

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARIANA HAMDAN PADILHA

**COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS MONITORADAS POR EMISSÃO
ACÚSTICA E A RELAÇÃO COM DADOS DE SISMOS**

Alegrete

2024

MARIANA HAMDAN PADILHA

**COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS MONITORADAS POR EMISSÃO
ACÚSTICA E A RELAÇÃO COM DADOS DE SISMOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich

Alegrete

2024

MARIANA HAMDAN PADILHA

**COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS MONITORADAS POR
EMIÇÃO ACÚSTICA
E A RELAÇÃO COM DADOS DE SISMOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em 06 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2024, às 17:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2024, às 17:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2024, às 17:14, 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, informando o código verificador **1618477** e o código CRC **5A960DD1**.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo primeiramente a minha família, que foi o pilar para que eu chegasse até aqui. Minha mãe Suraia me ensinou a ser forte e conquistar o meu lugar, a nunca deixar de me esforçar para alcançar meus sonhos. Meu pai Luiz foi o motivo pelo qual eu escolhi a Engenharia Mecânica, sempre incentivando minha curiosidade e me ensinando a nunca desistir. Minhas irmãs Júlia e Vitória foram minhas amigas e terapeutas nas horas vagas, as quais em qualquer dia ou hora eu sei que posso contar.

Maurício, meu amor e amigo, obrigada por me acompanhar nessa trajetória, agradeço por todos os incentivos e cuidados que tu tiveste comigo nesse período, e estendo para tua família, que foram igualmente importantes.

Aos meus amigos Alice, Amanda, Ana, Bárbara, Bruna, Eduardo, Pedro e Renan, obrigada pela lealdade e por serem os alívios nos momentos difíceis.

Obrigada ao meu orientador Prof. Dr. Leandro Friedrich, pelo incentivo e permitir o meu crescimento, e a Universidade Federal do Pampa, por ser o ambiente que me acolheu e desenvolveu durante toda minha trajetória acadêmica.

RESUMO

Emissão acústica (EA) é denominado o processo de liberação de ondas elásticas causado por uma descontinuidade interna em um material. Essa técnica de estudo pode auxiliar no monitoramento do dano e previsão de falha em estruturas, com amplas aplicações nas áreas de engenharia. A sismologia apresenta similaridades com EA, pois os danos causados por eventos sísmicos, os terremotos, começam pela liberação de ondas a partir do movimento de placas tectônicas. O valor- b é um dos principais parâmetros que ambas as metodologias utilizam para determinar as condições do material ou crosta terrestre quando em solitação. Assim, o presente trabalho realizou uma comparação da evolução de dano entre eventos acústicos e sísmicos através do valor- b , procurando identificar padrões de comportamento entre as diferentes séries de sinais. Os dados de EA foram obtidos por ensaios em amostras impressas 3D, enquanto os dados sísmicos são coletados do terremoto na Turquia de magnitude 7.8 na escala Richter em 2023. Foi possível observar que o valor- b se comportou de maneira a apresentar os precedentes da falha, ou, do evento principal, e a sua queda, quando associada a muitos eventos, indica a uma região de muito dano.

Palavras-chave: Emissão acústica, sismologia, valor- b .

ABSTRACT

Acoustic emission (AE) is called the process of releasing elastic waves caused by an internal discontinuity in a material. This study technique can help monitor damage and predict failure in structures, with wide applications in engineering areas. Seismology has similarities with EA, as the damage caused by seismic events, earthquakes, begins with the release of waves from the movement of tectonic plates. The b-value is one of the main parameters that both methodologies use to determine the conditions of the material or earth's crust when requested. Therefore, the present work carried out a comparison of the evolution of damage between acoustic and seismic events using the b-value, seeking to identify patterns of behavior between the different series of signals. The EA data was obtained by testing 3D printed samples, while the seismic data is collected from the earthquake in Turkey measuring 7.8 on the Richter scale in 2023. It was possible to observe that the b-value behaved in a way that indicates the precedents of the failure, or, of the main event, and its fall, when associated with many events, indicates a region of a lot of damage.

Keywords: Acoustic Emission, Seismology, value-*b*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de ensaio de emissão acústica.	13
Figura 2- Modos de propagação trinca.....	14
Figura 3 - Modo de falha.....	15
Figura 4 - Características de um evento de EA.....	16
Figura 5 - Representação das ondas P e S.....	17
Figura 6 - Distribuição terrestre de placas tectônicas.....	18
Figura 7 - Representação do valor-b ao longo do processo de dano.....	19
Figura 8 – (a) Máquina de ensaio, (b) osciloscópio Yokogawa, (c) Sensor MEMS utilizado durante os ensaios e (b) fonte.....	21
Figura 9 - Montagem completa dos equipamentos para o ensaio.....	22
Figura 10 - (a) Dimensões das amostras, e (b) amostras impressas 3D.....	22
Figura 11 - Impressora 3D Creality Ender-3 Max Neo.....	23
Figura 12 - Região limite atingida pelo terremoto e aftershock.....	25
Figura 13 - Eventos sísmicos: a) Região A, b) Região B.....	26
Figura 14 - Resultados de EA: a) atividade de EA e b) valor-b.....	27
Figura 15 - Modo de falha predominante: relação RA-AF.....	28
Figura 16 - a) Valor-b X dia; b) Magnitude X dia; c) Evento X dia.....	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	9
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Emissão Acústica	11
2.2 Modo de propagação de trincas.....	12
2.3 Terminologia.....	14
2.4 Sismologia.....	15
2.5 Valor-b	17
3 METODOLOGIA	19
3.1 Descrição do ensaio experimental de EA.....	19
3.1.1 Análise da evolução do dano.....	22
3.2 Dados sismológicos.....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 Análise dos sinais de EA.....	25
4.2 Amostra de sismos 1 - Região A.....	27
4.3 Amostra de sismos 2 - Região B	30
5 CONCLUSÕES	34
6 REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

Emissão Acústica (EA) é denominado o processo de liberação de ondas elásticas pela redistribuição de tensões internas causado por mudanças na estrutura interna de um material (Huang *et al.*, 1998). A principal fonte de EA está relacionada com danos, portanto, a detecção e monitoramento são normalmente utilizadas para tentar prever falhas em materiais e estruturas. A EA, ou a técnica da EA, é utilizada nas indústrias para detectar vazamentos em vasos de pressão, tanques e sistemas de tubulação, além de monitorar o progresso da evolução da solda e corrosão. É possível analisar essas atividades na estrutura interna do material através de sensores fixados na superfície, sem a necessidade de interrupções no processo produtivo para inspeções (Huang *et al.*, 1998).

Os eventos de emissão acústica podem ser considerados uma forma de microssismos, visto que ocorrem pela liberação de energia localizada devido a uma micro trinca no material (Christiansen, 2015). De fato, há uma correlação entre EA e sismologia, uma vez que em ambos os casos há a análise da liberação de ondas elásticas, porém em escalas e faixas de frequência diferentes. Mais precisamente, enquanto os sinais de EA operam em faixas de frequência de 20 kHz a 1 MHz, os dados sismográficos estão na ordem de 1 Hz. Outro fator importante na semelhança entre os dois temas é o objetivo de se prever a ocorrência de falhas baseando-se nos sinais coletados. Por isso, ao longo dos últimos anos diversos parâmetros precursores de EA e sismos têm sido aplicados a ambos os conjuntos de dados (Lei; Ma, 2014).

Na sismologia, o parâmetro valor- b é uma propriedade do terremoto, utilizado para caracterizar sua magnitude, sendo sua variação relacionada com o nível de tensão, heterogeneidade do material, entre outros fatores (El-Isa; Eaton, 2014). Para os eventos de EA, o valor- b se comporta de maneira similar, se modificando conforme intensificação da trinca, e se aproximando da unidade quando há indícios de fratura (Jung *et al.*, 2017).

