

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**KEVIN JHONEOR REBOLLEDO LA TORRE**

**AVALIAÇÃO DA FALHA EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A  
COMPRESSÃO POR MEIO DO MONITORAMENTO DE EMISSÕES ACÚSTICAS**

**Alegrete**

**2022**

**KEVIN JHONEOR REBOLLEDO LA TORRE**

**AVALIAÇÃO DA FALHA EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A  
COMPRESSÃO POR MEIO DO MONITORAMENTO DE EMISSÕES ACÚSTICAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luís Eduardo Kostascki

**Alegrete**

**2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

L111a La Torre, Kevin Jhoneor Rebolledo  
AVALIAÇÃO DA FALHA EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A  
COMPRESSÃO POR MEIO DO MONITORAMENTO DE EMISSÕES ACÚSTICAS /  
Kevin Jhoneor Rebolledo La Torre.  
101 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2022.

"Orientação: Luis Eduardo Kostaschi".

1. Emissão Acústica. 2. Ondas Elásticas. 3. Fissuras. I.  
Título.

**KEVIN JHONEOR REBOLLEDO LA TORRE**

**AVALIAÇÃO DA FALHA EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A COMPRESSÃO POR MEIO DO MONITORAMENTO DE EMISSÕES ACÚSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 27 de julho de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kosteski

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Jorge Daniel Riera

UFRGS

---

Prof. Dr. Paulo César Comassetto de Aguirre

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia  
UNIPAMPA

---



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/09/2022, às 09:15, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **PAULO CESAR COMASSETTO DE AGUIRRE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/09/2022, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/09/2022, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0937647** e o código CRC **B47FCB73**.

---

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela saúde e por ter me concedido foco e persistência no processo, sempre colocando no meu caminho as pessoas certas que me auxiliaram em esta etapa.

Aos meus pais e minha irmã, que apesar da distância sempre foram minha maior motivação e apoio em esta caminhada.

Aos meus familiares Maria Cornejo e Martin Santos pela oportunidade que me deram de conhecer a cidade e o programa de pós-graduação.

À minha namorada Raissa Ramos, por ter me proporcionado seu apoio e motivação nos momentos que mais precisei.

Aos professores Dr. Luis Eduardo Kostas e Leandro Friedrich, pela orientação e paciência, agradeço a oportunidade e os aprendizados adquiridos.

Aos meus colegas e amigos Matthews Vargas, Gustavo Laionel, Pedro Jucá, Danilo Nogueira, Camila Vargas, Nadine Fisher, Raquel Zydeck e Danieli Duó, pela recepção no país, ajuda nas atividades do mestrado e aprendizados dessa época que nunca irei esquecer. Foram de grande ajuda no meu processo de adaptação, fizeram que a saudade da minha terra seja menor e quero que aqui fique registrado o quão agradecido me sinto por ter coincidido com eles.

“Estamos na situação de uma criancinha que entra em uma imensa biblioteca, repleta de livros em muitas línguas. A criança sabe que alguém deve ter escrito aqueles livros, mas não sabe como. Não compreende as línguas em que foram escritos. Tem uma pálida suspeita de que a disposição dos livros obedece a uma ordem misteriosa, mas não sabe qual ela é”.

Albert Einstein

## RESUMO

Estruturas submetidas a carregamento experimentam processos de danos nos materiais que as compõem durante todo o histórico de carga, mesmo sem observar fissuração externa. Processos de falha microscópicos ocorrem dentro do material da estrutura, esta geração e crescimento das microfissuras origina emissões acústicas (EAs). Mediante a utilização de sensores colados na superfície do material é possível captar estas EAs que viajam em forma de ondas elásticas. E assim processar os dados fornecidos pelas ondas para estudar e monitorar o comportamento interno do material. O presente trabalho visa analisar e caracterizar os processos de fissuração que acontecem em corpos de prova submetidos a compressão axial, estudando os parâmetros fornecidos pelas ondas elásticas produzidas pela energia de deformação liberada na origem e propagação de fissuras. Utilizando acelerômetros localizados na superfície dos corpos de prova foi efetuada a conversão de ondas elásticas em sinais elétricos, que são amplificados para o processo de análise. Estes sinais foram obtidos em testes de compressão realizados com três condições de contorno diferentes. Uma se trata de meio antifricção: placa escova, outra condição de contorno é a de referência: ensaio tradicional normatizado. Finalmente é estudada uma configuração de máxima fricção: chapas metálicas com espessura de 3 mm coladas nas faces de contato dos corpos de prova. Foi possível classificar as fissuras em tipo I (Fissura de tração) e tipo II (fissura de cisalhamento). Assim foi observado que a configuração de máxima fricção apresenta fissuras características de cisalhamento (tipo II) nos extremos próximos aos pratos da máquina. No ensaio de referência a influência do atrito entre os pratos da máquina de ensaio e as faces de contato do espécime diminui consideravelmente. Finalmente usando o meio antifricção a fissuração antes e depois do carregamento máximo é de tração (tipo I) sendo o comportamento mais próximo do ensaio que estamos realizando. Como forma de prever a falha nos corpos de prova três abordagens são consideradas. (I) análise do valor  $b$ , (II) análise de correlações de longo alcance com os expoentes “ $\alpha$  e  $h$ ” e (III) análise de domínio do tempo natural (NT). Essas metodologias são aplicadas aos dados coletados dos acelerômetros colocados em 3 espécimes de cada condição de contorno. É importante levar em consideração estes resultados no âmbito acadêmico e na prática de engenharia por se tratar de um ensaio realizado para verificação da resistência a compressão do concreto utilizado em obra.

**Palavras-Chave:** Emissão Acústica, Ondas Elásticas, Fissuras

## ABSTRACT

Structures subjected to loading experience damage processes in the materials that compose them throughout the load history, even without external cracking. Microscopic failure processes occur within the structure material, this generation and growth of microcracks gives rise to acoustic emissions (EAs). By using sensors glued to the surface of the material, it is possible to capture these AEs that travel in the form of elastic waves. And so process the data provided by the waves to study and monitor the internal behavior of the material. The present work aims to analyze and characterize the cracking processes that occur in specimens subjected to axial compression, studying the parameters provided by the elastic waves produced by the deformation energy released at the origin and propagation of cracks. Using accelerometers located on the surface of the specimens, the conversion of elastic waves into electrical signals was performed, which are amplified for the analysis process. These signals were obtained in compression tests performed with three different boundary conditions. One is an anti-friction medium: brush plate, another boundary condition is the reference: traditional standardized test. Finally, a maximum friction configuration is studied: metallic sheets with a thickness of 3 mm glued to the contact faces of the specimens. It was possible to classify the cracks into type I (tensile cracking) and type II (shear cracking). Thus, it was observed that the maximum friction configuration presents characteristic shear cracks (type II) at the extremes close to the machine plates. In the reference test, the influence of friction between the plates of the test machine and the contact faces of the specimen decreases considerably. Finally, using the antifriction medium, the cracking before and after the maximum loading is tensile (type I) being the closest behavior to the test we are performing. As a way of predicting failure in specimens, three approaches are considered. (I) analysis of the value  $b$ , (II) analysis of long-range correlations with the exponents " $\alpha$  and  $h$ " and (III) analysis of the domain of natural time (NT). These methodologies are applied to data collected from accelerometers placed on 3 specimens of each boundary condition. It is important to take these results into account in the academic context and in engineering practice, as it is a test carried out to verify the compressive strength of the concrete used on site.

**Keywords:** Acoustic Emission, Elastic Waves, Cracking

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de EA mediante a liberação de energia de deformação.....	20
Figura 2 - Princípios de Geração, Propagação e Detecção de Emissão Acústica .....	21
Figura 3 - a) Fotografia da primeira configuração experimental para medir a emissão de som acústico (ASE) com máquina de tração pendular, amplificador e osciloscópio de 1949; do trabalho de J. Kaiser; b) Joseph Kaiser apresentando sua tese de doutorado.....	22
Figura 4 - Resultados Experimentais de L’Hermite, parâmetros mecânicos do concreto sob compressão .....	23
Figura 5 - Exemplo de sinais de Burst comparados a uma emissão contínua de ondas acústicas. ....	25
Figura 6 - Uma onda plana em um meio homogêneo em um tempo fixo, t.....	26
Figura 7 - Tipos de Movimento de Onda .....	28
Figura 8 - Propagação da onda Lamb.....	29
Figura 9 - Parâmetros de Emissão Acústica .....	30
Figura 10 - Configuração de Pico de Frequência e Centróide de Frequência .....	33
Figura 11 - Classificação de Fissuras com uma Combinação de Frequência Média e Valores de RA.....	34
Figura 12 - Modos de Fissura e Forma da Onda EA.....	34
Figura 13 - a) Hits EA versus tempo, b) energia EA versus tempo .....	35
Figura 14 - Correlação entre energia e duração.....	36
Figura 15 - Distribuições de amplitude com progressão de dano.....	37
Figura 16 - A evolução do valor b e seu significado físico em relação a um sinal de emissão acústica. ....	38
Figura 17 – Ilustração gráfica das etapas do DFA. a) Exemplo de série temporal; b) séries integradas divididas em janelas de tamanhos diferentes com suas tendências de ajuste linear correspondentes; c) gráfico log-log das flutuações médias $FDFA(n)$ versus tamanhos de janela n. O expoente de escala estimado $\alpha$ é a inclinação da linha ajustada de mínimos quadrados; d) exemplos representativos de séries de tempo e espectro de potência branca (aleatória), rosa (fractal, correlacionada de longo alcance, ligeiramente persistente) e azul (antipersistente) .....	39
Figura 18 – Parâmetros básicos envolvidos na análise R/S padrão: (a) uma série temporal não estacionária $x(i)$ ; (b) Exemplo de expoente de Hurst considerando $n = 250$ , onde $x$ é a média e $S(n)$ o desvio padrão, $X(i, n)$ são as diferenças locais acumuladas da média, e $R(n)$ é o	

intervalo local, que é, a diferença entre o máximo e o mínimo $X(i, n)$ (adaptado de Bassingthwaighte, 1994); (c) gráfico log-log do intervalo redimensionado R/S versus tamanho da janela $n$ . O expoente de escala estimado $H$ é a inclinação da linha de ajuste dos mínimos quadrados; (d) exemplos representativos do valor $H$ para uma série temporal branca (aleatória), rosa (fractal, correlacionada de longo alcance, levemente persistente) e azul (antipersistente). .....	41
Figura 19 – Tempo natural no contexto de series temporais de emissão acústica .....	42
Figura 20 – Aplicando o método do tempo natural: a) uma série temporal típica de sinais AE; b) descrição da série no domínio do tempo natural; c) evolução dos parâmetros de ordem e entropias em tempo natural. $t_{crit}$ indica o ponto de convergência dos critérios, onde a estrutura entra em um estágio crítico; d) evolução do espectro de potência normalizado até atingir $t_{crit}$ .....	44
Figura 21 - Modelos de exibição para (a) fissuras por tração, (b) fissuras de modo misto e (c) fissuras de cisalhamento .....	45
Figura 22 - Corpo de prova cilíndrico de concreto em compressão. (a) Configuração de teste. (b) Curva de carga versus tempo e atividade de EA. (c) valores $b$ durante o teste. (d) Variação no parâmetro $\beta_t$ durante o teste .....	46
Figura 23 - Gráfico do expoente $a$ do DFA versus o tempo convencional. Painéis a, b e c correspondem aos tamanhos $i = 250, 300$ e $1000$ eventos, respectivamente, ao analisar todos os terremotos com $M \geq 4.0$ . As linhas verticais que terminam em círculos representam as magnitudes do terremoto que são lidas na escala correta.....	48
Figura 24 - Produção do concreto realização do Slump Test .....	50
Figura 25 - Configuração do ensaio de compressão axial (a) posição dos sensores (b) prensa hidráulica INSTRON e equipamento de EA .....	51
Figura 26 - Condições de contorno utilizadas nos espécimes cúbicos: graxa (a), ensaio padrão de referência (b), chapas metálicas coladas (c) e placa escova .....	52
Figura 27 - (a) Acelerômetro piezoelétrico ICP® modelo 352C03 (b) Elementos do sensor de EA.....	53
Figura 28 - Uso de acoplador adesivo entre materiais de contato .....	54
Figura 29 - Processo de conversão de ondas analógicos em valores digitais.....	55
Figura 30 - Sistema PHOTON + de aquisição de dados .....	56
Figura 31 - Interfase do software RT Pro .....	57
Figura 32 – Etapa I, seleção adequada da linha limite .....	58

Figura 33 – Correções nos sinais a) o programa seleciona um evento que não é significativo para análise, b) eliminamos manualmente esse evento .....	59
Figura 34- a) Gráfico de tensão x deformação média dos espécimes b) gráfico de deformação transversal média dos espécimes nas regiões do centro e de extremidade para o ensaio de referência .....	61
Figura 35 -a) mapa de evolução de fissuras mediante software GOM, b) corpo de prova após o ensaio .....	62
Figura 36- Número de eventos instantâneos, número de eventos acumulados, tensão e energia acumulada versus tempo normalizado. Observe que para manter a mesma escala vertical para os eventos instantâneos e acumulados, o número de eventos instantâneos foi multiplicado por 4 no gráfico a) CP01 b) CP02 c) CP03.....	63
Figura 37- Classificação de eventos: a) modo I, b) modo II, c) evento da zona de transição	64
Figura 38 – Classificação dos modos de fissuras a) CP01, b) CP02, c)CP03 .....	65
Figura 39 - Valor b e gráfico de carga ao longo do tempo para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03 .....	67
Figura 40 - Aplicação dos métodos R/S e DFA aos dados EA para diferentes corpos de prova com $i = 50\ 000$ a) CP01 acelerômetros 1 e 2, b) CP02 acelerômetros 1 e 2, c) CP03 acelerômetros 1 e 2.....	68
Figura 41 - Valor do expoente $\alpha$ para janelas móveis de tamanho $i=250000$ pontos , $i=50000$ pontos e $i=5000$ pontos para o sinal do acelerômetro 1 do CP01 .....	69
Figura 42 - a) Gráfico de tensão x deformação média dos espécimes b) gráfico de deformação transversal média dos espécimes nas regiões do centro e de extremidade para os ensaios com condição de contorno de mínima fricção.....	71
Figura 43 - a) mapa de evolução de fissuras mediante software GOM, b) corpo de prova após o ensaio .....	72
Figura 44- Número de eventos instantâneos, número de eventos acumulados, tensão e energia acumulada versus tempo normalizado. Observe que para manter a mesma escala vertical para os acertos instantâneos e acumulados, o número de acertos instantâneos foi multiplicado por 3 no gráfico a) CP01 b) CP02 c) CP03.....	73
Figura 45- Classificação de eventos, só foram encontrados eventos do modo I a) e b).....	74
Figura 46 - Relação RA e AF para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03....	75
Figura 47 - Valor b e gráfico de carga ao longo do tempo para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03 .....	77

Figura 48 - Expoentes $\alpha$ e $h$ para o CP01 acelerômetro 01 com uma janela móvel de $i=5000$ pontos .....	78
Figura 49 – Análise NT da série temporal de EA. As seguintes linhas horizontais auxiliares foram adicionadas: $k_1 = 0,070$ (vermelho tracejado), limite $D = 10 - 2$ (verde tracejado), limite de entropia $S_u \approx 0,0966$ (azul tracejado) para CP01 .....	79
Figura 50 - a) Gráfico de tensão x deformação média dos espécimes b) gráfico de deformação transversal média dos espécimes nas regiões do centro e de extremidade para o ensaio com condição de contorno de máxima fricção .....	80
Figura 51 - a) mapa de evolução de fissuras mediante software GOM, b) corpo de prova após o ensaio .....	81
Figura 52- Número de eventos instantâneos, número de eventos acumulados, tensão e energia acumulada versus tempo normalizado. Observe que para manter a mesma escala vertical para os acertos instantâneos e acumulados, o número de acertos instantâneos foi multiplicado por 9 no gráfico a) CP01 b) CP02 c) CP03.....	82
Figura 53- Classificação de eventos: a) modo I, b) modo II, c) evento da zona de transição	83
Figura 54 - Relação RA e AF para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03....	84
Figura 55 - Valor $b$ e gráfico de carga ao longo do tempo para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 C) CP03 .....	85
Figura 56 - Expoentes $\alpha$ e $h$ para o a) CP02 acelerômetro 01 e b) CP03 acelerômetro 01 ambos com uma janela móvel de $i=5000$ pontos .....	87
Figura 57 –Análise NT da série temporal de EA. As seguintes linhas horizontais auxiliares foram adicionadas: $k_1 = 0,070$ (vermelho tracejado), limite $D = 10 - 2$ (verde tracejado), limite de entropia $S_u \approx 0,0966$ (azul tracejado), a)CP02 e b)CP03.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços em massa dos concretos C30 E C50 utilizados no ensaio de compressão axial. ....	49
Tabela 2 - Especificações do acelerômetro piezoelétrico ICP® modelo 352C03 .....	53
Tabela 3 – Variáveis analisadas .....	89
Tabela 4 - Diferenças do comportamento para cada condição de contorno .....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS

AF	“Average Frequency” (Frequência Média)
ASTM	“American Society for Testing and Materials”
DFA	Análise de Flutuação não Tendenciosa
EA	Emissão Acústica
NT	Tempo Natural
RA	“Rising Angle” (ângulo de subida)
RT	“Rising Time” (tempo de subida)
R/S	Análise de Intervalo Reescalonado

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 Objetivos .....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos específicos .....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1 Emissão Acústica (EA) .....	20
2.2 Breve Histórico do Teste de Emissão Acústica .....	21
2.3 Propriedades das Ondas de Emissão Acústica (EA) .....	25
2.3.1 Fontes de Emissão Acústica .....	25
2.3.2 Propagação de Ondas de EA .....	26
2.3.3 Tipos de Ondas .....	27
2.4 Parâmetros de Emissão Acústica .....	29
2.4.1 Outros Parâmetros .....	32
2.4.2 Parâmetros de Frequência .....	32
2.5 Análise Paramétrica dos Sinais de EA .....	33
2.5.1 Interpretação e Avaliação dos Dados Registrados .....	34
2.6 Análise do Valor b .....	37
2.7 Medidas de Correlações de Longo Alcance .....	38
2.8 Análise do Tempo Natural (NT) .....	42
2.9 Relação de EA e Mecanismo de Falha .....	45
2.9.1 Para Concretos .....	45
<b>3. ESTADO DA ARTE</b> .....	46
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	49
4.1 Ensaio de Compressão Axial .....	49
4.1.1 Elaboração de corpos de prova .....	49
4.1.2 Descrição da Campanha experimental .....	50
4.2 Ensaios de EA .....	52
4.2.1 Sensor .....	53
4.2.2 Acoplamento .....	54
4.2.3 Sistema de Aquisição de Dados .....	54
4.2.4 Computador e Software .....	56
4.3 Método de Processamento de Dados .....	57
4.3.1 Programa para Análise de EA .....	57
4.3.2 Etapas do Programa .....	57

4.3.3	Interpretação e Avaliação de Dados de Medição .....	59
<b>5.</b>	<b>Resultados e Discussão</b> .....	<b>60</b>
5.1	Ensaio Referência .....	60
5.1.1	Classificação de Eventos EA.....	62
5.1.2	Análise do Valor b.....	66
5.1.3	DFA e Hurst .....	68
5.1.4	Tempo Natural.....	70
5.2	Placa Escova .....	70
5.2.1	Classificação de Eventos EA.....	72
5.2.2	Análise do Valor b.....	76
5.2.3	DFA e Hurst .....	77
5.2.4	Tempo Natural.....	78
5.3	Chapa Colada.....	79
5.3.1	Classificação de Eventos EA.....	81
5.3.2	Análise do Valor b.....	85
5.3.3	DFA e Hurst .....	86
5.3.4	Tempo Natural.....	87
5.4	Comparação de Condições de Contorno.....	89
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>94</b>
6.1	Conclusões .....	94
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	95

# 1. INTRODUÇÃO

A experiência mostra que som audível é gerado quando um corpo ou estrutura falha. Se analisarmos em um nível microscópico encontraremos que o início e propagação de cada fissura, tanto interna como externa está acompanhado de som sub-audível, na maioria dos casos imperceptíveis para um humano. Mas a tecnologia atual nos fornece as ferramentas necessárias para conseguir captar estes eventos, os quais trazem informações importantes sobre as propriedades dos materiais.

O estudo do processo de aparição de fissuras ajuda a entender o comportamento das estruturas sob diferentes tipos de solicitações e condições de contorno. No caso de estruturas realizadas com materiais quase-frágeis, como o concreto, a caracterização do modo de fissura cumpre uma função importante para determinar os processos internos do material quando é solicitado até a falha. A realização desta análise proporciona profundo conhecimento de padrões de comportamento interno e previsão de falha (Ohno e Ohtsu 2011, Aggelis 2013)

É possível caracterizar o modo de fissuração de uma estrutura mediante monitoramento de emissões acústicas (EA) em tempo. Como descrito por Aggelis (2019), conforme a tensão é aplicada, a deformação é induzida devido ao movimento em escala atômica. Quando a deformação leva a fissuras, ondas elásticas transitórias são irradiadas da fonte sob tensão e se espalham em todas as direções. A técnica de Emissão Acústica (TEA) monitora esse fenômeno físico, detectando essas ondas que viajam pelo material e atingiram a superfície externa do corpo.

Os softwares de monitoramento de EA mais populares atualmente usam a arquitetura orientada a acertos (hits): um “hit” é usado para descrever o sinal capturado por um sensor. Um hit ou acerto é definido como um sinal acústico com amplitude maior do que o limite de tensão predefinido, utilizado para eliminar os efeitos do ruído. No caso de uma onda elástica (evento EA) ser emitida e captada por vários sensores, o sistema de aquisição de EA deve detectar o respectivo número de acertos, um de cada sensor. A forma do sinal e as informações estatísticas do acerto são coletadas e armazenadas. Uma série de recursos de sinal EA são extraídos, os quais serão importantes no pós-processamento dos sinais. (Tsangouri e Aggelis 2019, Nazarchuk *et al* 2017, Groose e Ohtsu 2008, Nakuno e Nakamura 2016)

A emissão acústica é estudada em relação à evolução do dano sob carregamento ou relativamente à taxa de propagação de fissuras (Moura 2005). É razoável que o número de sinais

registrados durante o carregamento possa ser correlacionado com o número real de fissuras ativas dentro do material (Susuki *et al.* 2010, Kurz *et al.* 2006). O presente estudo usa esta técnica para desenvolver uma ferramenta de análise para avaliar o dano das amostras de concreto submetido a diferentes ensaios de compressão e assim caracterizar qualitativa e quantitativamente padrões de falha e fissuras que brindam uma base importante para caracterizar o comportamento interno em cada caso.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O principal objetivo deste trabalho é estudar a forma como ocorre a falha de corpos de prova de concreto, quando submetido a diferentes condições de contorno em ensaios de compressão axial sob o uso de metodologia da Emissão Acústica.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos.

- Usando a análise paramétrica das ondas elásticas classificar as fissuras para ter o comportamento característico das falhas internas nos ensaios de compressão com três diferentes condições de contorno. Uma de referência, uma de mínima fricção utilizando placas escova e uma de máxima fricção utilizando chapas coladas nos corpos de prova.
- Usar o método do valor  $b$  que proporciona informação sobre se os eventos de EA são de micro ou macro fissuração. Baseado em parâmetros de EA para determinar uma correlação entre parâmetros de EA e integridade de corpos de prova ensaiados em laboratório.
- Comparar por meio da classificação das fissuras e a energia dos eventos de EA o comportamento dos corpos de prova nas três condições de contorno.
- Determinar se é viável o uso dos expoentes  $\alpha$  e  $h$  que preveem a falha do material com antecedência, e a diferença do comportamento destes expoentes para as diferentes condições de contorno estudadas.

- Comparar as variações existentes no comportamento dos valores dos expoentes  $\alpha$  e  $h$  para diferentes tamanhos de janelas móveis e assim determinar que tamanhos de janelas são adequadas para uma melhor análise.
- Determinar que tipos de ensaio entregam resultados mais precisos quando analisados mediante o método de Emissão Acústica.
- Determinar se a análise do tempo natural é aplicável para encontrar tempos críticos em cada condição de contorno.

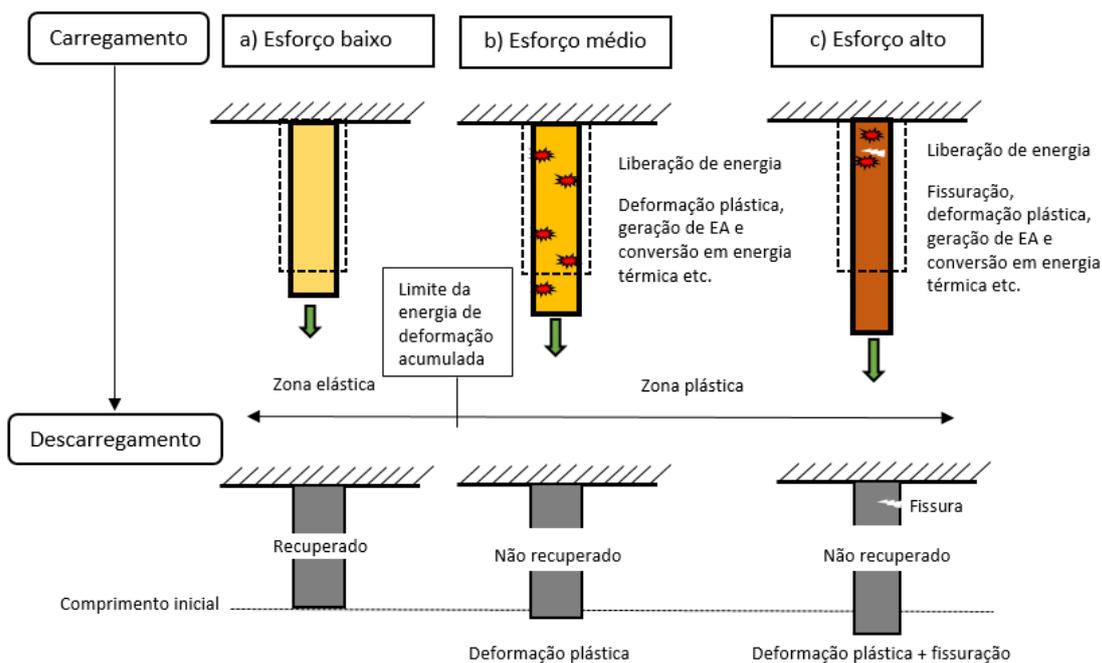
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentadas definições importantes sobre emissão acústica e análise de dados. Também será realizada uma revisão da literatura relevante sobre a evolução desta técnica e análise de parâmetros de emissão acústica de danos utilizados para avaliação de estruturas e corpos de prova de materiais quase frágeis.

### 2.1 Emissão Acústica (EA)

Como é descrito por Ohtsu e Mizutani (2016), um corpo sólido sofre uma deformação elástica quando recupera sua forma inicial após retirar a força externa exercida sobre este. A força externa gera um acúmulo de energia dentro dele conhecida como energia de deformação. Porém há um limite para o acúmulo de energia no corpo sem ocorrência de dano, e uma vez atingido esse limite, a energia será liberada resultando em deformação plástica, impedindo-o recuperar sua forma original mesmo quando a força externa é descarregada. Se uma força externa maior é aplicada, a energia de deformação acumulada dentro do corpo aumenta, e usualmente será consumida pela geração e crescimento de fissuras (Figura 1).

Figura 1 - Geração de EA mediante a liberação de energia de deformação

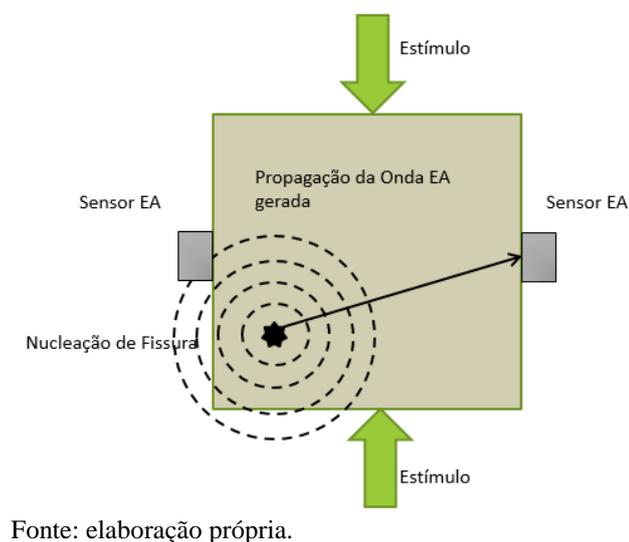


Fonte: Adaptado Ohtsu e Mizutani 2016

Quando o material sólido é fissurado, dissipa energia de deformação. Portanto, a maior parte da energia é liberada. Simultaneamente, a energia restante é consumida para gerar som e calor. O fenômeno em que o som é gerado pela liberação de energia é chamado de emissão acústica (EA) e às vezes é descrito como o “grito” do material sob tensão. (Ohtsu et al., 2016)

A emissão acústica é definida pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como “a classe de fenômenos pelos quais ondas elásticas transientes são geradas pela liberação rápida de energia de fontes localizadas dentro de um material” (ASTM E 1316). As ondas de emissão acústica são detectadas na superfície do material usando sensores como é observado na Figura 2.

Figura 2 - Princípios de Geração, Propagação e Detecção de Emissão Acústica

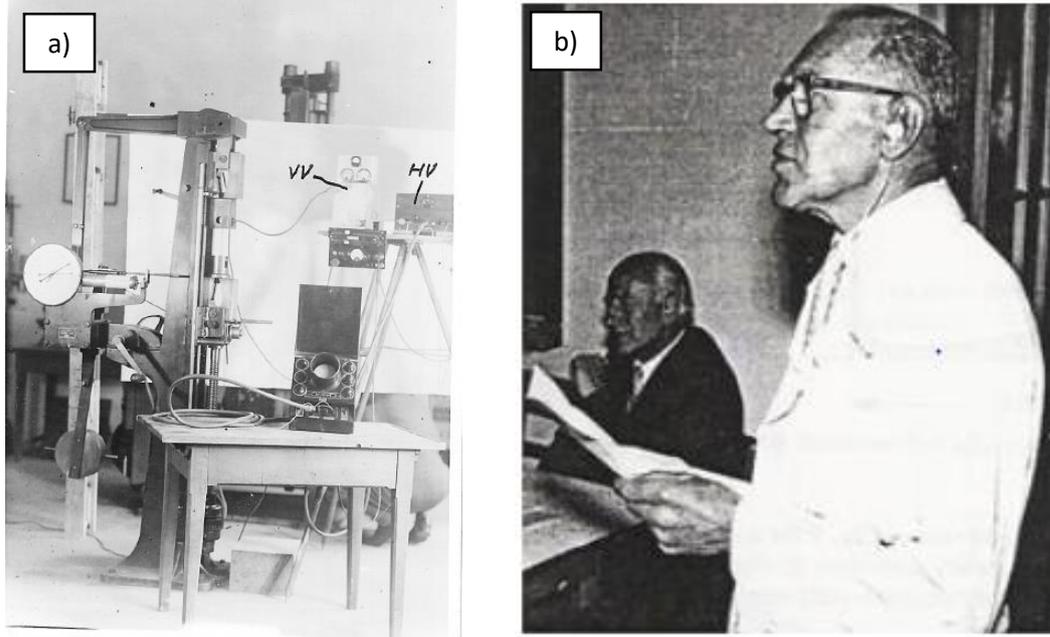


## 2.2 Breve Histórico do Teste de Emissão Acústica

Na Alemanha do pós-guerra uma tese de doutorado desenvolvida por Joseph Kaiser no período de 1945 a 1950 mostraria ao mundo a detecção de sons audíveis produzidos por metais (aço, zinco, alumínio, cobre e chumbo) durante a deformação. Usando instrumentação eletrônica (Figura 3a) Kaiser conseguiu determinar a qualidade destes materiais. Foi assim que sua tese “Investigação da ocorrência de ruídos durante ensaios de tração” fez que a emissão acústica (EA) seja reconhecida como disciplina científica. Este fato é identificado como marco histórico e que aportou entre muitas outras coisas o que se tornou conhecido como efeito Kaiser: “Quando os materiais são carregados ocorre EA, uma vez aliviada a tensão se apresenta

ausência de emissão acústica detectável em um nível fixo de sensibilidade, até que os níveis de esforço aplicados anteriormente sejam excedidos”.

Figura 3 - a) Fotografia da primeira configuração experimental para medir a emissão de som acústico (ASE) com máquina de tração pendular, amplificador e osciloscópio de 1949; do trabalho de J. Kaiser; b) Joseph Kaiser apresentando sua tese de doutorado.



Fonte: Tensi (2004)

A primeira investigação em grande escala em EA depois dos trabalhos de Kaiser se realizou nos Estados Unidos pelo pesquisador Bradford H. Schofield em 1954, iniciando um programa de pesquisa sobre a aplicação da EA em materiais de engenharia. Suas primeiras investigações foram na linha de verificar as conclusões de Kaiser e seu primeiro propósito foi determinar fontes de EA. Schofield desenvolveu investigações sobre como os efeitos de superfície e volume estão relacionados com o comportamento do EA, obtendo como conclusão mais importante que a EA é fundamentalmente um efeito de volume e não de superfície. Schofield, em seus vários artigos publicados, inseriu o termo *acoustic emission* (emissão acústica).

