLAPWaVe). a) Fontes de EA na região de contato entre o CP e o berço. b) Fontes de EA no núcleo central do CP. c) Fontes de EA na região próxima da superfície do CP. d) Fontes de EA não incluídas em a, b e c. e) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em a. f) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em b. g) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em c. h) Velocidade média móvel associada ao cálculo das fontes de EA identificadas em d

9 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA INTRINSECA DE ROCHAS POR MEIO DE LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE EA

A literatura apresenta diversas pesquisas focadas á modelagem computacional do processo de microfissuramento de materiais quase frágeis, como rochas e concreto (CHEN; YUE; THAM, 2004; DIEDERICH, 1999; FANG; HARRISON, 2002a, 2002b; JI et al. 2014; LANARO; SATO; STEPHANSSON, 2009; LAVROV et al., 2002; LIU; KOU; LINDQVIST, 2002; LIU et al., 2004, 2007; MA; WANG; REN, 2011; TANG et al., 2000; ZHU; TANG, 2004; WONG et al., 2006; WONG et al., 2006). Nessas pesquisas a variabilidade das propriedades mecânicas do material é definida por meio da introdução de descontinuidades aleatórias no interior do CP, por meio da utilização de uma função de distribuição para a resistência à tração ou para o módulo de elasticidade a cada elemento de rocha do CP, ou até mesmo utilizando-se os valores de resistência macroscópica do CP para calibrar alguma distribuição de propriedades intrínsecas do mesmo. No entanto, nenhuma das metodologias utilizadas na literatura, e acima citadas, tem sido validada com dados experimentais de resistência ou rigidez obtidos do interior do CP. Pesquisas têm demonstrado que a atribuição da resistência à tração da rocha intacta em cada ponto do CP define a localização do início do microfissuramento e a sua propagação (LANARO; SATO; STEPHANSSON, 2009; DIEDERICH, 1999; YUE et al., 2003). Portanto, a obtenção de uma função de distribuição das propriedades mecânicas no interior do CP mais realista é fundamental no aprimoramento das modelagens computacionais do processo progressivo de dano no mesmo.

Das metodologias para definir a heterogeneidade do CP, referidas no parágrafo anterior, a função de distribuição de Weibull (WEIBULL, 1951) é a mais comumente utilizada para introduzir a variabilidade na resistência à tração de cada elemento do CP é (WONG et al., 2006). Assim, pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de estimar os parâmetros da função de distribuição de Weibull associada à resistência de diferentes tipos de rochas ou concreto (AMARAL; FERNANDES; ROSA, 2008; NAKAMURA; MICHEL; SETOH, 2007; WONG et al., 2006; XIE; GAO, 2000;). Amaral, Fernandes e Rosa (2008) e Nakamura, Michel e Setoh (2007) utilizam apenas os resultados macroscópicos de resistência de pico de vários ensaios feitos em CPs semelhantes para realizar a calibração da distribuição da resistência intrínseca da rocha. Xie e Gao (2000) fizeram ensaios de compressão uniaxial em pequenos CPs de 25x10x1.5mm e registraram a evolução das microfissuras, incluindo comprimento, densidade e quantidade acumulada de microfissuras no tempo. Os autores utilizaram essa informação para desenvolver uma formulação estatística para a distribuição da resistência da rocha, baseando-se na teoria do elo mais fraco (*weakest link theory*) e em uma distribuição fractal de

microfissuras. Wong et al.(2006) utilizaram os conceitos da mecânica da fratura elástica linear e a densidade e distribuição dos comprimentos das microfissuras preexistentes em CPs para determinar os parâmetros da distribuição de Weibull associados à probabilidade de ruptura dos mesmos. No entanto, em nenhuma dessas pesquisas há registro de tensões determinadas no interior do CP ou informação da localização das microfissuras para determinar padrões de distribuição da resistência. Por outro lado, Dai et al. (2012) aplicou a técnica de emissão acústica em ensaios de flexão em vigas de concreto com fissuras induzidas (*single notched*) em diferentes localizações do CP e com diferentes comprimentos. Os autores relacionaram a quantidade acumulada de eventos de EA com a abertura na ponta da fissura previamente criada no CP, ajustando-se aos dados os parâmetros de uma função de distribuição de Weibull. Contudo, o monitoramento com EA, o uso de microscópio eletrônico ou de outras técnicas de avaliação do processo de microfissuramento em CPs de rocha ou concreto não tem sido utilizado ainda para se aferir a distribuição intrínseca da variabilidade da resistência à tração dos mesmos. Assim, neste capítulo se apresenta uma metodologia que permite visualizar a distribuição das resistências no interior dos CPs de rocha na medida em que o processo de microfissuramento ocorre. Os resultados da localização tridimensional das fontes de EA obtidos com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) (capítulo 8) são utilizados para estimar as distribuições de resistência intrínseca em CPs de mármore e monzogranito.

9.1 Metodologia de cálculo da distribuição da resistência intrínseca em CPs de rocha

O programa desenvolvido (CLAPWaVe) apresentado no capítulo 8 permitiu localizar as fontes de EA geradas no processo de carregamento dos CPs de rocha durante o ensaio de compressão diametral. Utilizam-se as coordenadas das fontes de EA para estimar as resistências da rocha nesses pontos, pois sabe-se que tais emissões acústicas ocorrem quando uma microfissura se propaga. Assim, quando alguma região do CP emite sinais de EA significa que essa região atingiu a sua resistência máxima, rompendo nessa região. Baseado no acima exposto, seleciona-se um conjunto apropriado de fontes de EA para se calcular o seu estado de tensões, aquelas que na condição limite de resistência são empregadas para se obter a distribuição de resistência intrínseca do CP. No item 9.1.1 descreve-se o procedimento de seleção das fontes de EA utilizadas no cálculo de resistência e no item 9.1.2 descreve-se a metodologia utilizada para calcular tais resistências.

9.1.1 Seleção e filtragem das fontes de EA

Do total de fontes de EA localizadas durante um ensaio de compressão diametral monotônico ou cíclico, selecionam-se apenas aquelas localizadas desde o início do microfissuramento na rocha até 90% do carregamento de pico no trecho pós-pico. No capítulo 8 estabeleceu-se que o início do microfissuramento no monzogranito ocorre entre o 75 e o 85% do carregamento de pico. Por isso, até o pico de carregamento a quantidade de fontes de EA localizadas é pequena, tendo-se pouco dano nessa rocha; em consequência tem-se informação insuficiente para se definir uma distribuição de resistência no CP. Levando isso em consideração, adicionam-se aquelas fontes de EA localizadas entre o pico de carregamento e 90% do pico no trecho pós-pico. Nesse trecho inicial pós-pico, ainda não tem sido formada uma macrofissura no CP nesta rocha nem no mármore, pelo que se considera razoável incluir essas informações de microfissuramento em ambas as rochas. Assim, considera-se o mesmo trecho do ensaio para ambas as rochas estudadas, embora a quantidade de fontes de EA no mármore seja maior, pois nessa rocha o início do microfissuramento é mais precoce que o monzogranito.

