

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MAURÍCIO DA SILVEIRA RUDEM MOMBACH**

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE FRATURA DE COMPONENTES  
IMPRESSOS 3D**

**Alegrete**

**2024**

**MAURÍCIO DA SILVEIRA RUDEM MOMBACH**

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE FRATURA DE COMPONENTES  
IMPRESSOS 3D**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Friedrich

**Alegrete**

**2024**

**MAURÍCIO DA SILVEIRA RUDEM MOMBACH**

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE FRATURA DE COMPONENTES IMPRESSOS 3D**

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

Monografia defendida e aprovada em 15 de julho 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 15/07/2024, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2024, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2024, às 16:53, 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 **1487098** e o código CRC **FEC6E619**.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus pais Liana Mombach e Jânio Mombach pelo apoio emocional e por sempre acreditarem em mim.

Agradecer a minha namorada Mariana Padilha pela paciência imensa durante essa jornada e por também acreditar que eu poderia chegar até aqui.

Agradecer aos meus amigos: Conrado, Diogo, Francisco, Guilhermy e Leonardo por estarem presente durante a graduação.

E por fim, mas não menos importante ao orientador Dr. Leandro Ferreira Friedrich que teve muita paciência para corrigir os meus erros.

## RESUMO

A técnica Emissão Acústica (EA) permite a captura de ondas elásticas produzidas por defeitos internos no material como, por exemplo, trincas. Essas ondas se propagam pelo material e são capturadas por sensores distribuídos pela superfície da amostra, gerando os chamados eventos de EA. Essa metodologia é amplamente utilizada no monitoramento de danos em estruturas e serve como uma ferramenta de previsão de falhas em pequenas e grandes estruturas. No presente trabalho, a técnica de emissão acústica é aplicada em corpos de prova impressos em 3D sob flexão em três pontos com o ABS. Os corpos de prova possuem entalhes em três diferentes pontos do seu comprimento. Os sinais de EA são obtidos através de sensores do tipo *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS), que utilizam uma nova tecnologia de fabricação. O objetivo do trabalho é monitorar a evolução do dano através do valor-b, um parâmetro comumente usado para identificar estágios críticos, ou seja, o colapso em estruturas. Os resultados mostram que os sensores MEMS são promissores para serem empregados na técnica de EA, sendo possível identificar pontos críticos antes da falha das estruturas impressas em 3D por meio dos dados coletados.

Palavras-chave: Emissão Acústica, *Micro-Electro-Mechanical Systems*, Impressão 3D.

## **ABSTRACT**

The Acoustic Emission (AE) technique allows the capture of elastic waves produced by internal defects in the material, such as cracks. These waves propagate through the material and are captured by sensors distributed across the surface of the sample, generating so-called AE events. This methodology is widely used in monitoring damage to structures and serves as a tool for predicting failures in small and large structures. In the present work, the acoustic emission technique is applied to 3D printed specimens under three-point bending with ABS. The specimens have notches at three different points along their length. EA signals are obtained through Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) sensors, which use a new manufacturing technology. The objective of the work is to monitor the evolution of damage through the b-value, a parameter commonly used to identify critical stages, that is, collapse in structures. The results show that MEMS sensors are promising for use in the EA technique, making it possible to identify critical points before the failure of 3D printed structures through the data collected.

Keywords: Acoustic Emission, micro-electro-mechanical systems, 3D-printed.

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Exemplo de detecção de sinal de EA.....  | 12 |
| Figura 2 - Comparação entre ensaios não destrutivos passivos e ativos. ....   | 16 |
| Figura 3 - características de onda de emissão acústica.....   | 18 |
| Figura 4 - Ilustração dos 3 modos de propagação de trincas.....   | 20 |
| Figura 5 - Variação do valor-b em processo de dano.....   | 21 |
| Figura 6 - Sensor MEM's.....  | 22 |
| Figura 7 - (a) Imagem ilustrativa da máquina de ensaio, e (b) osciloscópio Yokogawa. ....                                 | 23 |
| Figura 8 - (a) Sensor MEMS utilizado durante os ensaios e (b) imagem ilustrativa da fonte..                               | 24 |
| Figura 9 - Montagem completa dos equipamentos para o ensaio. ....   | 24 |
| Figura 10 - Conexão acelerômetros e ponta de prova. ....  | 25 |
| Figura 11 – Colagem dos sensores MEMS nas amostras. ....  | 26 |
| Figura 12 – (a) Dimensões das amostras, e (b) amostras impressas 3D.....  | 27 |
| Figura 13 - Impressora 3D Ender V3–neo.....   | 27 |
| Figura 14 – Amostra 1 (a) detalhe do ensaio experimental e (b) padrão de fratura encontrado. ....                         | 29 |
| Figura 15 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 1 e sensor 1..... | 30 |
| Figura 16 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA. ....  | 30 |
| Figura 17 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 1 e sensor 2..... | 31 |
| Figura 18 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 1 sensor 2. ....                    | 32 |
| Figura 19 – Amostra 2 (a) detalhe do ensaio experimental e (b) padrão de fratura encontrado. ....                         | 32 |
| Figura 20 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 2 e sensor 1..... | 33 |
| Figura 21 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 2 sensor 1. ....                    | 34 |
| Figura 22 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 2 e sensor 2..... | 35 |
| Figura 23 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 2 sensor 2. ....                    | 35 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24 – Amostra 3 (a) detalhe do ensaio experimental e (b) padrão de fratura encontrado. ....                         | 36 |
| Figura 25 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 3 e sensor 1..... | 37 |
| Figura 26 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 3 sensor 1. ....                    | 38 |
| Figura 27 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 3 e sensor 2..... | 38 |
| Figura 28 – Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 3 sensor 2. ....                    | 39 |
| Figura 1A - Fonte ajustada.....   | 48 |
| Figura 2A - Indicação da conexão positivo e negativo.....   | 48 |
| Figura 3A - Conexão ponteira-acelerômetro. ....   | 49 |
| Figura 4A - Conexão ponteiras de prova com os canais. ....  | 49 |
| Figura 5A - indicação do <i>dial button</i> . ....  | 50 |
| Figura 6A - Indicação da escala em Y.....   | 50 |
| Figura 7A- indicação do ajuste do <i>ground</i> . ....  | 51 |
| Figura 8A- Troca de canais e ajuste de frequência de corte. ....  | 51 |
| Figura 9A - Botões de navegação. ....   | 52 |

## Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 12 |
| 1.1. Objetivos.....   | 13 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                                      | 14 |
| 2.1. Tecnologia de impressão 3D.....                                | 14 |
| 2.2. Técnica da emissão acústica .....                              | 16 |
| 2.3. Sinais de EA .....   | 18 |
| 2.3.1. Identificação dos sinais de EA.....                          | 18 |
| 2.3.2. Modos de propagação de trincas.....                          | 19 |
| 2.3.3. Definição do valor-b .....                                   | 20 |
| 2.4. Sensores <i>Micro-Electro- Mechanical Systems</i> (MEMs) ..... | 21 |
| 3. METODOLOGIA .....  | 23 |
| 3.1. Descrição dos equipamentos utilizados para o ensaio de EA..... | 23 |
| 3.3. Geometria das amostras e parâmetros de impressão 3D .....      | 26 |
| 3.4. Análise da evolução do dano .....                              | 28 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                    | 29 |
| 4.1. Amostra 1 – Entalhe centralizado.....                          | 29 |
| 4.1.1. Amostra 1 sensor 1 .....                                     | 29 |
| 4.1.2. Amostra 1 sensor 2 .....                                     | 31 |
| 4.2. Amostra 2 – Entalhe Excêntrico 1 .....                         | 32 |
| 4.2.1. Amostra 2 sensor 1 .....                                     | 33 |
| 4.2.2. Amostra 2 sensor 2 .....                                     | 34 |
| 4.3. Amostra 3 – Entalhe Excêntrico 2.....                          | 36 |
| 4.3.1. Amostra 3 sensor 1 .....                                     | 36 |
| 4.3.2. Amostra 3 sensor 2 .....                                     | 38 |
| 5. CONCLUSÕES.....  | 40 |
| 6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....                              | 41 |
| 7. REFERÊNCIAS.....   | 42 |

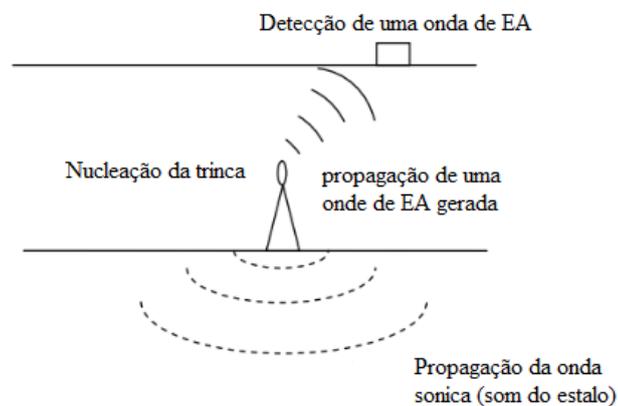
|  |    |
|--|----|
| APÊNDICE A – Manual montagem osciloscópio e acelerômetro ..... | 48 |
| 1. Ajuste da fonte de energia .....                            | 48 |
| 2. Conexão para alimentação do aparelho.....                   | 48 |
| 3. Conexão ponteira-acelerômetro .....                         | 49 |
| 4. Configurando o osciloscópio.....                            | 49 |
| 5. Utilizando os canais .....                                  | 51 |
| 6. Salvar os dados.....  | 52 |
| APÊNDICE B – Código para o cálculo do valor b .....            | 53 |

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica da Emissão Acústica (EA) é considerada a técnica de ensaios não destrutivos mais antiga referenciada com os primeiros estudos feitos em 1950 por J.Kaiser. No entanto, só em 1960 que sons emitidos de uma propagação de trinca passaram a serem atribuídos à uma investigação científica. Tal técnica é importante para a manutenção industrial, pois a peça ou material em análise pode ser monitorado em tempo real, assim fazendo uma avaliação geral da superfície e interior do equipamento, não precisando parar o processo produtivo para inspeções. (COTTICA; FRIEDRICH, 2020)

Segundo Eisenblätter et al. (2008) ondas elásticas se propagam dentro de um material e são detectadas por um sensor localizado na superfície da estrutura, como mostrado na Figura 1. As ondas elásticas são produzidas por diversos mecanismos de ruptura, resultado de eventos de propagação de trincas dentro do material.