As sequências de eventos de terremotos e de emissão acústica se assemelham, sendo então o propósito deste trabalho estudar o processo de fratura de forma a identificar comportamentos precursores em dados de sismos e EA.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é quantificar a evolução do dano em uma estrutura simples monitorada por Emissão Acústica através do valor- b e comparar a evolução deste parâmetro quando ele é empregado em dados de sismos.

Os objetivos específicos são:

- Separar eventos de EA do sinal capturado do ensaio experimental;
- Avaliar a evolução de dano pelo valor- b ;
- Coletar dados de sismos e avaliar a evolução com o valor- b ;
- Comparar os resultados de EA e sísmicos.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Emissão Acústica

A emissão acústica foi uma das primeiras técnicas que introduziram os ensaios não destrutivos para análise de dano. Diferente de outros métodos, a EA é considerada passiva, pois é aplicada durante o carregamento da estrutura, e a detecção dos sinais de ruptura ocorrem antes da falha completa do material (Grosse; Ohtsu, 2008).

Segundo a ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais, 1989, tradução própria) a definição de emissão acústica é “a classe de fenômenos pelos quais ondas transitórias de tensão/deslocamento são geradas pela liberação rápida de energia de fontes localizadas dentro de um material, ou as ondas transitórias assim geradas.” As possíveis causas dessas alterações estruturais são início e crescimento de trincas, abertura e fechamento de trincas, movimentos de discordâncias, transformação de fase em materiais monolíticos e descolamento de matriz de fibra em compósitos (Lockner, 1993).

A EA é uma onda elástica irradiada por liberação de energia causada por trincas internas no material. A aplicação desse estudo pode ser utilizada na área de geologia para o estudo de minas, de forma a estimar situações de tensões locais ou prever desastres causados por desabamento de pedras. Entre suas vantagens, destaca-se a observação do processo de dano durante o carregamento, sem interrupções; além disso, somente alguns sensores são necessários para detectar os sinais. Porém, essa técnica também possui empecilhos, o seu teste não pode ser reproduzido devido à natureza da fonte do sinal, que na maioria das vezes é associado a uma formação aleatória de trinca, mesmo sendo utilizado um material com as mesmas características e propriedades. Ademais, é necessário utilizar sensores com alta sensibilidade, porém o ambiente pode influenciar através de ruídos, atenuando sinais e modificando a resposta final; e uma análise confiável de sinais e interpretação dos dados só pode ser realizada quando a localização do sinal é feita (Grosse; Ohtsu, 2008).

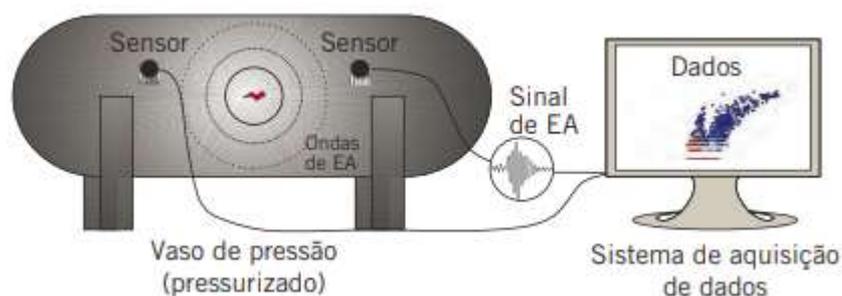
Segundo Lockner (1993) a fratura frágil ocorre com o crescimento de trincas, que surgem com concentradores de tensões em vazios que resultam em contrastes de propriedades elásticas. O dano irreversível resulta em emissão acústica, que pode ceder a informação sobre a localização, tamanho e mecanismos de deformação do evento, além das propriedades do meio no qual a onda acústica se propaga, como velocidade, atenuação e crescimento.

Porém, ainda uma das dificuldades dessa técnica é estimar o dano, pois ainda é necessário a interpretação das características da forma da onda originada microscopicamente para compreender o possível estimulador de dano (Burud; Kishen, 2020).

Ainda não se pode definir exatamente a quantidade de energia de uma EA, isso se deve ao fato que muitos fatores podem influenciar, tais como os parâmetros do sensor como sensibilidade, localização, escala de frequência, nível do *threshold*, entre outros. Porém, sabe-se que a energia de uma EA será a energia necessária para quebrar ligações atômicas e isso se deve ao fato que quando há quebra de ligações atômicas em um plano de trinca devido a um fluxo de energia, ocorrem emissões na forma térmica, eletromagnética e acústica. Portanto, uma onda de EA terá características de tensão que ocorrem no nível atômico do material.

A fonte do sinal de EA são as ondas elásticas liberadas por uma fonte de falha. Os sensores fixados na superfície do material captam as ondas de tensão e convertem para sinais elétricos. Os sinais de EA ocorrem em uma escala de frequência alta (20 kHz a 1 MHz), com baixa amplitude.

Figura 1 - Representação de ensaio de emissão acústica.



Fonte: Filippin *et al.* (2017).

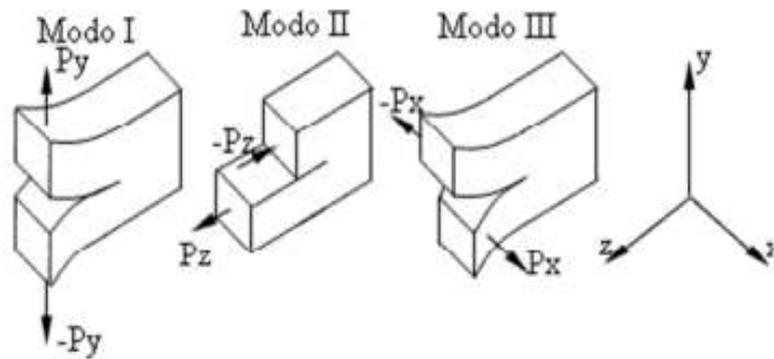
2.2 Modo de propagação de trincas

A propagação de trincas irá depender dos movimentos relativos de suas superfícies, dos modos I, II e III, respectivamente de tração, cisalhamento ou torção. Cada trinca terá um campo de tensões em seus arredores, que gerará um ou mais modos de deslocamento (Birck, 2016).

Na Figura 2 estão demonstradas as formas de propagação, na qual o modo I é o carregamento em tração, em que as superfícies da trinca farão o deslocamento perpendicular a si mesmas; modo II cisalhamento no plano, no qual o deslizamento das superfícies ocorre

paralela a si mesma e perpendicular a frente de propagação; e modo III cisalhamento fora do plano, que o deslocamento das superfícies será paralelo entre elas (Birck, 2016).

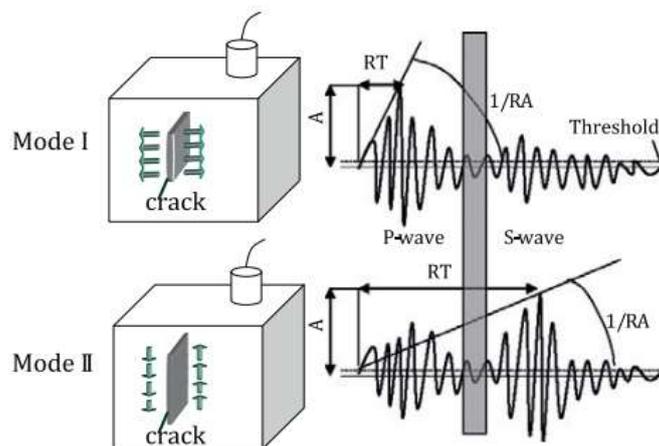
Figura 2- Modos de propagação trinca.



Fonte: Puglia (2014).

O modo de fratura, dentro do contexto da EA, pode ser determinado através de uma relação entre o tempo de subida da onda (RT), o valor da amplitude do pico e a frequência média (AF). A relação entre o tempo de subida e a amplitude de pico estabelece o ângulo de elevação (RA). Assim, o modo de falha predominante da estrutura ocorre através da relação dos parâmetros RA com AF que serão definidos na próxima seção. O modo de propagação de falhas I, por tração, é caracterizado por possuir valores altos de AF e baixos de RA, enquanto para o modo II, por cisalhamento no plano, resultam em ondas mais compridas, com RA alto e AF mais baixo, como apresentado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Modo de falha.