Em 1959, Ruesch estudou o ruído emitido durante a aplicação de carga compressiva no concreto. Ele observou que durante ciclos de carga e descarga de cerca de 70 a 85 % da carga de falha final, as emissões acústicas eram produzidas somente quando a carga máxima anterior era atingida, isso foi conhecido como uns dos primeiros estudos do efeito Kaiser, e relatou que

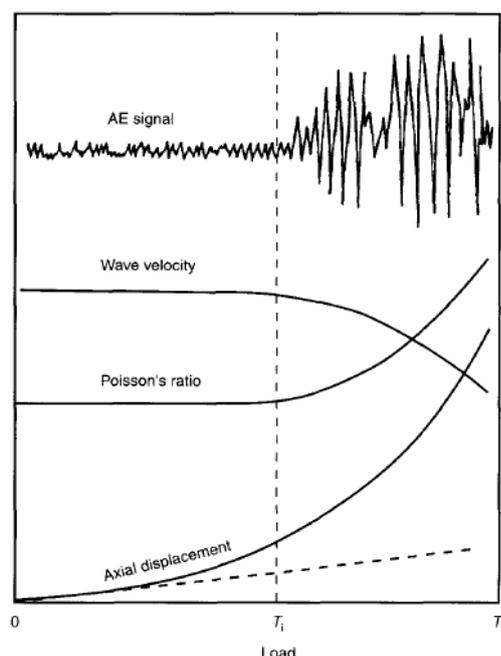
o comportamento de geração de sinais de EA estava intimamente relacionado à alteração volumétrica e à absorção em ondas ultrassônicas.

L'Hermite em 1960 também mediu a emissão acústica do concreto mediante ensaios de compressão, descobrindo que um aumento acentuado na emissão acústica coincidia com o ponto em que o coeficiente de Poisson também começou a aumentar (isto é, no início de fissuras significativas na matriz no concreto) como pode ser visto na Figura 4.

Em 1965, Robinson usou equipamentos mais sensíveis para mostrar que a emissão acústica ocorria em níveis de carga muito mais baixos do que os relatados anteriormente e, portanto, poderia ser usada para monitorar microfissuras (como as envolvidas no crescimento de fissuras de ligação na região interfacial entre cimento e agregado).

A aplicação recente de EA à engenharia de concreto começou no final de 1970, quando a tecnologia original desenvolvida para metais foi modificada para se adequar a materiais heterogêneos. Posteriormente, o interesse da pesquisa aumentou, gerando novos campos na pesquisa de EA, como a localização da fonte do sinal. Esta metodologia é aplicada para determinar a posição das fissuras e sua orientação no material. Shah e Zongjing (1994) aplicaram a nova metodologia para identificar a zona de processo de fratura de materiais cimentícios, que possuem comportamento *strain-softening* (amolecimento por tensão).

Figura 4 - Resultados Experimentais de L'Hermite, parâmetros mecânicos do concreto sob compressão



Fonte: Groose e Ohtsu 2008

A ampla aplicabilidade da técnica de EA à engenharia é evidente em investigações mais recentes, esta técnica permite monitorar estruturas em tempo real, possibilitando a detecção imediata de sinais causados por fissuras (Kaphle, 2012). No monitoramento de EA podem ser aplicadas duas estratégias de monitoramento. A global ajuda na avaliação de toda a integridade da estrutura e a local preocupada com uma área de dano específica.

Em estruturas de concreto a avaliação da condição do material pode ajudar a evitar falhas nas estruturas. EA é uma das técnicas mais utilizadas para monitoramento não destrutivo em tempo real, a metodologia por trás da técnica de EA é medição e registro de ondas elásticas emitidas durante a incidência de propagação de trincas por transdutores que são mantidos na superfície do material. Em estudo realizado por Ohno E Ohtsu (2010) dois modos de fissura foram investigados para classificar fissuras no concreto, aplicando o valor do RA (tempo de subida/amplitude) e os parâmetros de frequência média.

Alguns estudos analisaram a aplicação potencial da técnica de EA em entender o comportamento da fratura de materiais compósitos (Pappas e Kostopoulos 2001). A EA, diferentemente de outras técnicas que só conseguem detectar descontinuidades, detecta movimentos de ruptura de fibras, delaminação (remoção de camadas vizinhas) em placas compostas laminadas, quebra de matriz e extração de fibras (Diamanti e Soutis 2010). Em materiais compósitos a maioria das EA são causadas pela fricção que ocorre entre os componentes danificados no composto.

A EA permite encontrar a dimensão do defeito através da energia liberada detectada. Usando essas teorias, podemos entender melhor a relação entre eventos micro estruturais e comportamento macroscópico e estamos em uma posição melhor para formular modelos preditivos, sobre efeitos em escala de laboratório ou desempenho estrutural e confiabilidade em tamanho real (Carpinteri *et al.* 2007). Posto isso, a importância de realizar este tipo de análise deve ser enfatizada para entender o comportamento interno de materiais sujeitos a diferentes tipos de tensões como visto em estudos feitos por Xu (2018) ou Lacidogna *et al.* (2019).

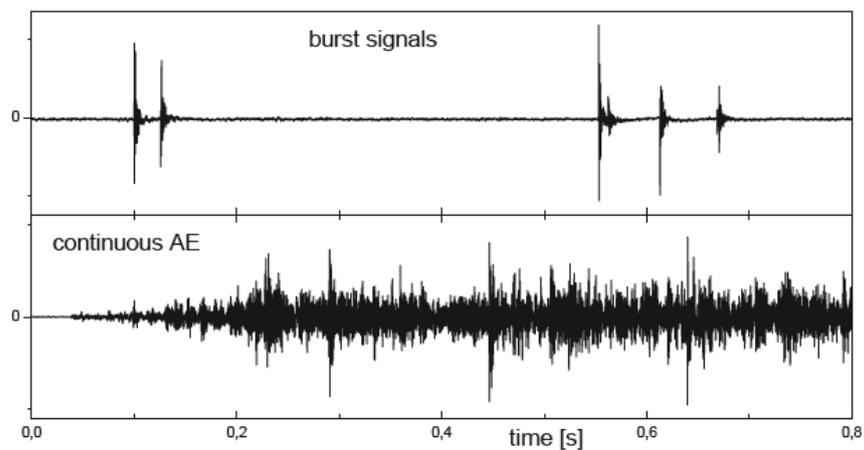
## 2.3 Propriedades das Ondas de Emissão Acústica (EA)

### 2.3.1 Fontes de Emissão Acústica

A classificação das fontes de EA, que geram sinais durante o início e propagação de uma fissura, é de especial interesse para os pesquisadores. Segundo Zohora (2016) as fontes de emissão acústica podem variar de eventos naturais como terremotos, rupturas de rocha até o início e crescimento de fissuras, deslizamento e movimentos de deslocamento, escoamento, derretimento, geminação e transformação de fase em metais. De acordo com Ohtsu *et al.* (2016) as ondas EA são essencialmente geradas por fenômenos de falha e podem ser atribuídas principalmente à formação de microfissuras. Este tipo de EA é algumas vezes denominada EA primária. Por outro lado, a EA gerada pela formação de ferrugem e fricção causada por inclusões e partículas é denominado EA secundária.

As fontes de emissões acústicas podem ter características amplamente variáveis devido a diferenças significativas nos sinais da fonte como visto em Kurz *et al.* (2008). Na Figura 5 emissões contínuas produzidas por fricção em rolamentos rotativos ou durante o corte de metal apresentam características de sinal muito diferentes quando comparadas aos sinais de estouro causados pela liberação espontânea de energia durante a fissuração. Este último apresenta um sinal denominado Burst o qual é mais adequado para as distintas técnicas de EA.

Figura 5 - Exemplo de sinais de Burst comparados a uma emissão contínua de ondas acústicas.



Fonte: Groose (2008)

### 2.3.2 Propagação de Ondas de EA

Ao contrário de líquidos e gases, o campo acústico em um sólido é mais complexo, porque um sólido possui não apenas a elasticidade do volume como líquidos e gases, mas também a elasticidade de sua forma, isto é, elasticidade ao cisalhamento. O conceito de tensão é introduzido para sólidos em vez de pressão, isto é, a força relacionada a uma unidade de superfície (Nazarchuk et al, 2017).

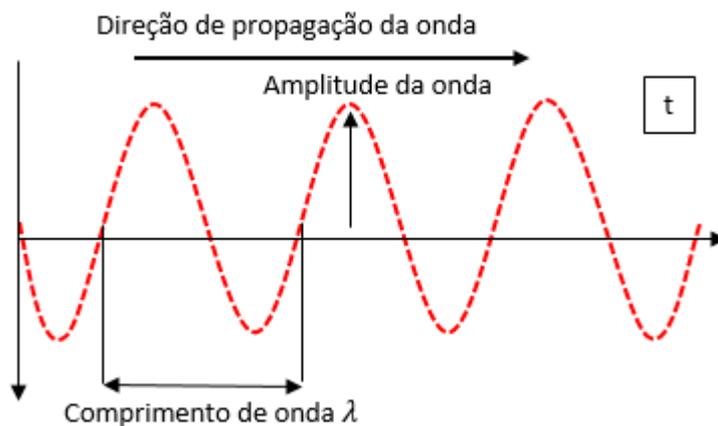
A ligação entre a fonte e o sinal de emissão acústica produzido pelo sensor é a onda acústica. Todos os materiais são feitos de átomos. Para frequências muito baixas de movimentos atômicos, o acoplamento pode se estender por um grande número de átomos (alta penetração). Esse movimento correlacionado de uma longa gama de átomos é uma onda acústica que corresponde a muitos átomos deslocados na mesma direção do seu equilíbrio. Este movimento é uma deformação local na estrutura do cristal. Essa deformação é dinâmica e o movimento atômico é quase oscilatório.

Em um meio, uma onda (Figura 6) tem um componente espacial e um temporal. Frequência, comprimento de onda e velocidade estão intimamente relacionados da seguinte maneira:

$$V = \lambda * f \quad (1.0)$$

Onde a velocidade (V); velocidade de deslocamento (cm/s): a frequência (f): ciclos por segundo (1/s) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ): distância que o som percorre em um ciclo (cm).

Figura 6 - Uma onda plana em um meio homogêneo em um tempo fixo, t



Fonte Adaptado Chapman (2004)

Uma onda acústica pode existir em qualquer material: sólido, líquido ou gás. Sua velocidade se determina pelas características do material (Muravin 2009).

$$V_i = \sqrt{C_i/\rho} \quad (2.0)$$

Sendo  $V_i$  a velocidade dos tipos de ondas; a constante elástica ( $C_i$ ) é uma medida da força de acoplamento entre átomos para este tipo particular de movimento. A força de acoplamento é a força existente nas ligações atômicas. Diferentes movimentos relativos dos átomos terão diferentes valores de constante elástica. A velocidade da onda deve ser diretamente proporcional à força atômica (constante elástica) e inversamente proporcional à densidade do material ( $\rho$ ).

### 2.3.3 Tipos de Ondas

O tipo de onda está determinado pela correlação entre o movimento das partículas e a direção de propagação das ondas.

- Onda Longitudinal ou de Compressão

Em uma onda longitudinal também conhecida como onda primária ou onda P, a partícula vibra na direção da propagação do som, a forma da onda é produzida por uma série alternativa de compressão e expansão. A onda P é a mais rápida e pode se propagar efetivamente em todos os estados da matéria (Holford e Lark 2005). A apresentação diagramática é mostrada na Figura 7(a).

- Onda Transversal ou de Corte

Também conhecida como onda de cisalhamento ou onda S, neste caso a partícula vibra a 90° respeito à direção da propagação do som, tem a metade da velocidade das ondas longitudinais e só pode se propagar nos sólidos (Ohtsu *et al.* 2016). Observamos a apresentação diagramática na Figura 7(b).

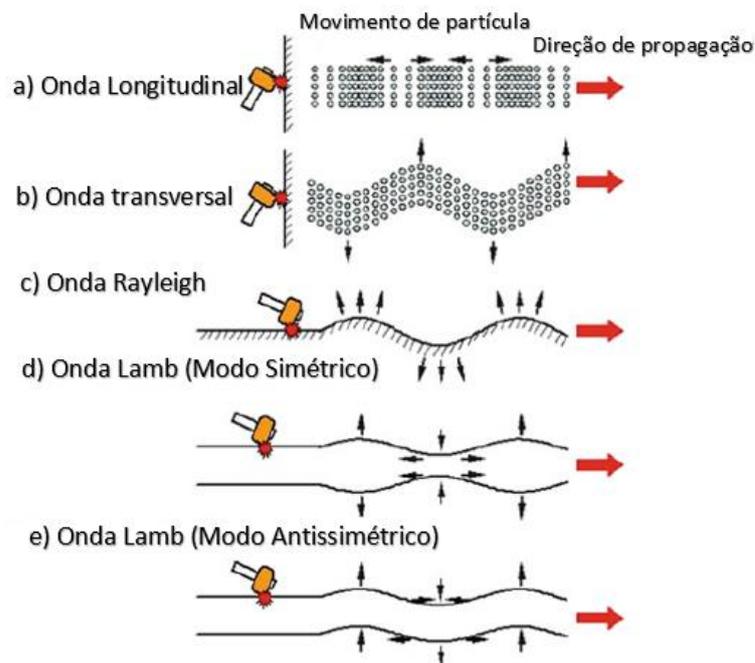
- Onda de Superfície

Junto com as ondas transversais e longitudinais se geram as ondas de superfície ou Rayleigh que viajam sobre a superfície e ingressam a uma profundidade de um comprimento de onda, o movimento das partículas tem uma órbita elíptica, se propagam ao longo da superfície e sua velocidade é de aproximadamente 0,9 vezes a velocidade da onda transversal (Holford e Lark 2005). Este tipo de onda

é a mais favorável para a localização de fontes de emissão acústica devido a que ela é não dispersiva, são como ondas de água, exceto que o movimento das partículas é elíptico e não circular.

Para que existam estas ondas devemos ter uma interface entre sólido e gás, também a espessura do material deve ser maior de aproximadamente um comprimento de onda. A maior parte da energia do som produzido se concentra na superfície (Figura 7(c)).

Figura 7 - Tipos de Movimento de Onda

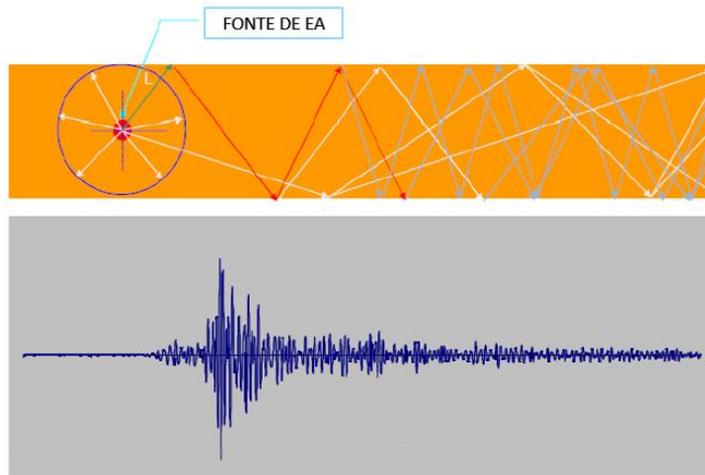


Fonte: Adaptado Ohtsu (2016)

- Ondas de Lamb

São geradas quando o comprimento de onda é comparável com a espessura do material devido à reflexão das ondas longitudinais e transversais nas duas placas de superfície, trata-se de uma onda dispersiva pois a velocidade de propagação varia com a frequência (Zohora 2016). O sinal de saída do sensor de emissão acústica é resultante da soma das ondas diretas e refletidas (Figura 8).

Figura 8 - Propagação da onda Lamb



Fonte: Adaptado Reyna (2015)

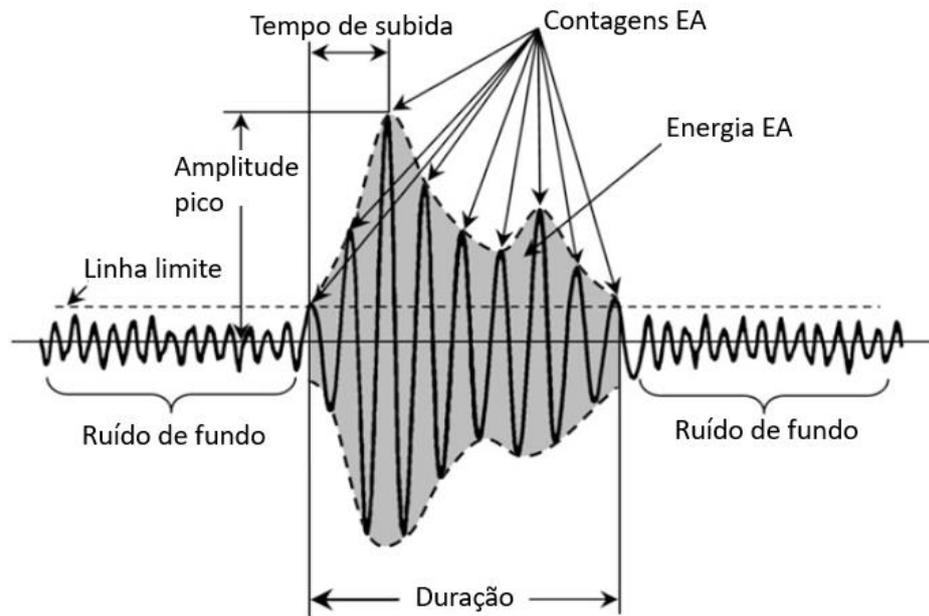
Existem dois tipos de ondas Lamb, as simétricas que podem existir em um número complexo de movimentos de partículas (Figura 7(d)), e as assimétricas, nas quais a espessura do material deve ser um comprimento de onda ou menos. Possuem uma velocidade menor que a onda transversal, mas são variáveis (Figura 7(e)).

Teoricamente, um sinal AE detectado deve começar com uma onda P e, se houver ruído alto e a onda P for interferida, uma onda S ou Rayleigh pode ser encontrada (Ohtsu, 1996).

## 2.4 Parâmetros de Emissão Acústica

Quando um sensor de EA é submetido a um movimento mecânico como um fenômeno de fratura, gera um sinal elétrico, que pode ser identificado como um sinal de EA. Este sinal pode conter informações sobre o evento de EA na fonte geradora da onda. Portanto, informações referente a eventos de EA e fenômenos físicos geralmente são inferidas indiretamente; isto é, calculando parâmetros de forma de onda que representam as características de uma forma de onda do sinal discriminado de EA (Figura 9), examinando variações temporais em parâmetros específicos de forma de onda durante a medição de EA, obtendo distribuições para um ou mais linhas limites de avaliação predeterminados e investigando a correlação entre diferentes parâmetros de forma de onda (Ohtsu et al, 2016).

Figura 9 - Parâmetros de Emissão Acústica



Fonte: Ohtsu (2016)

De acordo com norma ISO 12726:2001, os parâmetros de forma de onda são definidos como segue:

- Limiar: amplitude mínima do sinal EA que será gravado e analisado, este valor pode ser escolhido pelo operador dependendo da exigência do teste, é expresso em dB (decibéis). Além de ajustável pelo usuário a linha limite pode ser fixa ou flutuante automática (ASTM E 1316). Ela é usada para selecionar e rejeitar sinais com baixa amplitude, posto que elas não providenciam informação útil visto que os sinais captados são ruídos do ambiente, de circuitos eletrônicos ou interferências eletromagnéticas. É uma variável importante, pois as medições dependem dela para evitar baixo ruído ambiental, mas ao mesmo tempo sensível o suficiente para registrar eventos reais de EA devido a propagação de fissuras (Holford e Lark, 2005) (Aggelis et al, 2011).
- Acerto: um sinal que excede a linha limite e causa que o sistema comece a acumulação de dados é chamado de acerto (“hit”). A razão de acertos é um dos parâmetros frequentemente usados na análise de dados de EA.
- Contagens: número de vezes que o sinal de emissão acústica excede uma predefinição limiar durante qualquer parte selecionada de um teste (ASTM 1316). A contagem de EA em um determinado momento é dividido pelo tempo decorrido desde o início do sinal de EA, e o valor do resultado da contagem por unidade de tempo é chamado taxa de contagem de EA. Contagens é um dos parâmetros mais velhos e mais simples de

associar a eventos acústicos. O problema é que esse parâmetro tende a enfatizar fatores acústicos e do instrumento de medição às custas de fatores de fonte, uma vez que são dependentes da ressonância do elemento transdutor (Drummond *et al.* 2007).

- Amplitude: o pico de tensão detectado entre o início e o fim do sinal de EA é conhecido como amplitude. Ela está relacionada à magnitude da fonte do evento, e elas podem variar de microvolts a volts e geralmente é relatada em decibéis (dB). A tensão é convertida em decibéis usando a seguinte equação.

$$A = 20 \log \left( \frac{V}{1\mu\text{volt}} \right) - (\text{Ganho do pré - amplificador}) \quad (3.0)$$

Aqui A é amplitude em decibéis; V é tensão máxima recebida para aquela onda e o ganho do pré-amplificador é o ganho informado ao aparelho.

A amplitude de pico de um sinal de emissão acústica é uma indicação da intensidade da fonte (Pollock 1995). Devido aos vários fatores que podem afetar a resposta de um transdutor a amplitude de pico de um sinal individual pode não fornecer informações significativas em relação à fonte. No entanto, quando os dados relacionados à amplitude são avaliados por meio de métodos estatísticos, poderia fornecer informações úteis (Pollock, 1981).

A análise da distribuição de amplitude pode ser usada para aumentar o grau de confiabilidade dos dados de emissão acústica (Fowler e Gray 1979).

- Duração: é definida como o tempo entre o início do sinal EA e o final do sinal EA (ASTM E 1316). É o intervalo de tempo desde a primeira passagem do limiar até o último cruzamento do limiar pelo sinal. A duração do sinal é afetada pela seleção do nível limite e depende da magnitude da fonte, acústica estrutural e reverbação. Geralmente é relatada em microsegundos. As várias fontes de EA podem produzir sinais de diferentes durações. As fontes de ruído mecânico normalmente geram sinais de longa duração enquanto a duração do sinal para um pulso elétrico é geralmente inferior a 10 microssegundos (Pollock 1995).
- Tempo de subida: é o intervalo de tempo desde o primeiro cruzamento do limiar até o tempo onde ocorreu o pico de máxima amplitude. O tempo de subida está intimamente relacionado à função de tempo da fonte e aplicado para classificar o tipo de fratura ou eliminar os sinais de ruído.

- Energia: geralmente definida como uma área medida abaixo da envoltória do sinal retificado. A energia é preferida para interpretar a magnitude do evento da fonte sobre as contagens, porque é sensível à amplitude, bem como à duração e menos dependente do limiar de tensão e das frequências de operação (Ohtsu, 2008).

#### 2.4.1 Outros Parâmetros

- Frequência média (AF): calculado a partir da “contagem” dividida pela “duração”, que determina a frequência média ao longo de um evento de EA. A frequência média é usada habitualmente quando as formas de onda do sinal são praticamente difíceis de serem registradas.
- Frequência inicial: deriva de calcular a “contagem até o pico” dividido pelo “tempo de subida”.
- Frequência de reverbação: calculado da subtração “ (contagem) - (contagem até o pico) ” dividido por “ (duração) – (tempo de subida) ”.
- Valor de RA: derivado do “tempo de subida” dividido por “amplitude”, mostrando o recíproco de gradiente nas formas de onda do sinal EA. Que é relatado em ms/V. Os valores de RA são utilizados para classificar o tipo de fissuras.

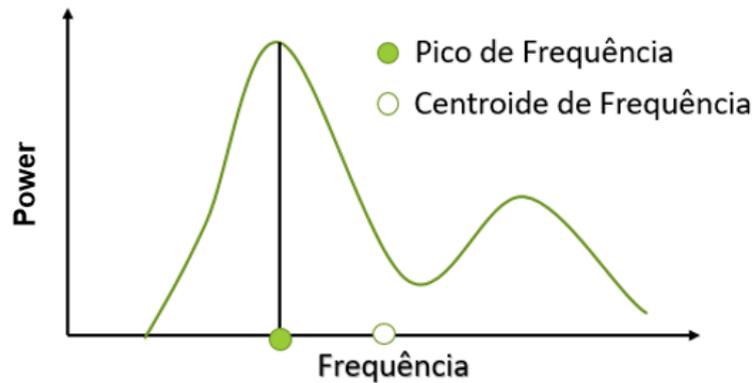
#### 2.4.2 Parâmetros de Frequência

As formas de onda do sinal de EA caracterizam os mecanismos de origem das EA, e com ajuda de sistemas de instrumentação, e aquisição de dados, modernos pode-se adquirir os sinais de EA em tempo real. Atualmente, esses parâmetros no domínio da frequência, como mostrado na Figura 10, desempenham um papel importante na interpretação dos dados de EA. A taxa de amostragem e o comprimento da forma de onda afetam a resolução dos parâmetros de frequência, pelo que é necessária atenção durante a análise de frequência.

- Centróide de frequência: O centróide de frequência, também conhecido como primeiro momento de inércia, é um recurso derivado da frequência em tempo real. Se uma soma da magnitude vezes a frequência for dividida por uma soma da frequência, o resultado será conhecido como Centróide de Frequência (C), é relatado em quilohertz (kHz).

- Pico de frequência: (PF) relatado em quilohertz (kHz), é o ponto no espectro de potência onde a magnitude de pico é observada.

Figura 10 - Configuração de Pico de Frequência e Centroide de Frequência



Fonte: Ohtsu (2008)

## 2.5 Análise Paramétrica dos Sinais de EA

Para interpretar os dados de EA adquiridos, os recursos paramétricos de EA baseados em correlação, tempo ou parâmetros externos são habitualmente usados com sua taxa de ocorrência ou tendência acumulada. Além disso, valores estatísticos do parâmetro e algumas combinações entre os parâmetros de EA, bem como parâmetros externos, são estudados intensivamente para relacionar a escala de fratura ou o grau de dano nos materiais e estruturas (Shiotani 2008).

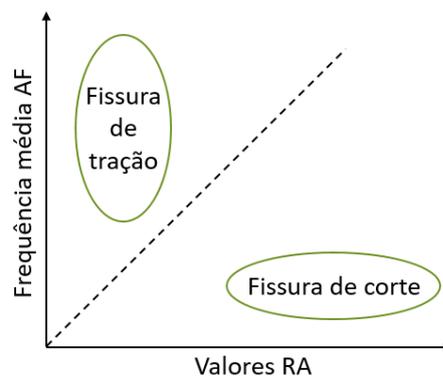
Só quando o sinal consegue passar a linha limite será reconhecido como um evento de EA, com isso são registrados parâmetros como amplitude, evento, contagem, duração, energia, intensidade do sinal, tempo de subida e as formas de onda EA. Portanto, recursos baseados em formas de onda como frequência de pico e centroide de frequência, podem ser determinados em tempo real a partir da transformada rápida de Fourier (FFT) das formas de onda registradas. Assim, os parâmetros EA extraídos oferecem boas informações sobre o comportamento de falha ou dano dos materiais (Groose e Ohtsu, 2008).

## 2.5.1 Interpretação e Avaliação dos Dados Registrados

### 2.5.1.1 Classificação de Fissuras por EA

Para estruturas ou corpos de prova de concreto, é proposta a classificação dos tipos de fissuras, utilizando a combinação de frequência média e dos valores de RA. Esta técnica de classificação foi padronizada (JCMS 2003), como visto na Figura 11.

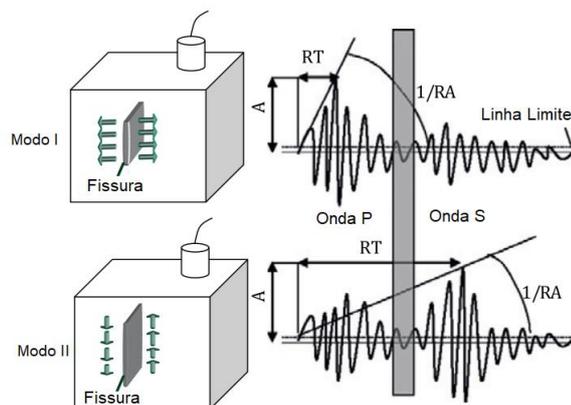
Figura 11 - Classificação de Fissuras com uma Combinação de Frequência Média e Valores de RA



Fonte: Shiotani (2008)

O modo de fratura é caracterizado pelo formato das formas de onda EA. Valores baixos de tempo de subida e alta frequência são típicos de propagações de trincas por tração, que incluem movimentos opostos dos lados da trinca (Modo I); enquanto os eventos de cisalhamento geralmente resultam em formas de onda mais longas, com tempos de subida mais longos e menor frequência (Modo II) (Aggelis et al., 2012), como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Modos de Fissura e Forma da Onda EA



Fonte: Aggelis (2012)

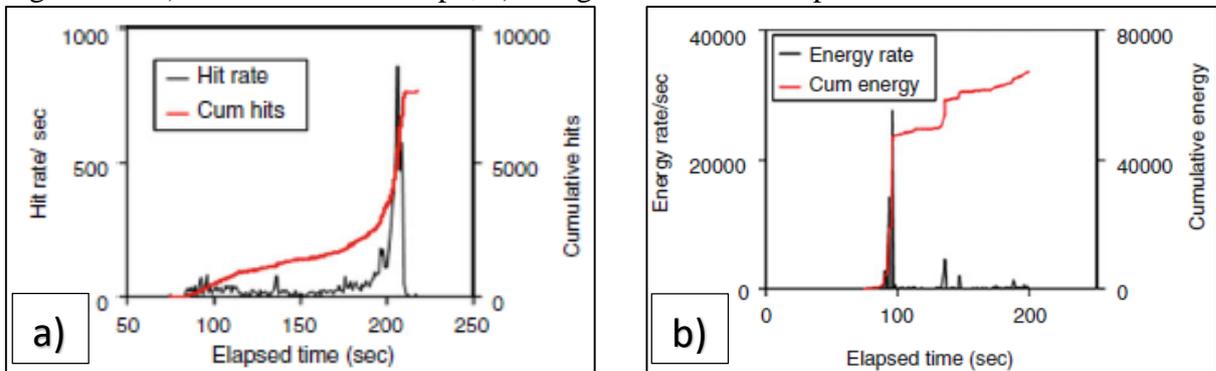
### 2.5.1.2 Avaliação de Série de Dados

Os dados de EA são geralmente avaliados ao longo do tempo ou para uma carga variável. É realizada uma análise quantitativa dos eventos com respeito ao tempo e à porcentagem de carga, este tipo de avaliação oferece informação sobre as mudanças da (Vallen 2002). Como um exemplo de avaliação de série de dados EA, a

Figura 13a mostra o tempo história de todas as ocorrências (hit) de EA obtidas pelos sensores no decorrer do tempo. Estes últimos utilizados para um ensaio de compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, é usado teflon entre a face da extremidade da amostra e a placa de carregamento (Shiotani 2016), enquanto a

Figura 13b mostra o tempo história da energia EA obtida de todos os sensores.

Figura 13 - a) Hits EA versus tempo, b) energia EA versus tempo



Fonte: Shiotani (2016)

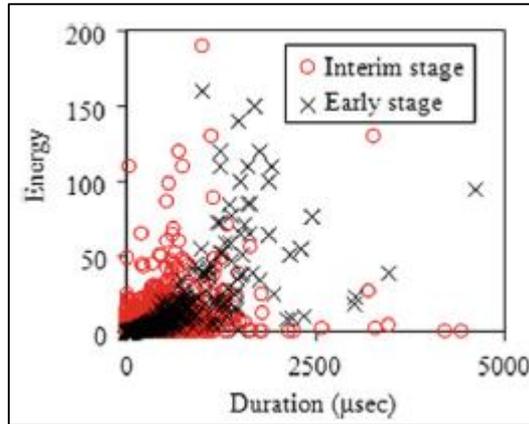
É visto que a atividade de EA aumenta conforme se aproxima do estágio final de carregamento na avaliação baseada em acertos de EA, enquanto há um alto nível de energia de EA no estágio inicial de carregamento na avaliação baseada em energia.

### 2.5.1.3 Avaliação de Correlações entre Parâmetros EA

Segundo Shiatoni (2016), para examinar os fatores que contribuem para a geração de fontes de EA por nucleação ou crescimento de fissura devido à tração, deformação por cisalhamento ou atrito dentro dos defeitos, a avaliação das correlações entre os parâmetros de EA é eficaz em alguns casos. Na Figura 14 por exemplo mostra como sinais de EA obtidos após o estágio intermediário apresentam alta energia e curta duração. Dessa forma, a

consideração de correlações entre os parâmetros de EA permite o exame da escala e do mecanismo de fratura que resulta de fontes de EA.