Figura 1 - Exemplo de detecção de sinal de EA.



Fonte: Adaptado de Eisenblätter et al. (2008)

Ao mesmo tempo que a técnica de EA evoluiu seu campo de aplicação, novos materiais e processos de fabricação foram sendo aprimorados. Mais recentemente, destaca-se a impressão de peças/estruturas 3D através da Modelagem por Fusão e Depósito (MFD). Segundo Pinheiro et al. (2018) técnicas de fabricação de objetos 3D já vêm sendo elaboradas desde o século passado. As primeiras impressoras foram pensadas e desenvolvida para a manufatura rápida, com passar do tempo o estudo foi sendo aprimorado e houve o surgimento de empresas oferecendo o serviço de prototipagem rápida ou de manufatura em pequena escala. Nos anos 2000 já tinham impressoras com preços mais razoáveis, permitindo então suas primeiras

aplicações a nível pessoal. O funcionamento de impressoras 3D é similar ao das impressoras comuns com a diferença do material utilizado e ao motor que conta com um grau de liberdade a mais para o controle da altura da amostra.

De acordo com Pinheiro et al. (2018) e Marşavina et al. (2022) a tecnologia MFD é uma das mais usadas na manufatura aditiva, pois se baseia na extrusão, e ainda é uma forma econômica de impressão e de fácil obtenção de peças. O funcionamento se dá “imprimindo” um termoplástico e depositando-o por camadas.

Segundo P. Isaac et al. (2020) o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) é um dos materiais mais utilizados por ser um termoplástico barato usado para fabricação aditiva de peças para engenharia em impressoras 3D e abrangência no mercado. Utilizado em várias áreas como a biomedicina através de implantes, próteses e etc., na moda como sapatos e relógios e indústrias de aeronaves e automotiva como injetores de combustível e algumas partes na asa de aviões.

No presente trabalho será aplicada a técnica da emissão acústica em vigas entalhadas impressas 3D com ABS. Três diferentes índices de excentricidade são usados e a evolução do dano para cada caso é avaliado a partir da separação dos eventos de EA do sinal capturado. Para a coleta dos dados um sensor do tipo MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) é empregado, sendo o sistema de aquisição desenvolvido e avaliado neste trabalho.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é analisar o processo de dano em vigas entalhadas impressas em 3D utilizando a técnica da emissão acústica por meio de sensores do tipo MEMS.

Os objetivos específicos são:

- a. Desenvolver uma metodologia para a captura de eventos de EA utilizando sensores do tipo *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS);
- b. Avaliar o processo de evolução da fratura utilizando o valor-b;
- c. Avaliar a influência da posição de entalhes na evolução do dano;

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Tecnologia de impressão 3D

Manufatura aditiva é um processo de fabricação onde os componentes são produzidos camada por camada em uma plataforma, com a ajuda de softwares CAD o que permite a produção de geometria mais complexas. Tecnologia Manufatura aditiva é classificada em diferentes tipos de fabricação como sinterização seletiva a laser (SLS), estereolitografia (SLA), modelagem por fusão e deposição (MFD), impressão 3D em leito e cabeçote de jato de tinta (PIP) e fabricação por deposição líquida congelada (LFDM).

A tecnologia MFD é uma das mais usadas na manufatura aditiva, pois se baseia na extrusão, e ainda é uma forma econômica de impressão e de fácil obtenção de peças. No processo de impressão 3D a máquina contém um carretel de fio de plástico alimentando uma cabeça de impressão que posteriormente extrusa um fino filamento de plástico derretido, formando camada por camada de acordo com o *software CAD* da máquina. (Marçavina et al., 2022)

Segundo Besko et al. (2017) os materiais mais utilizados na impressão 3D são: os filamentos acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ácido polilático (PLA), polietileno tereftalato (PETG), Nylon, os flexíveis elastômeros termoplástico (TPC, TPN e TPE) e por fim o policarbonato (PC).

De acordo com Rosa Magalhães (2019) o ABS tem temperatura de fusão e peso específico baixos, uma boa rigidez e resistência, também por se tratar de um termoplástico 100% reciclável, podendo retornar ao processo como matéria prima direta gerando uma boa viabilidade econômica e ambiental. O ABS é formado por 3 monômeros com proporções diferentes, o butadieno proporcionando flexibilidade e resistência ao impacto, caracterizando sua fase de borracha, o estireno adiciona fluidez, brilho e dureza e a acrilonitrila que é responsável pela resistência térmica, química e rigidez.

Segundo Diniz Campos (2022) existem os tipos de preenchimento e níveis de preenchimento. Os tipos de preenchimento são:

Linhas: a geometria é impressa através de linhas em uma direção tanto no eixo X ou Y a cada duas camadas, este tipo é muito utilizado por quem busca uma resistência em duas dimensões e impressão rápida, também não utiliza muito material e a peça fica bem leve;

Grade: considerado parecido com o padrão de linhas, contendo linhas bidimensionais a cada camada e com o dobro de espaço entre as linhas, tempo e quantidade de material médio de consumo;

Cúbico: padrão produz cubos empilhados e inclinados em 45 graus em torno dos eixos X e Y com isso parecendo triângulos, este padrão fornece resistência em 3 dimensões, porém gasta mais material e tempo na impressão que os outros citados acima;

Giroide: Tem curvaturas irregulares côncavas que se cruzam, bom equilíbrio entre resistência, material e tempo de impressão;

Favo de mel: padrão como o próprio nome diz favo de mel, bom para impressões semirrápidas, tem uma boa resistência e não consome muito material;

Triângulos: são linhas retangulares sobrepostas, essas linhas indo em direções no plano XY, boa resistência em duas dimensões apenas;

Tri-hexágono: Cria hexágonos com triângulos entre eles em 3 direções do plano XY, fornece resistência em duas direções;

Octeto: Semelhante ao cúbico aumentando em quadrados ao invés de triângulos inclinados, padrão de preenchimento tridimensional muito útil para peças que exigem bastante resistência;

Concêntrico: estrutura interna feita por linhas concêntricas que correspondem ao contorno da peça, padrão de rápida impressão, bom para peças flexíveis e um consumo muito menor de material comparado aos outros citados;

Em relação aos níveis de preenchimento varia de 0 a 100%, com o 0% indicando o componente vazio (oco) e 100% indicando preenchimento total do componente. O preenchimento tem como objetivo reforçar a estrutura, influenciar na resistência e peso do objeto.

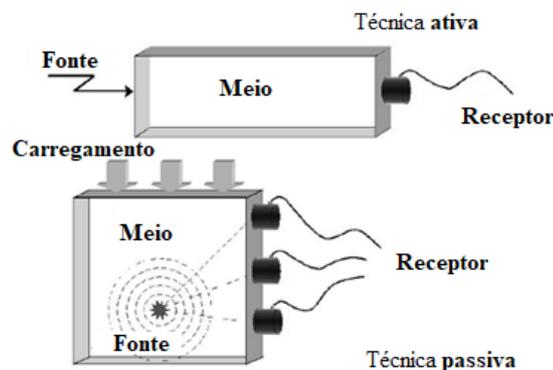
Conforme Pinheiro et al. (2018) existem tipos de impressoras 3D e cada uma diferencia o modo de sua impressão. Começando com as que funcionam por MFD que extrudam o material por um orifício e depositando em camadas; máquinas SLA consideradas mais sofisticadas que as anteriores e acabam utilizando laser para endurecer a resina líquida; por último tem-se as SLS que também utilizam laser, porém os materiais utilizados por ela podem ser plásticos, metais ou cerâmica em pó. O software de impressão é responsável pela análise do arquivo CAD e determina como ele será impresso, ou seja, tipo de preenchimento e % de preenchimento, entre outras configurações.

## 2.2. Técnica da emissão acústica

De acordo com Martins (2013) a técnica começou a ser estudada a partir dos anos 60, utilizada principalmente como ferramenta de monitoramento de estruturas mecânicas em ensaios não destrutivos. A técnica da emissão acústica é descrita como um ensaio passivo não destrutivo, como já existe um dano na estrutura seja por fabricação ou por agente externo. Segundo Tsubouchi e Friedrich (2021) não existe a necessidade de uma fonte emissora externa, o que comprova que é um ensaio não destrutivo, portanto a técnica consegue detectar uma falha ou trinca logo no seu estágio inicial antes de haver a falha completa da estrutura.