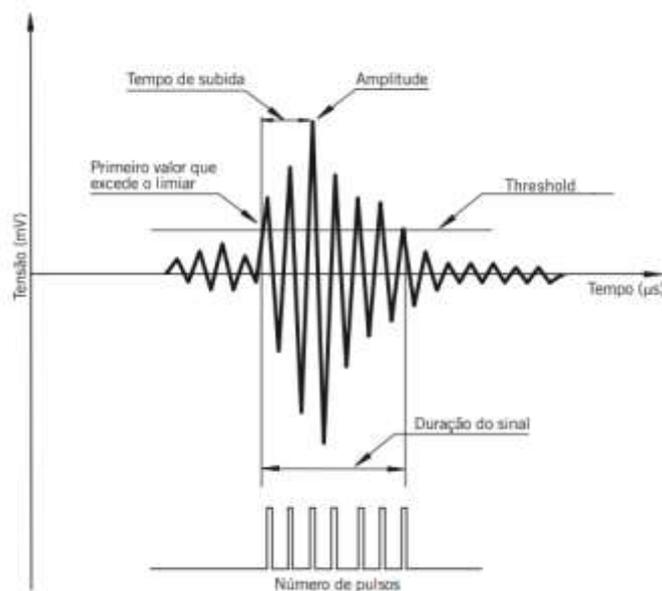
Fonte: Aggelis *et al.* (2011).

2.3 Terminologia

Para a técnica de emissão acústica há um conjunto de termos e parâmetros específicos para determinar diferentes tipos de situações, assim como descrito por Filippin *et al.* (2017) (ver Figura 4):

- Amplitude de sinal: maior pico de tensão registrado pela forma de onda do sinal de um evento de emissão;
- *Threshold*: nível de tensão limite que os sinais devem ultrapassar para serem considerados sinais de EA, utilizado para filtrar ruídos do ambiente não relacionados com o ensaio;
- Contagem de EA: número de vezes que o sinal de EA excede o *threshold* na faixa positiva durante o tempo determinado do ensaio;
- Duração do sinal: tempo entre a primeira e a última vez que o sinal ultrapassou o *threshold*;
- Evento: conjunto de ondas que ficam acima do *threshold* durante um determinado tempo;
- Fonte: causa física de um ou mais eventos de EA;
- Tempo de chegada: tempo que o sinal ultrapassa pela primeira vez o *threshold* até a amplitude do sinal do evento.

Figura 4 - Características de um evento de EA.



Fonte: adaptado de Filippin *et al.* (2017).

2.4 Sismologia

Um terremoto é o movimento da crosta terrestre que gera distúrbios elásticos conhecidos por ondas sísmicas, que se divergem por todas as direções. É denominado foco de um terremoto a região na qual a liberação de energia começou e o epicentro é o ponto na superfície localizado verticalmente ao foco. As vibrações causadas por esse estresse causam danos na superfície terrestre, associado com a sua magnitude e as condições geológicas locais (Skinner; Porter; Park, 2004).

As ondas sísmicas podem ser classificadas em ondas de corpo, que transmitem o movimento de forma compressiva, denominada ondas primárias (P), ou de forma cisalhante, chamada de ondas secundárias (S); e ondas de superfície, subdivididas em *Love Waves* e *Rayleigh Waves*.

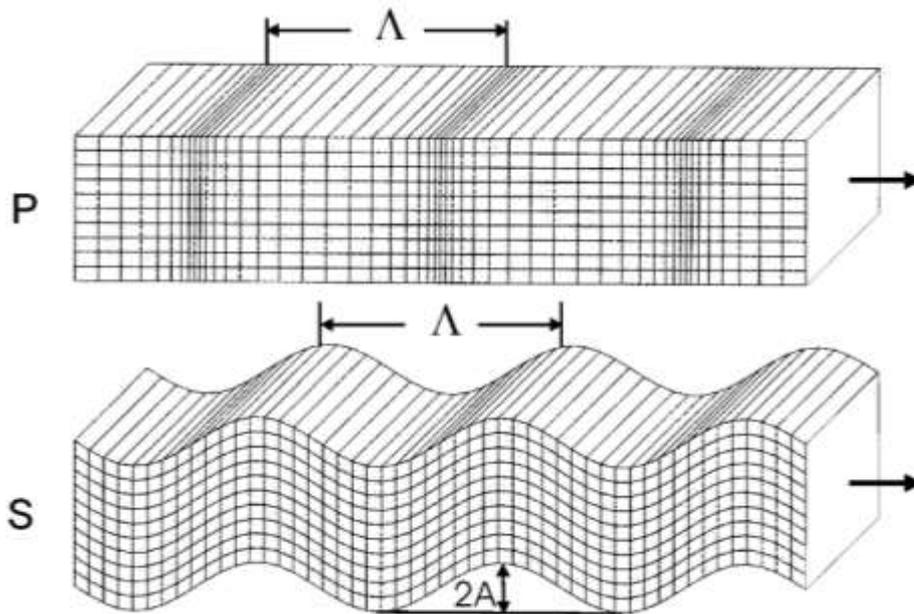
O sismómetro é um sensor de vibração que monitora e registra o movimento da superfície. Seu funcionamento ocorre com o uso de uma mola com baixa resistência presa a um corpo de grande massa; ao movimentar a mola, a massa permanece estacionária e a mola se movimenta, definindo um princípio inercial e registrando os sinais em um papel denominado sismograma (Skinner; Porter; Park, 2004).

As primeiras ondas a serem captadas pelos sismómetros após um terremoto são as ondas P, seguidas pelas ondas S e por fim pelas ondas de superfície. As ondas P podem viajar por sólidos, líquidos e gases, um exemplo seria o som. As ondas S só viajam em matéria sólida, visto que há uma deformação elástica quando ela se propaga. As ondas de superfície viajam mais devagar, porém normalmente possuem o maior número de sinais no sismograma, além de causarem os maiores estragos. A Figura 5 demonstra a transmissão das ondas P e S em um corpo.

O interior da Terra pode atingir temperaturas elevadas, somente na fronteira entre a crosta e o manto pode atingir até 5000°C. Para manter a temperatura constante na superfície ocorre um processo de convecção na litosfera, chamado de movimento de placas tectônicas, que pode ser dividido em convergente, divergente e transformante.

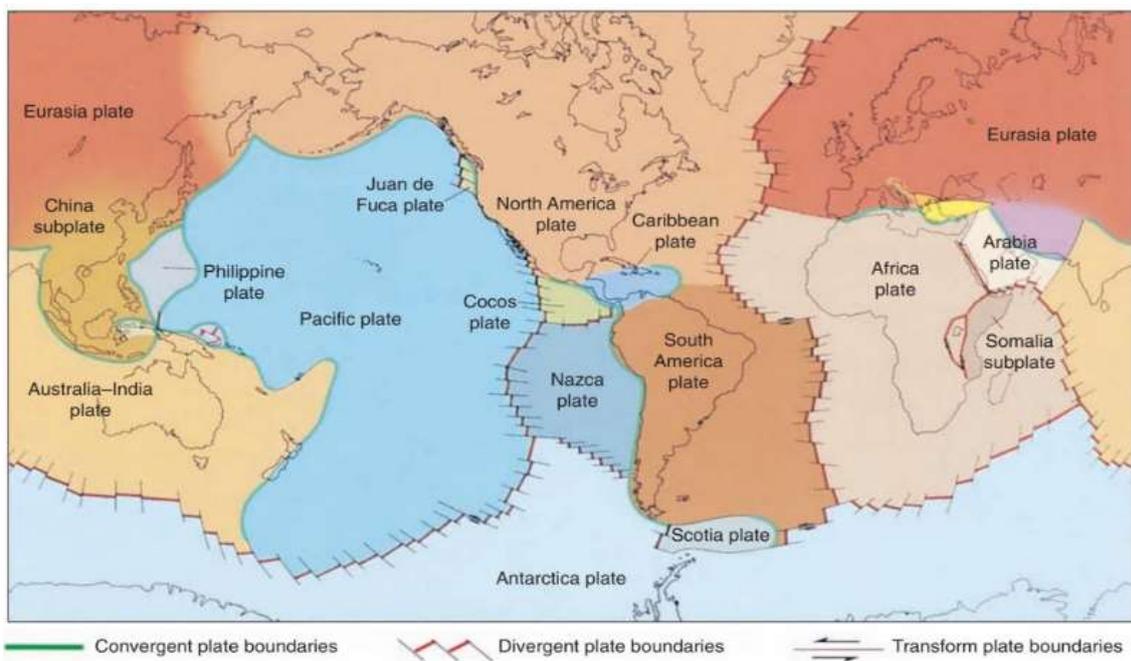
O movimento convergente pode ser subdividido em dois tipos, subducção e soerguimento. O divergente é o movimento de afastamento de placas e transformante é a fratura horizontal, como em um deslocamento cisalhante, ocorrendo geralmente em placas oceânicas. Pode ser visualizado na Figura 6 a distribuição dos diferentes tipos de placas tectônicas e seus movimentos (Skinner; Porter; Park, 2004).