Figura 14 - Correlação entre energia e duração

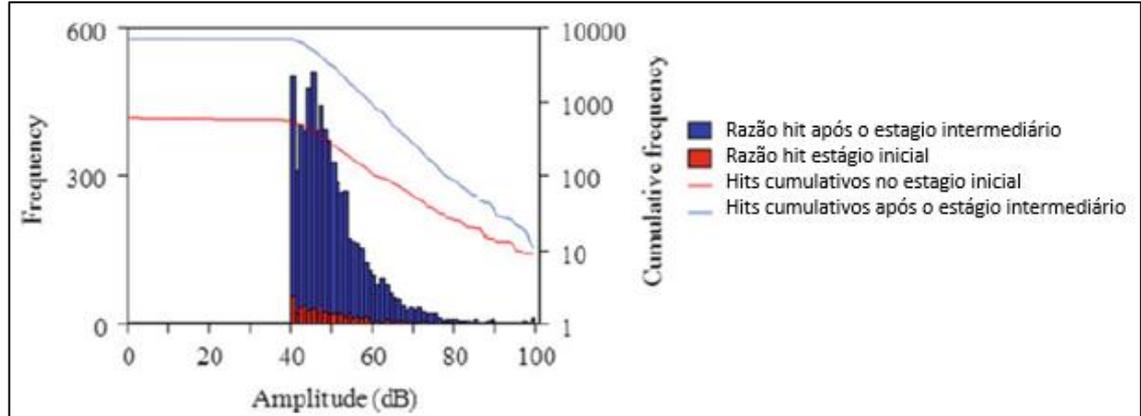


Fonte: Shiotani (2016)

#### 2.5.1.4 Avaliação de Frequência em Parâmetros EA

A avaliação adequada da mudança de frequência nos parâmetros de EA pode permitir a avaliação do processo de fratura. Uma avaliação representativa da frequência nos parâmetros de EA é baseada na amplitude do pico de EA, que é chamada de distribuição de amplitude (Shiotani 2016). Na Figura 15 os gráficos de barras e as linhas sólidas representam a distribuição de amplitudes diferencial e cumulativas respectivamente. A partir da figura estima-se que o gradiente de distribuição de amplitude cumulativa para o estágio inicial de carregamento é menor do que após o estágio intermediário de carregamento. Isto sugere que a atividade de EA com grande amplitude ocorre com mais frequência em relação à atividade de EA com pequena amplitude durante o carregamento inicial do que no caso após o estágio intermediário.

Figura 15 - Distribuições de amplitude com progressão de dano



Fonte: Shiotani (2016)

## 2.6 Análise do Valor b

O vínculo entre emissões acústicas e o processo de dano em estruturas de engenharia vem sendo enriquecido com o amplo estudo da sismologia e sua ligação com aplicações de EA. Um exemplo clássico é a lei clássica proposta por Gutenberg e Richter (1958). Esta lei relaciona a estatística das amplitudes do sinal usando uma lei exponencial universal. De acordo com Shiotani et al. (1994), Hemmer e Hansen (1992) e Hansen (2015) trata-se de uma lei universal que não depende da escala da distribuição. Podendo ser expressa da seguinte forma:

$$N(\geq A) = \zeta A^{-b} \quad (4.0)$$

Onde N é o número acumulado de eventos, A amplitude do sinal e  $\zeta$  e b são constantes de ajuste. Definindo  $m = \log A$  como outra medida da magnitude do sinal, podemos reescrever a equação 4 no domínio bi logarítmico da seguinte forma:

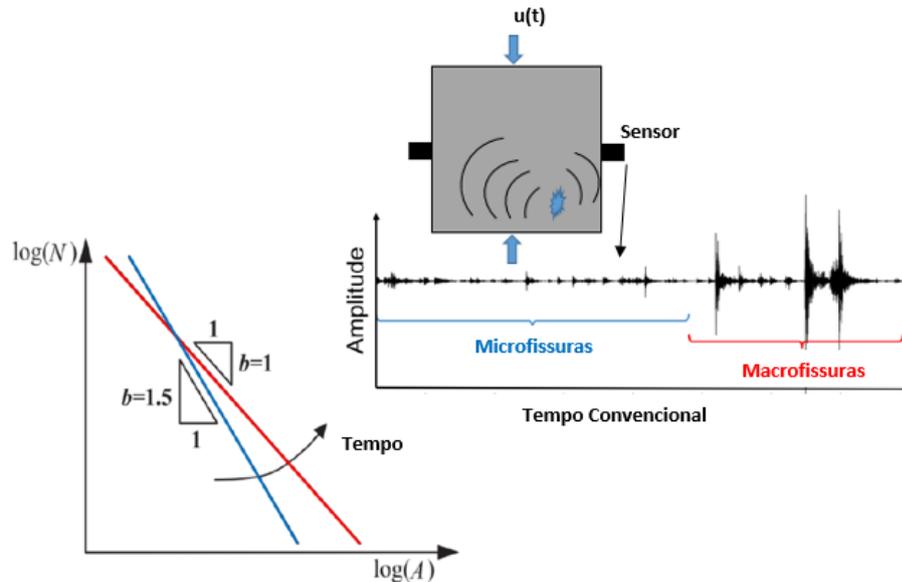
$$\log N = \log \zeta - bm \quad (5.0)$$

Onde b será a inclinação da linha que liga a amplitude dos sinais e o número acumulado de eventos, considerando ambas as variáveis em escala logarítmica.

A Figura 16 ilustra como o valor b varia durante um processo de dano típico. Segundo Aki (1967) e Carpinteri et al. (2009), o seu significado físico está relacionado com a dimensão fractal (D) do domínio de onde emanam as fissuras através da expressão  $D = 2b$ . No início do processo de dano, valores b elevados indicam a ocorrência de muitos eventos de EA de pequena amplitude causados pela formação de microfissuras distribuídas por todo o volume da estrutura, implicando  $D = 3$  e  $D = 1,5$ . À medida que o processo de dano evolui para produzir o efeito de localização, ou seja, os eventos tendem a emanar de uma região preferencial e formam uma

“nuvem” de microfissuras Friedrich (2021). Assim, ocorre a nucleação de macrofissuras, e os eventos acústicos tendem a se originar de uma superfície definida, i. e.,  $D = 2$  e  $D = 1$ . Em termos da Equação (4.0), isso é interpretado como um incremento de eventos de alta amplitude. O valor  $b$  é um parâmetro clássico no monitoramento de estruturas e, portanto, é utilizado aqui como referência para avaliar a utilidade dos índices propostos.

Figura 16 - A evolução do valor  $b$  e seu significado físico em relação a um sinal de emissão acústica.



Fonte: Adaptado Friedrich (2021)

## 2.7 Medidas de Correlações de Longo Alcance

### 2.7.1 DFA

Análise de flutuação não tendenciosa (DFA pela sigla em inglês). É um método proposto inicialmente por Peng et al. (1994). Desenvolvido para detectar correlações em séries temporais não estacionárias. O método abarca os seguintes passos:

1. Considere um sinal correlacionado  $u_i$  (sinal do acelerômetro) onde  $i = 1, \dots, N_{max}$  (número total de pontos na série). Integramos o sinal  $u_i$  e obtemos  $y(k) = \sum_{i=1}^k u(i) - \langle u \rangle$ , onde  $\langle u \rangle$  representa a média de  $u$ ;
2. O sinal integrado  $y(k)$  é dividido em janelas de igual comprimento  $n$ ;
3. Para cada janela de tamanho  $n$ , ajustamos  $y(k)$ , usando uma linha de mínimos quadrados (linha vermelha na Figura 17), que representa a tendência da janela. A

seqüência de linhas ajustadas constitui a série de tendência  $y_n(k)$ . A Figura mostra a série integrada com três tamanhos de janelas diferentes,  $n=250$ ,  $n=135$ ,  $n=50$

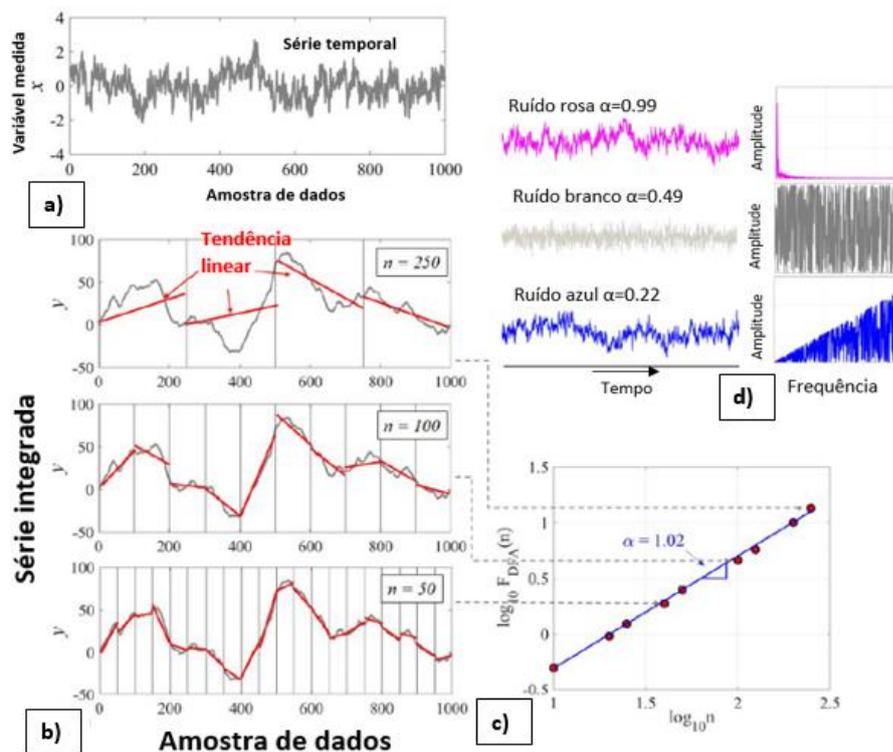
4. Calcule a flutuação média  $F_{DFA}$  da série integrada  $y(k)$  em torno da série de tendência

$$y_n(k). \text{ Explicitamente, } F_{DFA} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_{max}}\right) \sum_{k=1}^{N_{max}} [y(k) - y_n(k)]^2}.$$

5. Repita a etapa 4 para uma ampla gama de intervalos (tamanhos de  $n$ ) para fornecer uma relação entre  $F_{DFA}$  e  $n$ , ou seja,  $F_{DFA}(n)$ .

6. Plote  $\log(F_{DFA})$  versus  $\log(n)$  (veja Figura 17). Se houver uma relação linear óbvia entre eles, a inclinação de seu ajuste de mínimos quadrados estimou o expoente de escala.

Figura 17 – Ilustração gráfica das etapas do DFA. a) Exemplo de série temporal; b) séries integradas divididas em janelas de tamanhos diferentes com suas tendências de ajuste linear correspondentes; c) gráfico log-log das flutuações médias  $F_{DFA}(n)$  versus tamanhos de janela  $n$ . O expoente de escala estimado  $\alpha$  é a inclinação da linha ajustada de mínimos quadrados; d) exemplos representativos de séries de tempo e espectro de potência branca (aleatória), rosa (fractal, correlacionada de longo alcance, ligeiramente persistente) e azul (antipersistente)



Fonte: Adaptado Rigoli (2004)

A aplicação da metodologia DFA produz tanto uma medida de persistência quanto um índice de autossimilaridade na série temporal. Resumindo quando temos  $\alpha \approx 0,5$  indica que o sinal é não correlacionado ou não similar na estrutura de variabilidade (ruído branco). Se temos

$\alpha > 0,5$  as estruturas de variabilidade do sinal são correlacionadas de longo alcance, persistentes ou autosimilares, ou seja, se uma amostra de sinal de pequena amplitude é muito provável de ser seguida por uma ainda menor ou similarmente se uma amostra de grande amplitude tende a ser seguida por uma ainda maior (ruído rosa). Finalmente se  $\alpha < 0,5$  a relação de sinal é antipersistente, uma amostra de pequena amplitude é mais provavelmente seguida por uma de grande amplitude e vice-versa.

### 2.7.2 R/S

Hurst (1951) estudou o levantamento hidrográfico do rio Nilo descobrindo que a vazão de água de cada ano tinha certa correlação temporal. Com base nisso, ele introduziu o método de análise de intervalo reescalado (R/S). A ideia básica do método é determinar como o alcance das flutuações acumuladas depende do comprimento do subconjunto de dados em análise (Bassingthwaighte 1994). Como no método DFA, uma série temporal de comprimento  $N_{max}$  é dividida em janelas de igual comprimento com tamanho  $n$ . Consideramos janelas  $n=250$  na Figura, a série temporal é a mesma discutida na Figura 18a. Em seguida para cada janela:

1. Pegue a média  $\langle x \rangle_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x(j)$  da  $n$ ésima janela, marcado com as linhas vermelhas sólidas na Figura 18b.
2. Some as diferenças da média para obter o total acumulado  $X(i, n)$  em cada ponto de dados, desde o início do período até qualquer ponto desejado, ou seja,  $X(i, n) = \sum_{i=1}^n x(i) - \langle x \rangle_n$ , Figura 18b.
3. Calcule o intervalo local  $R(n) = \max X(i, n) - \min X(i, n)$  como a flutuação máxima da soma do desvio de média, onde  $\max X(i, n)$  e  $\min X(i, n)$  são os valores máximos e mínimos de  $X(i, n)$ , respectivamente, e  $1 \leq i \leq n$  (Figura).
4. Pegue o desvio padrão  $s(n) = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n [x(i) - \langle x \rangle_n]^2}$  sobre a janela para normalizar o intervalo relativo às flutuações de entradas na série (linhas vermelhas tracejadas na Figura 18b)
5. Reescale o intervalo, ou seja, calcule  $R(n)/s(n)$ .
6. Por fim, calcule o valor médio do intervalo redimensionado para todas as janelas,  $n_w$  (quatro no caso da Figura 18b):

$$(R/S)_n = \frac{1}{n_w} \sum_{m=1}^{n_w} R_m/S_m \quad (6.0)$$

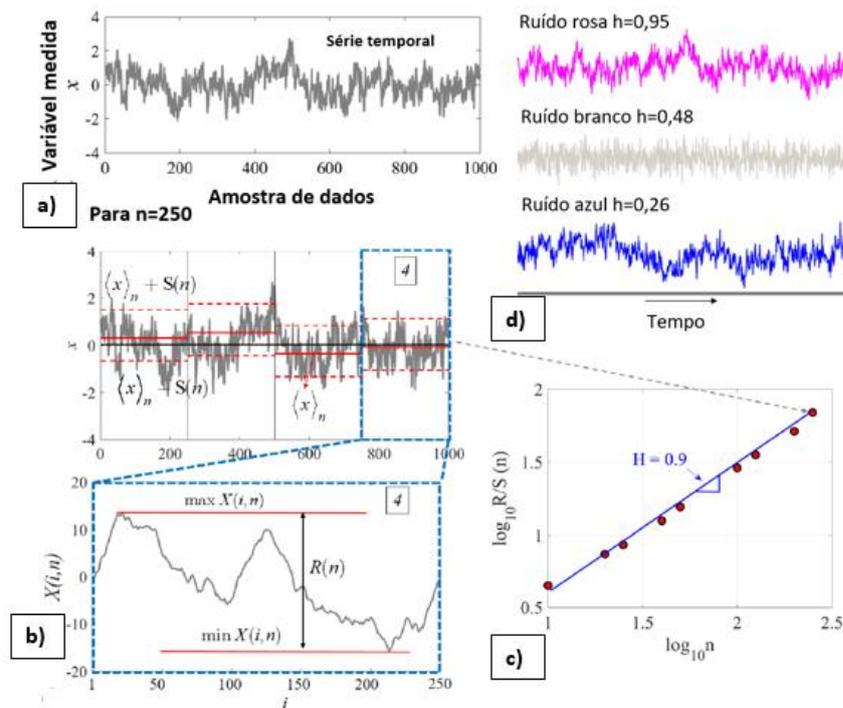
Para janelas com comprimentos diferentes, o novo valor adimensional R/S é bem descrito pela seguinte relação empírica, conforme ilustrado na Figura 18c:

$$R/S_n \sim n^h \quad (7.0)$$

Em eixos log-log, a inclinação de uma regressão de mínimos quadrados é a estimativa do expoente  $h$  de Hurst.

O parâmetro  $h$  varia de 0 a 1 e tem o mesmo significado do parâmetro  $\alpha$  (Figura 18d):  $h \approx 0,5$  para o caso do ruído branco, ou seja não correlacionado;  $h > 0,5$  se o processo for persistente; e para um caso anti-persistente,  $h < 0,5$ . Além disso também expressa a dimensão fractal da série temporal ( $d$ ) a partir da relação  $d = 2 - h$  onde  $1 < d < 2$  (Varotsos 2002). Assim  $d \rightarrow 1$  para correlações persistentes, ou seja, a série tende a uma linha, enquanto tende a um plano para correlações anti-persistentes ( $d \rightarrow 2$ ).

Figura 18 – Parâmetros básicos envolvidos na análise R/S padrão: (a) uma série temporal não estacionária  $x(i)$ ; (b) Exemplo de expoente de Hurst considerando  $n = 250$ , onde  $\langle x \rangle$  é a média e  $S(n)$  o desvio padrão,  $X(i, n)$  são as diferenças locais acumuladas da média, e  $R(n)$  é o intervalo local, que é, a diferença entre o máximo e o mínimo  $X(i, n)$  (adaptado de Bassingthwaight, 1994); (c) gráfico log-log do intervalo redimensionado R/S versus tamanho da janela  $n$ . O expoente de escala estimado  $H$  é a inclinação da linha de ajuste dos mínimos quadrados; (d) exemplos representativos do valor  $H$  para uma série temporal branca (aleatória), rosa (fractal, correlacionada de longo alcance, levemente persistente) e azul (antipersistente).



Fonte: Adaptado Bassingthwaight (1994)

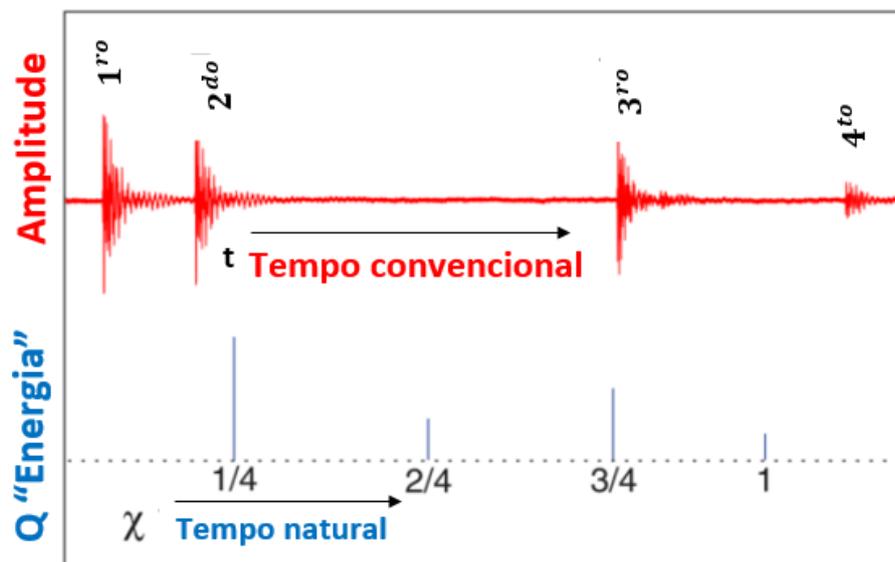
## 2.8 Análise do Tempo Natural (NT)

A análise no domínio do tempo natural permite identificar quando um sistema complexo entra em estado crítico (Varotsos et al. 2011). Estado no qual o sistema apresenta perda da capacidade de resistência e ruptura. Para uma série temporal compreendendo  $N$  eventos, o tempo natural  $X_k$  do  $k$ -ésimo evento é definido como este evento normalizado, dividido pelo número total de eventos considerados,  $X_k = k/N$  (Torquato 2013), veja a Figura 19. Por outro lado, o tempo natural  $X_k$  serve como índice para a ocorrência do  $k$ -ésimo evento, Figura 19. É, portanto, menor ou igual à unidade (0,1) (Varotsos et al. 2002, 2011). Denotamos por  $Q_k$  uma quantidade proporcional à energia do  $k$ -ésimo evento individual, então sua energia normalizada é dada por  $P_k = Q_k / \sum_{n=1}^N Q_n$ . Na análise de tempo natural, a evolução do par  $(X_k, P_k)$  é considerada (Varotsos et al. 2002), de acordo com a Figura 19. A variância  $k_1$  do tempo natural  $X_k$  é dada por:

$$k_1 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 \equiv \sum_{k=1}^N P_k \left( \frac{k}{N} \right)^2 - \left( \sum_{k=1}^N \frac{k}{N} P_k \right)^2 \quad (8.0)$$

$k_1$  varia quando ocorre um novo  $k$ -ésimo evento, uma vez que o tempo natural  $X_k$  muda de  $k/N$  para  $k/(N + 1)$  e  $P_k$  muda para  $Q_k / \sum_{i=1}^N Q_i$ . O parâmetro de ordem chamado  $1/k_1$  pode identificar a aproximação do sistema dinâmico a um ponto crítico (Varotsos et al. 2011).

Figura 19 – Tempo natural no contexto de series temporais de emissão acústica



Fonte: Adaptado Varotsos (2011)

Além disso, a entropia ( $S$ ) (observe que a letra  $S$  está em itálico, diferente do desvio padrão  $S$  apresentado na seção anterior) no domínio do tempo natural é definida como,

$$S = \langle x \ln x \rangle - \langle x \rangle \ln \langle x \rangle \equiv \sum_{k=1}^N P_k X_k \ln X_k - \left( \sum_{k=1}^N P_k X_k \right) \ln \left( \sum_{k=1}^N P_k X_k \right) \quad (9.0)$$

Observe que a entropia em tempo natural refere-se a dados numéricos do sinal e não se relaciona diretamente com a propriedade da termodinâmica tradicional (Ramirez Rojas et al, 2013), sendo relacionada à teoria da informação (Shannon, 1948). Assim como a variância  $k_1$ , a entropia  $S$  também é um parâmetro dinâmico dependendo da ordem sequencial dos eventos (Potirakis e Mastrogiannis, 2017).

O terceiro termo de variância considerado neste método é a entropia de reversão no tempo  $S_{rev}$ . Ela é obtida invertendo a ordem dos dados de energia ( $Q_k$ ), calculando  $S$  com esta nova série e então subtraindo do resultado a entropia da série original. Segundo Helman et al., 2020, este parâmetro de entropia é o mais sensível à ordenação dos dados do sinal.

É possível avaliar outro parâmetro de ordem, que descreve a distância “média”  $D$  entre as curvas do espectro de potência normalizado dos eventos (Varotsos et al, 2011),

$$\Pi(\omega) = \left| \sum_{k=1}^N P_k e^{i\omega \frac{k}{N}} \right|^2 \quad (10.0)$$

onde  $\omega = 2\pi\phi$  ( $\phi \in (0,0.5)$ ) representando a frequência em tempo natural) e o espectro de potência normalizado ideal,

$$\Pi(\omega)_{ideal} = \frac{18}{5\omega^2} - \frac{6\cos\omega}{5\omega^2} - \frac{12\sen\omega}{5\omega^2} \quad (11.0)$$

se  $\omega \rightarrow 0$ , a Equação (11.0) simplifica para  $\Pi(\omega)_{ideal} \approx 1 - 0.07\omega^2$ . Quando  $\Pi(\omega)$  se aproxima de  $\Pi(\omega)_{ideal}$  por baixo, o estado crítico é indicado.

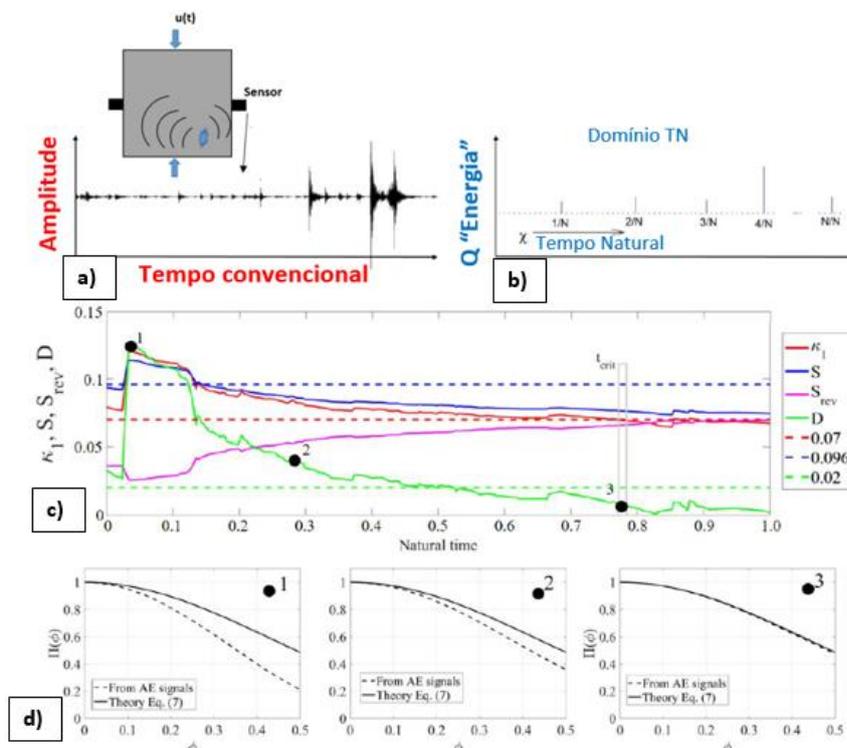
A aplicação do método de tempo natural para analisar sinais de EA pode ser descrita com auxílio da Figura 20. Primeiro, os eventos/acertos são separados do sinal geral, Figura 20a. Então, eles são ordenados no domínio do tempo natural, ou seja, em termos de  $X_k$  e  $Q_k$  (Figura 20b). Em seguida, dos parâmetros de ordem,  $k_1$  e  $\langle D \rangle$ , e as medidas de entropia  $s$  e  $s_{rev}$  são calculadas com as Equações (4)-(7). Finalmente, de acordo com Varotsos 2001 e 2006, o

sistema dinâmico é definido como em um verdadeiro estado crítico (“ $t_{crit}$ ” é alcançado, veja a Figura 20c) se:

1. A distância “média”  $\langle D \rangle$  torna-se menor que  $10^{-2}$ .
2. A variância  $k_1$ , ao descer de cima, aproxima-se de 0,070;
3. As entropias  $s$  e  $s_{rev}$  são ambas menores que a entropia do ruído uniforme  $S_u = (\ln 2/2) - 1/4 \approx 0.0966$ .

A Figura 20c mostra um exemplo de coincidência verdadeira, indicada como  $t_{crit}$ , onde todos os critérios listados acima são atendidos. Além disso, na Figura 20d, é apresentada uma sequência típica do espectro de potência normalizado, onde se espera que, à medida que se aproxima do estágio crítico, os dados obtidos (linhas tracejadas) cheguem à solução analítica (linhas sólidas). Foi observado que o instante de verdadeira coincidência também pode ser invariante com o valor limite escolhido (Niccolini et al, 2020).

Figura 20 – Aplicando o método do tempo natural: a) uma série temporal típica de sinais AE; b) descrição da série no domínio do tempo natural; c) evolução dos parâmetros de ordem e entropias em tempo natural.  $t_{crit}$  indica o ponto de convergência dos critérios, onde a estrutura entra em um estágio crítico; d) evolução do espectro de potência normalizado até atingir  $t_{crit}$



Fonte: Adaptado Friedrich (2022)

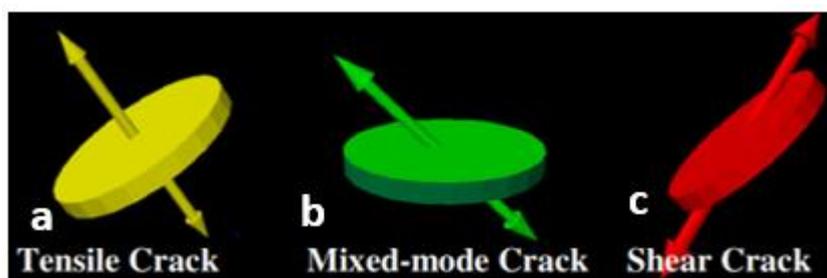
## 2.9 Relação de EA e Mecanismo de Falha

Em testes de EA diferentes mecanismos de falhas são observados. No entanto, as respostas de EA em diferentes materiais com relação aos mecanismos de falha são bastante semelhantes. Em caso de falha grave do material, se espera obter hit de EA com uma maior amplitude. A resposta de EA é alterada no início de qualquer dano, dependendo do tipo de material.

### 2.9.1 Para Concretos

Diferentes tipos de concreto (por exemplo, concreto reforçado com fibra, concreto protendido) são usados para análise de mecanismo de falha por EA. Tração, cisalhamento e modo misto são três tipos de mecanismos de falha considerados para materiais frágeis como o concreto (Groose e Finck, 2006; Aggelis et al, 2011). No modo de tração (Modo I), os lados das fissuras se afastam um do outro e geralmente ocorrem no início do dano, que está associado a impactos de AE de baixa amplitude. O modo de cisalhamento (Modo II) segue as fissuras de tração e as laterais das fissuras deslizam entre si causando uma resposta mais alta de EA. Ao lado desses dois modos, existe o modo misto (Modo III), que é uma combinação de tração e cisalhamento (Figura 21) (Groose e Finck, 2006) (Aggelis et al, 2011). Geralmente, o modo I de fratura é o característico quando são avaliadas fissuras microscópicas e o modo II pode ser visto em fissuras superficiais.

Figura 21 - Modelos de exibição para (a) fissuras por tração, (b) fissuras de modo misto e (c) fissuras de cisalhamento



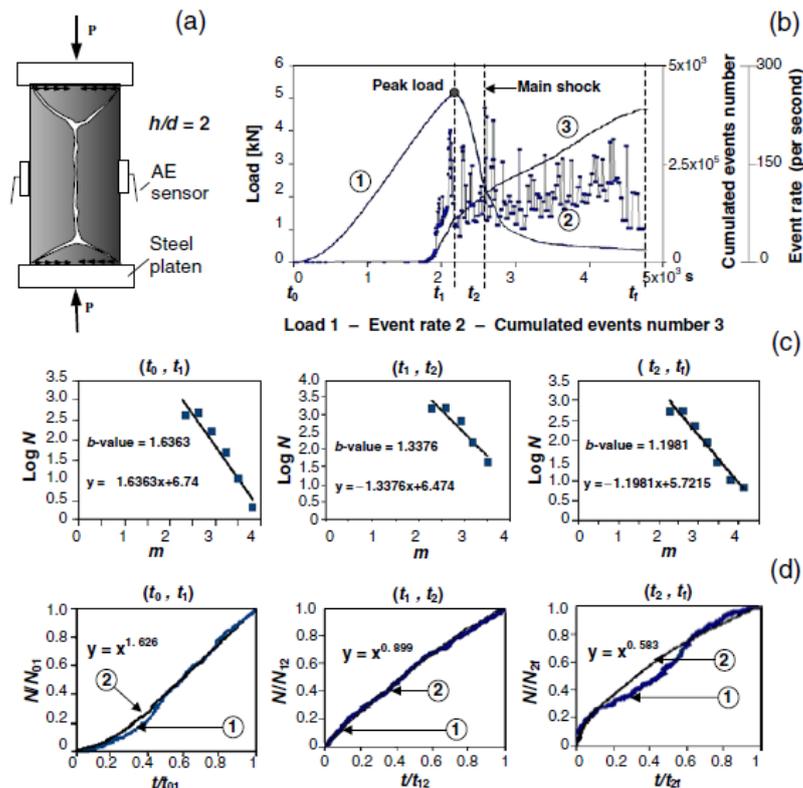
Fonte: Ohtsu (2010)

### 3. ESTADO DA ARTE

Emissão acústica (EA) vem sendo aplicada como tecnologia de inspeção e monitoramento em diversas áreas, como ciências materiais, ciências médicas, engenharia e sismologia. Algumas pesquisas atuais relacionadas com este trabalho são apresentadas a seguir.

Estudos realizados por Kurz JH et al. (2006) e Carpinteri et al. (2010), em corpos de prova de concreto submetidos a flexão e compressão axial, respectivamente, demonstraram que o número de sinais gravados durante o carregamento está ligado ao número de fontes ativas dentro do espécime. Além disso concordaram que para EA o valor  $b$  diminui com o aumento do carregamento como tinha sido visto em Scholz (2002) e Shiotani et al. (2001). Como visto na Figura 22 o valor  $b$  representa a razão de eventos fracos para fortes. As microfissuras geram um grande número de emissões acústicas fracas. Portanto, a microfissuração leva a um valor  $b$  relativamente alto. Macrofissuração, em vez disso, leva a valores  $b$  relativamente baixos, uma vez que apenas alguns eventos fortes são gerados. Com o aumento dos níveis de tensão, o processo de fratura passa de micro para macrofissura e o valor  $b$  diminui (Colombo 2003).