A diferença entre ensaios não destrutivos passivos e ativos segundo Eisenblätter et al. (2008) usando como exemplo o ultrassom considerado uma técnica ativa, que utiliza uma fonte geradora de emissão externa de ondas artificiais para fazer a detecção do dano na amostra tanto antes ou depois do carregamento por outro lado a técnica da emissão acústica detecta ondas emitidas pelas próprias trincas durante o carregamento. A Figura 2 ilustra a diferença entre ensaios não destrutivos passivos e ativos.

Figura 2 - Comparação entre ensaios não destrutivos passivos e ativos.



Fonte: Eisenblätter et al. (2008).

A técnica de EA tem como base a detecção de ondas elásticas, originadas pela energia liberada no momento em que há o surgimento ou propagação de uma trinca ou defeito, seja interno ou superficial. Sensores são fixados na superfície da amostra distribuídos estrategicamente para captação das ondas e assim podendo determinar a distribuição no espaço e tempo dos eventos. A partir da obtenção destes dados podem ser calculados os demais parâmetros que apresentam as mudanças que aconteceram dentro da amostra analisada (Aggelis et al., 2012).

Os sinais de emissões acústicas podem ter características diferentes devido ao tipo de fonte. Sinais contínuos são comumente característicos de cortes de metais ou atrito em rolamentos, já sinais ditos como estouros são obtidos pela liberação espontânea de energia durante a formação da trinca. Normalmente as emissões contínuas são utilizadas no monitoramento de máquinas em funcionamento, mesmo que seja difícil de localizar a fonte de emissão (Birck, 2016).

Para Jacques (2009) a alta emissividade está associada à materiais frágeis e heterogêneos pois tem picos bem definidos e com alta amplitude e para materiais dúcteis temos uma baixa emissividade, picos dispersos e baixa amplitude.

A técnica da emissão acústica é um método ainda em crescimento, mas sua eficácia já foi comprovada com o monitoramento da integridade de estruturas. Entre as principais vantagens da EA segundo Birck (2016) estão:

- Durante o ensaio de EA o equipamento não tem a necessidade de parada sendo assim podendo ser executado no ambiente de trabalho;
- Fornece uma análise global do da estrutura, pois é utilizada uma vasta área do equipamento para análise;
- Os sensores são fixados na face da estrutura, não precisando movê-los para escanear ponto a ponto;
- podendo ser utilizada durante a operação do equipamento como monitoramento da estrutura, prevenindo uma falha catastrófica;
- E ainda sendo capaz de detectar novas fissuras e a progressão de fendas já existentes.

Já as desvantagens são:

- Mesmo com forma, tamanho, propriedades e carregamento iguais, é quase impossível reproduzir o sinal de EA. Devido a heterogeneidade dos materiais, tendo como resultado sinais similares;
- Materiais utilizados em construção civil (concreto, metal, madeira, pedra e compósitos) geralmente são de baixa amplitude e baixa frequência, normalmente na faixa de kHz a MHz, precisando de sensores com alta sensibilidade, mas com isso estão sujeitos ao ruído ambiente. Para contornar isso é necessário a aplicação de métodos de amplificação e filtragem de ruído.

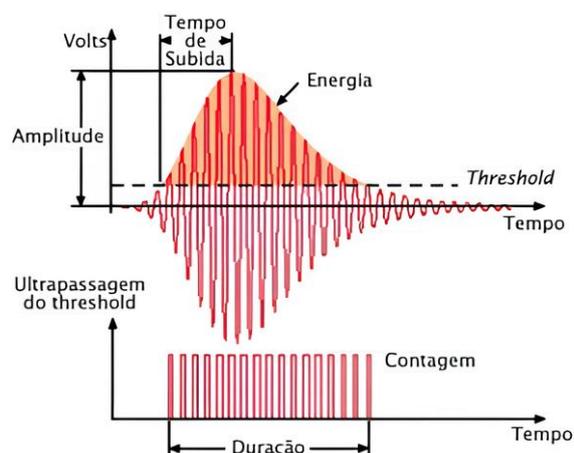
## 2.3. Sinais de EA

Segundo Cottica e Friedrich (2020) os parâmetros como amplitude, tempo de subida, frequência média, intensidade do sinal e energia podem ser analisados para determinar e caracterizar o nível de dano. Parâmetros esses que são fundamentais para o diagnóstico correto da estrutura e seus esforços. Vários fatores podem influenciar o formato de onda da EA, como características do sensor e sistema de medição, caminho entre fonte e o sensor e etc. Os sinais captados originados de trincas, têm amplitudes maiores que as de ruídos de fundo, também possuem curta duração e são separados no tempo, ao contrário que as amplitudes máximas crescem e decrescem de forma aproximadamente exponencial, para que seja feita uma diferenciação dos ruídos de fundo é necessário estabelecer um limiar para aquisição dos parâmetros.

### 2.3.1. Identificação dos sinais de EA

Os sinais de EA surgem de forma rápida e aleatória, diferentemente de ondas vistas em testes ultrassônicos ou vibratórios. O primeiro passo para análise da atividade de EA é definir um limite de voltagem ou limite de referência da onda em inglês chamado de *threshold* e este limite deve ser equivalente ao nível de amplitude do comparador eletrônico, portanto os sinais que excedem esse limite de tensão são identificados como sinais EA, para saber o fim do sinal EA é determinado o período em que o sinal não excede o limite de tensão (Eisenblätter et al., 2008). A Figura 3 ilustra as características de onda de emissão acústica.

Figura 3 - características de onda de emissão acústica.



Fonte: adaptado de Tsubouchi e Friedrich (2021).

Os principais parâmetros segundo Tsubouchi e Friedrich (2021) e Eisenblätter et al., (2008) são:

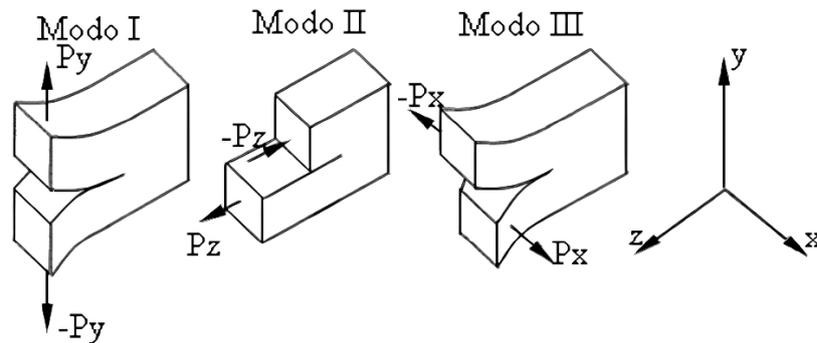
- Amplitude é o que define um evento, usualmente com a medição em volts e é o maior pico gerado pelo sensor devido a fonte do evento;
- Tempo de subida é o tempo entre o primeiro sinal a ultrapassar a *Threshold* até o pico, amplitude máxima detectada no evento;
- Contagem número de vezes que um sinal ultrapassa a *Threshold* durante um evento;
- Duração do sinal é o tempo em que o sinal está acima da linha de referência, essa duração especifica um evento de EA;
- Linha limite (*Threshold*) em termos mais simples é uma linha de referência, uma linha de amplitude para filtrar o ruído ambiente dos eventos acústicos, e apenas os sinais que ultrapassam essa linha serão coletados e parametrizados;
- Energia ou *Measured Area of Rectified Signal Envelope* (MARSE) dita como amplitude relativa do sinal ou vista como a área abaixo dos sinais do evento. Ela não depende da *Threshold* e nem das frequências de operação, com ela é possível determinar a energia da emissão.

### 2.3.2. Modos de propagação de trincas

A propagação de uma trinca pode acontecer de três modos diferentes, através de movimentos relativos que podem ser de tração, cisalhamento ou torção, são chamados de modo I, II, III. Cada um dos modos representa um tipo básico de campo de tensão na vizinhança da ponta da trinca. A Figura 4 ilustra os 3 modos, onde o modo I é tração, modo II é cisalhamento no plano, modo III é o cisalhamento fora do plano (BIRCK, 2016).

O modo I de abertura de trinca é caracterizado pelo deslocamento das superfícies da trinca perpendicular a si mesmas devido ao carregamento em tração. O modo II modo de deslizamento, provocado pelo deslocamento das superfícies da trinca paralelas a si mesma e perpendicularmente à frente da propagação, ocorre devido ao cisalhamento. Modo III dito como modo de rasgamento, ocorre devido ao cisalhamento fora do plano, com isso acontece um deslocamento das superfícies da trinca paralelas a si mesmas (Birck, 2016).

Figura 4 - Ilustração dos 3 modos de propagação de trincas.



Fonte: Puglia et al. (2014).

### 2.3.3. Definição do valor-b

A amplitude do pico de EA está relacionado a magnitude da fratura, então o valor-b é definido como uma inclinação da distribuição de amplitudes, também visto como um índice relacionado aos estados da fratura. Um valor-b maior mostra fraturas microscópicas mais predominantes do que macroscópicas, por outro lado quanto menor o valor-b indica maior predominância de macro fraturas (Eisenblätter et al., 2008).