Figura 5 - Representação das ondas P e S.



Fonte: adaptado de Bormann, Engdahl e Kind (2012).

Figura 6 - Distribuição terrestre de placas tectônicas.



Fonte: Christiansen (2015).

Muitos terremotos de grande magnitude são antecipados por terremotos menores, denominados sismos precursoros (*foreshock*), enquanto pós-choque (*aftershock*) é denominado o sismo que ocorre após um terremoto. Os terremotos normalmente ocorrem com falhas preexistentes, que são classificadas em três tipos diferentes: a falha de deslizamento, de impulso e falha normal. Neste trabalho, será observado a falha de deslizamento, que ocorre com placas transformantes.

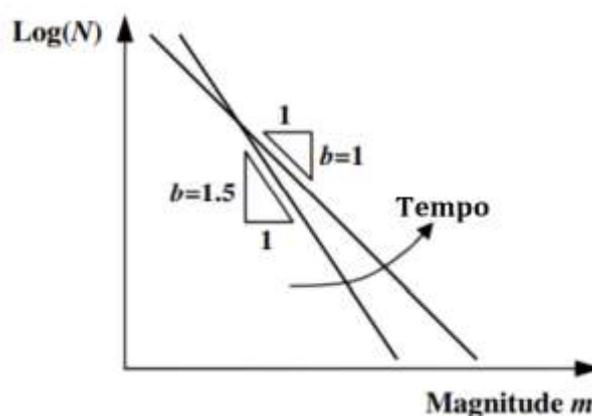
2.5 Valor-*b*

O valor-*b* é um dos parâmetros para a análise das condições de uma estrutura. Seu valor se modifica conforme o carregamento aumenta e a trinca se intensifica. Sua determinação pode ser feita através da equação de Gutenberg-Richter para a magnitude de um terremoto (Jung *et al.*, 2017):

$$\log N (M) = a - b.M \quad (1)$$

Na qual “*N*” corresponde a quantidade de eventos com magnitude “*M*” em um determinado período. Essa equação tem sido usada para o cálculo de emissões acústicas para encontrar a amplitude de distribuições de eventos de EA, manifestando uma das similaridades entre o processo de dano em uma estrutura e atividades sísmicas no interior da crosta da Terra. O valor-*b* é o coeficiente angular com inclinação negativa no gráfico $\log N - \log M$ (Carpinteri; Lacidogna; Puzzi, 2009).

Figura 7 - Representação do valor-*b* ao longo do processo de dano.



Fonte: adaptado de Carpinteri, Lacidogna e Puzzi (2009).

Em experimentos de EA o valor- b é aproximado a 1,5 em uma condição não crítica, como por exemplo no início do ensaio que é caracterizado por eventos de pequena amplitude e em grande quantidade. Assim que o processo de falha evolui, e a falha é iminente, o valor- b se aproxima da unidade. Isso ocorre, pois, eventos de grande magnitude aparecem na série temporal, diminuindo o coeficiente angular.

Em relação aos sismos, o valor- b é uma medida quantitativa da distribuição do tamanho do terremoto dentro de uma região e período especificados. Segundo El-Isa e Eaton (2014) na sismologia, um evento vem acompanhado de uma grande variabilidade do valor- b , bem como os epicentros dos maiores terremotos aparentam estar relacionados com a queda do valor- b para um ou abaixo.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do ensaio experimental de EA

Os dados de EA foram obtidos dentro do contexto do projeto financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS) sob Termo de outorga 24/2551-0000772-5.

Durante o ensaio de EA são utilizados: o osciloscópio, acelerômetros do tipo MEMs e a máquina de ensaios Shimadzu AGS-X com capacidade de carga de 5kN, Figura 8a. O osciloscópio é da marca Yokogawa DLM2054, tem largura de banda 200 a 500 MHz e memória de até 250 Mpoints, Figura 8b. Os acelerômetros utilizados são da marca *OCTOPARTS* e distribuídos pela empresa *mouser eletronic*s, tem uma capacidade de até 25 kHz e a taxa de aquisição utilizada foi de 62,5 kHz, Figura 8c. Além disso, foi utilizada uma fonte da marca *Politem* modelo HY3003D, ver Figura 8d.

Figura 8 – (a) Máquina de ensaio, (b) osciloscópio Yokogawa, (c) Sensor MEMS utilizado durante os ensaios e (d) fonte.



Fonte: (a) Site Direct Industry (2023), (b) Autor (2024).

O ensaio experimental foi realizado no laboratório de Metalografia da UNIPAMPA em Alegrete. A Figura 9 ilustra a montagem completa do ensaio de EA. O ensaio é realizado a partir dos seguintes passos:

- Calibração da célula de carga da máquina de ensaios;
- Montagem do osciloscópio e dos acelerômetros;
- Colagem dos acelerômetros na amostra;
- Posiciona-se a amostra na máquina de ensaios;
- Início do ensaio e registro da carga aplicada, deslocamento e dos acelerômetros;
- Análise do sinal capturado.

Figura 9 - Montagem completa dos equipamentos para o ensaio.

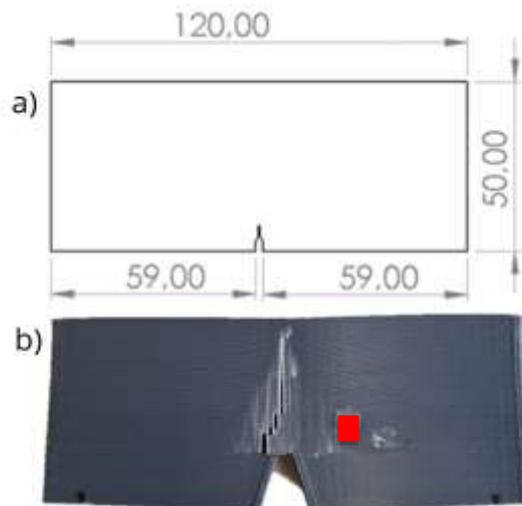


Fonte: Autor (2024).

Para avaliar a evolução do dano utilizando os sensores MEMS, foi utilizada um corpo de prova entalhado sob flexão em 3 pontos até a falha. A Figura 10a mostra as dimensões da amostra (em mm) e a Figura 10b mostra a amostra impressa 3D, onde o quadrado vermelho indica o posicionamento do sensor de EA.

A amostra foi impressa utilizando a impressora 3D Creality Ender-3 Max Neo, Figura 11. O *Software* UltiMaker-Cura foi utilizado para conversão do modelo 3D em instruções para a impressora, permitindo a criação de objetos camada por camada com precisão e detalhamento.

Figura 10 - (a) Dimensões das amostras, e (b) amostra impressa em 3D.