Figura 22 - Corpo de prova cilíndrico de concreto em compressão. (a) Configuração de teste. (b) Curva de carga versus tempo e atividade de EA. (c) valores  $b$  durante o teste. (d) Variação no parâmetro  $\beta t$  durante o teste



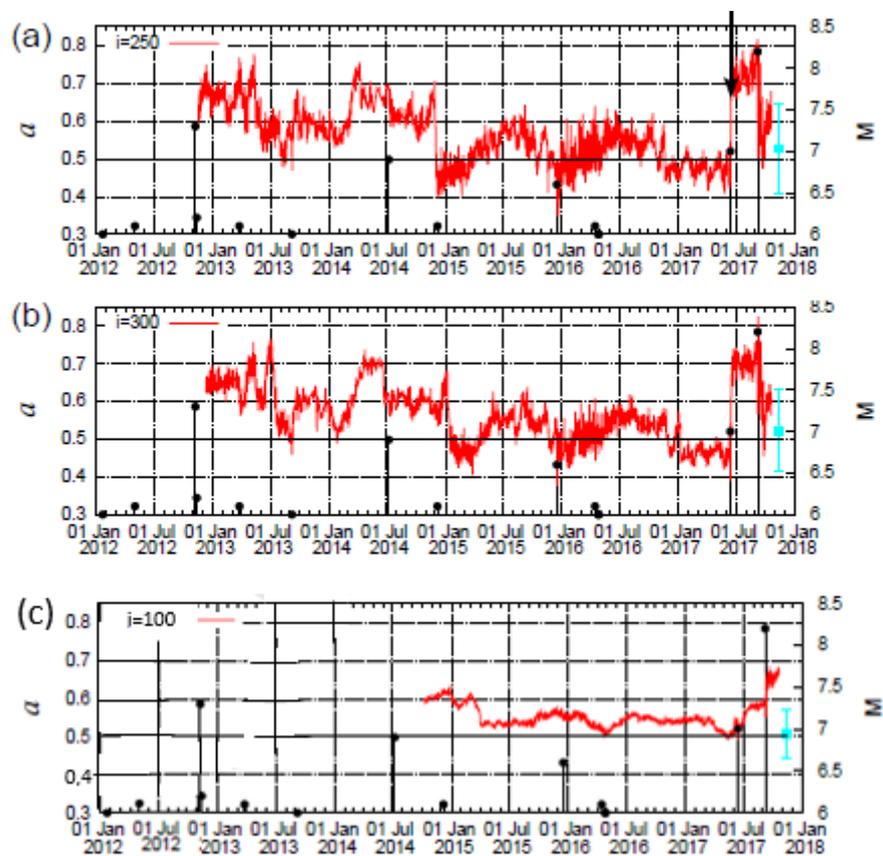
Fonte: Carpinteri (2010)

Também estudando espécimes de concreto Vidya Sagar (2010) apontou que os sinais de EA dependem da sua fonte e, especificamente, da intensidade e o modo de fratura. Portanto, o número de acertos e características de forma de onda como amplitude, energia e frequência carregam informações sobre o modo de dano e o processo de fissura. Em geral, o modo de fissura por tração geralmente se desenvolve antes do cisalhamento como visto por Ohtsu (2010); portanto, a caracterização das fissuras quanto ao seu modo fornece um aviso antes da falha. Aggelis et al. (2012) utilizou parâmetros como energia, forma de onda, RA e AF para classificar eventos de EA, concluindo que eventos de fissuras por tração excitam a maior parte de energia na forma de ondas longitudinais. Assim, a maior parte de energia chega na parte inicial da forma de onda adquirida, uma vez que as ondas longitudinais são do tipo mais rápido. Quando ocorre fissura por cisalhamento, a porcentagem de energia emitida no modo de onda de cisalhamento é aumentada resultando em um atraso dos principais ciclos de energia da forma de onda. Isso leva a um longo tempo de subida (RT) e ângulo de subida bastante baixo da forma de onda.

Devido ao fato de que terremotos e eventos de EA em rochas estressadas mostram semelhanças mecânicas e estatísticas em uma ampla gama de aspectos, EA em corpos de prova de concreto podem ser estudados como um modelo de terremotos naturais. As semelhanças entre terremotos e EAs estão envolvidas em várias leis de potência: na distribuição temporal, espacial, de tamanho e assim por diante como visto em Ojala et al. (2004) e Lei (2014). Por muito tempo, houve uma lacuna de escala entre os estudos de laboratório e a sismologia sísmica. No entanto, esta lacuna foi superada por desenvolvimentos recentes em estudos de Kwiatek et al. (2010) sobre sismicidade induzida pela mineração em minas profundas.

Sarlis et al. (2019) observou que ao aplicar correlações de longo alcance como DFA e R/S em históricos de terremotos ao longo de certo período de tempo, pode se observar um decaimento dos valores do expoente  $\alpha$  para aproximadamente 0,5. Mostrando um comportamento não correlacionado e aleatório que coincide com um intervalo de terremotos com magnitudes mínimas (Figura 23). Após este intervalo o expoente aumenta para valores entre 0,6 e 0,7, mostrando assim que se desenvolvem correlações temporais de longo alcance entre magnitudes de terremotos. Isso é consistente com pesquisas feitas por Varotsos et al. (2013) e (2014). Skordas (2020) também obteve resultados conforme ao mencionado anteriormente e aplicou adicionalmente a análise de tempo natural para determinar pontos críticos em um histórico de terremotos acontecidos na Califórnia no ano de 2019.

Figura 23 - Gráfico do expoente  $a$  do DFA versus o tempo convencional. Painéis a, b e c correspondem aos tamanhos  $i = 250, 300$  e  $1000$  eventos, respectivamente, ao analisar todos os terremotos com  $M \geq 4.0$ . As linhas verticais que terminam em círculos representam as magnitudes do terremoto que são lidas na escala correta



Fonte: Sarlis (2019)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os detalhes dos experimentos da pesquisa para atingir os objetivos propostos, ilustrando a visão geral dos experimentos realizados, as características dos equipamentos de EA e a configuração dos mesmos em cada um dos ensaios realizados.

A aquisição de dados de EA foi feita em paralelo com a realização de ensaios de compressão axial sob diferentes condições de contorno que foi parte do trabalho de mestrado de Bandeira (2020). O autor desta dissertação foi participante deste trabalho e colaborou nos processos de produção de corpos de prova, realização de ensaios e análise dos dados obtidos.

### 4.1 Ensaio de Compressão Axial

Para ensaio de compressão axial com diferentes condições de contorno foram moldados corpos de prova prismáticos a partir de um traço de concreto, possuindo este, resistência equivalentes a 50 MPa, denominados com a nomenclatura de C50. Materiais utilizados e suas respectivas proporções são apresentados na Tabela 1, maior detalhamento será encontrado na dissertação de mestrado de Bandeira (2020) ou em artigos publicados pelo mesmo autor Bandeira et al. (2020,2022).

Tabela 1 - Traços em massa dos concretos C30 E C50 utilizados no ensaio de compressão axial.

	Cimento	Areia A	Areia B	Brita 1	Água	Super-plastificante	Teor de Argamassa
C-50	1	0,76	0,93	2,31	0,44	0,24 % da massa do cimento	50,82%

Fonte: Bandeira (2020)

#### 4.1.1 Elaboração de corpos de prova

Para produção dos traços do concreto, utilizou-se uma betoneira disponível no laboratório de Engenharia Civil, a qual permitiu preparar o concreto de maneira mecanizada conforme as proporções de cada traço. Após a produção destes foram verificadas as

consistências por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone no estado fresco como especifica a NBR NM 67 (ABNT, 1998) (Figura 24).

Figura 24 - Produção do concreto realização do Slump Test



Fonte: Elaboração própria

Para o trabalho de dissertação de Bandeira (2020) produziram-se espécimes com três geometrias diferentes, cilíndrico ( $h=20$  cm e  $b=10$  cm), prismático ( $h=20$  cm e  $b=10 \times 10$  cm) e cúbico ( $10 \times 10 \times 10$  cm) totalizando 191 corpos de prova para o ensaio de compressão axial. Porém neste trabalho serão utilizados apenas os espécimes cúbicos pois a geometria deles é favorável para a aquisição de dados de EA durante os ensaios.

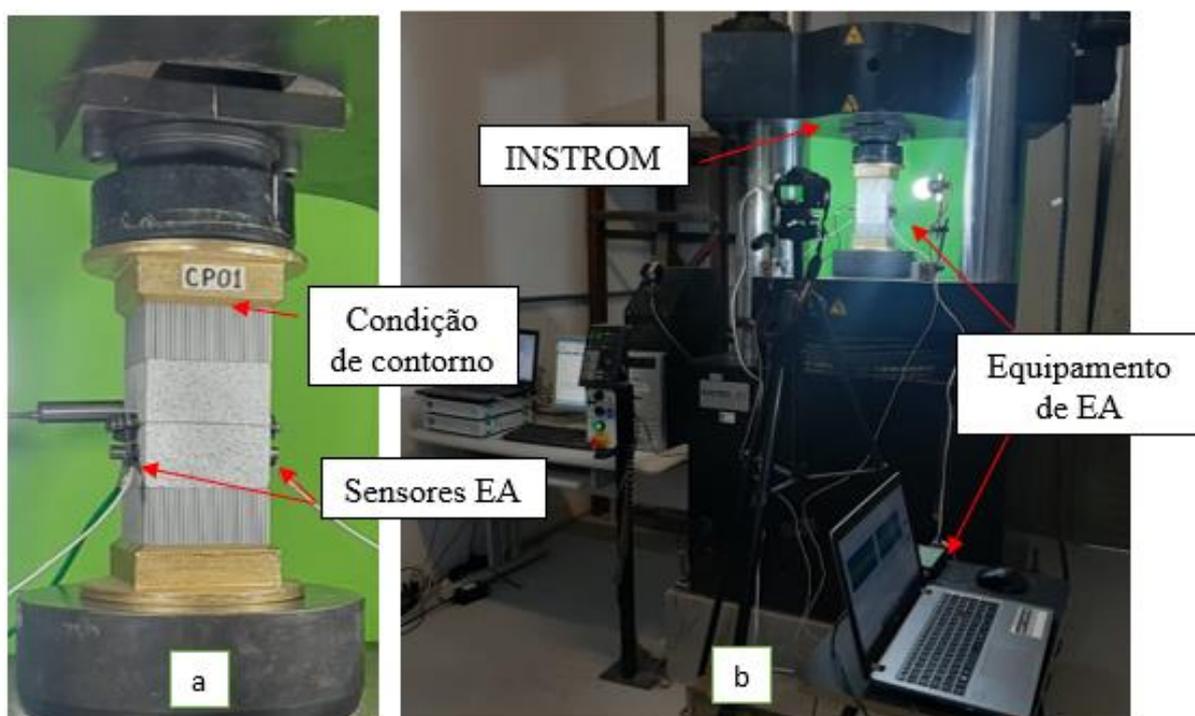
A produção dos corpos de prova foi realizada através de formas metálicas revestidas com óleo mineral e adensados de acordo com ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015). Após a moldagem dos espécimes, a normativa estabelece o tempo de repouso para endurecimento de 48 horas, o qual é respeitado, posteriormente os espécimes passam por desforma, são identificados e colocados em cura úmida à uma temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C e umidade relativa do ar superior a 95 %, até a execução dos ensaios na idade padrão de 28 dias.

#### **4.1.2 Descrição da campanha experimental**

Os ensaios de compressão axial foram realizados com base na NBR 5739 (ABNT, 2007) através de uma prensa hidráulica da marca INSTRON, SATEC séries, modelo 5590-HVL com

capacidade de 1500 kN como observado na Figura 25b. Utilizou-se para todos ensaios uma taxa de carregamento de 0,05 mm/min. Para obtenção do deslocamento e posterior elaboração dos gráficos Tensão x Deformação se utilizou de um extensômetro da marca INSTRON. Dois sensores piezoelétricos ICP® modelo 352C03 de 10 KHz foram montados em cada corpo de prova, para conseguir monitorar os sinais EA. Cada sensor foi posicionado em superfícies paralelas dos espécimes (fases opostas no caso de cubos e prismas) como mostrado na Figura 25a. Antes de cada teste o sistema é calibrado como explicado na seção 3.2.2 para obter dois sinais comparáveis correspondentes a cada sensor.

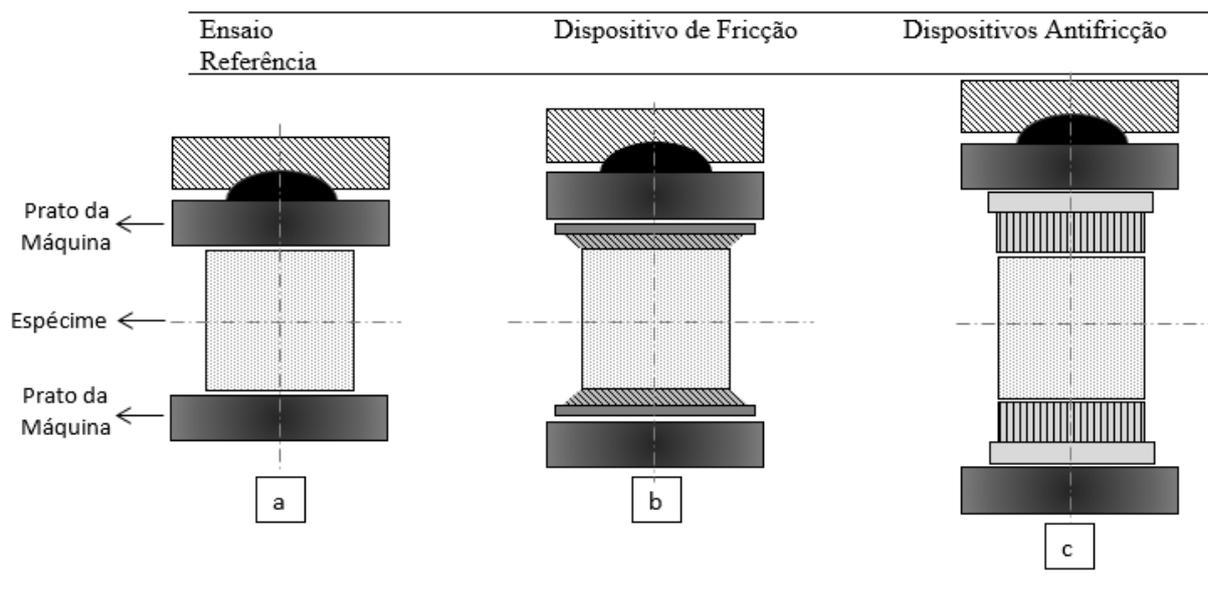
Figura 25 - Configuração do ensaio de compressão axial (a) posição dos sensores (b) prensa hidráulica INSTRON e equipamento de EA



Fonte: Elaboração própria

Fatores que influenciam em ensaios de compressão axial foram investigados por diversos autores ao longo do tempo, todavia não são analisados em conjunto, do mesmo modo que é proposto no estudo feito por Bandeira et al. (2020, 2022) no qual apresenta o atrito entre os pratos da máquina de ensaio, forma e esbeltez do espécime como fatores que podem influenciar diretamente sobre o comportamento mecânico do material submetido a um ensaio de compressão. Foi proposto que devido ao atrito, forças de cisalhamento nas faces de contato promovem um estado triaxial de tensões, conferindo-lhe parâmetros que não representam suas reais propriedades. Desta maneira será possível verificar a interação dos três fatores.

Figura 26 - Condições de contorno utilizadas nos espécimes cúbicos: (a) ensaio padrão de referência, (b) chapas metálicas coladas e (c) placa escova



Fonte: Bandeira (2020)

O trabalho experimental de Bandeira (2020) desenvolveu 191 espécimes dividindo-se entre cilindros, prismas e cubos. Os testes de compressão utilizados foram realizados em espécimes cúbicos de 10cm de lado com traço de concreto para resistência de 50 Mpa e três condições de contorno, uma de meio antifricção: placa escova, uma de referência: ensaio tradicional normatizado e por fim uma configuração de máxima fricção: chapas metálicas com espessura de 3 mm coladas nas faces de contato dos corpos de prova conforme a Figura 26. Estas três condições foram escolhidas com o objetivo de estudar extremos de máxima e mínima fricção nos ensaios de compressão axial e o ensaio de referência usualmente usado para comprovar a resistência do concreto convencionalmente.

## 4.2 Ensaios de EA

Antes começar qualquer ensaio foi verificado que os dois sensores estejam captando sinais em escalas iguais para efetuar uma comparação posterior. Isto é conseguido com ajuda do software PHOTON + disponível em < <https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/analyzer-system/phonon>>. Acesso em 24 de ago. de 2020, fixando temporalmente os sensores sobre a superfície do corpo de prova e gerando ondas a partir de batidas foi forçada uma leitura de eventos e verificação. Este processo foi repetido até conseguir uma escala igual nos sinais de cada sensor.

#### 4.2.1 Sensor

A maioria dos sensores de EA são do tipo de contato e possuem um elemento piezolétrico dentro de uma caixa de proteção. Na Figura 27(a) observamos o acelerômetro piezoelétrico ICP® modelo 352C03 usado nos testes e na Figura 27(b) a composição interna característica deste tipo de sensores piezoelétricos.

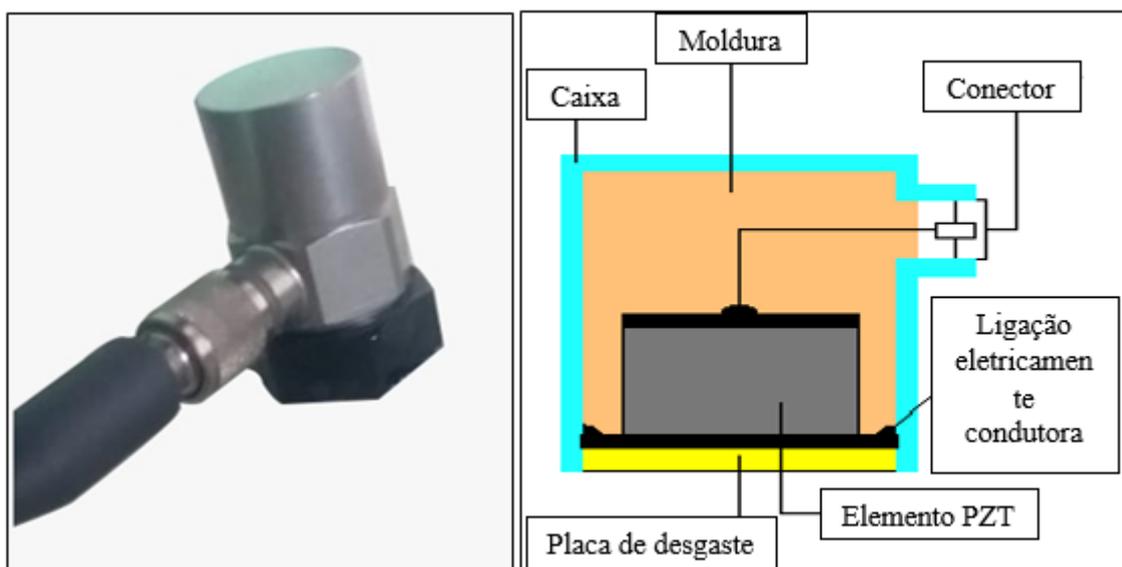
Nos testes são usados dois acelerômetros piezoelétricos do modelo antes mencionado, cujas especificações dos sensores são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações do acelerômetro piezoelétrico ICP® modelo 352C03

Alcance de frequência	(±5%) 0.5 até 10000 Hz
Sensibilidade	(±10%) 10 mV/g (1.02 mV/(m/s <sup>2</sup> ))
Faixa de medição	±500 g pk (±4900 m/s <sup>2</sup> pk)
Resolução de banda larga	0.0005 g rms (0.005 m/s <sup>2</sup> rms)
Elemento de detecção	cerâmica
Peso	0.20 oz (5.8 gm)

Fonte: Elaboração própria

Figura 27 - (a) Acelerômetro piezoelétrico ICP® modelo 352C03 (b) Elementos do sensor de EA



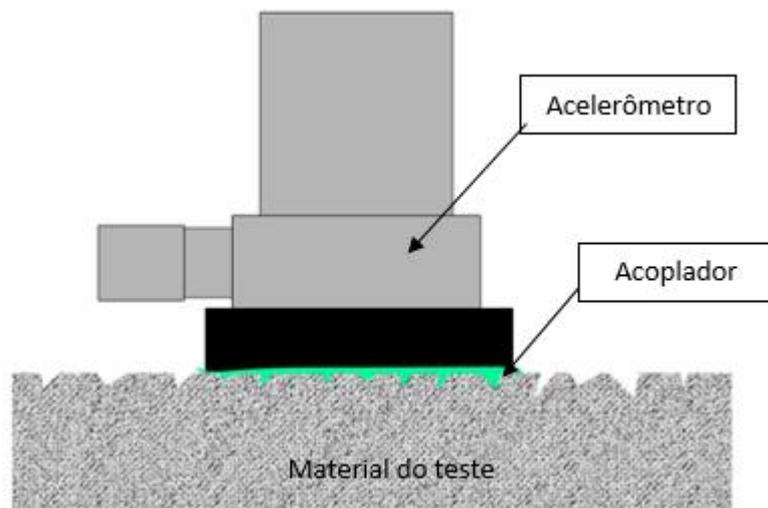
Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.2 Acoplamento

Um acoplante é um material usado para acoplar os sensores EA à superfície da peça que está sendo monitorada ou testada, assim preenchendo as lacunas microscópicas nas duas superfícies, como mostrado na Figura 28. Isto maximiza a transferência de sinal para o cristal piezoelétrico dentro do sensor EA. Idealmente, a impedância acústica do acoplante deve corresponder à impedância acústica de ambas as superfícies que estão sendo acopladas. Disponível em : <[www.physicalacoustics.com](http://www.physicalacoustics.com)>. Acesso em: 24 de ago. de 2020.

Neste estudo serão utilizadas fitas de espuma acrílica de alta resistência e dupla face, um material que atua como cola entre as superfícies de contato e permite instrumentar e remover os sensores com facilidade e sem comprometer a integridade deles.

Figura 28 - Uso de acoplador adesivo entre materiais de contato



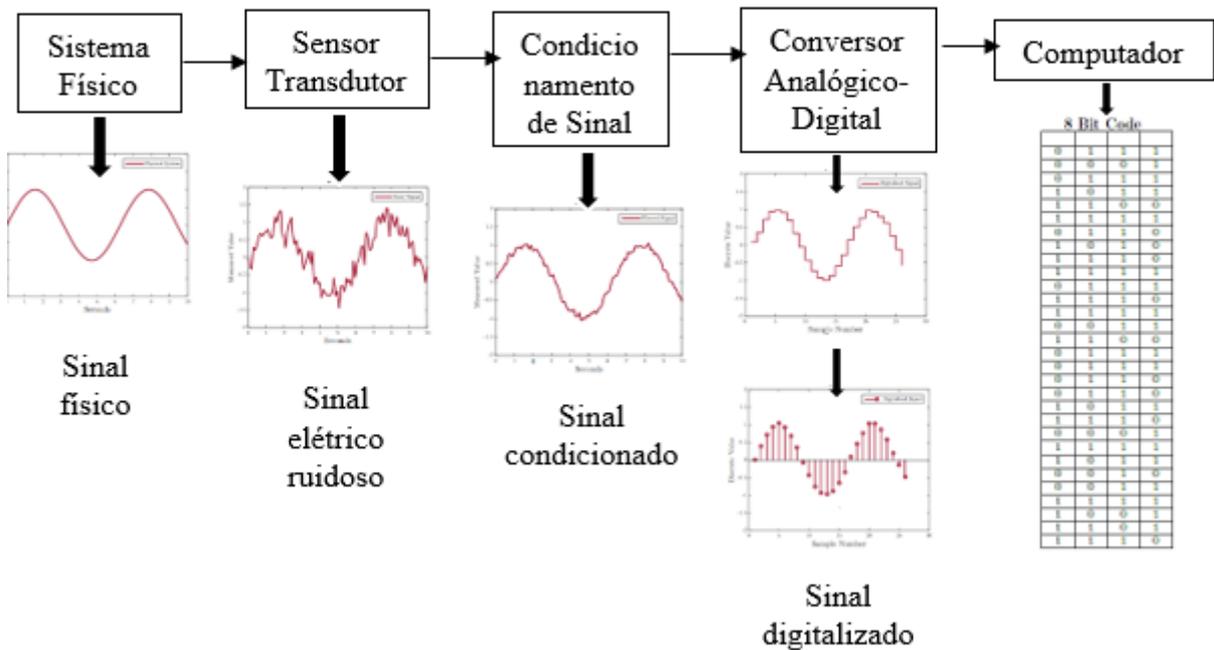
Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.3 Sistema de Aquisição de Dados

Uma vez detectado e amplificado o sinal, ele é transmitido para o sistema de aquisição principal para detecção e processamento do sinal. Segundo Nakano e Nakamura (2016) este sistema recolhe as amostras de sinais que medem as condições físicas reais dos testes e convertem estas amostras resultantes em valores numéricos digitais que podem ser manipulados por um computador, este processo pode ser descrito resumidamente como uma conversão de formas de onda analógicas em valores digitais para processamento como visto na Figura 29.

Figura 29 - Processo de conversão de ondas analógicas em valores digitais

### FLUXOGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DIGITAL



Fonte: Adaptado Rathke (2008)

No estudo realizado é utilizado um sistema de aquisição de dados que inclui a pré-amplificação dos mesmos. O sistema utilizado PHOTON+ observado na Figura 30 é um excelente equipamento de aquisição dados. Toda a parte de instrumentação e condicionamento do sinal proveniente do sensor é realizada por este equipamento.

Ele possui um conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits, com máxima taxa de amostragem de 192 mil amostras por segundo. O ADC é responsável por converter o sinal analógico proveniente do sensor (sinal contínuo variante no tempo) em um sinal digital, quantizado (sinal discreto composto por N bits, onde N é a resolução do ADC).

O número de amostras por segundo é muito importante no processo de aquisição e conversão analógico-digital de sinais. Um sinal só pode ser recuperado, de acordo com o teorema de Nyquist, se a frequência de amostragem é igual ou superior a 2 vezes a máxima frequência do sinal que está sendo adquirido.

Figura 30 - Sistema PHOTON + de aquisição de dados



Fonte: Elaboração própria

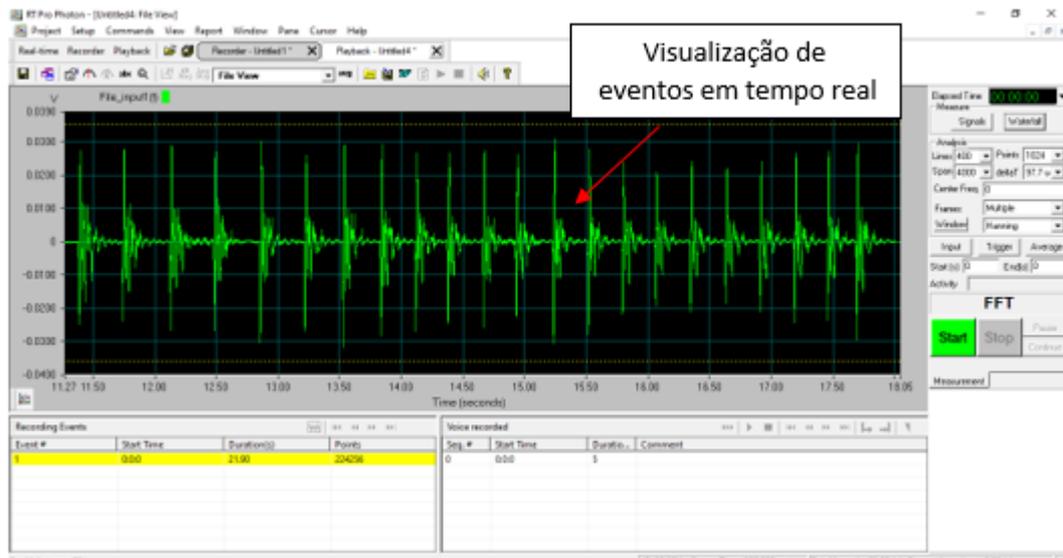
#### 4.2.4 Computador e Software

A instrumentação de EA é completada por um computador no qual será instalado o software que permitirá a aquisição, manipulação, análise e armazenamento dos dados em tempo real. Os sistemas de EA modernos usam computadores que fornecem uma entrada de parâmetros orientada por menu e controle do sistema (VALLEN, 2002).

Neste trabalho será utilizado o software RT Pro o qual é compatível com o sistema operacional Windows. O layout do software é mostrado na Figura 31, entre as características que possui temos:

- Processamento rápido em tempo real para configuração rápida, resultados instantâneos e verificação de dados no local.
- Filtragem digital programável, zoom em tempo real e calculadora de sinal.
- Medições em tempo real com um clique, pós-processamento e registro de dados.
- Gravação de forma de onda que transmite dados sem falhas para uma unidade de disco de PC.

Figura 31 - Interface do software RT Pro



Fonte: Elaboração própria

## 4.3 Método de Processamento de Dados

### 4.3.1 Programa para Análise de EA

Para o processamento dos dados utilizou-se um programa para análise de eventos de emissão acústica desenvolvido utilizando o software Matlab, que consta de duas partes: a primeira na qual é realizada a leitura dos dados obtidos em cada acelerômetro, a segunda que utiliza estes dados para gerar um sinal de amplitude versus o tempo para cada acelerômetro e obtém os parâmetros que são a base da caracterização dos eventos obtidos.

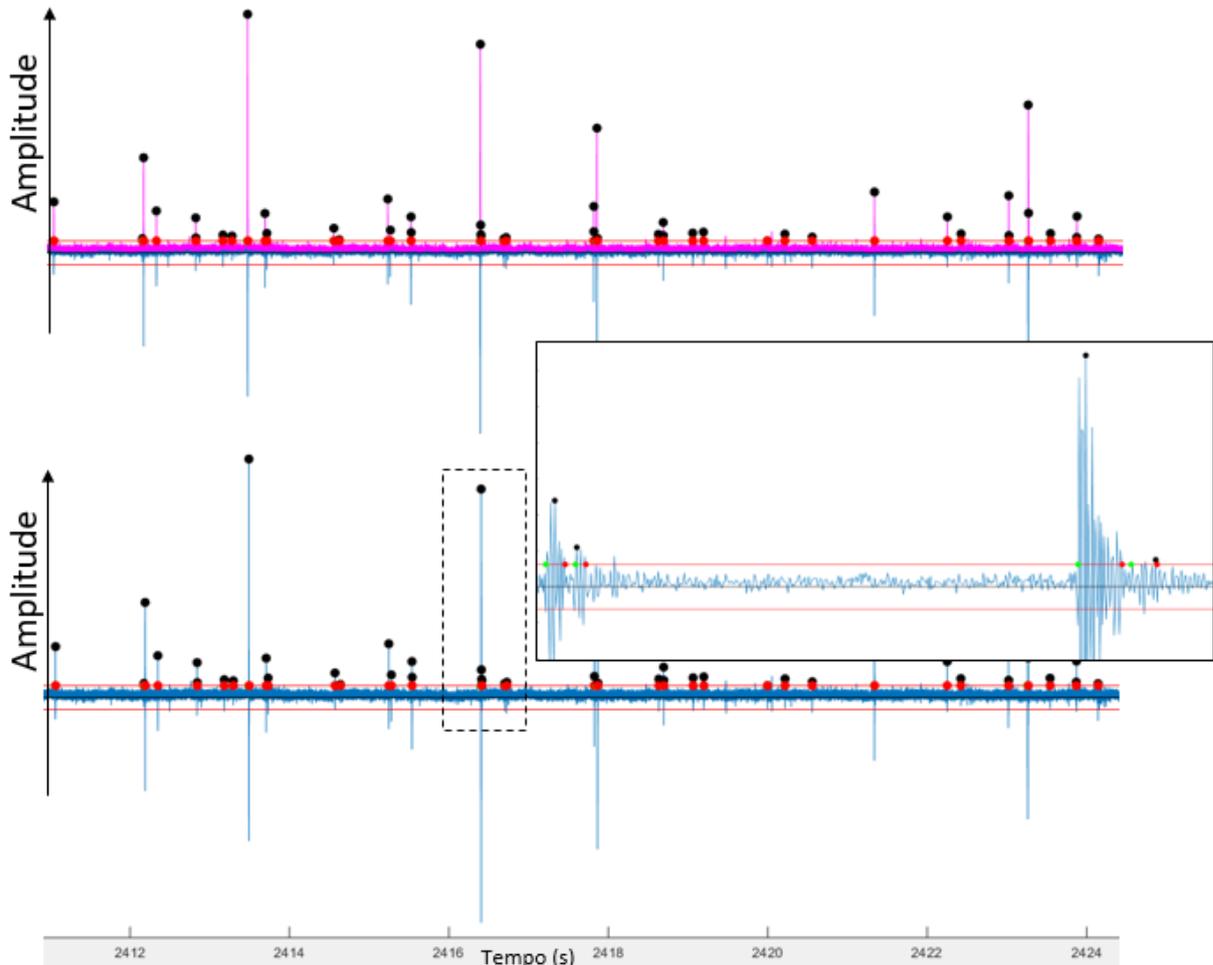
Utilizando um algoritmo de detecção de sinal EA baseado na ultrapassagem da linha limite. No trabalho de Friedrich *et al.* (2020) foi desenvolvido um programa semiautomático para identificação de sinais usando o software MATLAB. Oferecendo uma alternativa aos sistemas e software já disponíveis, com uma implementação relativamente simples e uma boa precisão.