As fontes selecionadas de acordo com o tempo são filtradas pela sua localização e pela distância entre elas. A primeira filtragem permite selecionar aquelas fontes de EA localizadas na região central do CP, desconsiderando aquelas associadas a processos de ajuste na transferência do carregamento entre o CP e o berço. Além disso, no capítulo 8.5 foi estabelecido que na região central inicia e progride o microfissuramento durante o estágio A de carregamento. Assim, a filtragem por localização considera as fontes cuja coordenada Y (eixo do carregamento) encontra-se entre $-0.75r \leq Y \leq 0.75r$. A filtragem pela distância entre as fontes de EA considera selecionar apenas as fontes de EA que se encontram separadas o suficiente das outras fontes de EA. O intuito é selecionar eventos iniciados em microfissuras naturais da rocha (que tendem a ter comprimentos mais uniformes) excluindo locais onde a coalescência já levou a tamanhos maiores de trincas. Garantido um tamanho uniforme de microfissuras, a variação da tensão de tração necessária para que aconteça um evento de EA estará diretamente ligado à variação do valor local de tenacidade à fratura do material. Dessa maneira, tem-se um conjunto de microfissuras isoladas, em que a região ao redor delas pode ser considerada como mantendo-se em condição elástica linear. As fotomicrografias de ambas as rochas apresentadas no capítulo 6 mostram que nos estágios iniciais do microfissuramento o comprimento das microfissuras é pequeno (inferior a $200\mu\text{m}$) e as suas espessuras são desprezíveis em comparação aos seus comprimentos. Portanto, considera-se que uma distância de 2mm entre fontes localizadas é suficiente para considerá-las localmente isoladas.

9.1.2 Cálculo da resistência associada a cada fonte

Para calcular o estado de tensões associado a cada fonte de EA utilizam-se as expressões propostas por Hertz em 1859 e apresentadas no capítulo 1 deste documento (equações 1.1 a 1.5).

Para se obter a resistência intrínseca à tração da rocha associada a cada fonte de EA localizada é necessária a obtenção da tensão principal de tração em qualquer ponto (x,y) do disco, a que é definida com a seguinte equação:

$$\sigma_1 = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \sigma_{xy}^2} \quad (9.1)$$

Como não se conhecem os comprimentos das microfissuras, não é possível avaliar a tenacidade à fratura. O tratamento dos resultados será então realizado em termos do valor da tensão de tração.

Assumindo que ruptura do CP ocorre quando é atingida a máxima tensão principal de tração no CP, a relação:

$$\sigma_{1pico} = \frac{F_{pico}}{\pi \cdot r \cdot t} \quad (9.2)$$

Permite calcular a tensão de ruptura do CP, em que F_{pico} é a resistência de pico.

9.2 Histogramas de distribuição da resistência intrínseca

Os resultados das tensões calculadas para cada fonte de EA selecionada de acordo com definido no item 9.1 são apresentados na forma de histogramas na Figura 9.1.

Como o mármore e o monzogranito apresentam comportamentos geomecânico diferentes, os níveis de carregamento máximo atingidos nos CPs (força F) são menores no mármore do que no monzogranito (ver capítulo 5). Assim, a comparação direta das distribuições de resistência intrínseca em um CP entre ambas as rochas não pode ser feita considerando-se os valores obtidos com a equação 2.6. Por isso, nos histogramas da Figura 9.1 são apresentadas as distribuições de resistência intrínseca de tração de forma adimensional. A resistência intrínseca de tração adimensional é obtida dividindo os valores da resistências à tração principal σ_1 (equação 9.1) pelo valor da resistência

máxima obtida no ensaio σ_{1pico} (equação 9.2). Dessa maneira, em qualquer rocha se tem $0 \leq \sigma_1 / \sigma_{1pico} \leq 1$, portanto a variabilidade das distribuições de resistência pode ser avaliada e comparada.

As distribuições de resistência intrínseca adimensional $\sigma_1 / \sigma_{1pico}$ em ambas as rochas se ajustam a funções de distribuição de Weibull. A média, desvio padrão e coeficiente de correlação obtidos do ajuste da Figura 9.1a e b apresentam-se na Tabela 9.1.

Figura 9.1 – Histogramas típicos de resistência intrínseca das rochas. a) Monzogranito. b) Mármore. As tensões são adimensionalizadas pela tensão σ_{1pico} que é o valor limite máximo de tensão de tração no CP

Tabela 9.1 - Parâmetros estatísticos associados à qualidade de ajuste dos histogramas de resistência intrínseca $\sigma_1 / \sigma_{1pico}$ da Figura 9.1 a uma distribuição de Weibull

Parâmetros	Monzogranito	Mármore
Média	0,92	0,81
Desvio padrão	0,06	0,15
Coeficiente de variação, σ/μ (%)	6,00	19,16

A Figura 9.1a mostra que no monzogranito a maior porção de fontes de EA apresenta níveis de tensão $\sigma_1 / \sigma_{1pico}$ na faixa 0.8-1. Em contraste, a Figura 9.1b mostra que no mármore a ruptura da rocha ocorre para níveis muito variáveis de tensão $\sigma_1 / \sigma_{1pico}$, concentrando-se a maior porção de fontes de EA na faixa 0.5-1. Além disso, a Tabela 9.1 mostra que a tensão intrínseca de tração $\sigma_1 / \sigma_{1pico}$ média no monzogranito foi muito mais próxima da resistência máxima do ensaio do que no mármore (0,92 versus 0,81) e que a variabilidade na resistência intrínseca $\sigma_1 / \sigma_{1pico}$ foi

aproximadamente três vezes menor no monzogranito do que no mármore (6 versus 19,16). Isso sugere que no monzogranito a ruptura ocorre concentrada em níveis muito próximos da resistência máxima de pico σ_{1pico} , valor considerado na literatura como representativo da resistência máxima de tração da rocha. Já no mármore a ruptura ocorre distribuída desde níveis baixos de tensão, menores que o valor de resistência máxima de pico σ_{1pico} . Assim, quanto maior a variabilidade na distribuição das resistências intrínsecas em um CP e menores os níveis iniciais em que ocorre ruptura da rocha, maior será a diferença entre os valores de resistência à tração da rocha reais e o valor obtidos utilizando-se a resistência máxima do ensaio (equação 9.2). Portanto, o valor constante e definido como a resistência à tração da rocha intacta não é representativo da condição real da rocha.

A Tabela 9.2 apresenta os valores médios dos parâmetros estatísticos obtidos para os outros ensaios feitos em mármore e monzogranito que apresentam informação adequada para a obtenção dos histogramas. A forma dos histogramas obtidos para os outros CPs mostra a mesma tendência dos apresentados na Figura 9.1. Além disso, observa-se que os parâmetros estatísticos obtidos na Tabela 9.1 são semelhantes aos da Tabela 9.2. Assim, a Figura 9.1 representa as distribuições típicas de resistência intrínseca σ_1/σ_{1pico} para ambas as rochas.