Fonte: Autor (2024).

Figura 11 - Impressora 3D Creality Ender-3 Max Neo.



Fonte: Site creality (2024).

3.1.1 Análise da evolução do dano

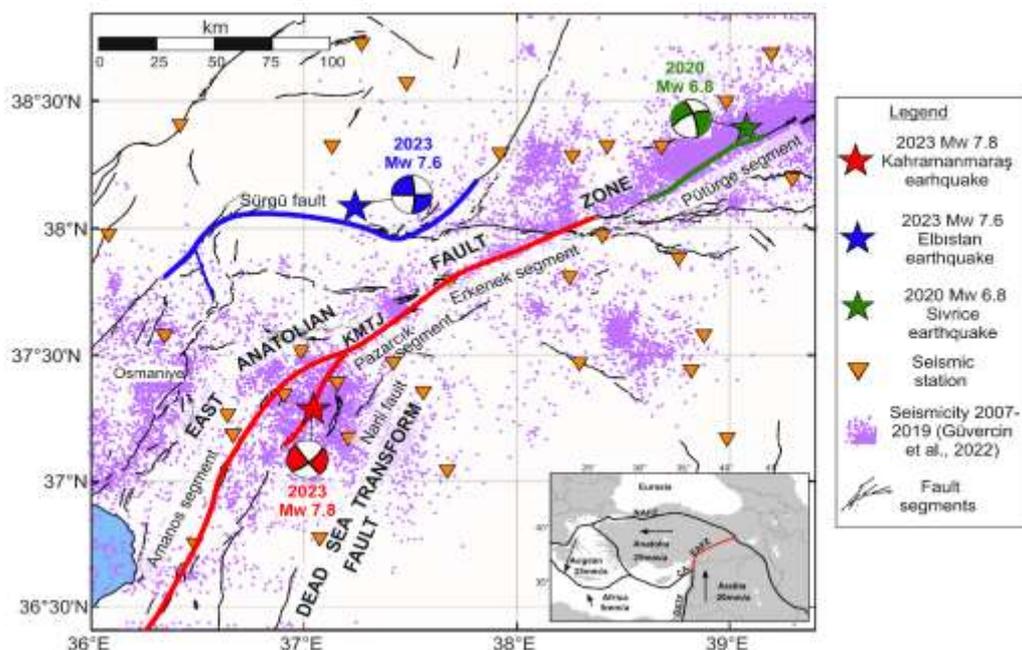
O osciloscópio faz o armazenamento dos sinais de EA durante o ensaio e exporta os dados em um único arquivo no formato .wdf. Para a análise dos resultados é feita a conversão destes arquivos para o formato de leitura suportado pelo Matlab .wvf. Após a conversão, os sinais de EA são obtidos através de um *software* no Matlab onde os eventos são separados do ruído ambiente. Com a identificação do início-fim e a amplitude máxima dos sinais será

possível analisar diversos parâmetros de cada sinal de que serão empregados nos cálculos, tais como o ângulo de subida (RA), a frequência média (AF), a energia de cada evento, o momento de chegada e a duração. Com estes parâmetros calculados serão analisados os índices de predição de falha, valor-b, e o modo de falha predominante nas amostras (Modo I ou Modo II), estabelecido pela correlação entre a frequência média (AF) e o ângulo de subida (RA).

3.2 Dados sismológicos

No dia 6 de fevereiro de 2023 às 01h17min UTC, um terremoto devastador de magnitude 7.8 na escala Richter atingiu o município de Pazarcık da província de Kahramanmaraş, na Turquia. Seguido por um segundo terremoto de magnitude 7.5 às 10:24 UTC em Elbistan. Ocorrido na Falha Oriental da Anatólia (EAFZ), com a intersecção das placas tectônicas Arábica e Anatólia, o choque principal atingiu a superfície e se estendeu por uma região de aproximadamente 500 km. Detalhes da região afetada e identificação dos sismos são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Região limite atingida pelo terremoto e *aftershock*.



Fonte: Kwiatek et al. (2023).

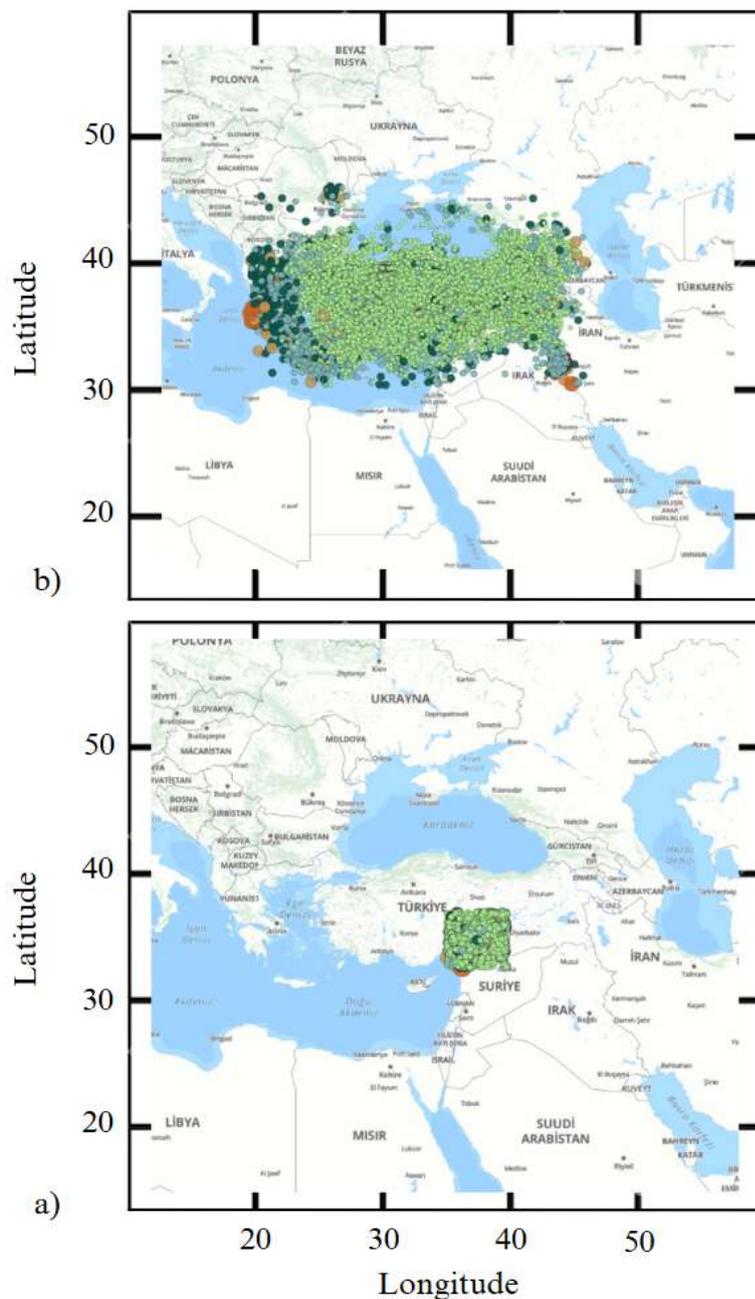
A área do epicentro foi a região sudeste da Turquia, incluindo as cidades de Gaziantep e Hatay. A EAFZ se desloca na forma de movimento transformante. Monitorada pela AFAD (presidência de gestão de desastres e emergências, tradução própria), os sinais dos sismos provenientes serão retirados do site <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>.

O período selecionado para análise será a partir de primeiro de janeiro de 2014 até o dia 6 de abril de 2023, em duas regiões diferentes definidas como:

- A: região de coordenadas geográficas de latitude [36°, 39°] e longitude [35°, 39°];
- B: região de coordenadas geográficas de latitude [33°, 46°] e longitude [20°, 48°].

O limite de magnitudes utilizado será a partir de 1,5 na escala Richter. Na Figura 13 estão representados os eventos sísmicos acumulados nas respectivas regiões.

Figura 13 - Eventos sísmicos: a) Região A, b) Região B.