Segundo Cottica e Friedrich (2020) a magnitude ( $m$ ) é dada como o logaritmo da amplitude do evento, utilizado para caracterizar um sinal elétrico gerado pelo evento, ou seja, a magnitude está relacionada com a amplitude ( $A$ ), como mostrada na equação abaixo,

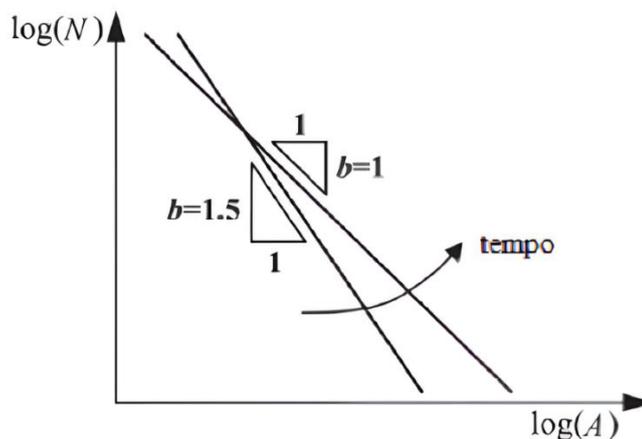
$$m = \log(A) \quad (1)$$

A próxima equação se refere a expressão de Gutenberg-Richter (GR) podendo relacionar o número de ventos com a magnitude dos mesmos.

$$\log N(\geq m) = a - bm \quad (2)$$

Tem-se que  $N$  representa a quantidade de eventos, com magnitude maior ou igual a  $m$ . O valor-b possui inclinação negativa no gráfico no  $\log N$ -  $\log m$ . O valor-b é o coeficiente angular da tendência linear do gráfico em escala logarítmica do número de eventos acústicos acumulado e sua amplitude. A Figura 5 mostra variação do valor-b em um processo de dano.

Figura 5 - Variação do valor- $b$  em processo de dano.



Fonte: adaptado de Cottica e Friedrich (2020).

#### 2.4. Sensores *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS)

Quando tensão ou dano são aplicados a um material, ondas elásticas transitórias conhecidas como emissões acústicas (EAs) são geradas. Elas podem ser captadas e identificadas a sua localização, para isso, sensores têm sido usados como monitores e ferramenta de avaliação não destrutiva em uma variedade de estruturas (LI et al., 2021).

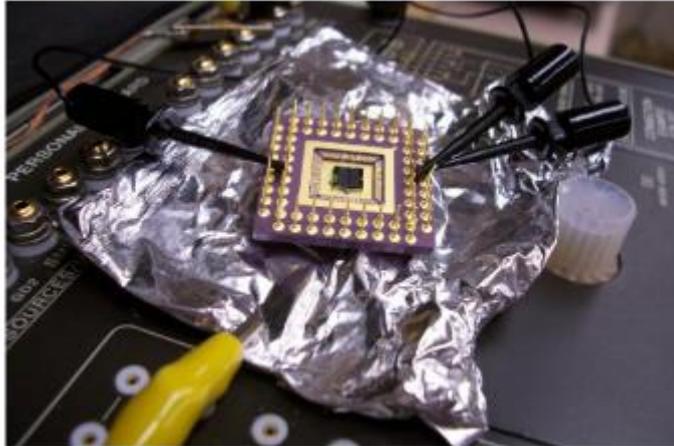
*Micro-electro-mechanical systems* (MEMS) são baseados no projeto e fabricação de sensores e atuadores usando técnicas de micro usinagem que é processo de usagem para microcomponentes caracterizado pela remoção de cavaco com espessura inferior a 999  $\mu\text{m}$ . A aplicação do MEMS no conceito de EA foi introduzido por Schoess and Zook em 1998. Posteriormente em 2002 e em 2006 Greve et al. (2007) utilizou dos mesmos parâmetros para estudo e fabricação de acelerômetros. (Greve et al., 2007)

O princípio básico dos *MEMS* EA e dos sensores de vibração são semelhantes. Enquanto os sensores *MEMS* EA operam na frequência ressonante da estrutura usualmente acima dos 20kHz, os acelerômetros MEMS operam abaixo da ressonância de micro estrutura (0-1000 Hz) para ter uma relação entre a aceleração de entrada e o sinal de saída (KABIR et al., 2018).

A Figura 6 mostra o acelerômetro montado por Greve et al. (2007) em seu teste de funcionamento onde a fabricação MEMS apresenta a subdivisão cada matriz quadrada de 10 mm em 4 *subchips*. Cada dispositivo contém 4 sensores com frequências entre 100kHz a 500kHz. Greve et al. (2007) ainda descreve o teste do acelerômetro montado em 2006, o sensor *MEMS* foi montado em uma bancada de pinos em grade quadrada de 25mm onde geometria da bancada apresenta um fundo plano, adequado para um acoplamento acústico e geometria do

pino possibilita a conexão elétrica a uma placa que posteriormente é conectada a um computador. A placa contém 4 amplificadores independentes com ganho nominal de tensão de 100 kHz.

Figura 6 - Sensor *MEM's*.



Fonte: Greve et al. (2007).

### 3. METODOLOGIA

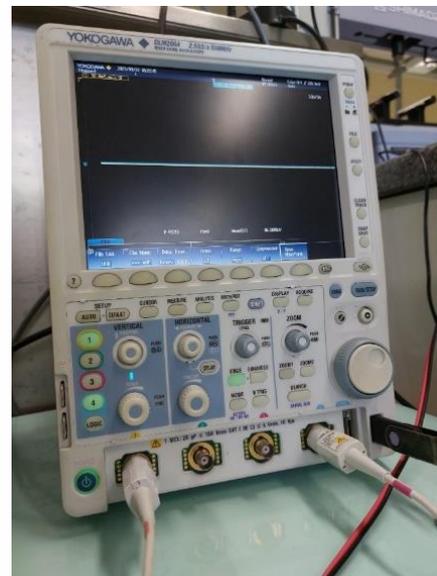
#### 3.1. Descrição dos equipamentos utilizados para o ensaio de EA

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 7a. O Osciloscópio é da marca *Yokogawa DLM2054*, tem largura de banda 200 a 500 MHz e memória de até 250 Mpoints, Figura 9b.

Figura 7 - (a) Imagem ilustrativa da máquina de ensaio, e (b) osciloscópio Yokogawa.



(a)

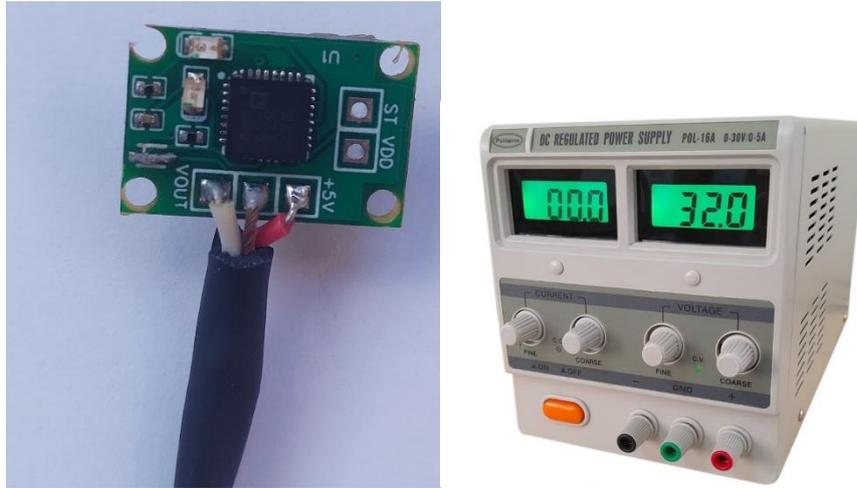


(b)

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

Os acelerômetros utilizados são da marca *Octoparts* e distribuídos pela empresa *mouser electronics*, tem uma capacidade de até 50 kHz e a taxa de aquisição utilizada foi de 100 kHz, podendo também suportar temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $125^{\circ}\text{C}$  segundo fabricante, fornecendo medição de vibração de alta resolução para aplicação de monitoramento. Como mostra a Figura 8(a). Além disso, foi utilizada uma fonte da marca *Politem* modelo HY3003D Ver Figura 8(b).

Figura 8 - (a) Sensor MEMS utilizado durante os ensaios e (b) imagem ilustrativa da fonte.



(a) (b)

Fonte: Autor (2024).

### 3.2. Montagem do sistema de EA

Os ensaios experimentais foram realizados 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.

A montagem do osciloscópio é feita conectando o mesmo em uma tomada 220V e posteriormente é realizada a montagem dos acelerômetros onde são conectadas pontas de provas no osciloscópio e nos acelerômetros, então os mesmos são conectados a uma fonte de energia onde não pode passar de 5 volts.