Tabela 9.2 - Resumo dos parâmetros estatísticos médios associados à qualidade de ajuste dos histogramas de todos os ensaios utilizados nas análises de resistência intrínseca σ_1/σ_{1pico} uma distribuição de Weibull

Parâmetros	Monzogranito	Mármore
Média	0,94	0,79
Desvio padrão	0,06	0,17
Coefficiente de variação, μ/σ (%)	5,89	22,44

A estrutura imbricada do monzogranito e a distribuição aproximadamente homogênea dos minerais que a compõem faz com que a resistência à propagação de microfissuras seja semelhante em qualquer lugar do CP, portanto, a ruptura do material começa e progride naquelas regiões em que o ensaio de compressão diametral induz níveis maiores de tensão. Assim, a estrutura do monzogranito poderia ser considerada como estatisticamente homogênea e isotrópica no nível microscópico. Isto permite explicar tanto a distribuição de fontes de EA mais localizada nesta rocha (ver item 8.5) quanto a distribuição estreita de resistências intrínsecas adimensionais σ_1/σ_{1pico} . O mármore apresenta uma estrutura monominerálica formada por cristais de calcita que possuem três planos de clivagem perfeitos, orientados em qualquer direção. A propagação de microfissuras nesta rocha segue os planos de clivagem. Assim, a presença de planos de fraqueza nos cristais de calcita faz com que a

resistência à propagação de microfissuras seja dependente não apenas da magnitude da tensão de tração em cada região, mas também da relação entre a direção principal de tração e a orientação dos planos de fraqueza. Dessa maneira, não necessariamente ocorrerá ruptura da rocha na região de máxima tração do CP, pois a resistência é dependente da orientação dos planos de clivagem dos cristais de calcita. Essa relação entre resistência dos minerais e tensão aplicada no interior do CP permite explicar a presença de microfissuras em níveis baixos de carregamento. O acima citado em relação ao mármore é consistente com a distribuição mais larga de resistências intrínsecas adimensionais $\sigma_1/\sigma_{1\text{pico}}$ (maior variabilidade) assim como com o início mais precoce do microfissuramento e com uma localização de fontes de EA mais distribuída (ao longo do eixo de carregamento do CP) do que no monzogranito.

10 CONCLUSÕES

A caracterização do processo de microfissuramento em corpos de prova (CPs) de mármore e monzogranito submetidos a ensaios de compressão diametral com controle de deslocamento foi realizada por meio de monitoramento com emissão acústica (EA) e complementado com análises petrográficas, análises das curvas de força versus deslocamento e exame visual. A partir do monitoramento com EA fizeram-se análises dos parâmetros de energia absoluta, amplitudes, frequência média e tempo de subida e dos sinais no domínio das frequências assim como localização das fontes de EA durante o ensaio. A localização das fontes de EA foi feita com o software AEwin e com um programa desenvolvido (*Crack Location by Acoustic emission with P wave velocity determination*, CLAPWaVe) durante esta pesquisa. Diferentemente da prática usual consagrada na literatura de considerar a velocidade de propagação constante ao longo do processo de fraturamento durante todo o ensaio, o algoritmo do software desenvolvido incorporou a possibilidade de mudança daquela variável. Adotou-se um processo iterativo em que se minimizam erros não só de coordenadas das fontes de EA como também da velocidade de propagação para cada evento. Além disso, com os resultados dos ensaios de compressão diametral, foram calculadas as propriedades elásticas E e ν assim como a tenacidade à fratura dos CPs. Foram realizados ensaios monotônicos e cíclicos em ambas as rochas. No caso dos ensaios cíclicos os ciclos foram aplicados após o carregamento de pico com o intuito de calcular a tenacidade à fratura.

Em ambas as rochas, a comparação entre resultados do software AEwin e do programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou diferenças no padrão de localização das fontes de EA, principalmente na detecção do início do microfissuramento e na definição das regiões de maior acúmulo de dano. Em ambas as rochas o programa desenvolvido (CLAPWaVe) detectou o início do microfissuramento antes do software AEwin. Em termos de localização do dano no início do microfissuramento, o padrão obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou-se mais consistente com a teoria do que o software AEwin. Foi possível detectar as regiões de concentração de dano em cada fase do ensaio. Assim, a distribuição de fontes de EA no início do microfissuramento obtido com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostra o acúmulo de fontes de EA na vizinhança do centro do CP, enquanto que com o software AEwin isso nem sempre ocorre e nos casos em que ocorre a distribuição das fontes apresenta muita maior dispersão e menor acúmulo de energia. Por outro lado, o programa desenvolvido (CLAPWaVe) revelou que em ambas as rochas o dano acumula-se preferencialmente em algumas regiões do CP em diferentes fases do ensaio, enquanto que o software AEwin mostra uma distribuição mais homogênea de fontes de EA ao longo do eixo de carregamento.

Assim, no padrão de dano obtido com o software AEwin, a esperada concentração de energia absoluta e fontes de EA no centro do CP é muito menos definida do que com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). Observa-se uma concentração na região dos apoios, porém muito menos marcante do que a obtida com o programa desenvolvido (CLAPWaVe). O padrão apresentado pelo software AEwin mostra-se menos consistente em relação à distribuição de tensões nos CPs carregados em compressão diametral que a literatura apresenta. Além disso, a avaliação da capacidade de minimização do algoritmo de localização de ambos os programas mostrou que no programa desenvolvido (CLAPWaVe) a maior concentração de fontes de EA apresenta um erro de ajuste muito menor do que no software AEwin.

O comportamento força versus deslocamento exibido pelo monzogranito foi o mesmo em ensaios monotônicos e cíclicos, incluindo a comparação entre ensaios feitos com CPs extraídos de diferentes blocos de amostra. O trecho pré-pico caracterizou-se por ser essencialmente linear, observando-se uma leve diminuição da rigidez nos CP entre 75% e 90% do carregamento de pico, mas, a perda brusca de rigidez ocorre apenas desse ponto em diante. Consistentemente, a localização tridimensional de fontes de EA obtida com o programa desenvolvido (CLAPWaVe), mostrou que o início do microfissuramento em monzogranito ocorre aproximadamente na faixa 75-85% do carregamento de pico e localiza-se na vizinhança do centro do CP. Ainda no trecho pré-pico, inicia-se o acúmulo de fontes de EA na região próxima dos apoios do CP, associadas à transferência de carregamento do berço ao CP. No entanto, o efeito do microfissuramento na vizinhança do centro do CP é preponderante em relação ao microfissuramento na região dos apoios. Em coerência com a localização, os níveis de contagem e energia absoluta acumulada são quase nulos até o início do microfissuramento, tendo-se uma taxa de aumento leve em ambos os parâmetros até o 90% do carregamento de pico. Desse ponto em diante observou-se um aumento dramático na taxa de acréscimo. As análises no domínio das frequências mostraram que as emissões prévias ao início do microfissuramento apresentam um conteúdo estreito de frequências, concentrando-se, preferencialmente, na faixa de 100-150kHz, sendo essa faixa de frequências predominante do sistema de EA. Em contraste, quando o dano se inicia no CP, a propagação de microfissuras é caracterizada pela emissão de sinais de EA de banda larga, tendo-se, assim, emissões em toda a faixa de frequências que o equipamento pode coletar. Essa variação no conteúdo de frequências no ensaio ocorre consistentemente com o instante de início do microfissuramento definido pela localização de fontes de EA e pelos parâmetros de EA. As análises petrográficas realizadas para o trecho pré-pico também estiveram em conformidade com as conclusões obtidas por meio do monitoramento com EA. Uma vez alcançada a resistência de pico, o microfissuramento no CP torna-se mais denso e localizado no centro do CP. Desse ponto em diante observou-se, também, o acúmulo de fontes de EA em uma