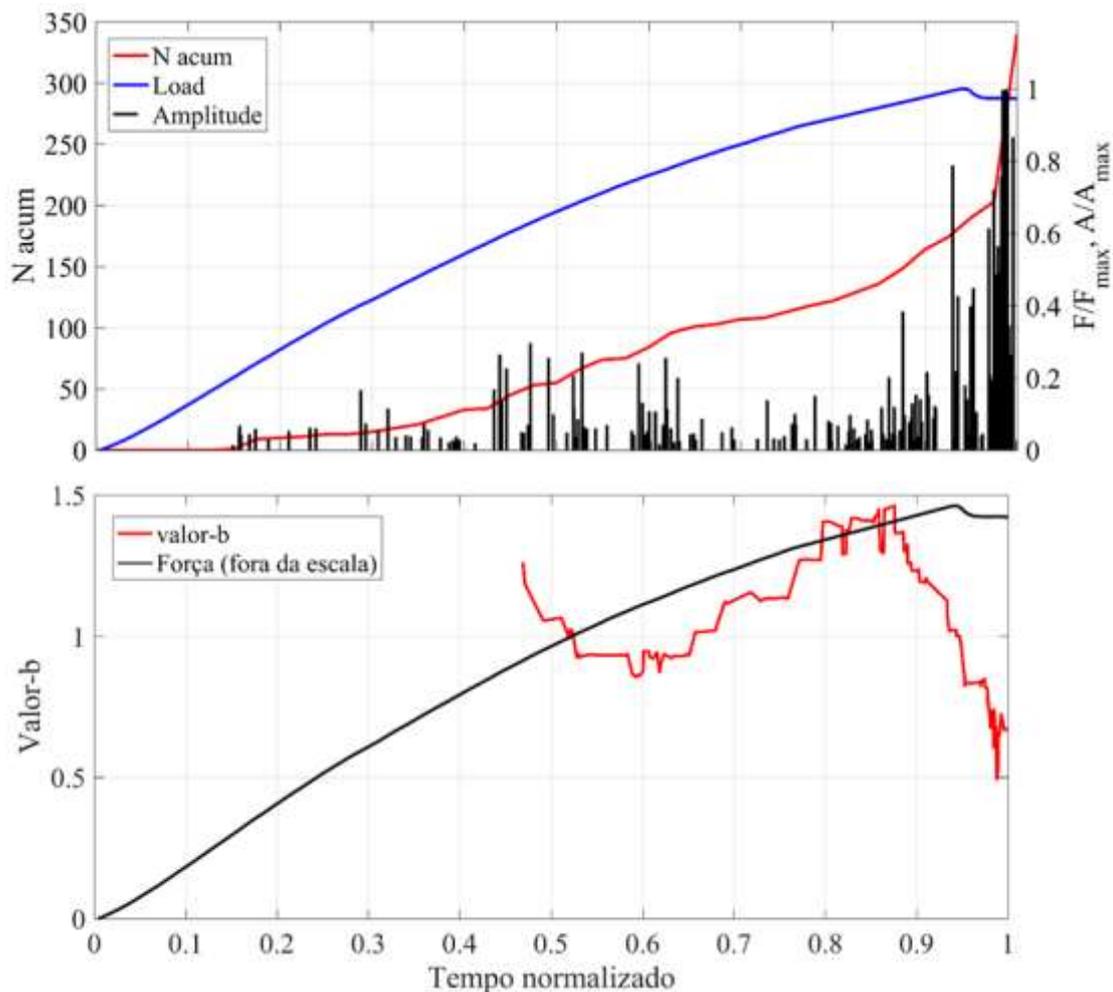


4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos sinais de EA

A análise dos resultados no domínio do tempo possibilita a observação das características gerais dos ensaios de EA. Conforme ilustrado na Figura 14a, são apresentadas as amplitudes máximas, o número de eventos acumulados ao longo do carregamento, em função do tempo normalizado. Observa-se que os eventos de emissão acústica têm início quando o material deixa de apresentar comportamento linear, indicando o começo da fase de deformação plástica, evidenciando a transição nas características mecânicas do material, à medida que ele acumula danos internos e microfissuras, gerando as ondas acústicas detectáveis.

Figura 14 - Resultados de EA: a) atividade de EA e b) valor-*b*.

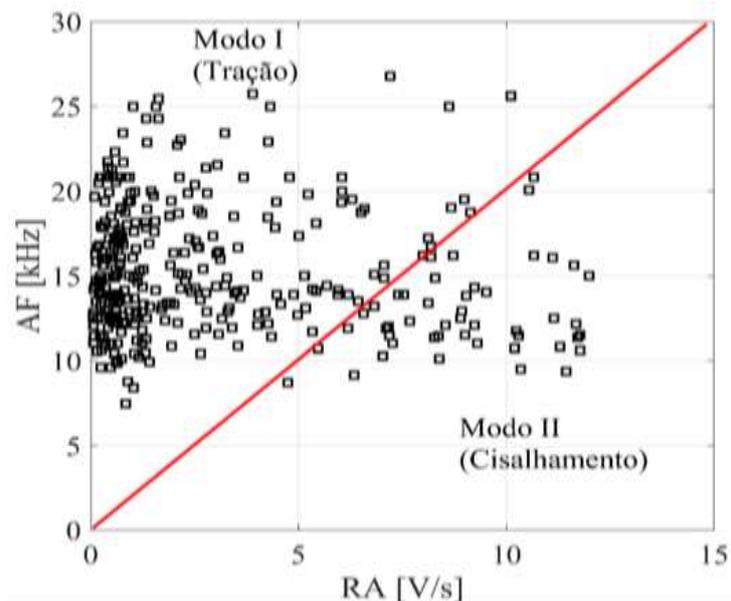


Fonte: Autor (2024).

O valor- b é calculado considerando uma janela móvel de 50 eventos, ou seja, no instante do evento 50, o valor- b é calculado levando em conta o evento 1 ao 50, e no instante do evento 51 considera o evento 2 ao 51 e assim sucessivamente. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 14b. Nota-se que o valor- b , após o tempo normalizado de 0,6 sobe até atingir o seu valor máximo de aproximadamente 1,5 muito próximo do instante de tempo em que a amostra atinge a carga crítica, indicando que o processo de micro fissuração é máximo nesta região. Após esse instante, o valor- b cai acentuadamente indicando que uma macro fissura aparece na estrutura monitorada. Os resultados estão em perfeita conformidade com o estabelecido pela literatura.

Com os parâmetros calculados dos sinais de EA, foi analisado o modo de falha predominante nas amostras (Modo I ou Modo II) a partir da correlação entre a frequência média (AF) e o ângulo de subida (RA). Essa avaliação de AF em função do RA permite identificar visualmente o modo de falha das amostras, como ilustrado na Figura 15, considerando uma escala de 2 vezes entre os eixos.

Figura 15 - Modo de falha predominante: relação RA-AF.



Fonte: Autor (2024).