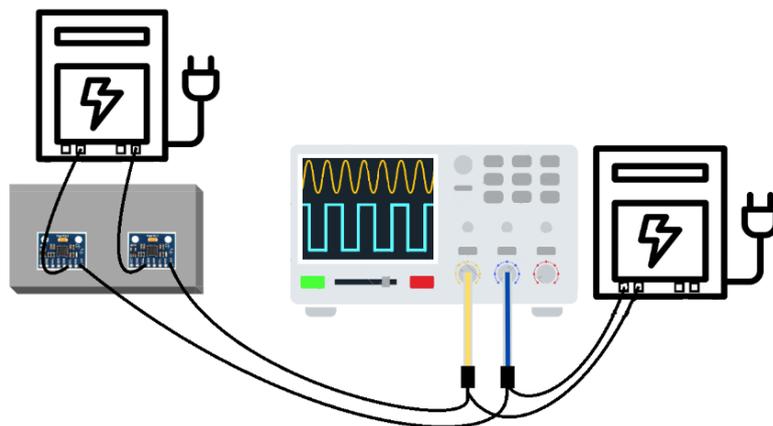
Figura 9 - Montagem completa dos equipamentos para o ensaio.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 10 detalha a montagem dos acelerômetros e sua conexão com o osciloscópio e a conexão das ponteiras e acelerômetros na fonte de energia. A fonte alimenta os acelerômetros com uma tensão de até 5 volts. As pontas de prova do osciloscópio são conectadas aos cabos dos acelerômetros fazendo o registro das acelerações capturadas durante o ensaio.

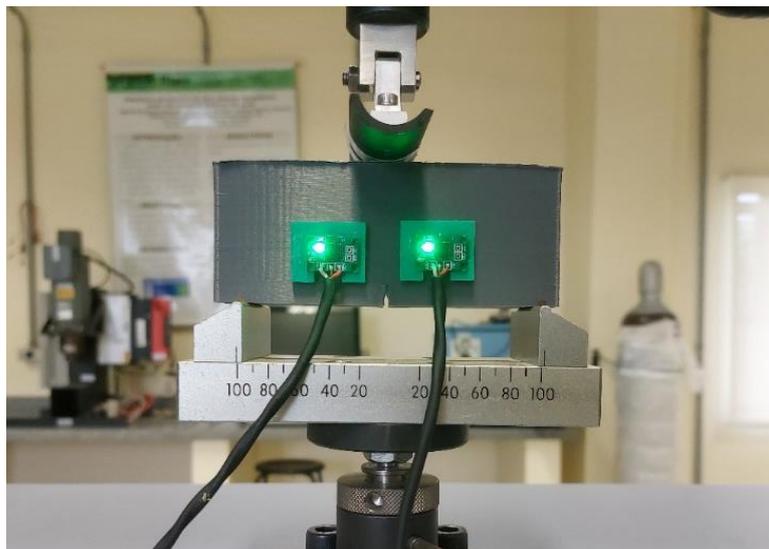
Figura 10 - Conexão acelerômetros e ponta de prova.



Fonte: Autor (2024).

Os acelerômetros são colados nas vigas impressas como mostrado na Figura 11. Devido ao formato do acelerômetro, uma pequena placa (em verde) foi impressa para permitir a uma maior adesão a viga. A cola usada foi *superbonder*.

Figura 11 – Colagem dos sensores MEMS nas amostras.



Fonte: Autor (2024).

Importante mencionar que um manual prático para realização do ensaio com os acelerômetros foi escrito com resultado desde trabalho a fim de ajudar futuras pesquisas com os mesmos. O manual encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

### 3.3. Geometria das amostras e parâmetros de impressão 3D

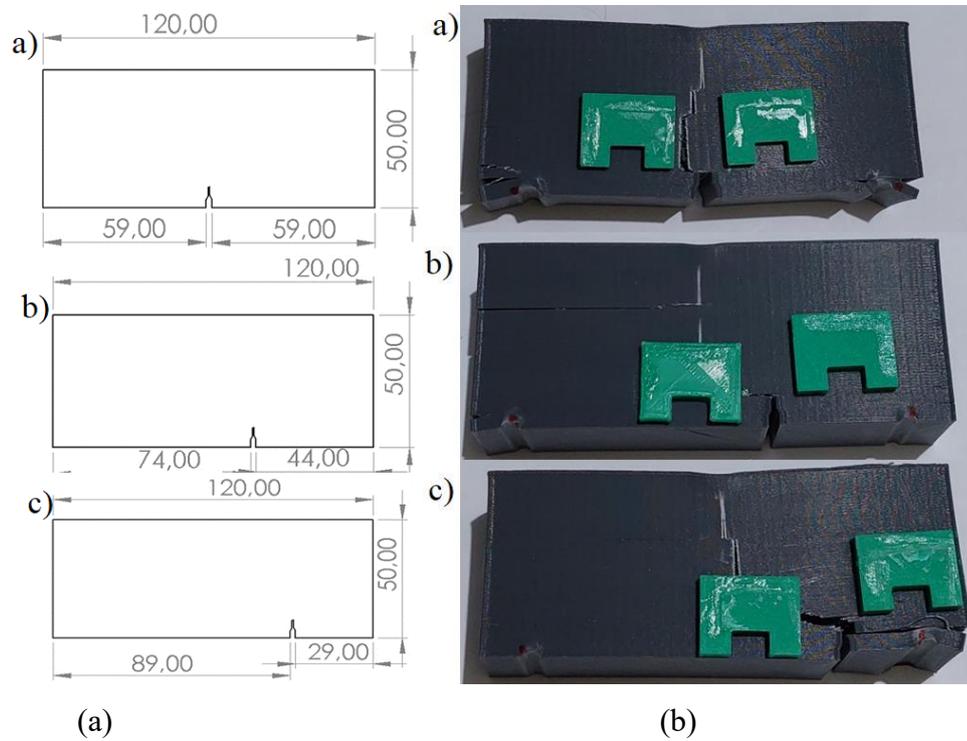
Para avaliar a evolução do dano utilizando os sensores MEMS, foram utilizadas 3 vigas entalhadas sob flexão em 3 pontos até a falha. A Figuras 12(a) mostra as dimensões das amostras (em mm) e a Figura 12(b) mostra as amostras impressas 3D. As vigas tem mesmas dimensões, sendo o único diferencial a excentricidade do entalhe.

As amostras foram impressas com a ajuda da colega Carla Moraes que utilizou a impressora Ender V3–neo, Figura 13. 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.

Os seguintes parâmetros de impressão foram usados:

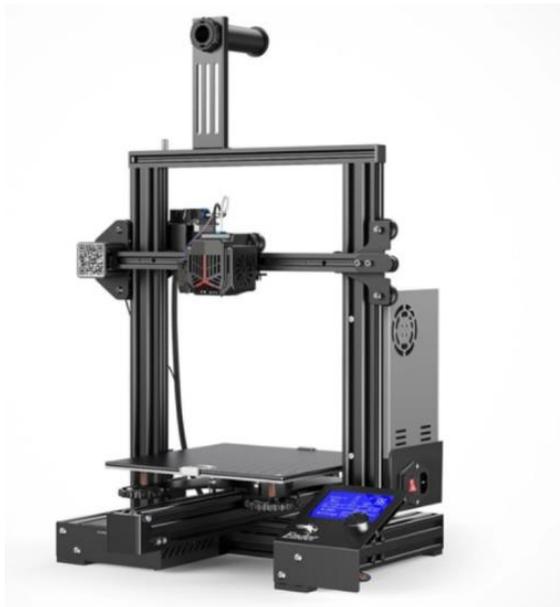
- Velocidade de impressão: 45mm/s;
- Camadas externas: 3 (1,2mm de espessura);
- Temperatura de impressão: 240°C;
- Temperatura da mesa: 105°C;
- Tipo de aderência: aba (12 linhas);
- Altura da camada: 0,2mm;

Figura 12 – (a) Dimensões das amostras, e (b) amostras impressas 3D.



Fonte: Autor (2024).

Figura 13 - Impressora 3D Ender V3-neo.



Fonte: Site creality(2023).

### 3.4. Análise da evolução do dano

O osciloscópio faz a leitura dos sinais, um ponto a se destacar é que a leitura é limitada a apenas o que é visto no *display*, posteriormente é feito 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 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 os eventos separados, a evolução do valor-b (ver seção 2.3.3) é realizada, de forma a quantificar o dano durante o ensaio. Vale ressaltar no apêndice B encontra-se o código para a definição do valor b.

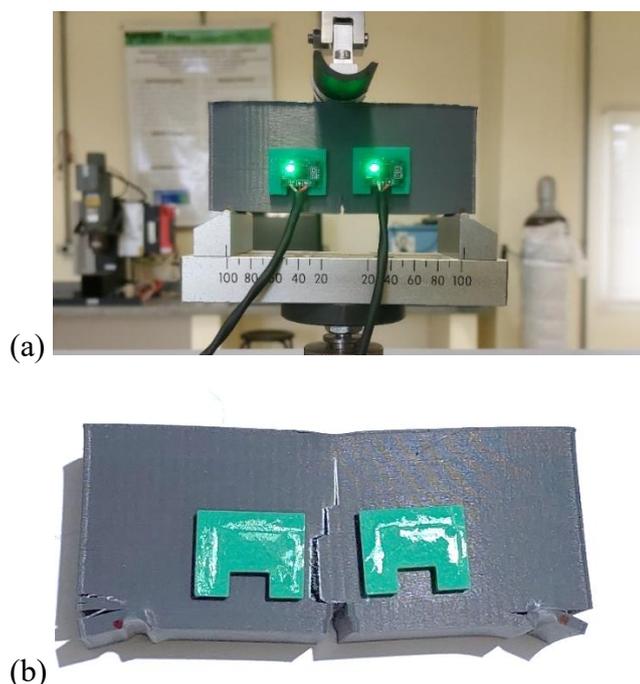
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os resultados do valor  $b$  e amplitude os parâmetros como tempo normalizado e força máxima foram considerados para o cálculo final e para o valor foi considerada uma janela de 50 eventos.