das faces do CP, criando-se uma fissura macroscópica na superfície do CP e aumentando a degradação da resistência e da rigidez da rocha. Isso tudo se encontra em coerência com a observação experimental da geração e da propagação de uma fissura macroscópica na mesma face do CP. A localização de fontes de EA na região dos apoios torna-se mais densa, embora, o acúmulo maior de energia absoluta ainda ocorra no núcleo central do CP. O trecho pós-pico do monzogranito caracteriza-se por apresentar uma diminuição brusca na curva de força versus deslocamento e um pico marcante nos níveis de contagem de EA e a energia absoluta liberada nos CPs. Além disso, nesse trecho a redução na AF e o aumento no RA (RT/A), mostram a flexibilização do CP e o surgimento de emissões cujo modo de ruptura é predominantemente de cisalhamento, o que se associa à geração da fissura macroscópica acima referida. Nos restantes ciclos de descarregamento e recarregamento dos ensaios cíclicos o microfissuramento recomeça apenas quando o carregamento atinge a curva virgem, coerentemente como efeito Kaiser. Consistentemente, as análises no domínio das frequências mostram que apenas nesses trechos virgens do recarregamento são observadas emissões de banda larga, semelhantes àquelas observadas a partir do início do microfissuramento. O trecho de resistência residual nos ensaios monotônicos e o trecho virgem dos ciclos de recarregamento nos ensaios cíclicos caracterizam-se por apresentarem níveis de contagem e energia absoluta semelhantes àqueles registrados na vizinhança do pico de carregamento, ou mesmo maiores. Nesse trecho a localização tridimensional mostra o avanço do fissuramento através do plano central do CP desde uma das faces até a outra, consistentemente com a observação visual de uma fissura vertical centrada em sua outra face. A tendência crescente no RA e decrescente na AF (anticíclica em relação ao RA) sugere uma transição gradativa entre o modo de ruptura por tração para modos com predominância de cisalhamento. Assim, as duas tendências gerais sugerem a transição entre o modo de ruptura por tração (no início do ensaio) para modos que incorporam cisalhamento.

Nos ensaios realizados em mármore, a relação força versus deslocamento foi menos frágil do que no monzogranito, tendo-se um pequeno patamar no pico de resistência e uma queda gradativa no pós-pico. Além disso, o comportamento força versus deslocamento dos diferentes ensaios feitos nesta rocha apresentou maior dispersão do que no monzogranito. A tendência geral observada nos parâmetros de EA (contagem, energia absoluta, AF e RA) é semelhante àquela obtida nos ensaios em monzogranito, mas as mudanças são menos marcantes. As regiões em que a localização tridimensional de fontes de EA mostrou as maiores concentrações de dano no CP é também análoga ao observado no monzogranito, porém, o dano nesta rocha inicia-se mais precocemente. Assim, o trecho pré-pico caracterizou-se por apresentar um pequeno segmento aproximadamente linear somente até o 25-30% do carregamento de pico. Desse ponto em diante observa-se uma diminuição gradativa da rigidez, tendo-se que a taxa de degradação da rigidez aumenta na medida em que o

carregamento se aproxima do pico. Consistentemente, a localização tridimensional de fontes de EA obtida com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) mostrou que o início do microfissuramento em mármore ocorre aproximadamente na faixa 25-30% do carregamento de pico e localiza-se na vizinhança do centro do CP. No entanto, a localização dessas fontes ocorre mais distribuída na região do núcleo central do que no monzogranito. As análises petrográficas realizadas para o trecho pré-pico são consistentes com esse padrão de dano mais distribuído nos CPs de mármore do que nos de monzogranito. Além disso, no mármore houve concentração de fontes de EA localizadas na região dos apoios, semelhante ao observado no monzogranito. Igual ao monzogranito, as análises no domínio das frequências mostraram um conteúdo estreito de frequências antes do início do microfissuramento e de banda larga quando há propagação do microfissuramento. O trecho pós-pico caracteriza-se pelo pico de contagem e energia, mas de forma gradativa distribuída ao longo do patamar exibido pela rocha. A intensidade das energias liberadas nesta rocha também foi menor do que no monzogranito, pois o mármore apresenta um comportamento menos frágil e explosivo do que o monzogranito devido às microfissuras prévias decorrentes da clivagem e ao menor valor de tenacidade à fratura. Assim, no fim do ensaio, as ordens de grandeza das energias absolutas acumuladas nesta rocha são 10 a 20 vezes menores do que as registradas no monzogranito. A frequência média exibiu uma diminuição suave e o parâmetro RA um leve aumento, mostrando incorporação de modos de ruptura por cisalhamento. A localização tridimensional mostrou que as fontes de EA continuam a se acumular preferentemente no núcleo central do CP assim como na região dos apoios, porém no pico inicia-se a concentração de fontes de EA em uma das faces do CP. Consistentemente, nesse estágio observa-se o fissuramento macroscópico nessa face do CP, assim como registra-se a maior taxa de degradação da resistência e da rigidez da rocha. Esse comportamento mostrou-se coerente com o registro de velocidades de propagação de ondas mais baixas na região. Nesse instante a maior parte da superfície final de ruptura do CP no mármore já foi definida. No trecho restante dos ensaios, associados à resistência residual nos ensaios monotônicos e ao trecho virgem dos restantes ciclos de carregamento nos ensaios cíclicos, o microfissuramento continua a se acumular na superfície de ruptura do CP já definida, propagando-se através da espessura do mesmo, desde uma face até a outra, semelhante ao que ocorre nos CPs de monzogranito.

No monzogranito o processo de dano se estende até o fim do ensaio, definindo-se gradativamente a superfície de ruptura do CP. Em contraste, o padrão geral de dano nos CPs de mármore é definido ao redor do carregamento de pico do ensaio, o que inclui o trecho de maior diminuição de resistência após o pico.