### 4.3.2 Etapas do Programa

- I. Identificação e seleção automática de sinais: No sinal adquirido (amplitude vs tempo) é importante definir um nível apropriado da linha limite, que deve ser baixa o suficiente para capturar o sinal EA de menor amplitude. No entanto,

deve não ser muito pequeno para permitir a correta identificação dos tempos de início e término dos sinais significativos (Figura 32). Dentro do intervalo em que o sinal começa e termina, o pico de amplitude máxima é identificado.

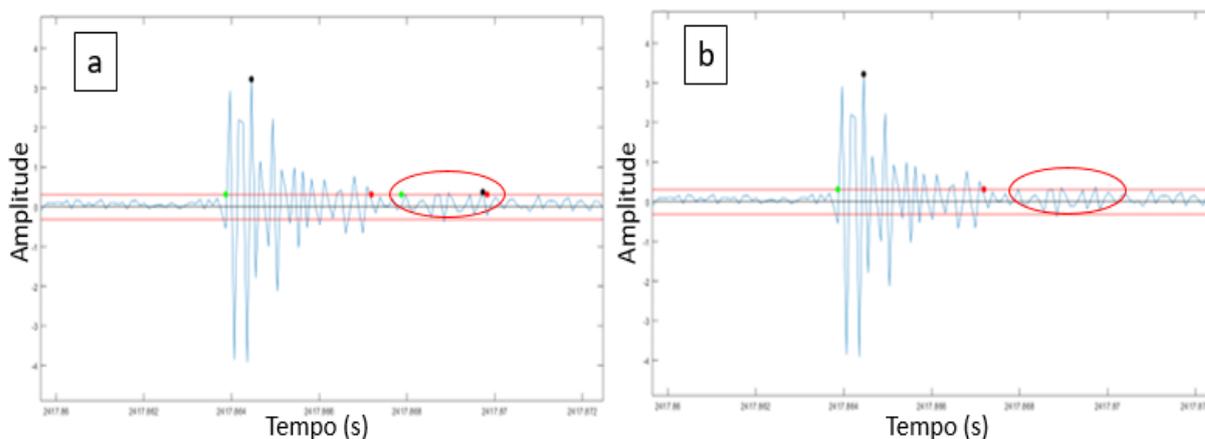
Figura 32 – Etapa I, seleção adequada da linha limite



Fonte: Elaboração própria

- II. Ajuste manual: nesta etapa, usando ferramentas internas do software MATLAB, é possível fazer correções em algumas das determinações automáticas realizadas pelo software. Na Figura 33 observamos o processo manual que é utilizado para corrigir os eventos que o programa detectou mas não apresentam uma forma que seja adequada para análise.

Figura 33 – Correções nos sinais a) o programa seleciona um evento que não é significativo para análise, b) eliminamos manualmente esse evento



Fonte: Elaboração própria

- III. Análise dos resultados: nesta última etapa o início, fim e a amplitude dos sinais já foram identificados. Então, é possível calcular outros parâmetros de cada sinal que será usado nos cálculos, por exemplo, o ângulo de elevação (RA), a frequência média (AF), a energia de cada evento, horário de chegada, duração, entre outros.

#### 4.3.3 Interpretação e Avaliação de Dados de Medição

Com os parâmetros calculados na última etapa do programa, sabendo-se que o número de eventos de EA é proporcional ao número crescente de fissuras e a amplitude de EA e sabendo-se também que os dados de contagem de energia são proporcionais aos incrementos de crescimento de fissura em materiais frágeis e quase frágeis como rocha e concreto (Sagar 2013) (Ohtsu 1996). Utilizamos os métodos mencionados na seção 2.6.2 para obter dados estatísticos de EA dos quais podem ser inferidos a origem e o desenvolvimento da atividade de micro-fissuração no concreto.

## 5. Resultados e Discussão

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados da pesquisa separados por tipo de condições de contorno. Desta forma, depois, se verificará se há diferença ou mudança no comportamento e nos mecanismos de falha em relação aos eventos de EA. Os espécimes cúbicos em cada condição de contorno são analisados e comparados por meio de quatro tópicos diferentes.

Em primeiro lugar foi avaliada visualmente a evolução das fissuras externas dos corpos de prova e a configuração final das falhas. Isto é conseguido com o apoio de um mapeamento de imagens realizado mediante um método de correlação de imagens (DIC) feito com auxílio do software GOM o qual pode ser encontrado a detalhe no trabalho do Bandeira (2020). Em seguida será apresentada uma classificação dos modos de fissuras captados no corpo de prova, baseado na forma de onda que estes eventos têm. O terceiro tópico abrange a análise do valor  $b$  pelo qual é possível determinar em que ponto dos ensaios são manifestadas micro ou macro fissuras. Finalmente teremos uma análise de correlações de longo alcance mediante a metodologia DFA e R/S, sendo que estas permitem identificar estados críticos nos sinais de EA.

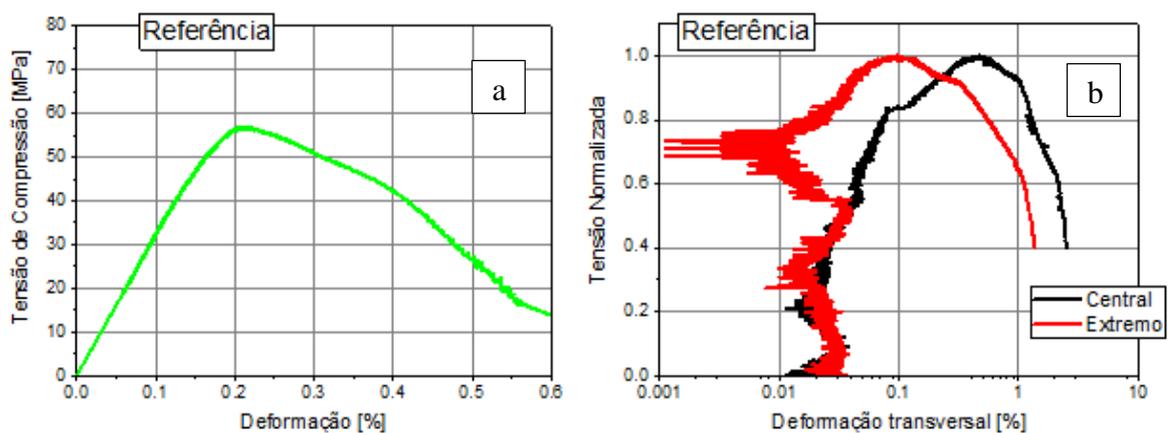
Na representação gráfica dos resultados das análises realizadas é utilizado o tempo normalizado para uniformizar os diferentes tempos dos ensaios executados. A normalização requer que seja conhecido o intervalo de tempo desde o começo do ensaio até quando acontece o pico de carregamento. Redimensionando este intervalo original para que os valores estejam dentro do intervalo de 0 a 1, sendo o valor de tempo normalizado 1 indicativo de pico do ensaio. Quando o valor é maior do que 1 indica que o ensaio continua depois de atingida a resistência máxima do corpo de prova.

### 5.1 Ensaio Referência

Três corpos de prova foram analisados com esta condição de contorno, foram monitoradas deformações transversais, carregamento ao longo do tempo, fissuração externa dos espécimes e foram acoplados dois acelerômetros na superfície de cada corpo de prova para obter sinais de EA ao longo dos ensaios. Para compreender o comportamento dos corpos de prova, a Figura 34a mostra a curva de tensão x deformação média dos três espécimes analisados. Foi obtida uma resistência média acima da esperada e foi observado um comportamento de amolecimento depois de alcançado o carregamento máximo. Na Figura 34b foi plotado o

gráfico tensão x deformação para análise da deformação transversal central e de extremidade média dos três corpos de prova e que será de grande ajuda para compreender as análises posteriores. O ensaio de referência mostra uma deformação transversal maior no centro do corpo de prova (CP) quando comparada com a deformação transversal no extremo do CP, assim foi evidenciado o confinamento que ocorre próximo aos extremos em contato com os pratos da máquina de ensaios. Cabe salientar que essas deformações são deformações medias diametrais que levam em consideração a deformação de todo o espécime e foram plotadas em escala logarítmica para observar melhor o comportamento das deformações pequenas antes do pico de tensões. As curvas foram deslocadas para a direita para facilitar a interpretação. Podemos encontrar mais detalhes no trabalho de Bandeira (2020) no qual o autor de esta dissertação colaborou nas etapas experimentais e de análise de dados.

Figura 34- a) Gráfico de tensão x deformação média dos espécimes b) gráfico de deformação transversal média dos espécimes nas regiões do centro e de extremidade para o ensaio de referência



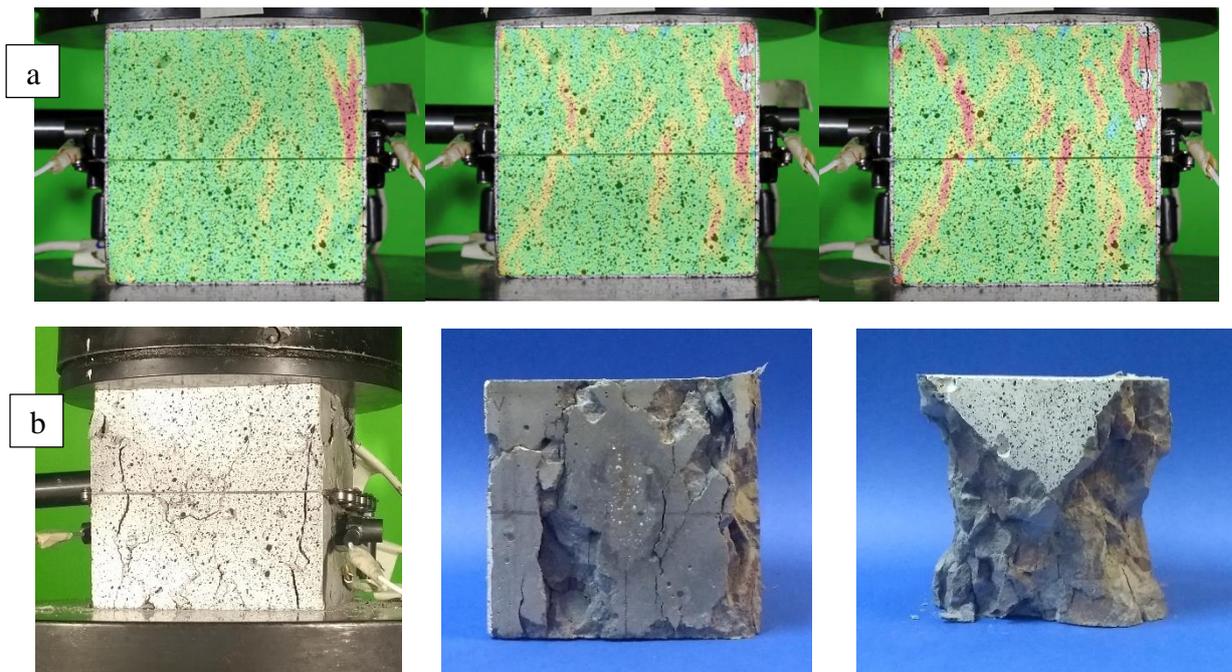
Fonte: Bandeira (2020)

A Figura 35a mostra, por meio de um mapeamento de imagens usando o software GOM, que o início da fissuração na face externa é localizado na aresta superior direita. Este comportamento se repete em todos os corpos de prova desta seção, evidenciando alta concentração de esforços triaxiais nesses pontos. Eventos EA de cisalhamento (modo II) detectados geralmente depois da ruptura são característicos das tensões de confinamento que acontecem perto dos pratos da máquina. Estes não são parte do comportamento esperado neste

tipo de ensaio e ajudam a entender a razão pela qual os espécimes têm uma resistência maior; assim como também uma elevada tenacidade.

Na Figura 35b é apresentado o estado do corpo de prova depois do ensaio. Aqui fica evidente que além das fissuras por tração que acontecem interna e externamente durante o começo do processo de falha; foram observadas fissuras por cisalhamento que se mostram diagonais perto do prato da máquina de ensaio, as quais não deveriam estar presentes em um ensaio de compressão axial. Isto é mais uma evidência da influência do confinamento que fornecem os pratos da máquina ao contato com o corpo de prova. Fissuras visíveis são detectadas antes de chegar ao pico de resistência. Estas fissuras começam localizadas nas arestas que estão em contato com os pratos da máquina. Ao continuar o carregamento é evidente o formato de ampulheta na ruptura do corpo de prova (Figura 35b).

Figura 35 -a) mapa de evolução de fissuras mediante software GOM, b) corpo de prova após o ensaio



Fonte: Adaptado Bandeira (2020)

### 5.1.1 Classificação de Eventos EA

É importante mostrar a quantidade de eventos EA instantâneos e acumulados que foram captados em todos os ensaios, assim como a evolução do carregamento aplicado no corpo de

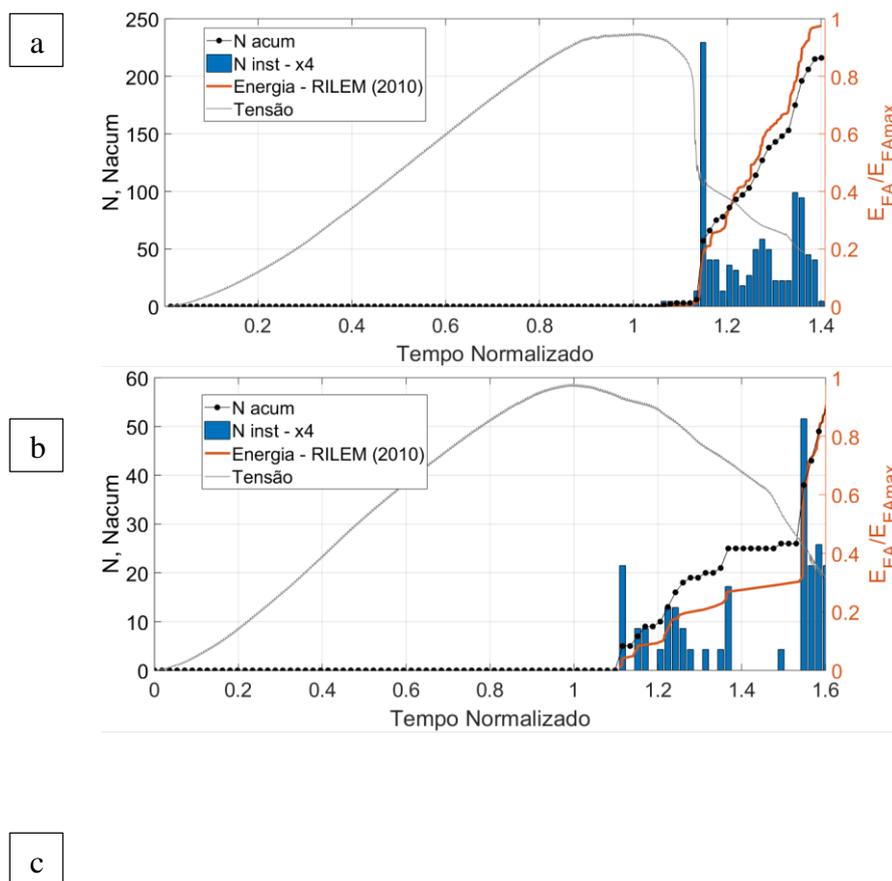
prova e a energia de emissão acústica. Estes dados foram plotados em relação ao tempo normalizado (

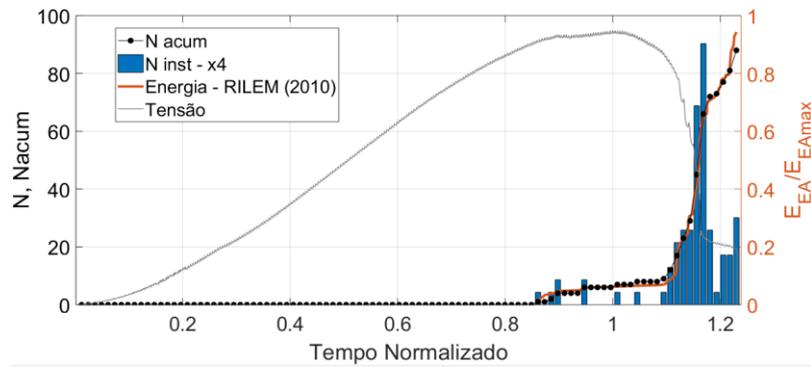
Figura 36). O valor da energia foi calculado usando a metodologia apresentada em RILEM (2010). Para a condição de contorno de referência, a maior parte dos eventos são captados depois de atingida a carga máxima no ensaio, como observado na

Figura 36 a e b, nesta etapa foi vista múltipla fissuração nos corpos de prova . No terceiro corpo de prova temos uma presença mínima de eventos antes do pico (

Figura 36c), esta pequena parte de eventos acontecem depois de atingida o 90% da carga no ensaio. A energia de emissão acústica e o número de eventos acumulados possuem uma correlação, é possível identificar que as inclinações desses parâmetros coincidem.

Figura 36- Número de eventos instantâneos, número de eventos acumulados, tensão e energia acumulada versus tempo normalizado. Observe que para manter a mesma escala vertical para os eventos instantâneos e acumulados, o número de eventos instantâneos foi multiplicado por 4 no gráfico a) CP01 b) CP02 c) CP03

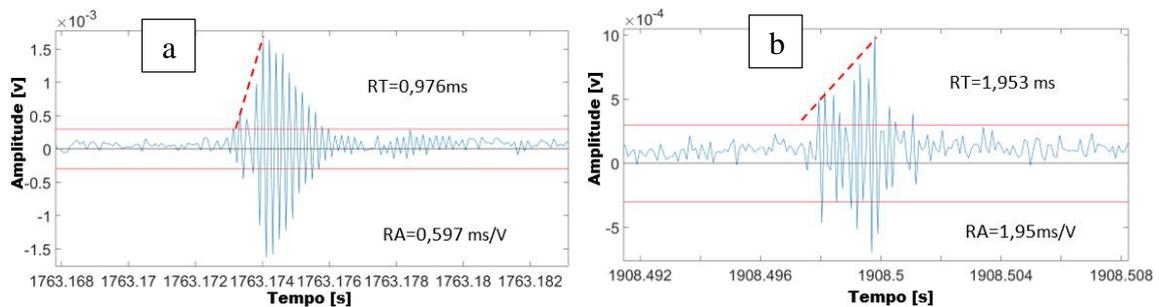


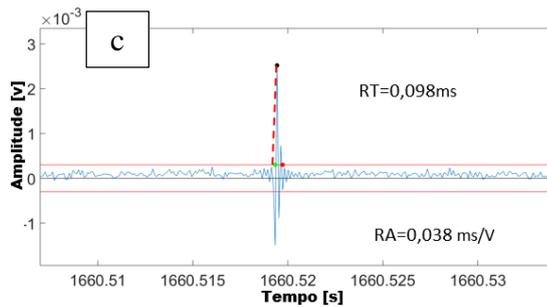


Fonte: Elaboração própria

Uma vez quantificados os eventos ao longo dos ensaios foi analisada a forma de onda que estes eventos apresentam. Os parâmetros do ângulo de subida (RA) e da frequência média (AF) separados ou combinados estão relacionados aos diferentes mecanismos de falha conforme foi apresentado na seção 2.5.1.1 deste trabalho. Conforme relatado por Ohtsu e Tomoda (2007), a categorização do mecanismo de falha com bases nestes parâmetros produz resultados menos dependentes do tipo de sensores. A Figura 37 apresenta a classificação de eventos captados por meio de sensores na superfície dos corpos de provas, utilizando os parâmetros anteriormente mencionados. Eventos com sinais que tem frequência alta e tempo de subida curto que será proporcional a RA baixo são características do modo I de fissuras (Figura 37a); quando obtidas frequências baixas, mas tempo de subida alto o evento se classifica como modo II de fissura (Figura 37b). Eventos que não poderiam ser classificados como modo I ou II por ter um formato atípico são classificados numa zona de transição (Figura 37c).

Figura 37- Classificação de eventos: a) modo I, b) modo II, c) evento da zona de transição



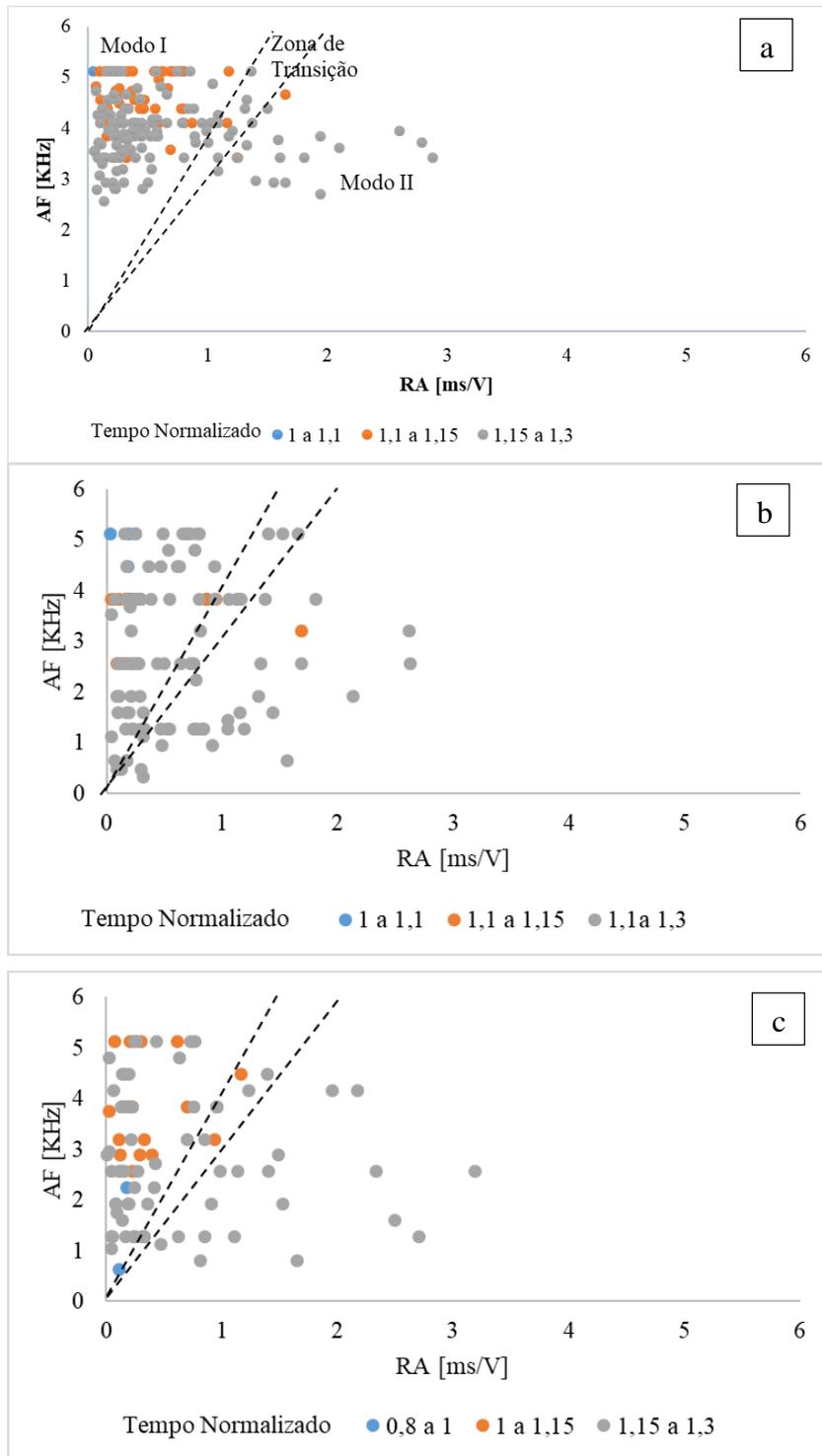


Fonte: Elaboração própria

Com base nos eventos mostrados na Figura 37, foi criado um critério para separar e distinguir os diferentes eventos. Quando o evento tiver uma relação RA/AF menor que 0,267 é identificado como um evento de tração (modo I), se a relação RA/AF do evento de EA estiver entre 0,267 e 0,333 será considerado misto e finalmente se tiver uma relação com valor maior do que 0,333 teremos um evento de cisalhamento (modo II).

Definido o critério e a partir da observação experimental nesta condição de contorno e utilizando em cada corpo de prova os dados fornecidos pelo acelerômetro que captou maior quantidade de eventos, são apresentados os resultados da análise dos parâmetros RA e AF para 3 corpos de prova (CP's) (Figura 38 a, b e c). Nos gráficos, os eventos estão agrupados de maneira similar, o modo I de fissuras é o que tem maior número de eventos, uma pouca presença de eventos localizados na zona de transição e finalmente os eventos do modo II. Esta presença de evento do modo II responde às tensões triaxiais mencionadas anteriormente neste trabalho e das quais foram encontrados indícios nos formatos dos espécimes quebrados após os ensaios.

Figura 38 – Classificação dos modos de fissuras a) CP01, b) CP02, c)CP03



Fonte: Elaboração própria

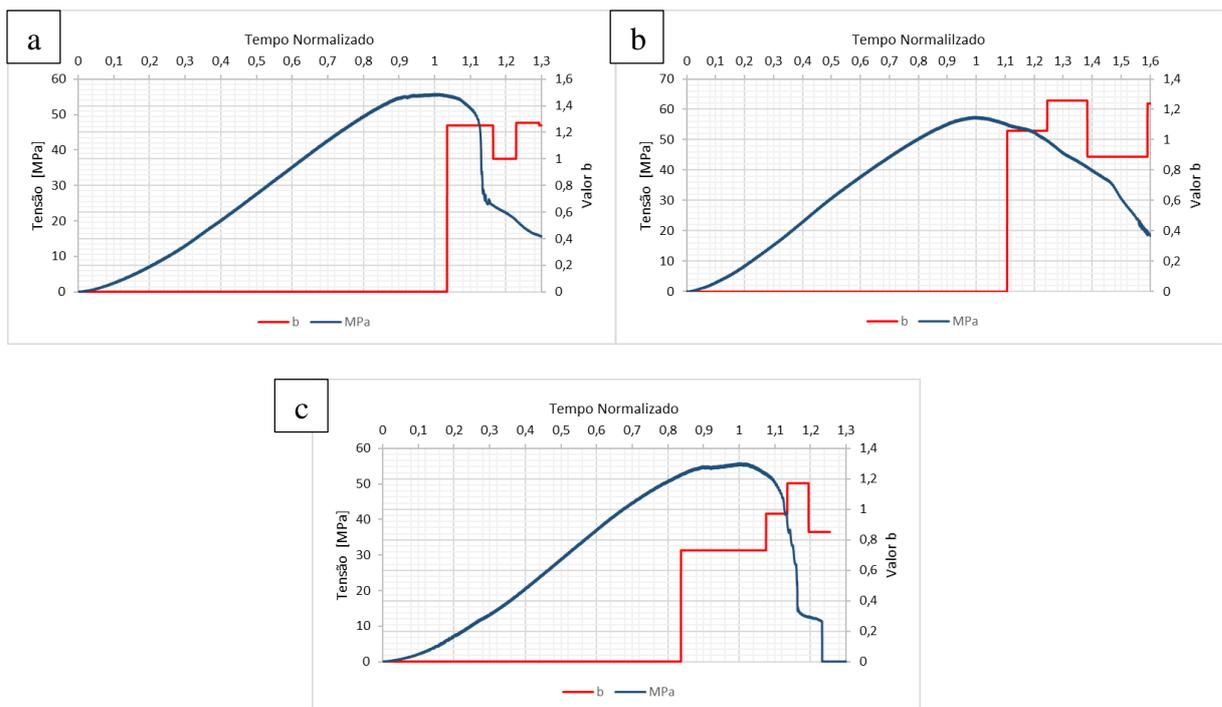
Para todos os gráficos da Figura 38 o tempo normalizado dos ensaios foi dividido em três partes. Considerando que a primeira parte abranja os primeiros eventos captados, neste caso será a parte na qual o carregamento de pico foi alcançado. A segunda parte são eventos que acontecem depois de passar a carga de pico, finalmente eventos que ocorrem no final dos ensaios. Foi observado que ao alcançar o carregamento máximo ou seja quando o tempo

normalizado está entre 0,8 e 1,1 predomina a presença de eventos do modo I. ao decorrer do tempo aparecem eventos com formato do tipo II, mas a presença destes é muito menor. Levando em consideração que nesta parte do ensaio está ocorrendo o crescimento de fissuras justifica a presença predominante de eventos do modo I (tração). Contudo, a aparição de eventos do tipo II entrega indícios de desenvolvimento de tensões triaxiais e fissuras por cisalhamento que são observadas no estado do corpo de prova depois do ensaio como visto na Figura 35b. O passo seguinte será analisar o parâmetro do valor b com o qual será verificado se os eventos obedecem ao crescimento de fissuras mencionado.

### 5.1.2 Análise do Valor b

Valores obtidos para b nos três espécimes do ensaio de referência são mostrados na Figura 39. Pode se observar que os primeiros eventos captados têm um valor b baixo (entre 0,8 e 1,0) o que é característico de energia liberada em formato de microfissuras. Os demais valores flutuam entre 0,8 e 1,2 o que mostra que os eventos são captados quando o tamanho das fissuras é consideravelmente grande. Isso ocorreu assim que o sinal obtido começou a mostrar eventos depois de alcançar o pico de carregamento. O limitado alcance de frequência do equipamento não permitiu captar eventos microscópicos em estes ensaios.

Figura 39 - Valor b e gráfico de carga ao longo do tempo para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03



Fonte: Elaboração própria

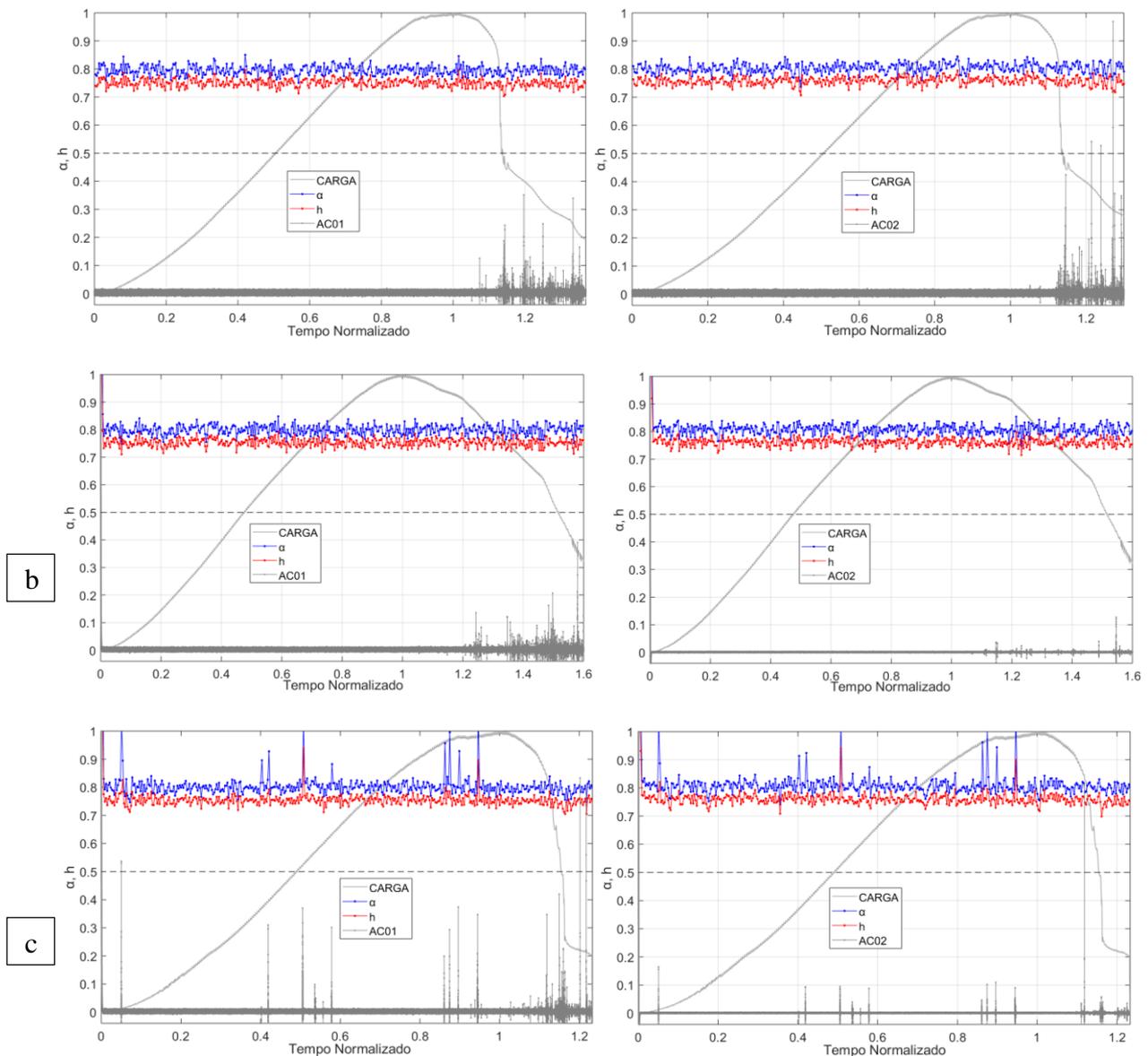
Quando a carga máxima é atingida aparecem os primeiros eventos EA entre 1 a 1,1 do tempo normalizado com um comportamento tipicamente de tração como já foi observado anteriormente. Os eventos de EA captados nestes ensaios acontecem depois de atingido o pico de carregamento o que dificulta o trabalho de obtenção de valores de  $b$  que possam ajudar na análise. Novamente a falta de sensibilidade dos sensores impede a geração de um gráfico de valor  $b$  que possa entregar um comportamento característico do ensaio antes do pico. Foram obtidos valores de  $b$  durante o pico do ensaio e o amolecimento na curva como visto na Figura 39 a, b e c. Estes se encontram na faixa indicativa de fissuras macroscópicas o que é facilmente comprovado visualmente mas não é um aporte significativo para esta pesquisa. Contudo os valores mostram uma coerência respeito do que foi encontrado na Figura 38. A elevada presença de eventos de modo I está atrelada à microfissuração no corpo de prova pois esta é característica do crescimento de fissuras internas que não conseguiram ser captadas durante a fase microscópica delas.