### 4.1. Amostra 1 – Entalhe centralizado

A Figura 14(a) ilustra a amostra 1 durante o ensaio de EA. Os sensores foram posicionados a mesma distância do entalhe, sendo o sensor 1 do lado esquerdo e o 2 do lado direito. A Figura 14(b) mostra o padrão de fratura encontrado após o ensaio. Pode-se observar que a trinca se propagou verticalmente em direção ao ponto de aplicação da carga, na iminência a fazer a separação de duas partes semelhantes da viga. Visualiza-se que o modo de propagação predominante da trinca é modo I (tração).

Figura 14 – Amostra 1 (a) detalhe do ensaio experimental e (b) padrão de fratura encontrado.



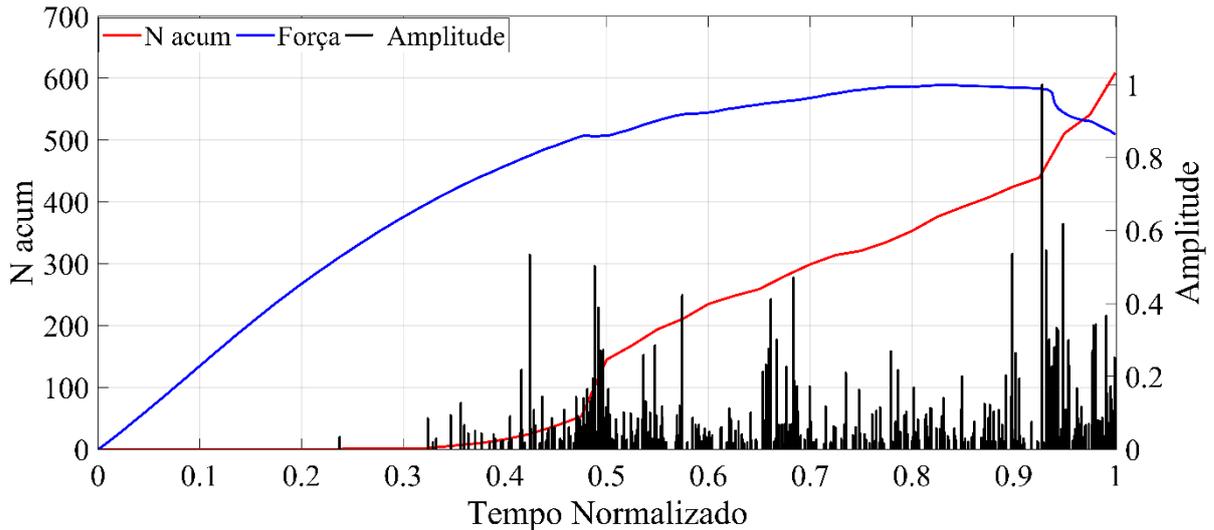
Fonte: Autor (2024).

#### 4.1.1. Amostra 1 sensor 1

A Figura 15 mostra a atividade de EA registrada para o sensor 1 da amostra 1, sendo apresentado o número acumulado de eventos, a amplitude dos eventos e o carregamento em relação tempo normalizado (tempo fim do ensaio). Pode-se observar que no início do ensaio

têm vários eventos com amplitudes pequenas. Conforme a amostra se aproxima da falha do material, ou seja, o pico de carga, observa-se que têm eventos com amplitudes maiores, posteriormente após a falha ainda é registrado uma grande atividade de EA.

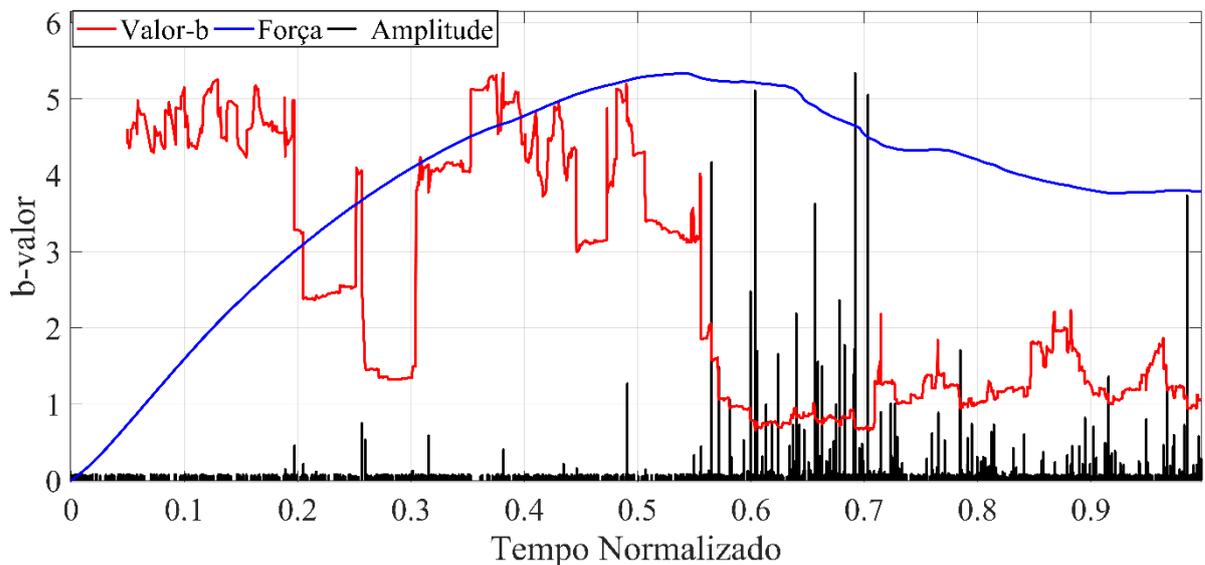
Figura 15 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 1 e sensor 1.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 16 mostra a variação do valor-b conforme o carregamento aumenta e a amplitude dos eventos de EA. O valor-b é calculado considerando uma janela de 1400 eventos.

Figura 16 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA.



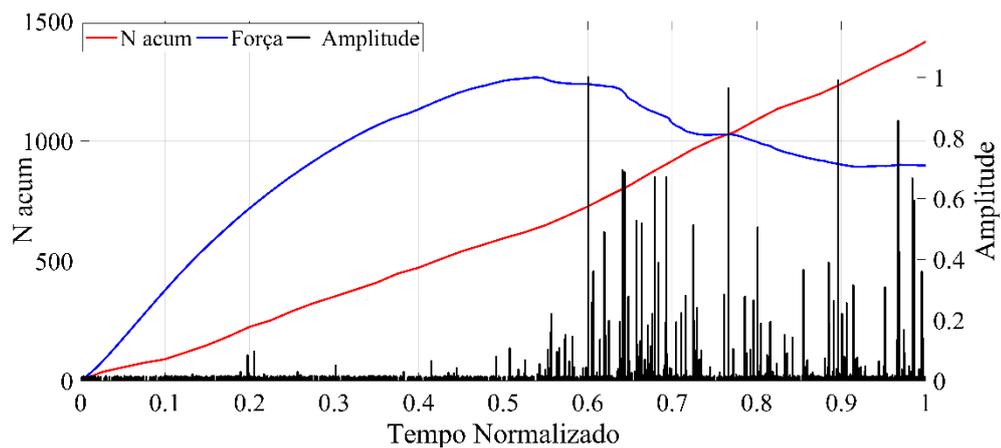
Fonte: Autor (2024).

Pode-se notar que o valor-b começa alto e na presença de eventos de amplitudes maiores tem uma queda. Nesse sentido, no momento do pico de carga, é possível notar que o valor-b tem uma queda acentuada para 1, indicando neste caso que há uma formação de macro trinca na amostra. O valor-b mantém-se nesse patamar durante um bom tempo do regime pós-pico.

#### 4.1.2. Amostra 1 sensor 2

A Figura 17 mostra a atividade de EA para o sensor 2 para a amostra 1. Em comparação ao sensor 1, uma atividade de EA semelhante é registrada, no entanto, com um pouco mais de eventos totais.

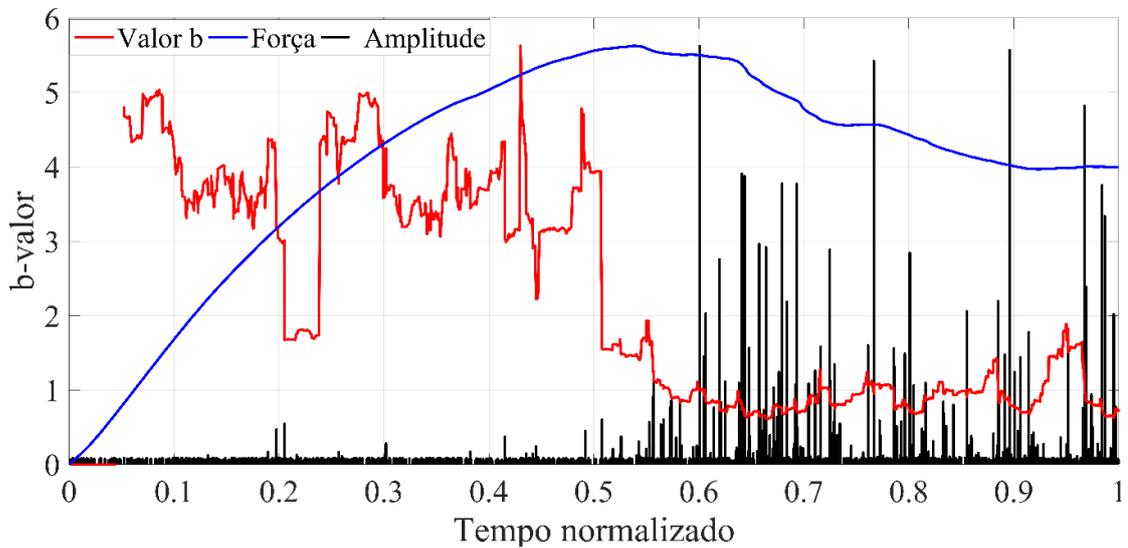
Figura 17 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 1 e sensor 2



Fonte: Autor (2024).