As análises das velocidades de propagação de ondas calculadas junto das coordenadas das fontes de EA com o programa desenvolvido (CLAPWaVe) forneceram informações importantes e até

agora desconhecidas a respeito da distribuição e evolução do dano no interior do CP assim como das variações de rigidez no interior do CP ao longo do ensaio. Em ambas as rochas, identificaram-se quatro zonas de acúmulo de dano: região dos apoios, núcleo central, núcleo externo e de região das bordas. A região dos apoios corresponde às fontes localizadas na região dos apoios entre o CP e o berço, enquanto que o núcleo central é associado às fontes localizadas no centro do CP e ao redor dele, e o núcleo externo às fontes localizadas na região central do CP, porém, próximas às faces do CP. Essas três regiões localizam-se ao longo do eixo de carregamento, formando, assim, a conhecida superfície de ruptura que se estabelece nos CPs submetidos a ensaios de compressão diametral. A região das bordas do CP corresponde a uma região de microfissuramento secundário produzido como consequência do processo de dano primário na superfície de ruptura do CP, pois ocorre depois que o dano progrediu nas outras três regiões. A flexão na borda exterior das metades do CP ao longo do eixo horizontal X induz microfissuramento por tração nas bordas do CP, fora da região dos apoios. Desde o início do microfissuramento pode-se observar em ambas as rochas a criação de um núcleo central danificado, em que as velocidades são muito menores do que a registrada na condição intacta do CP, o que reflete a propagação do dano e a degradação da rigidez de forma localizada nessa região. Na região dos apoios observa-se, predominantemente, o efeito do confinamento tridimensional produzido pelo berço, que aumenta na medida em que o carregamento cresce. Esse confinamento aumenta a rigidez do CP localmente, produzindo fontes de EA cujas velocidades de propagação de ondas são iguais ou maiores do que as obtidas na condição intacta do CP. Na região do núcleo externo as velocidades são próximas do valor médio na condição intacta, pois embora haja microfissuramento se propagando na região, o percurso das ondas até os sensores de EA inclui áreas fora da zona de dano, que permanecem quase intactas ao longo do ensaio. Essas conclusões são consistentes com a geração esperada de dano localizado ao longo do eixo de carregamento dos CP, enquanto o restante do CP permanece quase intacto. Fora do eixo de carregamento (superfície de ruptura do CP) detectam-se apenas algumas fontes de EA na região das bordas do CP, associadas a níveis baixos do microfissuramento secundário por flexão nessa região. Em ambas as rochas o maior acúmulo de fontes de EA ocorre no núcleo central do CP, a segunda região de maior acúmulo de fontes de EA é a região dos apoios, a terceira é o núcleo externo e no último lugar tem-se a região das bordas, em que a proporção de fontes foi apenas de 1 a 3% do total de fontes de EA registradas até o fim do ensaio. A proporção semelhante de fontes de EA nessas quatro regiões em mármore e em monzogranito sugere a existência de um padrão geral de acúmulo de microfissuramento por regiões, embora o processo de propagação de microfissuras nessas regiões seja diferente em cada rocha.

As análises da distribuição das velocidades no interior do CP assim como ao longo do ensaio mostram que há uma distribuição não homogênea do dano no CP, mudando significativamente suas

características em relação à sua condição inicial intacta. A utilização da velocidade de propagação das ondas constante e igual à condição intacta não é representativo da condição do CP durante o ensaio.

O processo de microfissuramento no monzogranito é frágil, explosivo e localizado, e envolve alta liberação de energia absoluta. Já no mármore esse processo é contínuo, gradativo, mais distribuído e mais precoce, e envolvendo níveis menores de liberação de energia absoluta. A composição mineralógica do monzogranito e a sua estrutura imbricada fazem com que a propagação de microfissuras ocorra principalmente através dos cristais de quartzo (mais rígidos, concentrando mais tensão), seguindo um caminho tortuoso subparalelo à direção de carregamento. Em contraste, a composição praticamente monominerálica do mármore e a sua estrutura homogênea, promovem a propagação constante de microfissuras através dos planos de clivagem perfeitos dos cristais de calcita. Esses padrões de propagação do microfissuramento proporcionam ao monzogranito uma alta resistência à propagação de microfissuras, enquanto que no mármore essa resistência é baixa. Tais diferenças são, também, refletidas nos valores médios de tenacidade à fratura de $1,69 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ e $0,71 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ para o monzogranito e o mármore, respectivamente.

A localização tridimensional das fontes de EA e o cálculo das tensões de tração de um conjunto adequado de microfissuras localizadas durante o estágio A de carregamento, permitiu a obtenção da resistência intrínseca de ambas as rochas. Os histogramas da distribuição espacial da resistência à tração obtidos para os CPs de mármore e monzogranito mostraram-se ajustados a uma distribuição de Weibull, porém o melhor ajuste foi obtido nos CPs de monzogranito. A variabilidade na resistência intrínseca obtida nos CPs de monzogranito foi aproximadamente três vezes menor no monzogranito do que no mármore. As análises dos histogramas indicam, também, que no monzogranito a ruptura ocorre concentrada em níveis muito próximos do valor considerado na literatura como representativo da resistência máxima de tração da rocha, enquanto que no mármore ruptura ocorre distribuída desde níveis baixos de tensão. Assim, o valor constante e definido como a resistência à tração da rocha intacta não é representativo da condição real da rocha, especialmente no caso do mármore.

Em futuras pesquisas sugere-se tomar a caracterização obtida nesta tese e incorporá-la na variável de dano, permitindo assim conectar os processos na macroescala com aqueles que acontecem na microescala e aprimorando a calibração às relações constitutivas do material que são utilizadas nas modelagens.

REFERÊNCIAS

- ADELINET, M. et al. Deformation modes in an Icelandic basalt: from brittle failure to localized deformation bands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, n.255, p.15-25, 2013.
- AGGELIS, D.G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters. *Mechanics Research Communications*, v.38, n.2, p.153-157, 2011.
- AGGELIS, D.G. et al. Effect of wave distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, n.35, p.183-190, 2012.
- AKAIKE, H. Statistical predictor identification. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, v.22, n.2, p.203-217, 1970.
- AKER, E. et al. Experimental investigation of acoustic emissions and their moment tensors in rock during failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.70, p.286-295, 2014.
- AL-RUB, R.K.A.; KIM, S.M. Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain fracture. *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, n.77, p.1577-1603, 2010.
- AL-RUB, R.K.A.; VOYIADJIS, G.Z. Gradient-enhanced coupled plasticity-anisotropic damage model for concrete fracture: computational aspects and applications. *International Journal of Damage Mechanics*, n.18, p.115-154, 2009.
- AMARAL, P.M.; FERNANDES, J.C.; ROSA, L.G. Weibull statistical analysis of granite bending strength. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v.41, n.6, p.917-928, 2008.
- AMERICAN STANDART TECHNICAL MATERIALS. ASTM D3967: Standart test method for splitting tensile strength of intact rock core specimes. Washington, 2008.
- ARASTEH, M.M. et al. Broadband acoustic emission observations during fracture propagation in rock-like material. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.34, n.3, p.83.e1-83.e13, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. Manual de emissão acústica, cursos de nível 1 e 2. São Paulo: ABENDI.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 2010.
- BALBO, J.T. Relations between indirect tensile and flexural strengths for dry and plastic concretes. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v.6, n.6, p.854-874. 2013.
- BENSON, P.M. et al. Imaging slow failure in triaxially deformed etna basalt using 3D acoustic emission location and X-ray computed tomography. *Geophysical Research Letters*, v.3, n.34, p.L03303, 2007.

BOZDOGAN, H. Model selection and Akaike's information criterion (AIC): the general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*, v.52, n.3, p.345-370, 1987.

BUNGER, A.P. et al. Sustained acoustic emissions following tensile crack propagation in a crystalline rock. *International Journal of Fracture*, v.193, n.1, p.87-98, 2015.

CAI, M.; KAISER, P.K.; MARTIN, C.D. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, n.38, p.1135-1145, 2001.