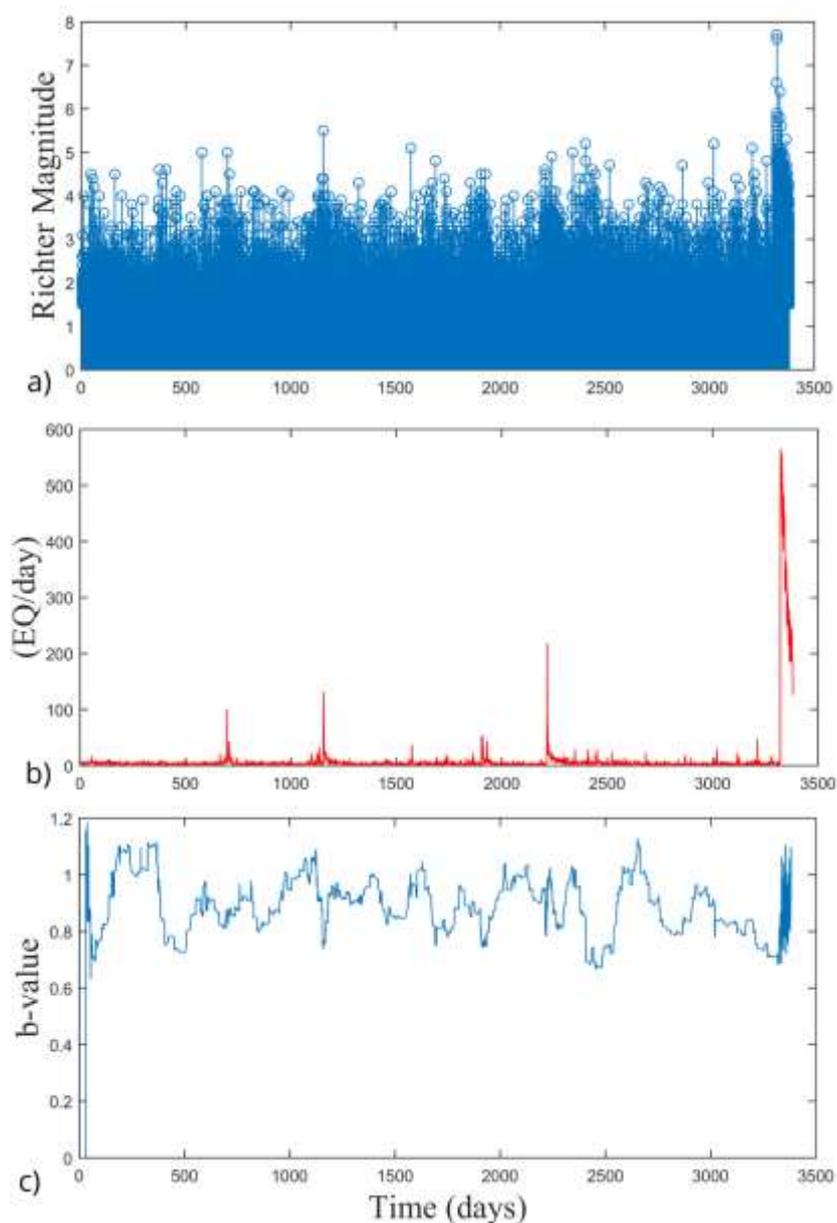
Nota-se que, embora eventos relacionados ao Modo II também tenham sido registrados, indicando a presença de componentes de cisalhamento no processo de fratura, a maior parte dos eventos está associada ao Modo I, característico de tração. Esse comportamento pode ser

explicado pelo entalhe central nas amostras impressas, que concentra tensões nessa região e a torna mais vulnerável a falhas por tração, ver Figura 12b.

4.2 Amostra de sismos 1 - Região A

A amostra de sismos 1 conteve 35369 eventos. A análise dos dados sismológicos da região A são apresentados na Figura 16: a) a magnitude na escala Richter dos terremotos por dia; b) acumulado de terremotos por dia; c) a variação do valor- b conforme os dias. Para os resultados do valor- b foi considerado uma janela móvel de 480 eventos.

Figura 16 – Análise dos sismos da região A: (a) Magnitude, (b) taxa de sismos e (c) Valor- b .



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 16a o primeiro grande terremoto ocorreu entre os dias 1200 e 1250, representando um valor na escala Richter de aproximadamente 5,5. Comparando com as Figuras 16b e 16c, percebe-se que a taxa de eventos é alta (>150 EQ/day) e o valor- b apresenta uma queda abrupta conforme esse evento se aproxima, variando de 1,1 para 0,7. Esse comportamento se repete próximo ao dia 2500, após um grande valor acumulado de eventos e terremotos de magnitude moderada, quando o valor- b atinge sua menor amplitude, de aproximadamente 0,6. Em seguida, a próxima queda acentuada ocorreu próximo ao evento de magnitude 7,8 e um acumulado de aproximadamente 600, no qual o valor- b atingiu 0,7, indicando que ele pode ser um precursor de um evento crítico.

Utilizando da mesma região e período, os autores Kwiatek *et al.* (2023) evidenciaram que as maiores amplitudes ocorridas para o valor- b , de aproximadamente 1,2 a 0,6, estão associadas a um alto estresse ou concentração de dano, como constatado para o evento principal. Além disso, foi pontuado que quando estagnado as atividades sísmicas, o valor- b poderia se apresentar entre 0,9 e sofrer uma queda abrupta, porém nem sempre seria seguido de um grande terremoto, como pode ser observado comparativamente com a Figura 16c próximo ao dia 500.

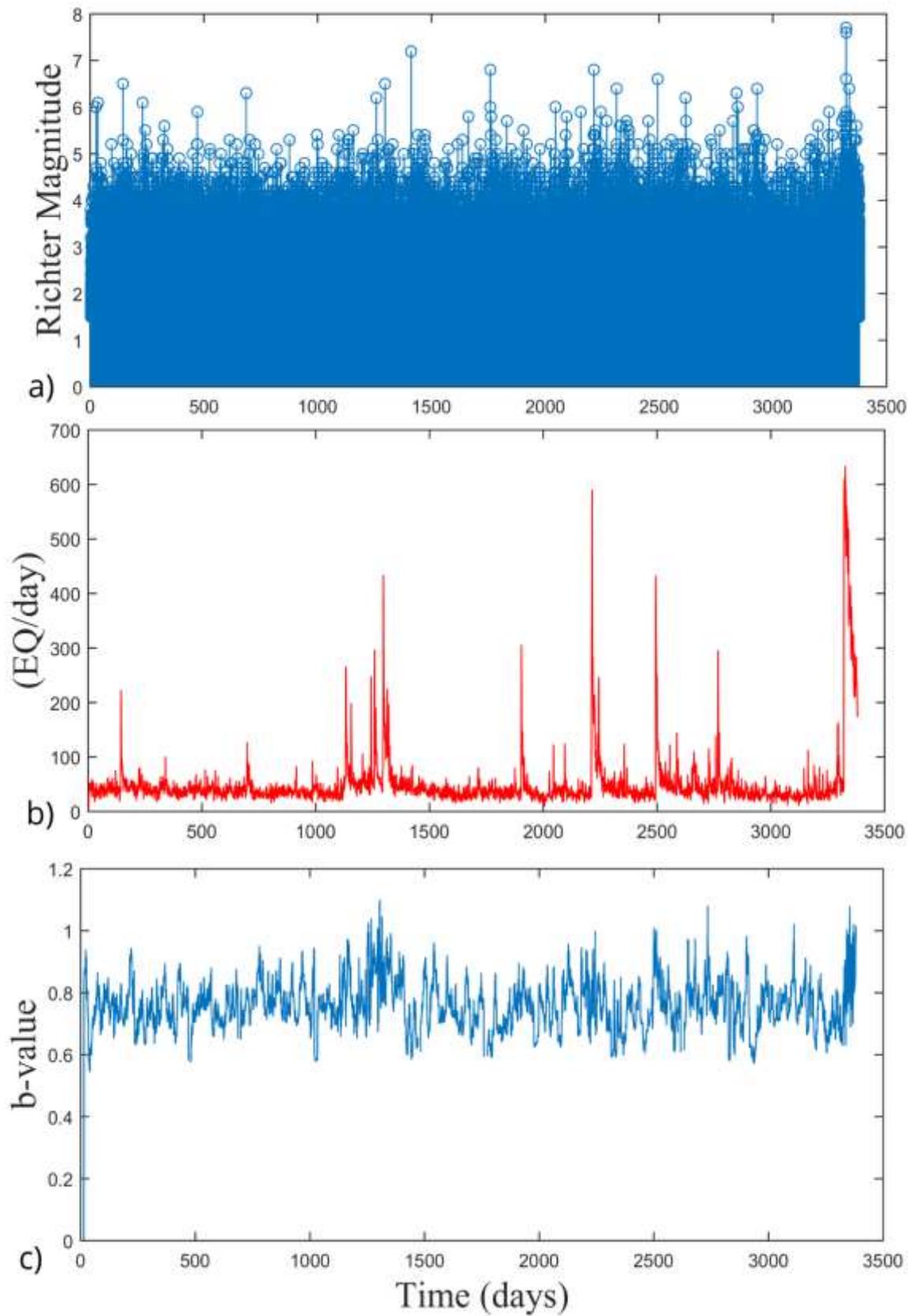
4.3 Amostra de sismos 2 - Região B

A amostra 2 conteve 169281 eventos, a Figura 17 evidencia: a) a magnitude na escala Richter dos terremotos por dia; b) acumulado de terremotos por dia; c) a variação do valor- b conforme os dias. Para os resultados do valor- b foi considerado uma janela móvel de 480 eventos.