A Figura 18 mostra o resultado do valor-b para o conjunto de dados do sensor 2., a amplitude e o carregamento captados pelo sensor 2 na amostra 1.

Figura 18 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 1 sensor 2.



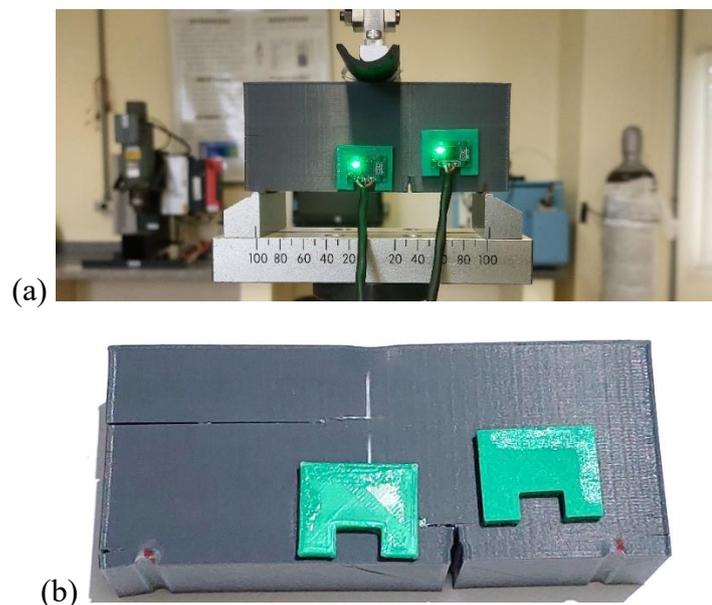
Fonte: Autor (2024).

Neste caso, antes do pico máximo de carga o valor-b tem uma queda rápida e no momento do pico o valor é de aproximadamente 1. Isso mostra que o valor-b pode atuar como precursor de um estado crítico na estrutura.

#### 4.2. Amostra 2 – Entalhe Excêntrico 1

A Figura 19(a) ilustra a amostra 2 durante o ensaio de EA. A Figura 19(b) mostra o padrão de fratura encontrado após o ensaio.

Figura 19 – Amostra 2 (a) detalhe do ensaio experimental e (b) padrão de fratura encontrado.



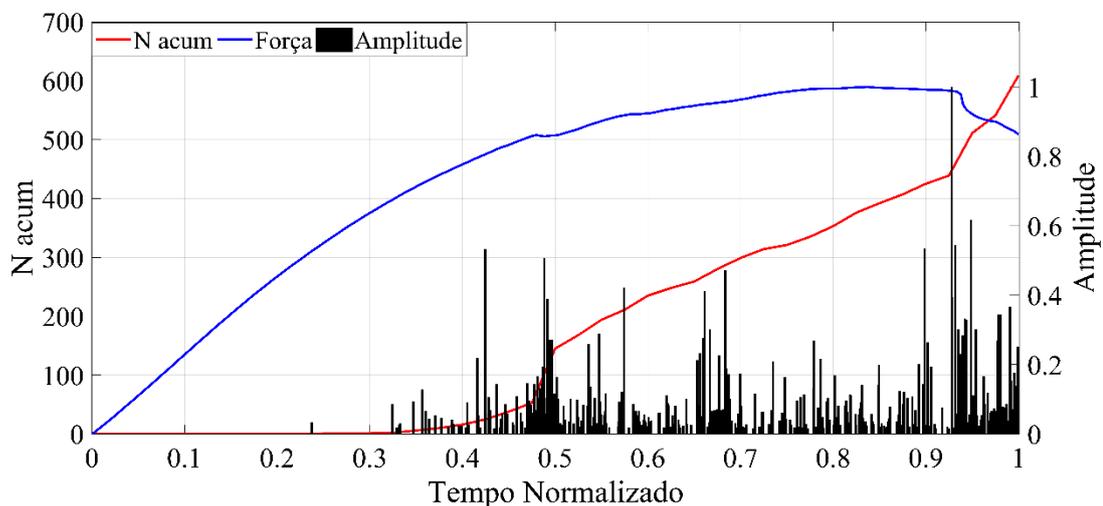
Fonte: Autor (2024).

Observa-se que a trinca começa a partir do entalhe, mas logo se direciona para o meio onde a força foi aplicada. Essa mudança de direção pode estar associada ao tamanho do entalhe que não foi grande o suficiente para fragilizar a amostra naquele ponto. É possível visualizar também uma outra trinca originada na lateral esquerda superior da amostra deslocando-se também para o ponto central onde é aplicada a força.

#### 4.2.1. Amostra 2 sensor 1

A Figura 20 mostra a amplitude dos eventos, número acumulado e o carregamento registrado durante o ensaio da amostra 2 com o sensor 1. Observa-se que no início do ensaio praticamente não têm eventos registrados, mas conforme o aumento da carga ocorre tem-se vários picos na amplitude e com o pico mais alto no momento da falha do elemento de ensaio. Nota-se que em 0,5 do tempo normalizado uma grande atividade de EA é registrada, podendo estar relacionada com a mudança de direção da trinca principal.

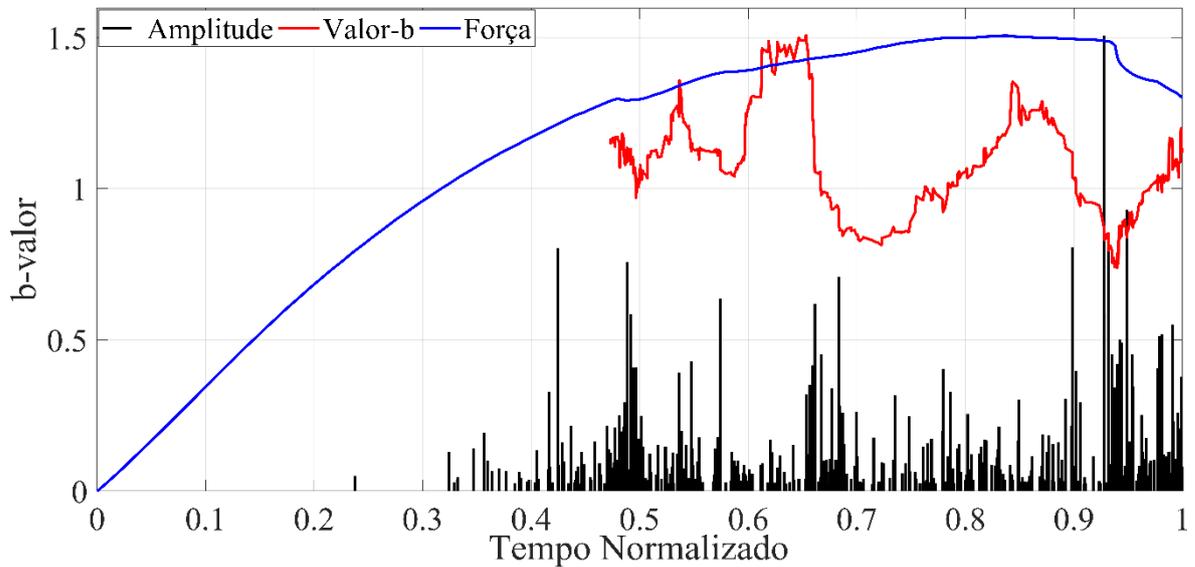
Figura 20 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 2 e sensor 1.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 21 mostra a evolução do valor-b durante o carregamento. A amplitude dos eventos e a força são também apresentados na Figura.

Figura 21 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 2 sensor 1.