### 5.1.3 DFA e Hurst

Os resultados de correlação de longo alcance para as amostras que pertencem ao ensaio de referência são mostrados na Figura 40. Para o cálculo de  $\alpha$  e  $h$  foram consideradas janelas moveis de tamanho  $i=50.000$  pontos, ou seja, os parâmetros são calculados no passo de tempo  $\#50.000dt$ , com base em uma série temporal começando no passo  $\#1dt$ , depois de  $\#2 dt$  a  $\#50.001dt$ ,  $\#3 dt$  a  $\#50.002 dt$  e assim por diante, onde  $dt$  é o incremento de tempo capturado no ensaio de EA.

Figura 40 - Aplicação dos métodos R/S e DFA aos dados EA para diferentes corpos de prova com  $i = 50.000$  a) CP01 acelerômetros 1 e 2, b) CP02 acelerômetros 1 e 2, c) CP03 acelerômetros 1 e 2.

a



Fonte: Elaboração própria

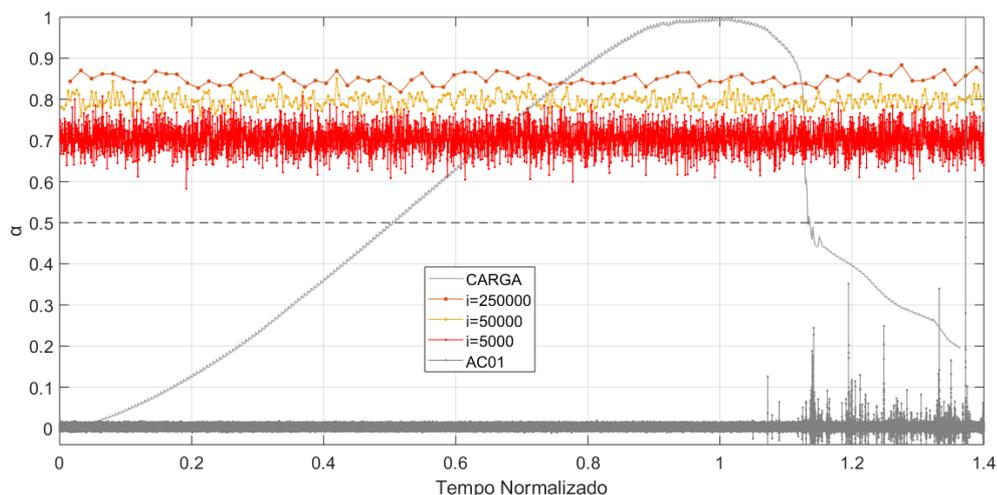
Para possibilitar a análise das séries temporais, os algoritmos de DFA e R/S descritos na revisão bibliográfica foram inseridos no computador por meio do software Matlab.

Na Figura 40 os sinais correspondem a corpos de prova de 3 ensaios de referência. Em cada ensaio é analisado o sinal obtido pelos acelerômetros 1 e 2. Independente da amplitude do sinal, o comportamento dos espécimes analisados é similar desde o ponto de vista dos coeficientes DFA e R/S. Maiores amplitudes do sinal são observadas nos acelerômetros mais próximos ao começo da fissuração. Foi observado que inclusive antes do pico de carregamento o comportamento do sinal é persistente. Foram encontrados valores que em alguns pontos descem até aproximadamente 0,7 e em outros sobem até 0,85 resultados que mostram correlação de longo alcance, indicando correlações persistentes ao longo do sinal total. Não foi possível detectar uma diferença considerável ao longo do sinal, fatores como a sensibilidade do

sensor e o tipo de ensaio podem não permitir uma melhor captação dos dados. Isso impede de localizar um ponto de queda dos expoentes que antecipe a ocorrência da falha crítica do sinal como observado por Sarlis et.al (2017).

Foi notado que quando a análise é feita para janelas de tamanho menor, os valores dos expoentes descem consideravelmente até 0,6 muito próximo de um comportamento não correlacionado. Na Figura 41 se mostram os expoentes  $\alpha$  para 3 tamanhos de janelas  $i=250.000$ ,  $i=50.000$  e  $i=5.000$  pontos. Para os tamanhos maiores os valores do expoente oscilam entre 0,8 e 0,9 sendo que toda vez que reduzida a janela os valores são mais oscilantes e tendem a estar mais próximos de 0,5.

Figura 41 - Valor do expoente  $\alpha$  para janelas móveis de tamanho  $i=250.000$  pontos ,  $i=50.000$  pontos e  $i=5.000$  pontos para o sinal do acelerômetro 1 do CP01



Fonte: Elaboração própria

Como já foi visto anteriormente janelas de entre  $i=5.000$  até  $i=1.000$  acertos mostram de melhor maneira o comportamento do sinal, pois tem muitos pontos próximos e algumas vezes abaixo de 0,5 que concorda com o formato do sinal nesses pontos o qual é similar com o denominado ruído branco. O menor tamanho de janela móvel ajudou na visualização. Neste ensaio em particular não foi possível captar um comportamento que indique fissuração. A maior parte dos eventos captados ocorrem após o pico de carregamento, desta maneira o sinal mantém um comportamento linear persistente quando analisado desde o ponto de vista das correlações de longo alcance. Foi determinado que a janela  $i=5.000$  pontos, oferece melhor relação entre tempo de ensaio e precisão dos resultados para análise dos ensaios de compressão.

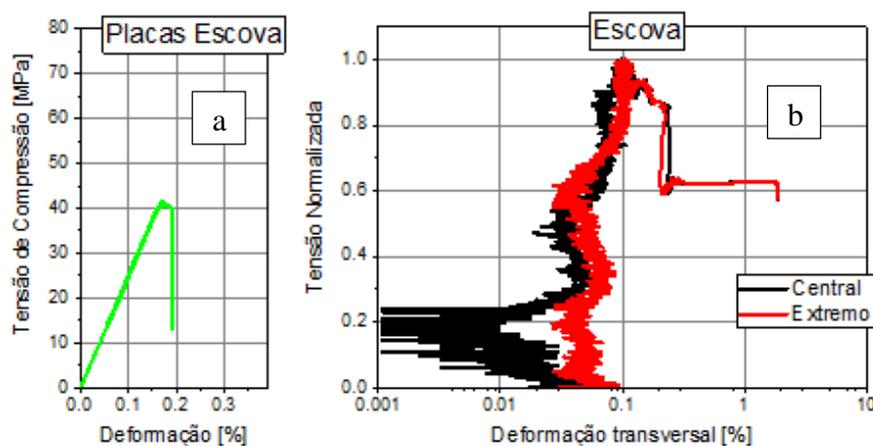
#### 5.1.4 Tempo Natural

Para este ensaio foi inviável a plotagem do gráfico do tempo natural, pois não existe uma quantidade de eventos antes do pico de carga que permitam este tipo de análise.

## 5.2 Placa Escova

Para esta condição de contorno foram ensaiados 3 corpos de prova. O atrito entre os corpos de prova e máquina de ensaio foi reduzido por meio da utilização de uma placa escova desenvolvida para o trabalho de Bandeira et al. (2021). A Figura 42a mostra a curva de tensão versus deformação média dos três espécimes analisados. Foi obtida uma resistência média menor a 50 MPa e foi observada a perda total da resistência do espécime depois de atingido o carregamento máximo. Na Figura 42b foi plotado o gráfico tensão versus deformação para análise da deformação transversal central e de extremidade média dos três corpos de prova. No ensaio com placa escova a deformação transversal no centro e no extremo do corpo de prova foi a mesma, indicando que esta condição de contorno eliminou o efeito de confinamento gerado pelos pratos da máquina.

Figura 42 - a) Gráfico de tensão x deformação média dos espécimes b) gráfico de deformação transversal média dos espécimes nas regiões do centro e de extremidade para os ensaios com condição de contorno de mínima fricção

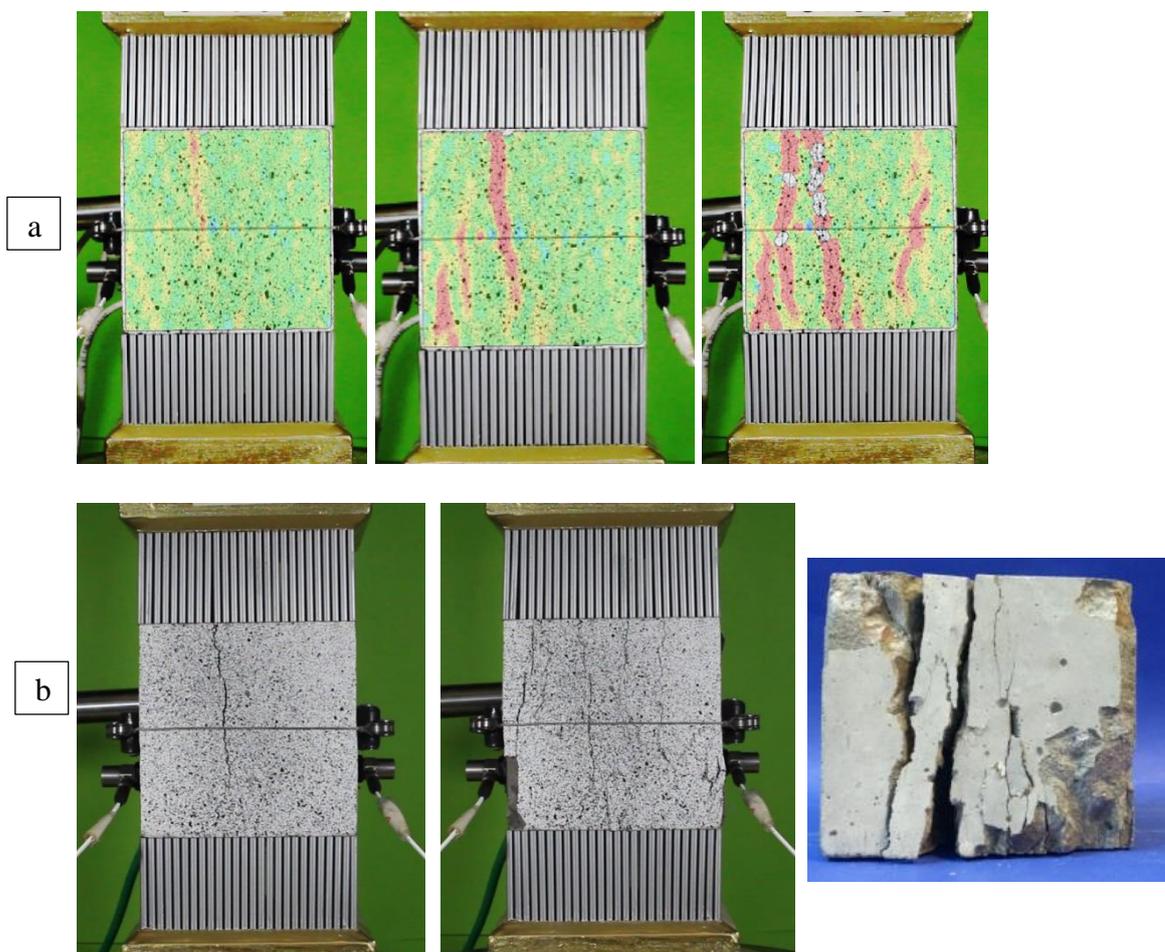


Fonte: Bandeira (2021)

Após a ruptura os espécimes ensaiados mostram diversas fissuras verticais que acabam por se fragmentar em inúmeras colunas que acabam se subdividindo ao longo da deformação observada. Na Figura 43b se observa a distribuição colunar das falhas que evidenciam a propagação de fissuras do modo I (fissuras de tração), além disso a aparição da primeira fissura vertical centralizada e do lado a propagação e o estado final do corpo de prova. O mapa das

fissuras (Figura 43a) mostra a evolução das microfissuras mediante o uso do software de análise de imagens GOM. Foi observado que estas fissuras são verticais e paralelas entre si concordando plenamente com a teoria. Como era esperado a condição de contorno de mínima fricção dissipou as tensões triaxiais que foram vistas perto dos pratos da máquina nos ensaios de referência. Não houve presença de fissuras diagonais e o corpo de prova apresentou uma quebra caracterizada por colunas verticais no sentido da aplicação do carregamento.

Figura 43 - a) mapa de evolução de fissuras mediante software GOM, b) corpo de prova após o ensaio



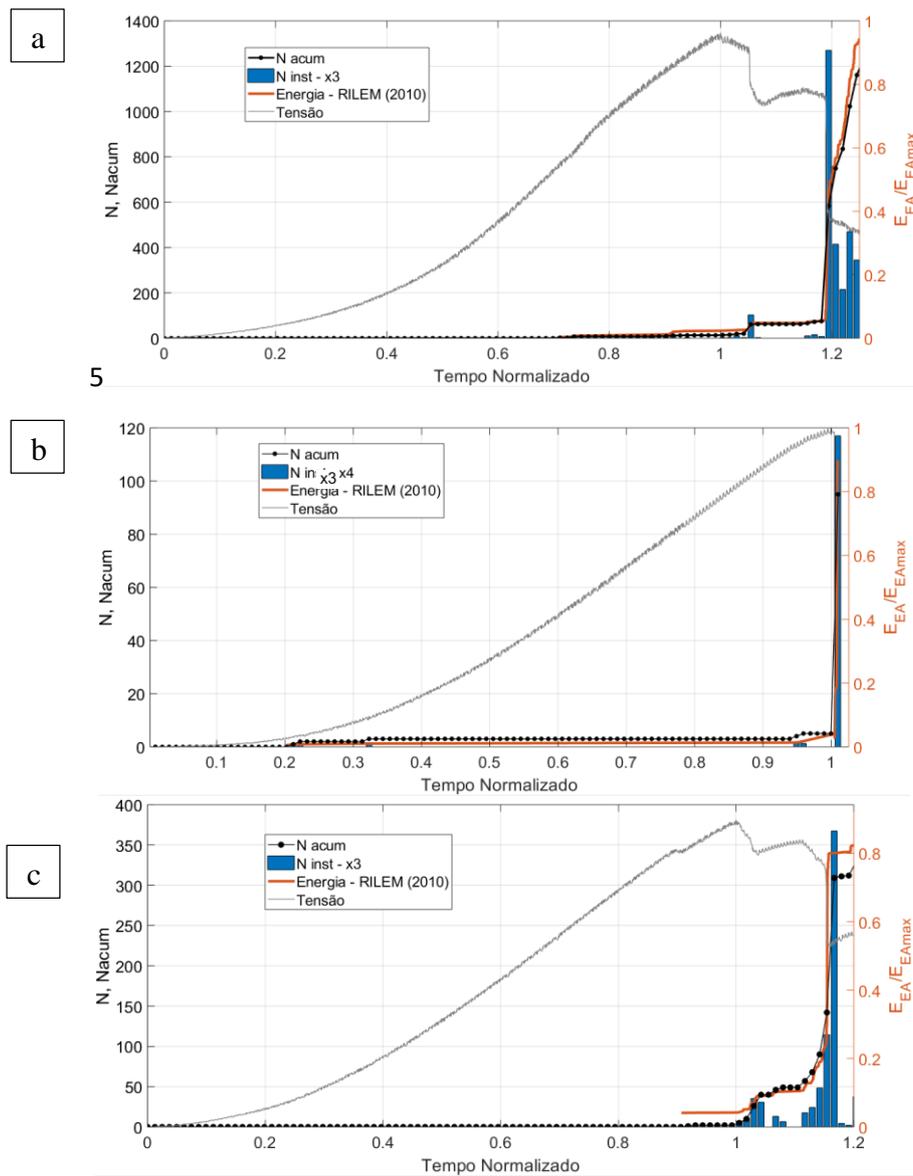
Fonte: Elaboração própria

### 5.2.1 Classificação de Eventos EA

Na contagem de eventos antes de alcançar o pico de carregamento foi observada uma quantidade maior comparado com o ensaio de referência. Estes eventos parecem ser indício da formação da fissura central característica nos 3 corpos de prova analisados. Na Figura 44 apresentam-se o número de eventos instantâneos e acumulados, a evolução do carregamento

aplicado no corpo de prova e a energia de emissão acústica, tudo em relação ao tempo normalizado.

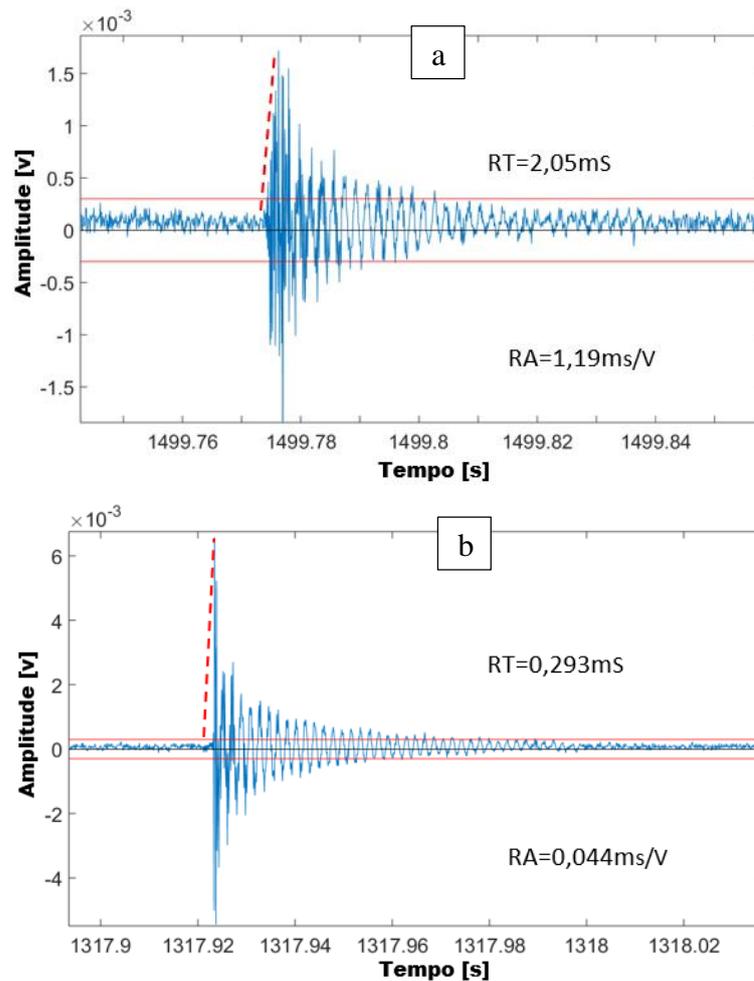
Figura 44- Número de eventos instantâneos, número de eventos acumulados, tensão e energia acumulada versus tempo normalizado. Observe que para manter a mesma escala vertical para os acertos instantâneos e acumulados, para manter a escala o número de acertos instantâneos foi multiplicado por 3 no gráfico a) CP01 b) CP02 c) CP03



Fonte: Elaboração própria

Uma vez quantificados os eventos ao longo dos ensaios foi analisada a forma de onda que estes eventos apresentam. Considerando os parâmetros do ângulo de subida (RA) e da frequência média (AF). A Figura 45 apresenta a classificação dos eventos no corpo de prova, utilizando os parâmetros do valor RA e a frequência média AF. Ao longo do sinal os eventos apresentam um formato bem definido e foram observados frequências médias altas e um curto tempo de subida (RT) como visto na Figura 45 a e b.

Figura 45- Classificação de eventos, só foram encontrados eventos do modo I a) e b)



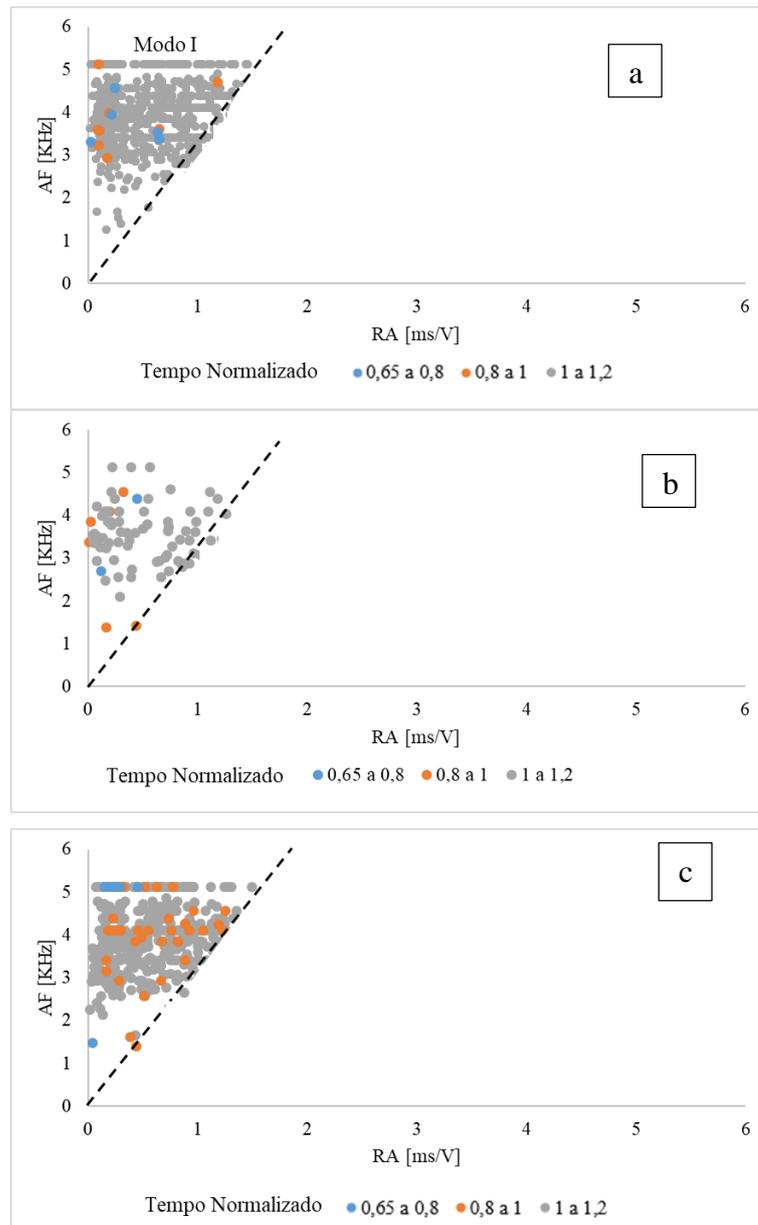
Fonte: Elaboração própria

Com base nos eventos mostrados na Figura 45, foi definido o critério para separar e distinguir os diferentes eventos. Na sua totalidade os eventos apresentam um formato característico do modo I (fissuras por tração), a configuração dos eventos levou a estabelecer a relação RA/AF com valor de 0,317 como a linha que delimita os eventos nesta condição de contorno, desta maneira foram observados somente eventos com relação RA/AF menor a 0,317.

Não foram observados nesta condição de contorno eventos de modo II ou de transição, está em acordo com a disposição das fissuras que foram vistas anteriormente na Figura 43.

Definido o critério e a partir da observação experimental, nesta condição de contorno são apresentados os resultados da análise dos parâmetros RA e AF para 3 corpos de prova (CP's) na Figura 46 a, b e c. Foi observado que nos ensaios os eventos estão agrupados de maneira similar, o modo I de fissuras foi observado antes, durante, e depois do carregamento dos corpos de prova.

Figura 46 - Relação RA e AF para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03



Fonte: Elaboração própria

Nesta condição de contorno de menor atrito, após alcançar a carga máxima o material perde a capacidade de resistir à compressão. Foi possível registrar eventos de EA antes do pico de carga; o que indicaria processos de microfissuras dentro do espécime. Eventos com características do modo II de fissura (cisalhamento) são nulos neste tipo de ensaio. Nesta condição de contorno eventos começam alguns minutos antes de alcançar o pico de carga e aumentam a quantidade no ponto que o coeficiente de Poisson também começa a mudar como visto em L'Hermite (1960). Segundo Kumar et al. (1983) e Kotsovos (2016) o comportamento apresentado por essas condições de contorno demonstram coerência se tratando de um material frágil como o concreto, visto que o amolecimento verificado nos ensaios tradicionais de compressão, segundo os autores, é resultado da fricção de contato entre amostra e os pratos da máquina de ensaio. Com uma condição de contorno que reduz o atrito entre o corpo de prova e a máquina era esperada a ausência de eventos do modo II (cisalhamento).

Eventos de EA captados antes do pico de carregamento foram indicativos de microfissuras de tração que originam as fissuras visíveis verticais na carga máxima. Foi observado que os eventos parecem saturar nos 5KHz de frequência média (AF), isto foi devido a que a frequência máxima de detecção dos acelerômetros foi configurada em 10KHz permitindo registrar sinais de até 5KHz. Na utilização de acelerômetros com frequência de detecção maior estes eventos indicariam uma frequência média mais alta (Figura 46 a, b e c).

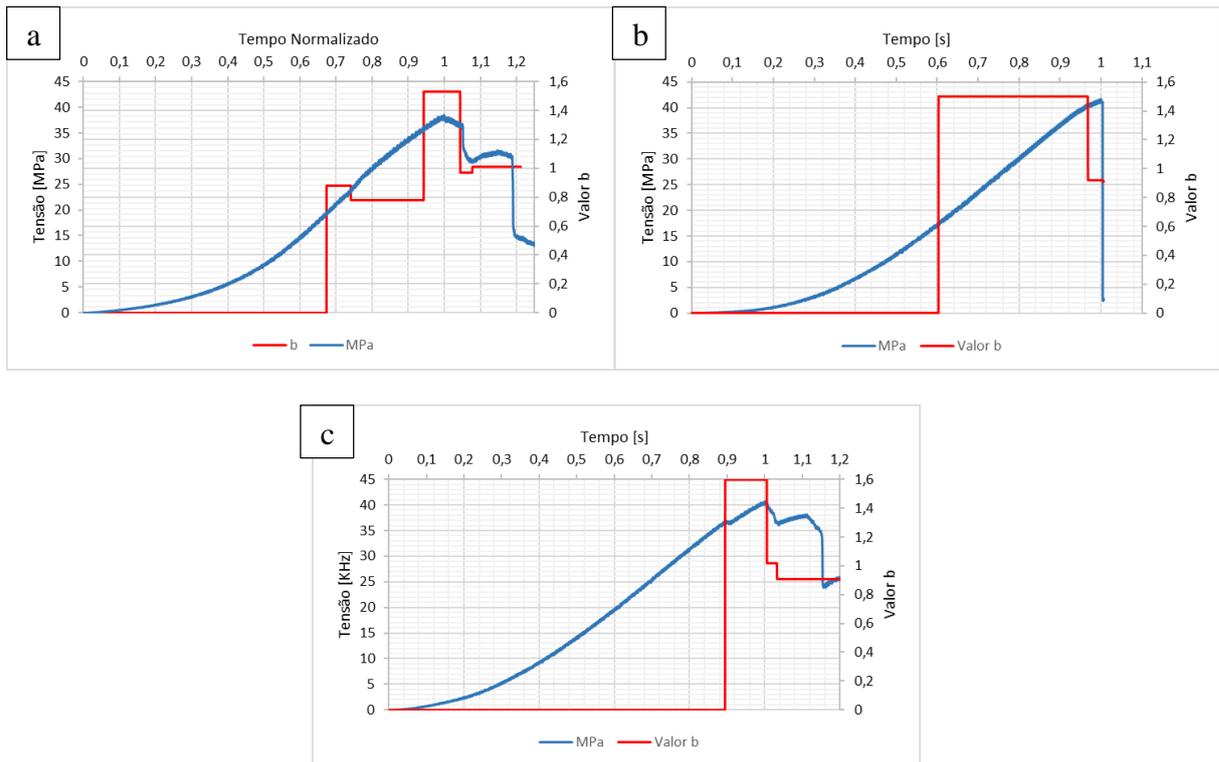
### **5.2.2 Análise do Valor b**

Neste tipo de ensaio foram encontrados eventos antes do pico de carregamento o que possibilitou uma grande oportunidade de analisar que tipo de fissura (micro ou macro) caracteriza o trecho anterior à falha do CP. Na Figura 47a temos um trecho compreendido entre os tempos normalizados 0,65 e 0,9 que apresenta um valor b de entre 0,8 e 0,9. Na inspeção visual do ensaio podemos comprovar aparição de uma fissura vertical visível a qual cresce lentamente até chegar no 90% do carregamento máximo (tempo normalizado =0,9) aproximadamente. Aqui o valor de b fica em 1,5 evidenciando microfissuras no interior do corpo de prova o qual segue até pouco depois da falha, já na perda da capacidade resistente do CP foram evidenciados novamente valores de b perto de 1 o que indica múltipla fissuração visível em formato colunar.

No caso da Figura 47b e c foram observados valores de b em 1,5 para os eventos localizados antes do pico, mostrando um comportamento de microfissuração interna. Isso até

a falha que é explosiva e seguida de muitas fissuras externas que comprovam o valor de  $b=1$  mostrado nos gráficos. Foi possível analisar de maneira eficiente este parâmetro mesmo com um número reduzido de eventos antes do pico, com sensores de frequência maior poderíamos obter mais eventos e garantir uma análise mais detalhada.

Figura 47 - Valor b e gráfico de carga ao longo do tempo para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03



Fonte: Elaboração própria

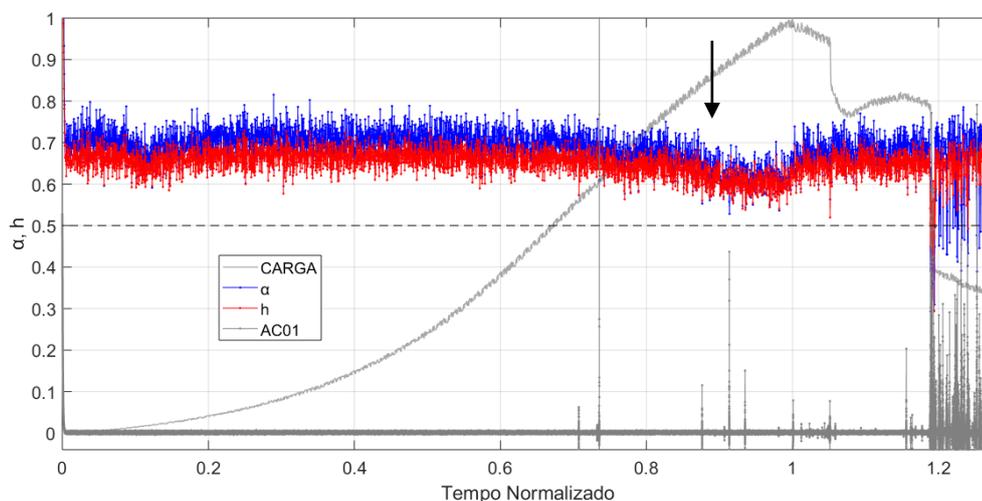
### 5.2.3 DFA e Hurst

Foi encontrado que os sinais neste tipo de ensaio apresentam correlações de longo alcance ( $\alpha, h > 0,5$ ) até a pico do ensaio, seguido por múltipla fissuração e perda total da capacidade resistente do material. Nesta múltipla fissuração foram obtidos valores dos expoentes menores a 0,5 indicando que os sinais apresentam correlações de longo alcance antipersistentes ( $\alpha, h < 0,5$ ), ou seja, uma tendência de crescimento implicará numa tendência de redução e vice-versa.