Entre os dias 1000 e 1500 ocorreram terremotos de alta intensidade e em grande quantidade, como observado nas Figuras 17a e 17b, que provocaram no valor- b uma queda brusca variando de 1,2 a 0,6. Essa mesma situação aparenta ocorrer novamente para o período de 2000 a 2500 no qual uma grande quantidade de eventos de altas magnitudes está ocorrendo. Entre as Figuras 16c e 17c, se destaca o fato que o valor- b tem uma queda acentuada antes do evento principal, similar ao que ocorre durante a fratura na emissão acústica. Porém, é importante ressaltar que logo após o pico ocorrem muitas variações entre 0,7 a 1,1 em um curto período.

No caso desta segunda região, destaca a necessidade de realizar uma análise da variação do tamanho da janela móvel.

Figura 17 - Análise dos sismos da região B: (a) Magnitude, (b) taxa de sismos e (c) Valor-*b*.



Fonte: Autor (2024).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou de maneira comparativa o comportamento do valor- b em situações mais controladas, como em um ensaio de emissão acústica em vigas impressas em 3D, e em eventos sismológicos ocorridos na região de Kahramanmaras, na Turquia. Foi possível observar que em diversas situações o valor- b se comportou de maneira a indicar os precedentes da falha, ou, do evento principal.

A maior semelhança entre a emissão acústica e sismologia ocorre quando em um curto período o acúmulo de eventos, e de altas magnitudes para os terremotos, provocam no valor- b uma variação abrupta, que pode indicar uma região de grande estresse e dano, como observado por Kwiatek *et al.* (2023) e comparativamente com os dados sísmicos e acústicos.

Para a análise de terremotos, a janela de 480 eventos é mais adequada para a menor região, pois foi possível visualizar mais claramente as variações do valor- b . Logo, para a região B, seria mais conveniente utilizar uma janela maior, para que a amplitude de onda fosse menor e o comprimento maior.

Sendo assim, como sugestão para trabalhos futuros:

- Fazer a análise do valor- b para diferentes janelas e regiões;
- Realizar um ensaio de emissão acústica com estruturas similares com as rochas, de maneira a tentar aproximar ainda mais os eventos de EA com eventos sísmicos.

6 REFERÊNCIAS

PRESIDÊNCIA DE GESTÃO DE DESASTRES E EMERGÊNCIAS, AFAD. **Earthquake Catalog**. Turquia, [ca. 2000]. Disponível em: <https://depem.afad.gov.tr/event-catalog>. Acesso em: 24 jun. 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). E1316-24a: Standard Terminology for Nondestructive Examinations. United States, ASTM, 1989.

AGGELIS, D.G. *et al.* Effect of wave distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials. **Elsevier**, [s. l.], 2011. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.013>.

BIRCK, Gabriel. **Análise do processo de dano em material quase-frágil através da simulação de um modelo de barras**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/141091>. Acesso em: 13 jun. 2024.

BORMANN, Peter; ENGDAHL, E. Robert; KIND, Rainer. Seismic Wave Propagation and Earth models. *In*: BORMANN, Peter. **New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)**. [S. l.: s. n.], 2012. cap. 2. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch2. Acesso em: 2 jul. 2024.

BURUD, Nitin; KISHEN, J.M. Chandra. Response based damage assessment using acoustic emission energy for plain concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121241. Acesso em: 9 jun. 2024.

CARPINTERI, Alberto; LACIDOGNA, Giuseppe; PUZZI, Simone. From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0. **Chaos, Solitons and Fractals**, Torino, Itália, 2008. DOI:10.1016/j.chaos.2008.04.010. Acesso em: 12 jun. 2024.

CHRISTIANSEN, Eric H. **Dynamic Earth: An introduction to physical geology**. Estados Unidos: Jones & Bartlett Learning, 2015. ISBN 978-1-4496-5984-4.

CREALITY. **Impressora 3D Ender-3 Max Neo**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.creality.com/br/products/ender-3-neo-3d-printer>. Acesso em: 18 nov. 2024.

EL-ISA, Z.H.; EATON, David W. Spatiotemporal variations in the b-value of earthquake magnitude–frequency distributions: Classification and causes. **Tectonophysics**, [s. l.], 2014. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.001. Acesso em: 17 jun. 2024.

FILIPPIN, Carlo Giuseppe *et al.* **Emissão Acústica: Conceitos e Aplicações**. 1. ed. Curitiba - PR: Instituto Lactec, 2017. 128 p. ISBN 978-85-69527-02-2. Disponível em:

https://lactec.org.br/wp-content/uploads/2021/01/LIVRO-EMISSAO-ACUSTICA-_CONCEITOS-E-APLICACOES_R_Digital.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

GHOLIZADEH, S.; LEMANA, Z.; BAHARUDIN, B.T.H.T. A review of the application of acoustic emission technique in engineering. **Structural Engineering and Mechanics**, Malaysia, v. 54, n. 6, p. 1075-1095, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2015.54.6.1075>. Acesso em: 15 maio 2024.

GROUP, VirtualExpo. **Máquina de ensaio universal AGS-X series Shimadzu**. [S. l.], [ca. 2023]. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/shimadzu-europa/product-25210-355433.html> Acesso em: 19 jun. 2024.

GROSSE, C. U. (ed); OHTSU, M (ed). **Acoustic Emission Testing**. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

HUANG, Miinshiou *et al.* Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. **JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)**, [s. l.], v. 50, n. 11, 1998. Disponível em: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/9811/huang/huang-9811.html>. Acesso em: 14 maio 2024.

JUNG, Do Yun *et al.* Frequency Dependence of the b-Value Used for Acoustic Emission Analysis of Glass Fiber Reinforced Plastics. **Open Journal of Composite Materials**, [s. l.], p. 117-129, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojcm.2017.73007>. Acesso em: 11 jun. 2024.

KWIATEK, G. et al. Months-long seismicity transients preceding the 2023 Mw 7.8 Kahramanmaraş earthquake, Türkiye the 2023. **Nature Communications**, [s. l.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42419-8>. Acesso em: 19 jun. 2024.

LEI, Xinglin; MA, Shengli. Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process. **Earthquake Science**, China, v. 27, n. 6, p. 627-646, 2014. DOI: 10.1007/s11589-014-0103-y. Acesso em: 14 maio 2024.

LOCKNER, D. The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock Fracture. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Great Britain, v. 30, n. 7, p. 883-899, 1993. Doi:10.1016/0148-9062(93)90041-b . Acesso em: 15 maio 2024.

NEVES, M. Conceição. **Sismos na Anatólia**. [S. l.], 21 set. 2023. Disponível em: <https://storymaps.arcgis.com/stories/54ae28a6cc5943d6b04bf5e577d1ab19>. Acesso em: 18 jun. 2024.

PUGLIA, Vicente Bergamini. **Estudo da ruptura em materiais heterogêneos quase frágeis aplicando o método dos elementos discretos formado por barras juntamente com a técnica de emissão acústica**. 2014. Tese (Doutorado em engenharia) - Universidade Federal do Rio

Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/101211/000930600.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 jun. 2024.

SKINNER, Brian J.; PORTER, Stephen C.; PARK, Jeffrey. **Dynamic Earth: An introduction to Physical Geology**. 5. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2004. 584 p.