CARLSON, S.R.; YOUNG, R.P. Acoustic emission and ultrasonic velocity study of excavation-induced microcrack damage at the underground research laboratory. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v.7, n.30, p.901-907, 1993.

CARPINTERI, A. et al. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, n.34, p.529-537, 2012.

CARPINTERI, A.; CORRADO, M.; LACIDOGNA, G. Heterogeneous materials in compression: correlations between absorbed, released and acoustic emission energies. *Engineering Failure Analysis*, v.33, p.236-250, 2013.

CARVALHO, F.C.S. Characterizing brittle failure through quantitative acoustic emission. 1999. Thesis (Ph.D.) - Graduate School, Minnesota University, Minnesota, 1999.

CARVALHO, F.C.S.; LABUZ, J.F. Moment tensors of acoustic emissions in shear faulting under plane-strain compression. *Tectonophysics*, n.356, p.199-211, 2002.

CELESTINO, T.B. ; BORTOLUCCI, A.A . Determination of rock fracture toughness by means of brazilian test. São Carlos: EESC/USP, 1992. (Relatório SOC-07/92).

_____. Diametral compression tests for the determination of elastic constants in rock. In: SEMINARIO VENEZOLANO DE GEOTECNIA, 15., 1998, Caracas. Proceedings... Caracas: [s.n.], 1998. p.1-10.

CELESTINO, T.B.; BORTOLUCCI, A.A.; NÓBREGA, C.A. Determination of rock fracture toughness under creep and fatigue. In: U.S.SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 35., Rotterdam, 1995. Proceedings... [S.l., s.n.], 1995. v.1, p.147-152.

CELESTINO, T.B. et al. Fracture mechanics of marble using a splitting tension test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.13, n.6, p.407-411, 2001.

CHANG, S.H.; LEE, C.I. Estimation of cracking damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, n.41, p.1069-1086, 2004.

CHAU, K.T.; WEI, X.X. A Three-dimensional analytic solution for the brazilian test. In: ASIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 2., 2001, Lisse. Proceedings... London: A.A.Balkema, 2001. p.141-144.

CHEN, L. et al. Acoustic source localization based on generalized cross-correlation time-delay estimation. *Procedia Engineering*, v.15, p.4912-4919, 2011.

CHEN, S.; YUE, Z.Q.; THAM, L.G. Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.41, n.6, p.939-957, 2004.

CHENG, Y.; MITRA, R.; HAGAN, P. Development and future aspect of acoustic emission data processing methods. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ACOUSTIC EMISSION TESTING, 30./ INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTIC EMISSION, 7., 2012, Granada. *Proceedings...* Granada: University of Granada, 2012.

CIAMPA, F.; MEO, M. A New algorithm for acoustic emission localization and flexural group velocity determination in anisotropic structures. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, v.41, n.12, p.1777-1786, 2010.

CICEKLI, U.; VOJIADJIS, G. Z.; AL-RUB, R.K.A. A Plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. *International Journal of Plasticity*, n.23, p.1874-1900, 2007.

COLEMAN, T.F.; LI, Y. An Interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds. *SIAM Journal on Optimization*, v.6, p.418-445, 1996.

COSTA PEREIRA, J.M.C.R. *Análise em componentes independentes na separação cega de fontes coincidentes no espectro*. 2003. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2003.

CUNAT, J.F.S. *Distribuciones de máxima entropía en espacios de probabilidad transformados*. 2006. Tesis (Doctoral) - Facultad de Ciencias Matemáticas, Departamento de Estadística e Investigación Operativa I, Madrid, 2006.

DAI, Q. et al. Damage investigation of single-edge notched beam tests with normal strength concrete and ultra high performance concrete specimens using acoustic emission techniques. *Construction and Building Materials*, v.31, p.231-242, 2012.

DEY, T.N.; WANG, C.Y. Some mechanisms of microcrack growth and interaction in compressive rock failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v.3, n.18, p.199-209, 1981.

DIEDERICHS, M.S. *Instability of hard rockmasses: the role of tensile damage and relaxation*. 1999. Thesis (Ph.D.) - University of Waterloo, Ontario, 1999.

DONG, L.; LI, X. A Microseismic / acoustic emission source location method using arrival times of PS waves for unknown velocity system. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v.2013, Article ID 307489, 8 pages, 2013.

EATON, M.J.; PULLIN, R.; HOLFORD, K.M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, v.43, n.6, p.856-863, 2012.

EBERHARDT, E. et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Canadian Geotechnical Journal*, v.35, n.2, p.222-233, 1998.

EMILIANO, P.C. et al. Critérios de informação de Akaike versus bayesiano: análise comparativa. São Pedro: UNICAMP, 2010.

FAIRHURST, C. On the validity of the brazilian test for brittle materials. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v.1, p.535-546, 1964.

FALLS, S. Ultrasonic Imaging and acoustic emission studies of microcrack development in lac du bonnet granite. 1993. Thesis (Ph.D.) - Queens University, Kingston, 1993.

FANG, Z.; HARRISON, J.P. Development of a local degradation approach to the modelling of brittle fracture in heterogeneous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.39, n.4, p.443-457, 2002a.

_____. Application of a local degradation model to the analysis of brittle fracture of laboratory scale rock specimens under triaxial conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.39, n.4, p.459-476, 2002b.

GRIFFITH, A.A. The Phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, n.221, p.163-198, 1920.

GUELLO, G. Simulação computacional de estruturas de concreto por meio da mecânica do dano. 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HAMROCK, B.J.; ANDERSON, W.J. Rolling-element bearings. Washington: NASA, 1983. (NASA Reference Publication, 1105).

HAN, Q. et al. Localization of acoustic emission sources in structural health monitoring of masonry bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, v.22, n.2, p.314-329, 2015.

HARDY, H.R. Acoustic emission/microseismic activity: principles, techniques and geotechnical applications. New York: CRC Press, 2005. v.1.

HASUI, Y. Geologia da folha de São Roque. *Boletim do Instituto de Geociências USP*, v.6, p.57-183, 1975.

HE, M.C.; MIAO, J.L.; FENG, J.L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v.47, p.286-298, 2010.

HENSMAN, J. et al. Locating acoustic emission sources in complex structures using Gaussian processes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.24, n.1, p.211-223, 2010.

HERTZ, H. *Gesammelte Werke (collected Works)* Leipzig. [S.l.:s.n.], 1985.

HOEK, E.; BIENIAWSKI, Z.T. Brittle rock fracture propagation in rock under compression. *International Journal of Fracture Mechanics*, v.1, p.137-155, 1965.

HONDROS, G. The Evaluation of poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. *Australian Journal of Applied Science*, v.10, n.3, p.243-268, 1959.

INCE, N.F. et al. Averaged acoustic emission events for accurate damage localization. In: *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS SPEECH AND SIGNAL PROCESSING*, 2009. *Proceedings...* Palo Alto: IEEE, 2009. p.2201-2204.

INGLIS, C.E. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Proceedings Institute Naval Architects*, n.55, p.219-241, 1913.

IVERSON, N.; KAO, C.S.; LABUZ, J.F. Clustering analysis of AE in rock. *Journal of Acoustic Emission*, v.25, p.364-372, 2007.