Com o intuito de realizar uma análise mais detalhada dos resultados obtidos para os expoentes  $\alpha$  e  $h$ , foi reduzida a janela de análise para  $i=5.000$  pontos assim foi observado que os valores apresentam uma redução, mas o formato da curva total dos valores não é afetado. A

Figura 48 mostra como os valores para o CP01 acelerômetro 1 estão na faixa de 0,6 a 0,7. Uma diminuição visível comparado com o gráfico mostrado anteriormente. Para uma análise mais profunda foi aplicado o método do tempo natural com a finalidade de obter o tempo crítico no qual o corpo de prova começa a falhar. Dois tempos críticos foram obtidos como visto na Figura 48b, um no tempo 0,735 (70% da carga) o qual coincidiu com o começo da fissura central que ocorre no corpo de prova e outro no tempo 0,877 (aproximadamente 90% da carga) que coincidiu com o crescimento da mesma fissura ao longo do corpo de prova. Este também foi coincidente com a queda do valor dos expoentes sinalizada com seta na Figura 48. Segundo o visto por Sarlis et al. (2018) o expoente começa a apresentar uma diminuição gradual de 0,6 para cerca de 0,5, assim as correlações temporais de longo alcance entre os acertos se quebram para um comportamento quase aleatório possivelmente se transformando em não correlacionado. Após essa diminuição ocorre a falha no pico de carregamento sendo esta queda de valores dos expoentes um claro indicativo da ocorrência de que o CP está atingido o máximo da sua capacidade resistente.

Figura 48 - Expoentes  $\alpha$  e  $h$  para o CP01 acelerômetro 01 com uma janela móvel de  $i=5.000$  pontos



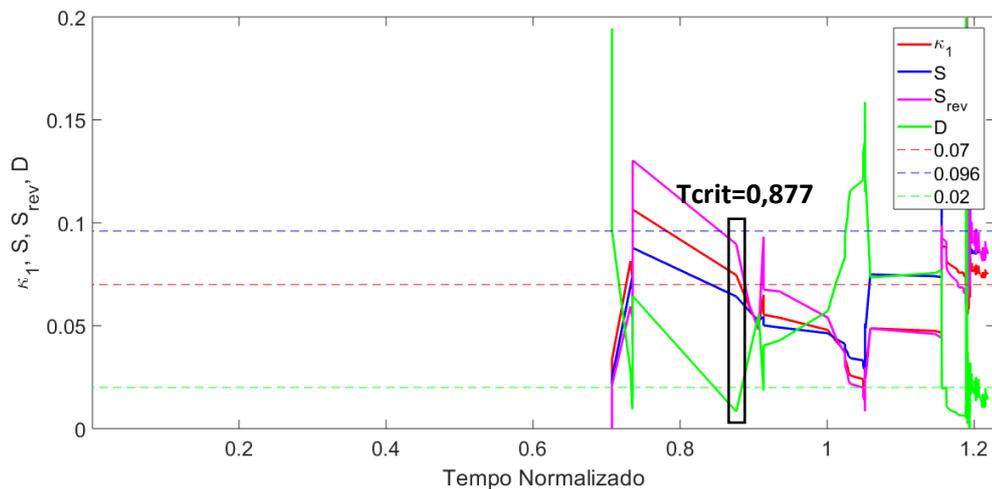
Fonte: Elaboração própria

## 5.2.4 Tempo Natural

A evolução dos parâmetros de tempo natural versus o tempo normalizado foi plotada na Figura 49. Para esta análise, foi seguido o mesmo raciocínio de Carpinteri et al. (2018), tomando o componente da energia ( $Q_k$ ) como igual a  $A_{max,k}^{1,5}$ , onde  $A_{max,k}$  é a amplitude máxima do sinal, uma abordagem comumente encontrada também em estudos de sismologia (Kanamori,

1975). O cálculo de  $A_{max}^{1,5}(t)$  (com t denotando o tempo convencional) foi realizado acerto a acerto, ou seja, toda vez que um novo sinal surge, um novo sinal é incluído na análise do tempo natural, levando ao reescalonamento das séries temporais ( $X_k, Q_k$ ) e ao recálculo de  $k_1, S, S_{rev}$  e  $\langle D \rangle$ . Os resultados foram mostrados em tempo normalizado para facilitar a identificação do possível ponto de entrada para um estado crítico, ou seja, o instante em que as condições de criticidade descritas na seção 2.8 são cumpridas. Como visto na Figura 49, este tempo crítico foi encontrado no tempo 0,877 (aproximadamente 90% da carga) coincidindo com o começo da fissura central que ocorre no corpo de prova, foi observado que os parâmetros convergem o que indica a quebra e perda da resistência do corpo de prova.

Figura 49 – Análise NT da série temporal de EA. As seguintes linhas horizontais auxiliares foram adicionadas:  $k_1 = 0,070$  (vermelho tracejado), limite  $\langle D \rangle = 10^{-2}$  (verde tracejado), limite de entropia  $S_u \approx 0,0966$  (azul tracejado) para CP01

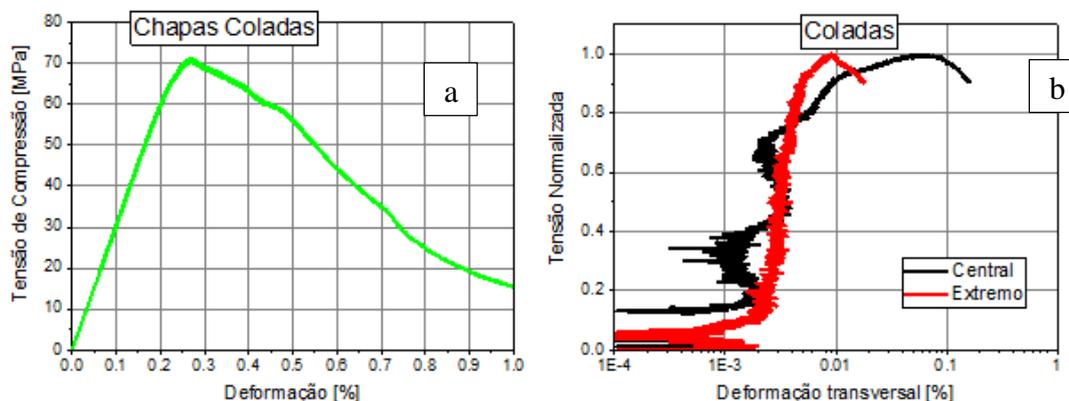


Fonte: Elaboração própria

### 5.3 Chapa Colada

No trabalho de Bandeira et al. (2021) foi encontrado que a utilização de chapas coladas gera um atrito máximo que simula um engaste. Em espécimes cúbicos esta condição de contorno apresentou uma mudança significativa na resistência com respeito ao ensaio de referência. O aumento encontrado estava entorno de 21% de resistência, junto com uma elevada tenacidade que também é traduzida em uma extensa absorção de energia até a resistência última do material (Figura 50a).

Figura 50 - a) Gráfico de tensão x deformação média dos espécimes b) gráfico de deformação transversal média dos espécimes nas regiões do centro e de extremidade para o ensaio com condição de contorno de máxima fricção

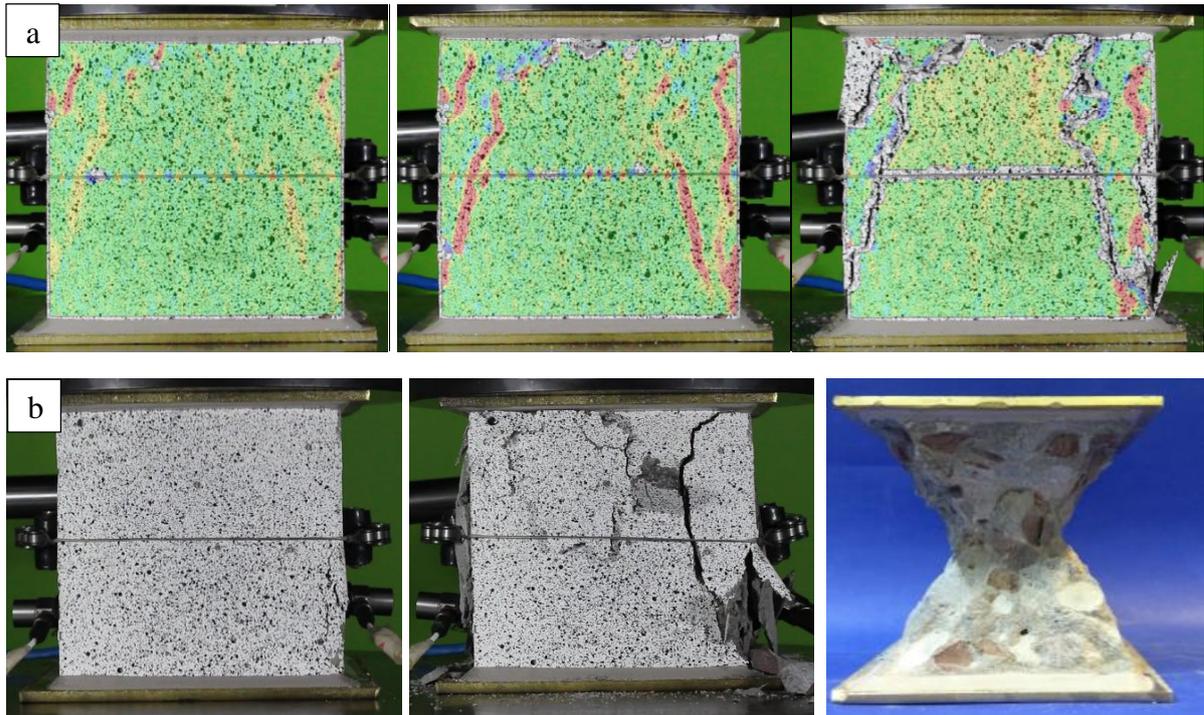


Fonte: Elaboração própria

Na Figura 50b foi observado como para os corpos de prova submetidos a uma condição de contorno de máxima fricção, a deformação transversal nos extremos colados foi muito menor comparada com a deformação observada no centro dos espécimes. Isto gera uma concentração de esforços nos extremos que segundo visto na teoria gera tensões triaxiais que se traduzem em fissuras diagonais.

Esta condição de máxima fricção obtida com chapas coladas demonstra um confinamento alto nas partes coladas do corpo de prova, fato que pode ser verificado no deslocamento transversal mostrado anteriormente. A Figura 51a mostra o mapa de fissuração obtido por meio do software GOM de um espécime ensaiado com esta condição de contorno. As fissuras surgem perto das chapas coladas com uma inclinação diagonal e se propagam até o centro. Ao finalizar o ensaio, observa-se claramente um formato de ruptura tronco-cônico ou ampulheta (Figura 51b). Foi notado que esta condição maximizou os efeitos já observados anteriormente nos ensaios de referência.

Figura 51 - a) mapa de evolução de fissuras mediante software GOM, b) corpo de prova após o ensaio

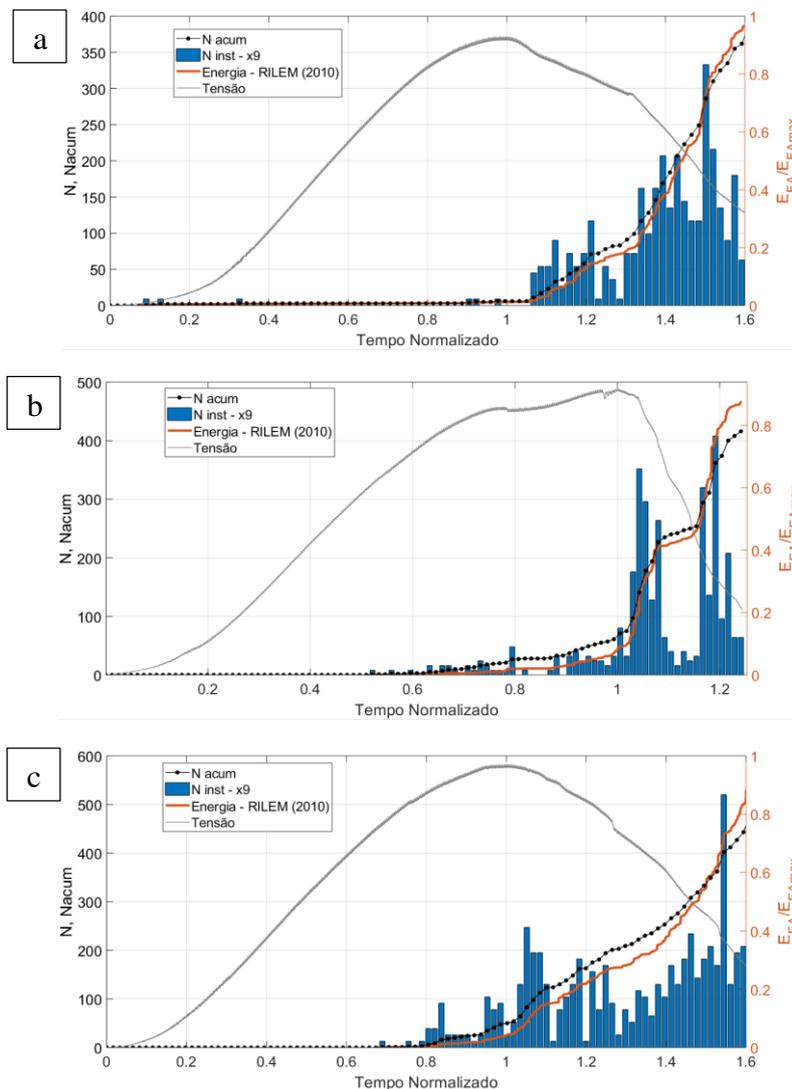


Fonte: Elaboração própria

### 5.3.1 Classificação de Eventos EA

Na Figura 52 a, b e c foram plotados o número de eventos instantâneos e acumulados, a evolução do carregamento aplicado no corpo de prova e a energia de emissão acústica, tudo em relação ao tempo normalizado para 3 corpos de prova ensaiados com esta condição de contorno. As curvas de tensão deformação, junto com as curvas de energia mostradas anteriormente coincidem com o formato tronco-cônico mostrado na Figura 51b, visto que este formato se gera a partir de um confinamento de tensões triaxiais que aumentam a resistência dos espécime, a tenacidade e proporcionam maior absorção de energia.

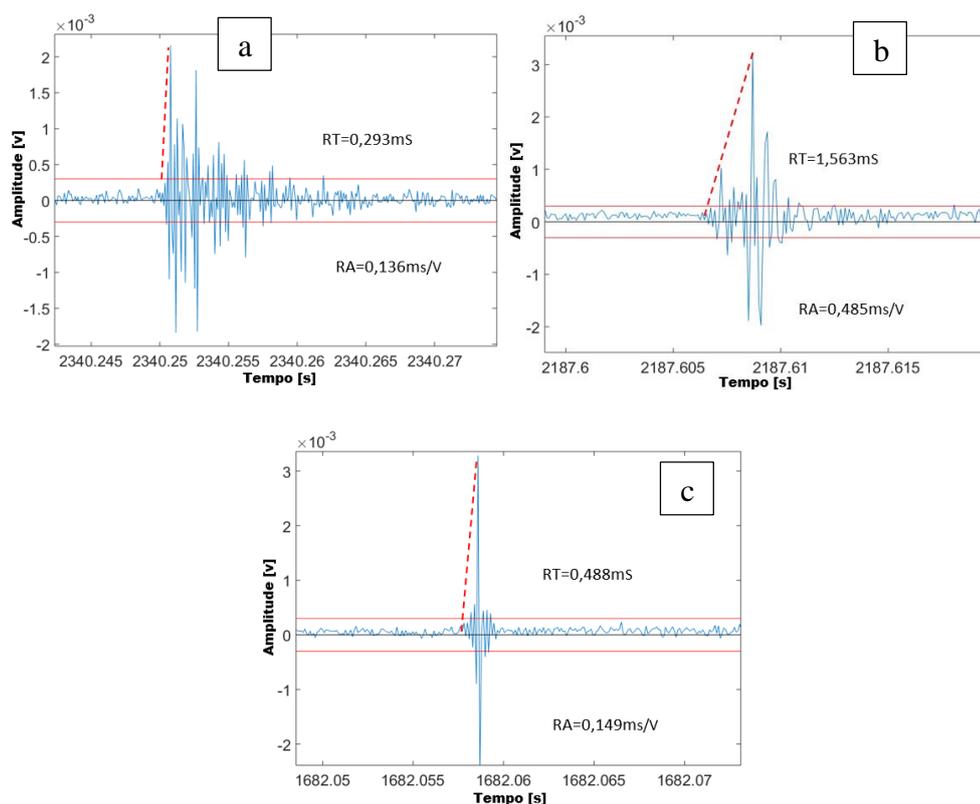
Figura 52- Número de eventos instantâneos, número de eventos acumulados, tensão e energia acumulada versus tempo normalizado. Observe que para manter a mesma escala vertical para os acertos instantâneos e acumulados, o número de acertos instantâneos foi multiplicado por 9 no gráfico a) CP01 b) CP02 c) CP03



Fonte: Elaboração própria

Foi definida a classificação das fissuras no corpo de prova, utilizando os parâmetros do valor RA e a frequência média AF. Na Figura 53a foi plotado um evento característicos de modo I (tração) com tempo de subida desde o início do evento até o pico muito curto. Já na Figura 53b o evento tem tempo de subida (RT) até o pico mais demorado comparando com o evento anteriormente mencionado o que é característico do modo II de fissura. Finalmente a Figura 53c mostra um evento classificado na zona de transição pois o formato dele não permite identificar em nenhum dos modos antes mencionadas.

Figura 53- Classificação de eventos: a) modo I, b) modo II, c) evento da zona de transição

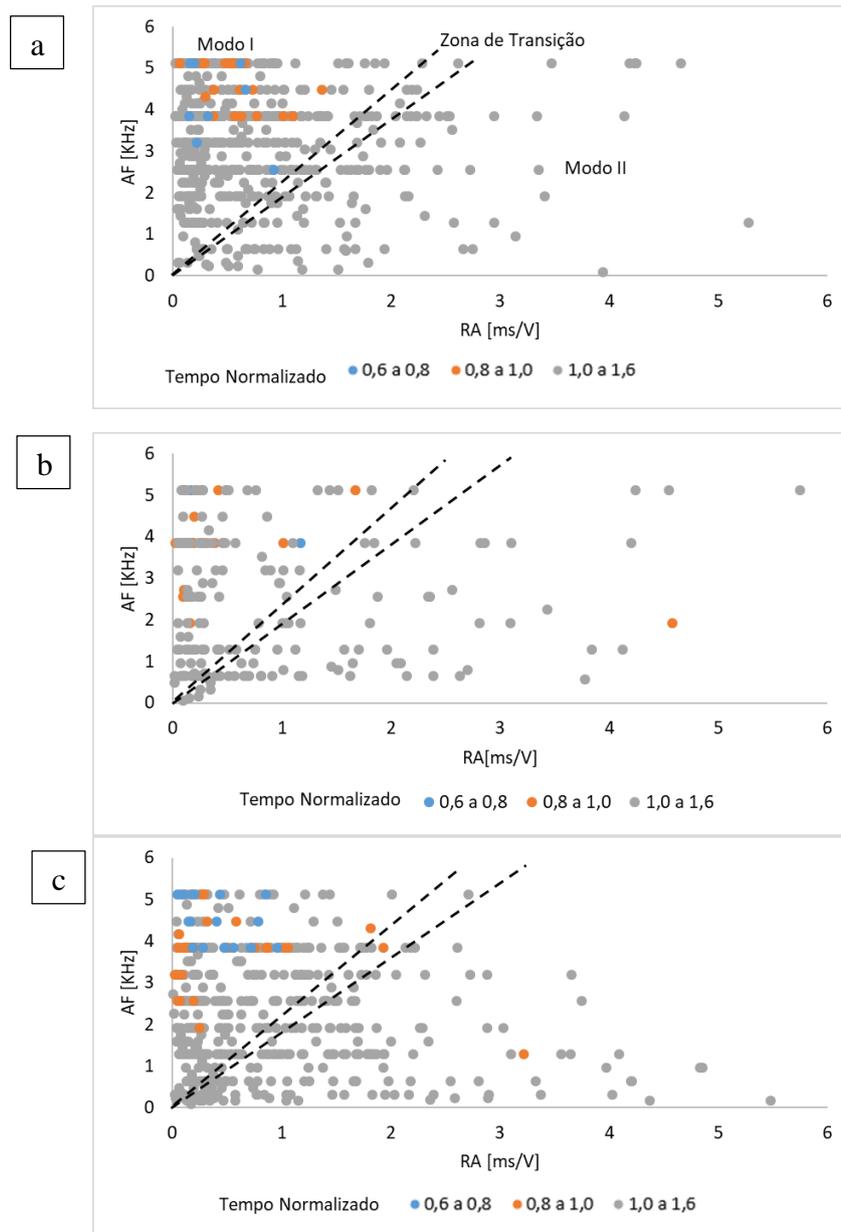


Fonte: Elaboração própria

Com base nos eventos mostrados na Figura 53, foi comprovado que critério para separar e distinguir os diferentes eventos Neste caso estudado difere dos mostrados anteriormente. Quando o evento tiver uma relação RA/AF menor que 0.417 é identificado como um evento de tração (modo I), se a relação RA/AF do evento de EA estiver entre 0.417 e 0,533 será considerado misto e finalmente se tiver uma relação com valor maior do que 0,533 teremos um evento de cisalhamento (modo II). Foi observada uma inclinação menor na linha que delimita os eventos do modo I quando comparado com as condições de ensaios anteriormente estudadas.

Como observado na Figura 54, este ensaio contém o maior número de eventos do tipo II comparado com os ensaios anteriormente vistos. As chapas metálicas visam maximizar o atrito, com isso é gerado um estado triaxial de tensões que não amostra o verdadeiro comportamento de um ensaio de compressão uniaxial. Os eventos de cisalhamento (modo II) captados pelos acelerômetros representam esse comportamento gerado nas fases confinadas. Nos gráficos que descrevem a relação RA e AF os eventos de EA com baixa frequência e um tempo longo de subida (valor RA alto) aparecem em maior número em relação aos ensaios de referência e placa escova.

Figura 54 - Relação RA e AF para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 c) CP03



Fonte: Elaboração própria

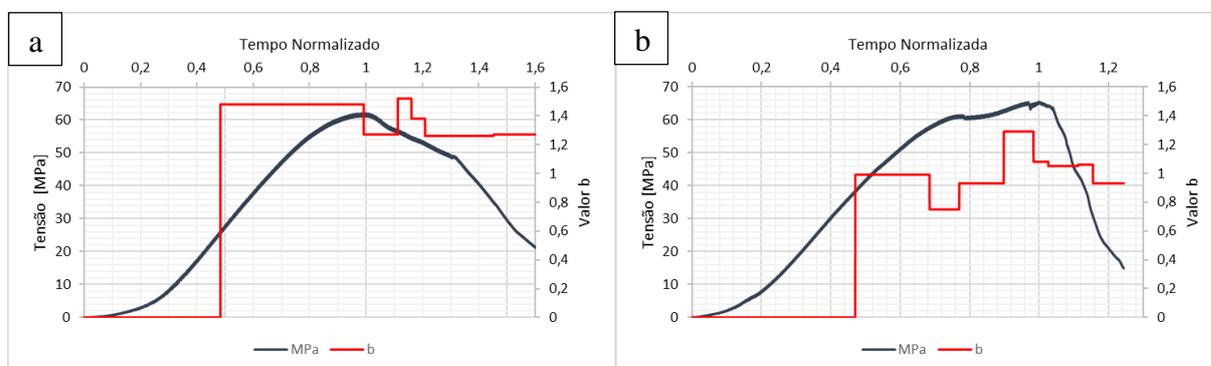
Os eventos de EA captados foram geralmente registrados durante o carregamento máximo dos corpos de prova. Aqueles eventos surgidos depois de alcançado o pico de carregamento tendem a ter um comportamento misto localizado no meio das duas linhas divisórias. Também foram obtidos eventos com características de tração com valores de AF altos e RA mínimos como visto na Figura 54 a, b e c. É importante salientar que para todos os corpos de prova mostrados nos gráficos existe uma presença maior de eventos abaixo da linha divisória com maior inclinação. O que supõe que múltiplos eventos de cisalhamento influenciam no desenvolvimento das falhas neste tipo de ensaio. Sensores com maior sensibilidade poderiam

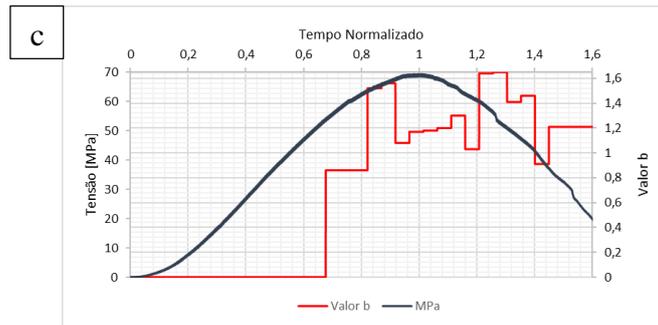
fornecer uma melhor visualização dos eventos gerando assim que a classificação deles com estes parâmetros seja mais acertada. No corpo de prova estes eventos de EA classificados como modo II (cisalhamento) são evidentes nas fissuras diagonais no corpo de prova, as quais se propagam perto das arestas em contato com as placas metálicas (Figura 51).

### 5.3.2 Análise do Valor b

Nestes ensaios foram captados alguns eventos de EA anteriores ao pico de carga espalhados ao longo do sinal. A quantidade de eventos captados no trecho antes mencionado é reduzida, mesmo assim foi possível analisar eles por meio do parâmetro do valor b. Na Figura 55a anterior ao pico de carga durante os ensaios de máxima fricção o valor b de entre 1,4 e 1,5 indica micro fissuração acontecendo no interior do espécime. Seguido por uma redução neste valor que é acompanhado com o pico máximo de carga, ele cai até um valor perto de 1. No ensaio observamos uma grande quantidade de fissuras diagonais formadas no corpo de prova quando o CP atravessa este estágio. Na Figura 55b foi observado valor de b de aproximadamente 1 muito tempo antes do pico. Fissuras visíveis são observadas no ensaio o qual coincide com o valor de b, este valor se mantém até pouco antes de alcançar o carregamento máximo quando apresenta um valor próximo de 1,3 o qual pode ser indicio de começo de muita microfissuração que coincide com a ruptura final do material. Este comportamento se repete para o CP03 como observado na Figura 55c. O valor b encontrado nos ensaios foi calculado com um maior número eventos pré-pico o que entrega um resultado mais preciso para esta condição de contorno.

Figura 55 - Valor b e gráfico de carga ao longo do tempo para diferentes corpos de prova a) CP01 b) CP02 C) CP03



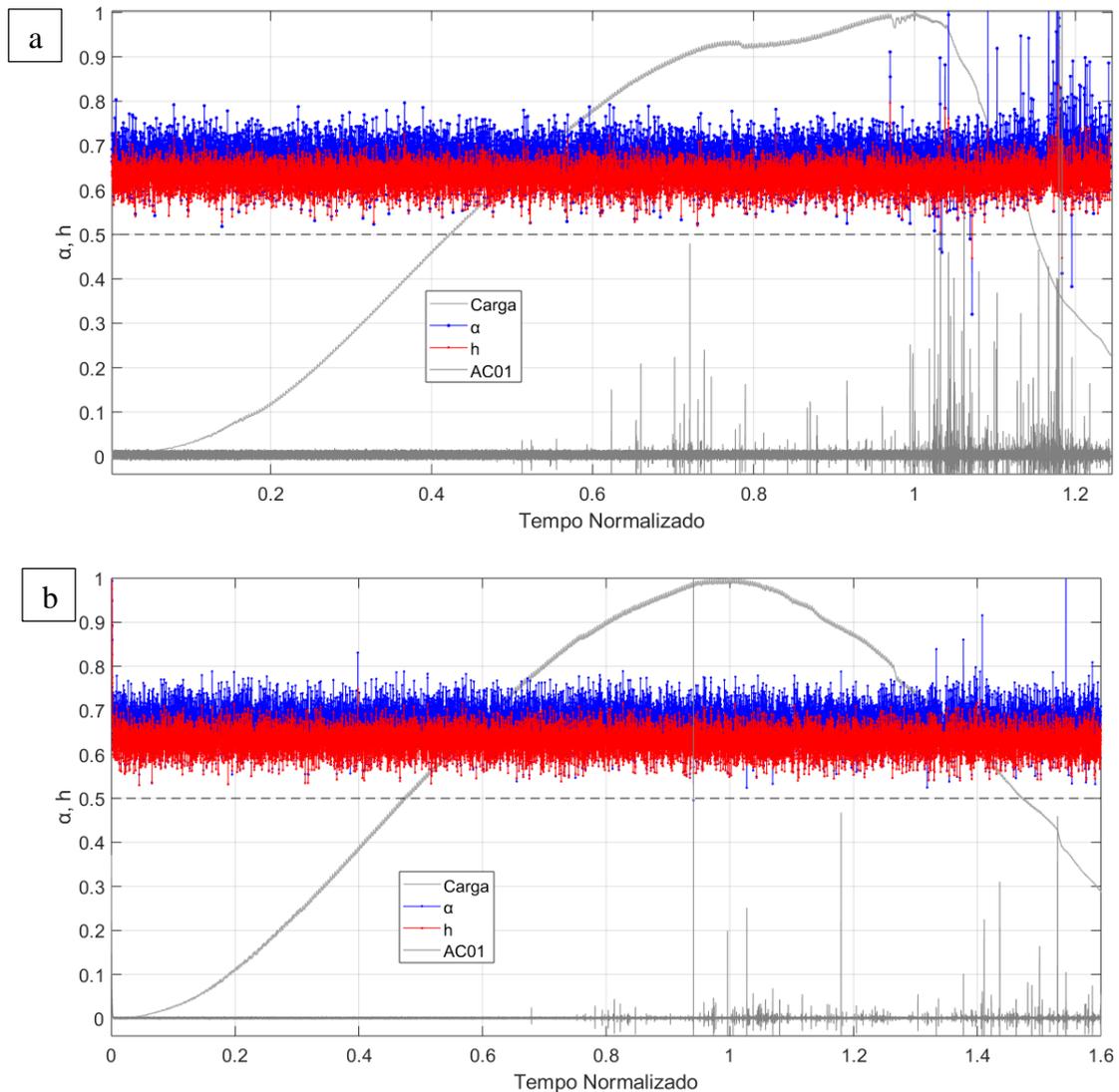


Fonte: Elaboração própria

### 5.3.3 DFA e Hurst

Na análise dos dados obtidos foram utilizadas janelas moveis de  $i=5.000$  pontos. Os valores de  $\alpha$  e  $h$  são maiores que nos ensaios com outras condições de contorno e com as mesmas janelas de tempo. Estes valores estão compreendidos entre 0,55 e 0,85 aproximadamente. O que faz as estruturas de variabilidade do sinal ainda mais persistentes do que os casos mencionados anteriormente. Foram encontrados pontos críticos onde os valores de  $\alpha$  e  $h$  ficam muito aproximados os quais coincidem com o tempo no qual são desenvolvidas as fissuras próximas ao pico de carregamento. Na Figura 56 foram plotados os gráficos dos expoentes  $\alpha$  e  $h$  para os corpos de prova CP02 e CP03 os quais foram escolhidos depois de mostrar eventos antes de alcançar o carregamento máximo no ensaio. Esta escolha foi feita em função da posterior análise do tempo natural com o objetivo de encontrar trechos de tempo críticos durante o ensaio descartando assim a análise do CP01 para estes parâmetros, pois este ensaio apresentou uma baixa quantidade de eventos antes de atingir o carregamento máximo do ensaio.

Figura 56 - Expoentes  $\alpha$  e  $h$  para o a) CP02 acelerômetro 01 e b) CP03 acelerômetro 01 ambos com uma janela móvel de  $i=5.000$  pontos

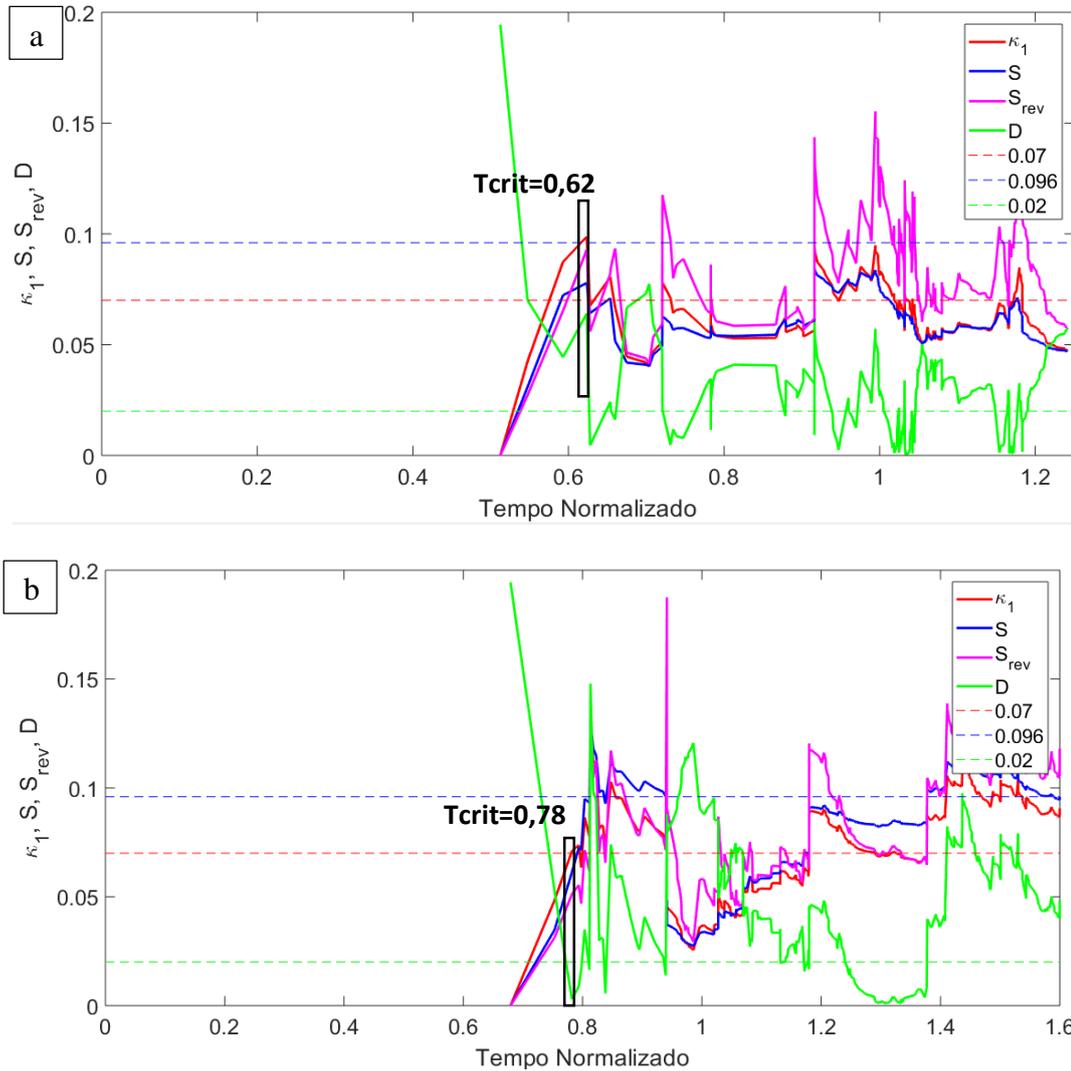


Fonte: Elaboração própria

### 5.3.4 Tempo Natural

Nos corpos de prova número 02 e 03 foram registrados eventos antes do pico que permitem analisar o sinal mediante os parâmetros do tempo natural. A Figura 57a mostra o gráfico do tempo natural para o CP02. O tempo crítico está localizado no tempo 0,62 (62% do carregamento) no qual foi observado o começo de fissuras evidentes na aresta do corpo de prova. O tempo crítico coincide com o tempo no qual são captados os primeiros eventos no sinal. Porém, estes sinais não foram suficientes para observar um comportamento no valor dos expoentes que permitisse prever a falha do corpo de prova.

Figura 57 –Análise NT da série temporal de EA. As seguintes linhas horizontais auxiliares foram adicionadas:  $k_1 = 0,070$  (vermelho tracejado), limite  $\langle D \rangle = 10^{-2}$ (verde tracejado), limite de entropia  $S_u \approx 0,0966$  (azul tracejado), a)CP02 e b)CP03



Fonte: Elaboração própria

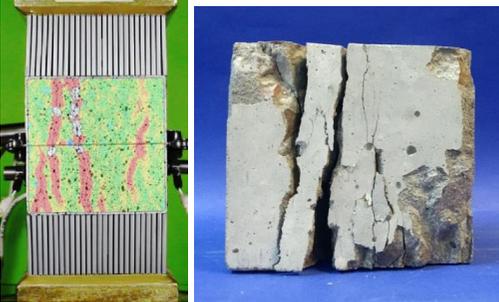
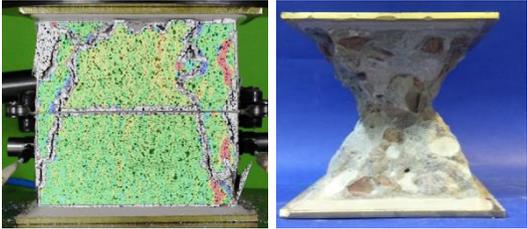
A Figura 57b mostra o gráfico do tempo natural para o CP03. O tempo crítico está localizado no tempo normalizado 0,78 o qual também está em acordo com o começo de fissuração. Da mesma maneira foi observado que o tempo crítico coincide com o tempo no qual são captados os primeiros eventos no sinal.

## 5.4 Comparação de Condições de Contorno

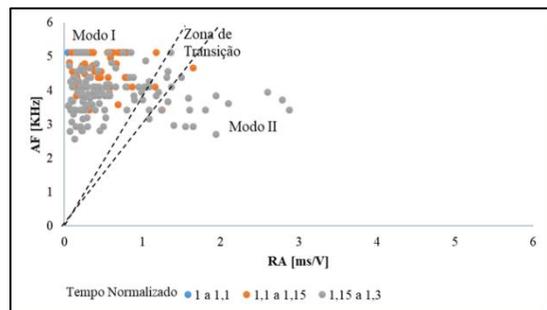
Tabela 3 – Variáveis analisadas

Tipos de análises realizadas	Descrição			
Classificação de eventos de EA	Por meio de parâmetros (AF e RA), obtidos no processamento dos sinais é efetuada a classificação de eventos como modo I (tração), modo II (cisalhamento) e modo III (transição).			
Análise do valor b	$b \approx 1$ sinal característico de eventos macroscópicos .	$b \approx 1,5$ sinal característicos de eventos microscópicos.		
DFA e Hurst	<p>Detecta correlações no sinal ao longo do tempo.            Espera-se que fissuras microscópicas sejam precursoras de fissuras maiores e aconteçam nos primeiros estágios do ensaio (<math>\alpha, h &lt; 0,5</math>), uma vez atingido o pico espera-se (<math>\alpha, h &gt; 0,5</math>) representando fissuras macroscópicas aumentando de tamanho.</p>			
			$\alpha, h < 0,5$ fissuras microscópicas serão seguidos por fissuras macroscópicas.	
			$\alpha, h \approx 0,5$ um evento caraterístico de fissura não apresenta correlação com o evento subsequente.	
$\alpha, h > 0,5$ aumento de tamanho de fissuras .				
Análise do tempo natural	Usado para determinar tempo crítico nos ensaios, este tempo é utilizado como indicio da interface entre micro e macro fissuração e falha do corpo de prova.			

Tabela 4 - Diferenças do comportamento para cada condição de contorno

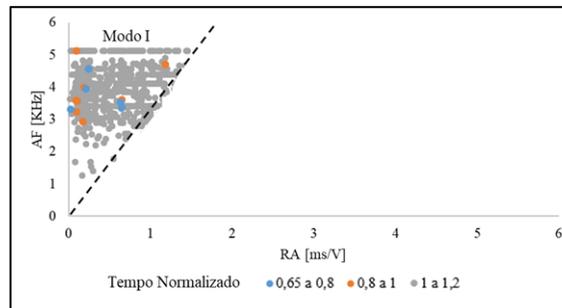
Ensaio de Referência	Ensaio com Placa Escova (mínima fricção)	Ensaio com Chapas Coladas (máxima fricção)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fissuras de tração misturadas com algumas de cisalhamento localizadas nas arestas de contato da máquina com o corpo de prova.</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fissuras de tração paralelas à aplicação da carga.</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falha em forma de ampulheta, mostra a alta concentração de esforços triaxiais mostrados nos eventos como modo II (cisalhamento).</li> <li>Fissuras diagonais que se originam nas arestas e, contato com as chapas coladas.</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>Os eventos são encontrados a partir de alcançado o carregamento máximo no corpo de prova.</li> <li>Estes eventos tem uma alta frequência média (AF) e um valor de RA baixo sendo na sua maior parte, o que representa um comportamento interno de tração.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Captamos um maior número de eventos anteriores ao pico de carregamento</li> <li>Comportamento típico de fissuras de tração nos eventos. Alta concentração de eventos com frequência alta e RA baixo.</li> <li>Muitos eventos saturam na frequência de 5KHz o que é indicativo de que eles têm frequências mais altas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Captamos eventos antes do pico, porém em menor quantidade comparado com o ensaio com placa escova.</li> <li>A distribuição dos eventos mostra uma maior concentração de eventos de cisalhamento, estes evidenciam as tensões triaxiais geradas pelas chapas coladas.</li> </ul>

- Uma quantidade mínima de eventos na zona de transição e no modo II de cisalhamento mostra o desenvolvimento em menor parte de tensões triaxiais no corpo de prova.
- Eventos classificados como modo I (tração) neste tipo de ensaio tem uma relação RA/AF < 0,267.
- Eventos classificados como modo II (cisalhamento) tem uma relação RA/AF > 0,333.



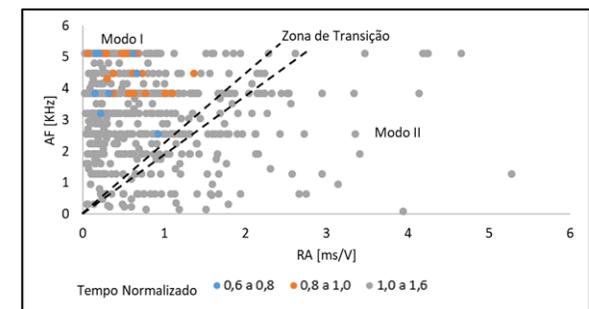
- O valor de b mostra a fissuração externa que é registrada durante o pico do ensaio

- Todos os eventos observados tiveram uma configuração do seu formato de onda característico do modo I de fissura (tração) obtendo na linha que delimita os modos uma relação RA/AF igual a 0,317.

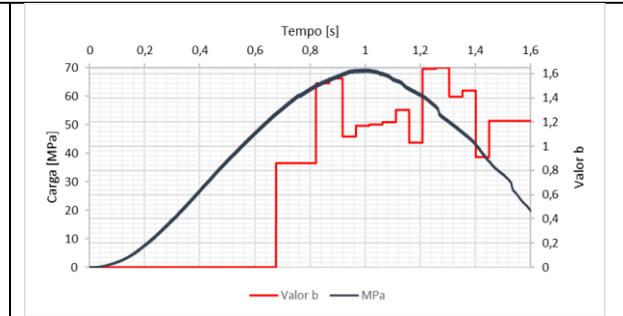
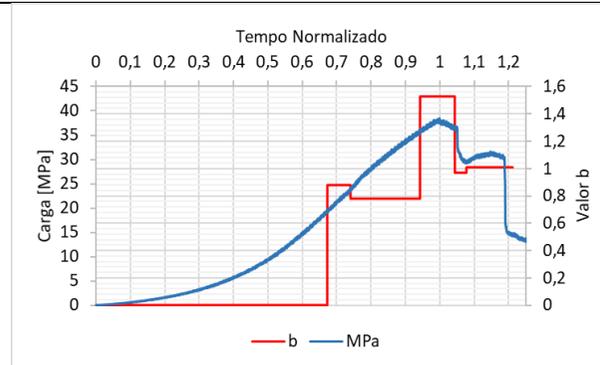
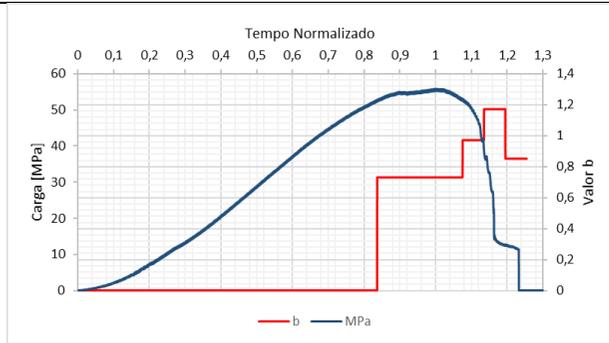


- O valor b mostra presença de microfissuras antes de falha final.

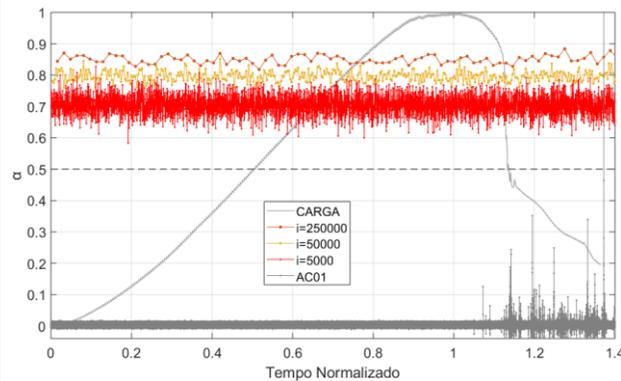
- Eventos classificados como modo I (tração) neste tipo de ensaio tem uma relação RA/AF < 0,417.
- Eventos classificados como modo II (cisalhamento) tem uma relação RA/AF > 0,533.



- Os valores de b mudam muito indicando resumidamente presença de micro e macro fissuração durante o ensaio.



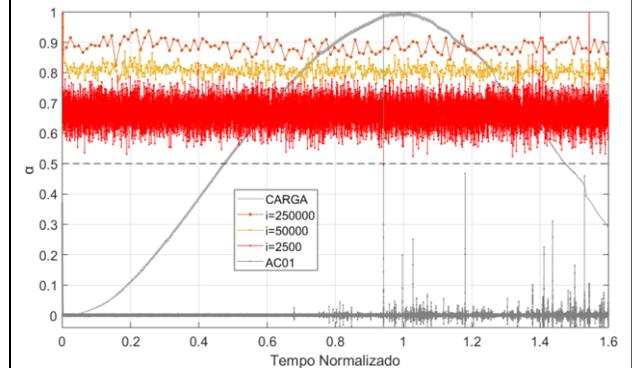
- Os expoentes DFA e R/S nesta condição de contorno acusam um comportamento persistente ao longo do ensaio.



- O valor dos expoentes muda ao reduzir o tamanho da janela móvel, porém não temos

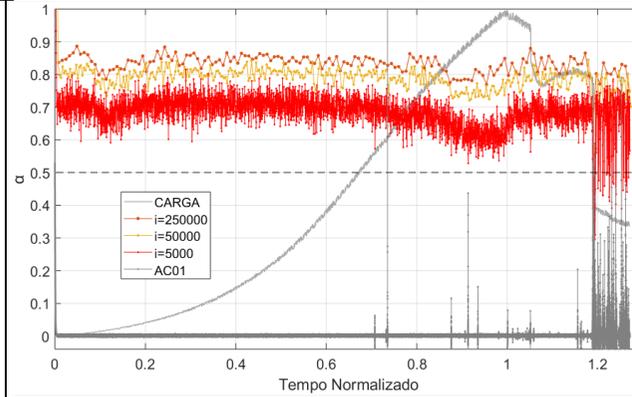
- O comportamento apresentado como persistente no começo do ensaio diminui gradualmente, chegando a valores de até 0,5 como indicativo de que estamos próximos de uma falha maior no material que coincide com o pico do carregamento.
- O valor dos expoentes muda ao reduzir o tamanho da janela móvel, temos maior precisão nos valores quanto menor o tamanho da mesma.

- Os expoentes DFA e R/S nesta condição de contorno acusam um comportamento persistente ao longo do ensaio.



- O valor dos expoentes muda ao reduzir o tamanho da janela móvel, porém não temos

mudança no comportamento da curva descrita pelos expoentes.



mudança no comportamento da curva descrita pelos expoentes.

Fonte: Elaboração própria

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Conclusões

O presente trabalho buscou aplicar técnicas de emissão acústica no monitoramento de fissuras em corpos de prova de concreto. Testaram-se diferentes condições de contorno em ensaios de compressão axial. As principais considerações estão listadas a seguir:

- A condição com chapas coladas e de referência apresentam fissuras internas classificadas no modo II (cisalhamento). Um maior número deste tipo de fissuras foi encontrado na primeira condição, isto é, atrelado ao confinamento proporcionado nesta condição. No ensaio de referência este confinamento também é observado em menor medida. Assim os resultados coincidem com o esperado, tensões triaxiais relatadas na teoria são captadas e traduzidas em eventos de EA típicos de cisalhamento.
- A utilização de uma placa escova para reduzir o atrito durante o ensaio de compressão é coerente com os eventos típicos de tração que o sinal correspondente apresenta. Não foram encontrados eventos do modo II nesta condição.
- A análise paramétrica de EA revelou que microfissuração ocorre em três estágios distintos e sucessivos. Ou seja, estágio inicial, estágio de colapso principal, e pós-fratura
- Quando comparamos o valor  $b$  nas três condições de contorno analisadas observamos que a microfissuração precede a macrofissuração. Exceto pelo ensaio de referência no qual devido à limitada capacidade dos sensores não foi possível determinar um padrão de comportamento pré-pico de carga.
- Não houve diferenças significativas nos valores dos expoentes de DFA e R/S para os ensaios de referência e chapas coladas. Se observou correlações de longo alcance nos sinais obtidos para os ensaios realizados para estas duas condições de contorno. Não são parâmetros que possam ser utilizados para prever a falha nestes casos.
- Os valores de janelas móveis utilizadas para obter os valores de  $\alpha$  e  $h$  são importantes para uma análise mais precisa. Foi determinado que para estes ensaios janelas de tamanho  $i=5.000$  pontos são as mais adequadas para ser usadas.
- No ensaio de mínimos atrito (chapas coladas) foi possível determinar um comportamento comum já encontrado em trabalhos relacionados. Descobrimos que o valor do expoente DFA correspondente exibe as seguintes alterações: Antes do mínimo de 70% do carregamento, o expoente começa a apresentar uma diminuição gradual de mais de 0,6 para cerca de 0,5, assim as correlações temporais de longo alcance se

quebram para um comportamento quase aleatório possivelmente se transformando em anticorrelação. Após esta inclinação o expoente aumenta para valores entre 0,6 e 0,7, mostrando assim que se desenvolvem correlações temporais de longo alcance, isto último acontece depois de passar o carregamento do pico no ensaio.

- A análise no domínio do tempo natural mostrou que a convergência dos parâmetros de ordem e as entropias podem prever a entrada da estrutura em um estágio crítico, calculada a partir da energia EA.
- Com equipamentos mais sensíveis poderia ser possível monitorar em tempo real estruturas em condições de serviço identificadas como propensas a falhas, para determinar em qual estágio da falha os elementos estruturais se encontram. Também resultados obtidos apresentaram uma similitude com resultados obtidos ao estudar correlações temporais em séries de dados de históricos de terremotos.

## **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

A partir da análise de resultados realizada no presente trabalho, fazem-se as seguintes sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos:

- A utilização de sensores de 10KHz para captação de eventos durante o ensaio de referência se provou ineficaz para os estágios prévios à quebra dos espécimes. Recomenda-se melhorar a isolamento acústica do ambiente de ensaio assim como também o uso de sensores com uma maior frequência de captação de dados.
- Para a condição de contorno com chapas coladas e de referência sugere-se que a localização dos sensores seja próxima às partes de contato entre os corpos de prova e a máquina de realização do ensaio. Desta forma será possível ter uma melhor captação de eventos gerados pelas tensões triaxiais e determinar se o comportamento paramétrico destes eventos está de acordo com a teoria.
- Para visualizar sinais com frequência maior do que 5 KHz o número mínimo de amostras que deve ser empregado é de 20 mil amostras por segundo, ou seja, a frequência de amostragem deve ser superior a 20 kHz. Sugere-se utilizar a frequência máxima de amostragem do equipamento (192.000 amostras por segundo) de modo a melhorar a relação sinal ruído.

## REFERÊNCIAS

AGGELIS, D. G. et al. Effect of wave distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 183-190, 2012.

AGGELIS, D. G.; KORDATOS, E. Z.; MATIKAS, T. E. Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates. **Mechanics Research Communications**, v. 38, n. 2, p. 106-110, 2011.

AGGELIS, D. G.; MPALASKAS, A. C.; MATIKAS, T. E. Investigation of different fracture modes in cement-based materials by acoustic emission. **Cement and Concrete Research**, v. 48, p. 1-8, 2013.

AGGELIS, Dimitrios G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters. **Mechanics Research Communications**, v. 38, n. 3, p. 153-157, 2011.

AKI, Keiiti. **Scaling law of seismic spectrum**. **Journal of geophysical research**, v. 72, n. 4, p. 1217-1231, 1967.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASTM, E. 1316-06. 2006. **Standard terminology for nondestructive examinations**. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.

ATIVITAVAS, Nat. **Acoustic emission signature analysis of failure mechanisms in fiber reinforced plastic structures**. 2002. Tese de Doutorado.

BANDEIRA, Matthews Vargas Vaucher. **Influência das condições de contorno e geometria dos espécimes em resposta à compressão axial**. 2020.

BEHNIA, A. et al. Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 202-215, 2014.

BEATTIE, Alan G. Acoustic emission non-destructive testing of structures using source location techniques. **Albuquerque and Livermore**, 2013.

BASSINGTHWAIGHTE, James B.; RAYMOND, Gary M. Evaluating rescaled range analysis for time series. **Annals of biomedical engineering**, v. 22, n. 4, p. 432-444, 1994.

CARPINTERI, Al; LACIDOGNA, G.; PUGNO, N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 74, n. 1-2, p. 273-289, 2007.

CARPINTERI, Alberto; LACIDOGNA, Giuseppe; PUZZI, Simone. **From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0**. *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 41, n. 2, p. 843-853, 2009.

CARPINTERI, A.; LACIDOGNA, G.; NICCOLINI, G. Fractal analysis of damage detected in concrete structural elements under loading. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 42, n. 4, p. 2047-2056, 2009.

CARPINTERI, Alberto; NICCOLINI, Gianni; LACIDOGNA, Giuseppe. Time series analysis of acoustic emissions in the Asinelli tower during local seismic activity. **Applied Sciences**, v. 8, n. 7, p. 1012, 2018.

CHAPMAN, Chris. **Fundamentals of seismic wave propagation**. Cambridge university press, 2004.

COLOMBO, Ing S.; MAIN, I. G.; FORDE, M. C. Assessing damage of reinforced concrete beam using “b-value” analysis of acoustic emission signals. **Journal of materials in civil engineering**, v. 15, n. 3, p. 280-286, 2003.

DIAMANTI, K.; SOUTIS, C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 46, n. 8, p. 342-352, 2010.

DRUMMOND, G.; WATSON, J. F.; ACARNLEY, P. P. Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing. **Ndt & E International**, v. 40, n. 1, p. 94-101, 2007.

FOWLER, T. J.; BLESSING, J. A.; CONLISK, P. J. New direction in testing: Third International Symposium on Acoustic Emission from Composite Materials, Paris (France), 17–21 Jul. 1989, pp. 16–27. ASNT (1989). **NDT & E International**, v. 25, n. 1, p. 43-44, 1992.

FOWLER, T. J.; GRAY, E. Development of an acoustic emission test for FRP equipment. **Preprint**, v. 3583, p. 2-6, 1979.

FRIEDRICH, Leandro et al. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition. **Composite Structures**, v. 256, p. 113105, 2021.

GROSSE, Christian U.; FINCK, Florian. Quantitative evaluation of fracture processes in concrete using signal-based acoustic emission techniques. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 4, p. 330-336, 2006.

GROSSE, Christian U.; OHTSU, Masayasu (Ed.). **Acoustic emission testing**. Springer Science & Business Media, 2008.

HANSEN, Alex; HEMMER, Per Christian; PRADHAN, Srutarshi. **The fiber bundle model: modeling failure in materials**. John Wiley & Sons, 2015.

HELMAN, Daniel S. Seismic electric signals (SES) and earthquakes: A review of an updated VAN method and competing hypotheses for SES generation and earthquake triggering. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 302, p. 106484, 2020.

HEMMER, Per C.; HANSEN, Alex. **The distribution of simultaneous fiber failures in fiber bundles**. 1992.

HOLFORD, Karen Margaret; LARK, Robert John. **Acoustic Emission Testing Bridges**. 2005.

Hurst, H.E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* **1951**, 116, 770-808.

IDA, Nathan; MEYENDORF, Norbert (Ed.). **Handbook of advanced nondestructive evaluation**. Springer International Publishing, 2019.

INABA, Hidehiro. AE Sensor (AE Transducer). In: **Practical Acoustic Emission Testing**. Springer, Tokyo, 2016. p. 35-43.

ISO, *Nondestructive testing-acoustic emission inspection: Vocabulary*. 2001.

JCMS-III B5706 (2003) Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission. Federation of Construction Materials Industries, Japan

KAISER, E. J. A study of acoustic phenomena in tensile test. **Dr.-Ing. Dissertation. Technical University of Munich**, 1950.

KANAMORI, Hiroo; ANDERSON, Don L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. **Bulletin of the seismological society of America**, v. 65, n. 5, p. 1073-1095, 1975.

KAPHLE, Manindra R. **Analysis of acoustic emission data for accurate damage assessment for structural health monitoring applications**. 2012. Tese de Doutorado. Queensland University of Technology.

KOSTOPOULOS, Vassilis et al. On the identification of the failure mechanisms in oxide/oxide composites using acoustic emission. **NDT & E International**, v. 36, n. 8, p. 571-580, 2003.

KOTSOVOS, M. D. Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression. **Materiaux et construction**, v. 16, n. 1, p. 3-12, 1983.

KUMAR, S. et al. Effect of Platen Restraint on Stress–Strain Behavior of Concrete Under Uniaxial Compression: a Comparative Study. **Strength of Materials**, v. 48, n. 4, p. 592-602, 2016.

KURZ, Jochen H. et al. Source localization. In: **Acoustic Emission Testing**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. p. 101-147.

KURZ, Jochen H. et al. Stress drop and stress redistribution in concrete quantified over time by the b-value analysis. **Structural health monitoring**, v. 5, n. 1, p. 69-81, 2006.

LACIDOGNA, Giuseppe; PIANA, Gianfranco; CARPINTERI, Alberto. Damage monitoring of three-point bending concrete specimens by acoustic emission and resonant frequency analysis. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 210, p. 203-211, 2019.

LI, Zongjin; SHAH, Surendra P. Localization of microcracking in concrete under uniaxial tension. **Materials Journal**, v. 91, n. 4, p. 372-381, 1994.

MINDESS, Sidney. Acoustic emission methods. In: **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. CRC press, 2003. p. 349-365.

MOURA, André; LEI, Xinglin; NISHISAWA, Osamu. Prediction scheme for the catastrophic failure of highly loaded brittle materials or rocks. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 53, n. 11, p. 2435-2455, 2005.

NAKANO, Masaaki; NAKAMURA, Hideyuki. AE Measurement System. In: **Practical Acoustic Emission Testing**. Springer, Tokyo, 2016. p. 45-60.

NAKANO, Masaaki; NAKAMURA, Hideyuki. AE Measurement System. In: **Practical Acoustic Emission Testing**. Springer, Tokyo, 2016. p. 45-60.

NAZARCHUK, Zinoviy; SKALSKYI, Valentyn; SERHIYENKO, Oleh. Propagation of elastic waves in solids. In: **Acoustic Emission**. Springer, Cham, 2017. p. 29-73

NICCOLINI, Gianni et al. Criticality Hidden in Acoustic Emissions and in Changing Electrical Resistance during Fracture of Rocks and Cement-Based Materials. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 5608, 2020.

OHNO, Kentaro; OHTSU, Masayasu. Crack classification in concrete based on acoustic emission. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2339-2346, 2010.

OHNO, Kentaro; OHTSU, Masayasu. Crack classification in concrete based on acoustic emission. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2339-2346, 2010.

OHTSU, Masayasu et al. Principles of the acoustic emission (AE) method and signal processing. In: **Practical Acoustic Emission Testing**. Springer, Tokyo, 2016. p. 5-34.

OHTSU, Masayasu. History and fundamentals. In: **Acoustic Emission Testing**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. p. 11-18.

OHTSU, Masayasu. Sensor and instrument. In: **Acoustic emission testing**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. p. 19-40.

OHTSU, Masayasu. The history and development of acoustic emission in concrete engineering. **Magazine of concrete research**, v. 48, n. 177, p. 321-330, 1996.

OHTSU, Masayasu; TOMODA, Yuichi. Phenomenological model of corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 2, p. 194, 2008.

PAPPAS, Yiannis Z.; KOSTOPOULOS, Vassilis. Toughness characterization and acoustic emission monitoring of a 2-D carbon/carbon composite. **Engineering fracture mechanics**, v. 68, n. 14, p. 1557-1573, 2001.

Peng, C.K. et al. Mosaic Organization of DNA Nucleotides, *Phys. Rev. E* 1994, 49, 1685-1689.

POLLOCK, A. A. Inspecting bridges with acoustic emission—inspection details about in-service steel bridges and monitoring weld operations: application guidelines. **Prepared by: Physical Acoustics Corporation**, 1995.

POLLOCK, A. A. Stress-wave emission—a new tool for industry. **Ultrasonics**, v. 6, n. 2, p. 88-92, 1968.

POLLOCK, A. Acoustic emission amplitude distributions. **International Advances in Nondestructive Testing.**, v. 7, p. 215-239, 1981.

POTIRAKIS, S. M.; MASTROGIANNIS, D. Critical features revealed in acoustic and electromagnetic emissions during fracture experiments on LiF. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 485, p. 11-22, 2017.

RAMIREZ-JIMENEZ, C. R. et al. Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event. **Composites Science and Technology**, v. 64, n. 12, p. 1819-1827, 2004.

Ramírez-Rojas, A.; Flores-Márquez, E.L. Order parameter analysis of seismicity of the Mexican Pacific coast, *Phys. A: Stat. Mech. 620 Appl.* **2013**, 392, 2507-2512.

RATHKE, Juliano Elesbão et al. Sistema de processamento de sinais biomédicos: módulos didáticos de aquisição de ECG, EMG, EOG e conversão analógico-digital de biosinais. 2008

RICHTER, C. F. *Elementary Seismology*. San Francisco: WH Freeman and Company; London: Bailey Bros. & Swinfen Ltd. 1958.

RIGOLI, Lillian M. et al. Co-actors exhibit similarity in their structure of behavioural variation that remains stable across range of naturalistic activities. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020.

RILEM TC. 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. *Mater Struct* 2010; 1187:1189-43(9).

ROBINSON, George S. Methods of detecting the formation and propagation of microcracks in concrete. 1968.

RÜSCH, Hans. **Physical problems in the testing of concrete**. Cement and Concrete Association, 1960.

SARLIS, Nicholas V. et al. Investigation of the temporal correlations between earthquake magnitudes before the Mexico M8. 2 earthquake on 7 September 2017. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 517, p. 475-483, 2019.

SHANNON, Claude Elwood. A mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, v. 5, n. 1, p. 3-55, 2001.

SCHOFIELD, B. H.; BARREISS, B.; KYRALA, A. **Acoustic emission under applied stress WADS**. Technical Report 58-194. Lessells and Associates: Boston, MA, 1958.

SHIOTANI, Tomoki et al. Practical AE testing, data recording and analysis. In: **Practical acoustic emission testing**. Springer, Tokyo, 2016. p. 61-99.

SHIOTANI, T. Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model tests. *Progress in Acoustic Emission VII, JSNDI*, p. 529-534, 1994.

SHIOTANI, Tomoki. Parameter analysis. In: **Acoustic emission testing**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. p. 41-51.

SUZUKI, Tetsuya et al. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2347-2352, 2010.

TENSI, Hans Maria. The Kaiser-effect and its scientific background. **Journal of Acoustic Emission**, v. 22, p. s1-s16, 2004.

TERNOWCZEK, Samuel J. et al. Acoustic emission and ultrasonic testing for mechanical integrity. In: **Acoustic Emission: Standards and Technology Update**. ASTM International, 1999.

TORQUATO, Salvatore; HASLACH JR, H. W. Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties. **Appl. Mech. Rev.**, v. 55, n. 4, p. B62-B63, 2002.

TSANGOURI, Eleni; AGGELIS Dimitrios G. Acoustic emission. In: **Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation**. Springer International Publishing, 2019. p. 115-140

VALLEN, Hartmut. AE testing fundamentals, equipment, applications. **Journal of Nondestructive Testing(Germany)**, v. 7, n. 9, p. 1-30, 2002.

VAROTSOS, P. A.; SARLIS, N. V.; SKORDAS, E. S. Long-range correlations in the electric signals that precede rupture: Further investigations. **Physical Review E**, v. 67, n. 2, p. 021109, 2003.

VAROTSOS, Panayiotis; SARLIS, Nicholas V.; SKORDAS, Efthimios S. **Natural time analysis: the new view of time: precursory seismic electric signals, earthquakes and other complex time series**. Springer Science & Business Media, 2011.

XU, Jian Gong. **Nondestructive evaluation of prestressed concrete structures by means of acoustic emissions monitoring**. 2008. Tese de Doutorado.

ZINOVIIY. SKALSKIYI NAZARCHUK (VALENTYN. SERHIYENKO, OLEH.). **ACOUSTIC EMISSION: Methodology and Application**. SPRINGER, 2019.

ZOHORA, Fatematu. **Evaluation of material crack using acoustic emission technique**. 2016. Tese de Doutorado. Queensland University of Technology.