Jl, H.G. et al. Comparative analysis of acoustic emission signal frequency characteristics between packsand and granite. In: CAI, M. *Rock mechanics: achievements and ambitions*. New York: CRC Press, 2012. p.483-487.

Jl, M. et al. Damage evolution law based on acoustic emission and Weibull distribution of granite under uniaxial stress. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, v.11, n.3, p.269-277, 2014.

JIAN-PO, L. et al. Cracking mechanisms in granite rocks subjected to uniaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v.75, p.151-159, 2015.

_____. Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in rock with a pre-cut circular hole under uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, v.135, p.206-218, 2015.

KAO, C.S.; CARVALHO, F.C.S.; LABUZ, J.F. Micromechanisms of fracture from acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v.4, n.48, p.666-673, 2011.

KHAZAEI, C.; HAZZARD, J.; CHALATURNYK, R. Damage quantification of intact rocks using acoustic emission energies recorded during uniaxial compression test and discrete element modeling. *Computers and Geotechnics*, v.67, p.94-102, 2015.

KIRSCH, G. Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre. *Zeitgiest Verein Deutscher Ingenieure*, n.42, p.797-807, 1898.

KITAGAWA, G.; AKAIKE, H. A Procedure for the modeling of non-stationary time series. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, n.30, p.351-363, 1978.

KÖPPEL, S.; GROSSE, C. Advanced acoustic emission techniques for failure analysis in concrete. In: *WORLD CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING*, 15., 2000. *Proceedings...* [S.l.:s.n.], 2000.

KORDATOS, E.Z.; AGGELIS, D.G.; MATIKAS, T.E. Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission. *Composites: part B*, n.43, p.2676-2686, 2012.

KOURKOULIS, S.K.; MARKIDES, C.H.F.; CHATZISTERGOS, P.E. The Standardized brazilian disc test as a contact problem. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.57, p.132-141, 2013.

KOURKOULIS, S.K.; MARKIDES, C.H.F.; CHATZISTERGOS, P.E. The Brazilian disc under parabolically varying load: theoretical and experimental study of the displacement field. *International Journal of Solid and Structures*, v.49, p.959-972, 2012.

KUNDU, T. Acoustic source localization. *Ultrasonics*, v.1, n.54, p.25-38, 2014.

KUNDU, T. et al. A Two-step hybrid technique for accurately localizing acoustic source in anisotropic structures without knowing their material properties. *Ultrasonics*, v.56, p.271-278, 2015.

KURZ, J.H.; GROSSE, C.U.; REINHARDT, H.W. Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete. *Ultrasonics*, n.43, p.538-546, 2005.

LABUZ, J.F.; CATTANEO, S.; CHEN, L.-H. Acoustic emission at failure in quasi-brittle materials. *Construction and Building Materials*, n.15, p.225-233, 2001.

LABUZ J.F.; DAI, S.T.; SHAH, K.R. Identifying failure through locations of acoustic emission. *Transportation Research Record*, v.1, n.1526, p.101-111, 1996.

LANARO, F.; SATO, S.; STEPHANSSON, O. Microcrack modelling of brazilian tensile tests with the boundary element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, n.46, p.450-461, 2009.

LAJTAI, E.A. A Theoretical and experimental evaluation of the griffith theory of brittle fracture. *Tectonophysics*, v.2, n.11, p.29-156, 1971.

LAVROV, A.; VERVOORT, A. Theoretical treatment of tangencial loading effects on the brazilian test stress distribution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, n.39, p.275-283, 2002.

LAVROV, A. et al. Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic brazilian tests with disk rotation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, n.39, p.287-302, 2002.

LEI, X. et al. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring. *Journal of Geophysical Research*, v.105, n.B3, p.6127-6139, 2000.

_____. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rock. *Journal of Structural Geology*, v.2, n.26, p.247-258, 2004.

LI, X.; DONG, L. An Efficient closed-form solution for acoustic emission source location in three-dimensional structures. *AIP Advances*, v.4, n.2, p.027110, 2014.

LI, D.; WONG, L.N.Y. The brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, n.46, p.269-287, 2013.

LISJAK, A. et al. Numerical simulation of acoustic emission in brittle rocks by two-dimensional finite-discrete element analysis. *Geophysical Journal International*, v.195, n.1, p.423-443, 2013.

LIU, H.Y.; KOU, S.Q.; LINDQVIST, P.A. Numerical simulation of the fracture process in cutting heterogeneous brittle material. *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v.26, p.1253-1278, 2002.

LIU, H.Y. et al. Characterization of rock heterogeneity and numerical verification. *Engineering Geology*, v.72, p.89-119, 2004.

LIU, H.Y. et al. Numerical modelling of the heterogeneous rock fracture process using various test techniques. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v.40, n.2, p.107-144, 2007.

LOCKNER, D.A. et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, v.7, n.350, p.39-42, 1991.

MA, C.H.; HUNG, K.M. Exact full-field analysis of strain and displacement for circular disks subjected to partially distributed compressions. *International Journal of Mechanical Sciences*, n.50, p.275-292, 2008.

MA, G.W.; WANG, X.J.; REN, F. Numerical simulation of compressive failure of heterogeneous rock-like materials using SPH method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.48, n.3, p.353-363, 2011.

MACHADO, N. et al. U-Pb geochronology of the central Ribeira belt (Brazil) and implications for the evolution of the Brazilian orogeny. *Precambrian Research*, v.3, n.79, p.347-361, 1996.

MAROS, I. *Computational techniques of the simplex method*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2003. v.1.

MAZARS, J. *Application de la mécanique de l' endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure*. Thèse (Doctorate d'Etat) – L.M.T. Université Paris, France, 1984.

MAZARS, J.; PJAUDIER-CABOTO, G. Continuum damage theory – application to concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v.2, n.115, p.345-365, 1989.

MCLASKEY, G.C.; GLASER, S.D.; GROSSE, C.H.U. Integrating broad-band high-fidelity acoustic emission sensors and array processing to study drying shrinkage cracking in concrete. *Sensors and smart structures technologies for civil, mechanical, and aerospace systems*. San Diego: [s.n.], 2007. (Proceedings of SPIE, v.6529).

MEGLIS, I.L.; CHOWS, T.M.; YOUNG, R.P. Progressive microcrack development in tests in lac du bonnet granite—I. Acoustic emission source location and velocity measurements. *International Journal of Rock mechanics and mining sciences & Geomechanics Abstracts*, v.8, n.32, p.741-750, 1995.

MURALIDHARA S. et al. Fracture process zone size and true fracture energy of concrete using acoustic emission. *Construction and Building Materials*, v.4, n.24, p.479-486, 2010.

NAKAMURA, A.M.; MICHEL, P.; SETOH, M. Weibull parameters of yakuno basalt targets used in documented high-velocity impact experiments. *Journal of Geophysical Research: planets* (1991–2012), v.112, n.E2, 2007.

NICCOLINI, G. et al. OnSet time determination of acoustic and electromagnetic emission during rock fracture. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, v.35, p.51-62, 2012.

NIRI, E.D.; SALAMONE, S. A Probabilistic framework for acoustic emission source localization in plate-like structures. *Smart Materials and Structures*, v.21, n.3, p.035009, 2012.

NORDEN, B.N. On the compression of a cylinder in contact with a plane surface. Washington: Institute of basic standards, National bureau of standards, 1973. (NBSIR73-243).

OHNAKA, M.; MOGI, K. Frequency characteristics of acoustic emissions in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure. *Journal of Geophysical Research*, n.87 (B5), p.3873-3884, 1982.

OHNO, K.; OHTSU, M. Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials*, v.24, p.2229-2346, 2010.

OHTSU, M. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete: test method for classification of active cracks in concrete structures by acoustic emission. *Materials and Structures*, v.43, n.9, p.1183-1186, 2010.

OHTSU, M.; ISODA, T.; TOMODA, Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures. *Journal of Acoustic Emission*, v.25, p.21-32, 2007.

PALUSZNY, A.; MATTHÄI, S.K. Numerical modeling of discrete multi-crack growth applied to pattern. *International Journal of Solid and Structures*, n.46, p.3383-3397, 2009.

PEHOVAZ, H.I. Estudo de mecanismos de deformação lenta da gipsita bandada da Chapada do Araripe em ensaios de fluência monitorados por emissão acústica. 2009. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PHILIPPIDIS, T.P.; NIKOLAIDIS, V.N.; KOLAXIS, J.G. Unsupervised pattern recognition techniques for the prediction of composite failure. *Journal of Acoustic Emission*, v.1-2, n.17, p.69-81, 1999.

PHYSICAL ACOUSTIC CORPORATION. DiSP with AEwin User's Manual Rev. 3. Princeton Junction: PAC, 2005.

PRESS, W.H. et al. Numerical recipes in C: the art of scientific computing. 2nded. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

PŘIKRYL, R. et al. Acoustic emission characteristics and failure of uniaxially stressed granitic rocks: the effect of rock fabric. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v.36, n.4, p.255-270, 2003.

PROCOPIO, A.T.; ZAVALIANGOS, A.; CUNNINGHAM, J.C. Analysis of the diametrical compression test and the applicability to plastically deforming materials. *Journal of Materials Science*, v.38, n.17, p.3629-3639, 2003.

PROENÇA, S.B. Simulação numérica do comportamento de elementos estruturais em concreto e argamasa armada pelo emprego de um modelo de dano. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, v.8, n.4, p.351-360, 1992.

ROCCO, C. et al. Ensayo brasileño: efecto tamaño y mecanismos de rotura. *Anales de Mecánica de la Fractura*, v.13, p.203-208, 1996.

SALINAS, V. et al. Localization algorithm for acoustic emission. *Physics Procedia*, v.1, n.3, p.863-871, 2010.

SANCHO, J.B.; VILDA, P.G.; BERMÚDEZ, J.B. La Transformada de Fourier: una visión pedagógica. *Estudios de Fonética Experimental*, n.10, p.41-74, 1999.

SATOH, T.; LEI, X. Importance of AE study for fracture process of heterogeneous solid material-high-speed, multi-channel AE measurement system in geological survey of Japan/AIST. In: AIST- NDE-NATIONAL SEMINAR ON NON-DESTRUCTIVE EVALUATION, 2006. *Proceedings...* [S.l.:s.n.], 2006. p.271-275.

SCHIAVI, A. et al. Analysis of acoustic emissions at low frequencies in brittle materials under compression. In: SEM ANNUAL CONFERENCE, 2009, Albuquerque. *Proceedings...* Bethel: Society of Experimental Mechanics, 2009.

SEDLAK, P. et al. New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates. *Ultrasonics*, v.49, n.2, p.254-262, 2009.

SHAH, K.; LABUZ, J. Damage mechanism of stressed rock from acoustic emission. *Journal of Geophysics Research*, n.100, p.15527-15539, 1995.

SHUAI, X.U. et al. Experimental studies on pillar failure characteristics based on acoustic emission location technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v.22, n.11, p.2792-2798, 2012.

SLEEMAN, R.; VAN ECK, T. Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, n.113, p.265-275, 1999.

SOULIOTI, D. et al. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending. *Construction and Building Materials*, n.23, p.3532-3536, 2009.

ST-ONGE, A. et al. Akaike information criterion applied to detecting first arrival times on microseismic data. In: SEG ANNUAL MEETING. SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, 2011. *Proceedings...* [S.l.:s.n.], 2011.

SURDI, A.A. Detection of fracturing in rocks using acoustic emissions. 2010. Dissertation (M.Sc.) – University of Utah, Utah, 2010.

TANG, C.A. et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part I: effect of heterogeneity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.37, n.4, p.555-569, 2000.

THAM, L.G. et al. On Tension failure of 2-D rock specimens and associated acoustic emission. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v.1, n.38, p.1-19, 2005.

VAN HAUWAERT, A.; DELANNAY, F.; THIMUS, J.F. Cracking behavior of steel fiber reinforced concrete revealed by means of acoustic emission and ultrasonic wave propagation. *ACI Materials Journal*, v.96, n.3, p.291-296, 1999.

VANDEN, F. Levenberg-marquardt algorithms vs trust region algorithms. Bruxelles: Universit'e Libre de Bruxelles, 2004.

WANG, E.Y. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture. *Journal of China Coal Society*, v.29, n.3, p.289-292, 2004.

WANG, E.Y.; ZHAO, S.Q. Frequency analyzing system of acoustic emission signals. *Seismology and Geology*, v.8, n.1, p.94-96, 1986.

WEI, X.X.; CHAU, K.T. Three dimensional analytical solution for finite circular cylinders subjected to indirect tensile test. *International Journal of Solids and Structures*, v.50, n.14, p.2395-2406, 2013.

WEIBULL, W. A Statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, n.18, p.293-297, 1951.

WONG, T.F. et al. Microcrack statistics, Weibull distribution and micromechanical modeling of compressive failure in rock. *Mechanics of Materials*, v.38, n.7, p.664-681, 2006.

XIE, H.; GAO, F. The Mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.37, n.3, p.477-488, 2000.

XU, J.; LACIDOGNA, G.; CARPINTERI, A. Accuracy of acoustic emission localization for masonry structures monitoring. [S.l.:s.n.], 2013. (En ICF13).

YAN, G.; TANG, J. A Bayesian approach for localization of acoustic emission source in plate-like structures. *Mathematical Problems in Engineering*, v.2015, ID 47839. DOI://dx.doi.org/10.1155/2015/247839.

YUE, Z.Q. et al. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing. *Computers and Geotechnics*, v.30, p.375-397, 2003.

ZANG, A. et al. Source analysis of acoustic emissions in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads. *Geophysical Journal International*, v.3, n.135, p.1113-1130, 1998.

ZHANG, H.; THURBER, C.; ROWE, C.H. Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v.93, n.5, p.1904-1912, 2003.

ZHU, W.C.; TANG, C.A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, v.1, n.37, p.25-56, 2004.

ZIETLOW, W.K.; LABUZ, J.F. Measurements of the intrinsic process zone in rock using acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v.35, n.3, p.291-299, 1998.

APÊNDICE A

FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO UTILIZADO NO PROGRAMA CLAPWaVe