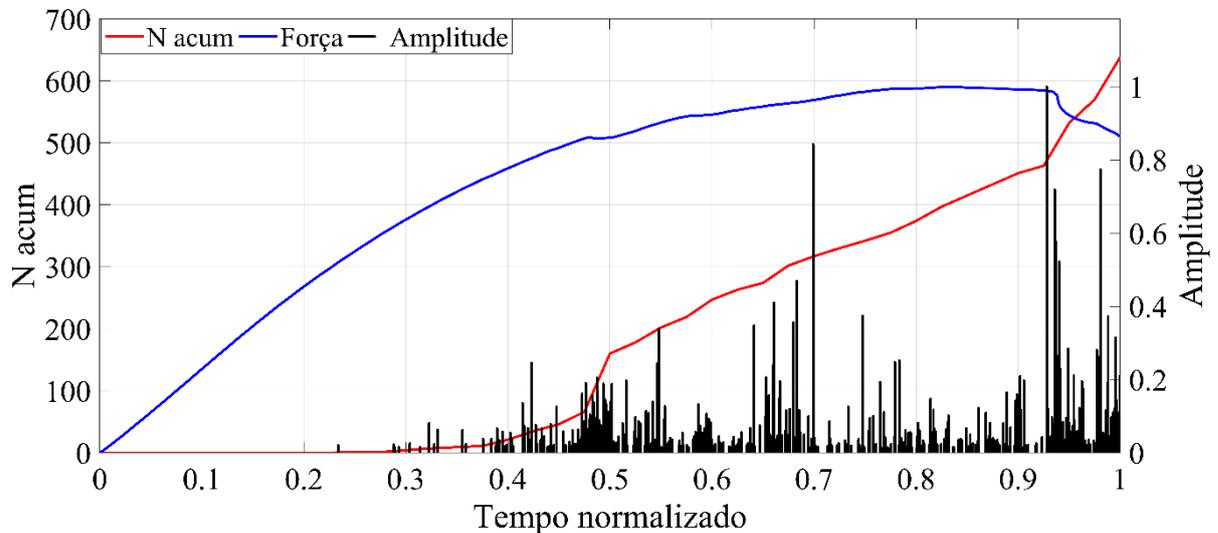
Fonte: Autor (2024).

O valor-b apresenta pelo menos 4 quedas significativas, indicadas pelos retângulos tracejados na Figura, onde há a presença de uma grande atividade de EA com eventos de grande amplitude. A transição mais importante ocorre no fim do ensaio no pico de força máxima, onde o valor muda de aproximadamente 1,2 para 0,75, indicando a presença de macro trincas.

#### 4.2.2. Amostra 2 sensor 2

A Figura 22 mostra a amplitude dos eventos, número acumulado e o carregamento registrado durante o ensaio da amostra 2 com o sensor 2. Neste caso a atividade de EA é similar a aquela apresentada na Figura 20 para o sensor 1.

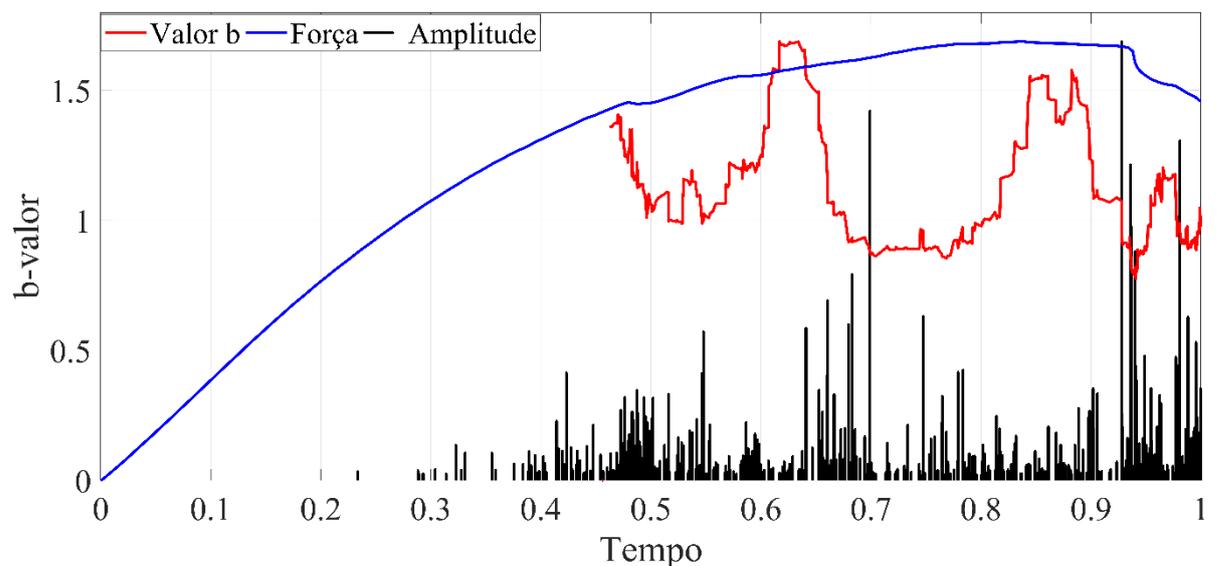
Figura 22 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 2 e sensor 2.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 23 mostra a evolução do valor-b durante o carregamento para os dados do sensor 2. A amplitude dos eventos e a força são também apresentados na Figura. Neste caso apenas 3 mudanças do valor-b podem ser observadas. A mais importante delas ocorre justamente instantes antes da carga de pico ser atingida.

Figura 23 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 2 sensor 2.

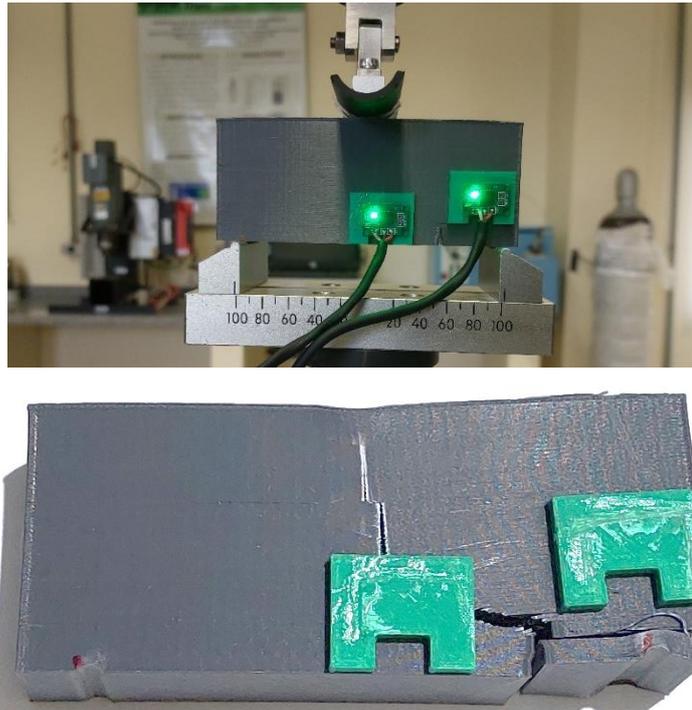


Fonte: Autor (2024).

### 4.3. Amostra 3 – Entalhe Excêntrico 2

A Figura 24(a) ilustra a amostra 3 durante o ensaio de EA. A Figura 24(b) mostra o padrão de fratura encontrado após o ensaio.

Figura 24 – Amostra 3 (a) detalhe do ensaio experimental e (b) padrão de fratura encontrado.



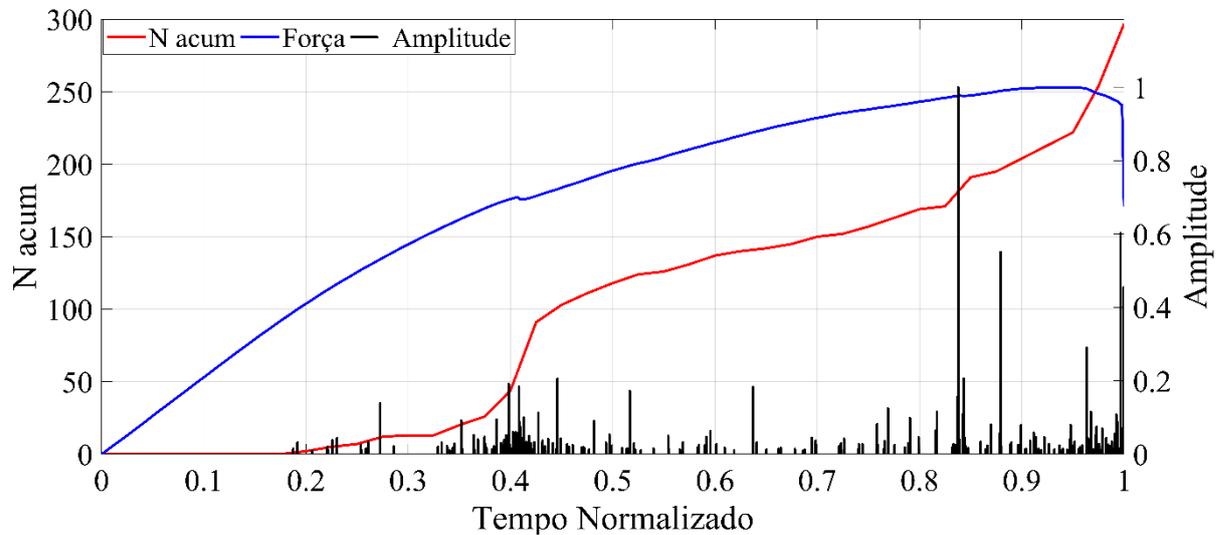
Fonte: Autor (2024).

Pode-se observar que a trinca inicia a partir do entalhe e desloca-se diagonalmente em direção ao centro onde se encontra o ponto de aplicação da força, destaca-se que ela passa por de baixo do suporte do acelerômetro 1. É possível visualizar outra trinca ao lado do entalhe, que aparece somente ao final do ensaio.

#### 4.3.1. Amostra 3 sensor 1

A Figura 25 mostra a amplitude dos eventos, número acumulado e o carregamento registrado durante o ensaio da amostra 3 com o sensor 1.

Figura 25 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 3 e sensor 1.

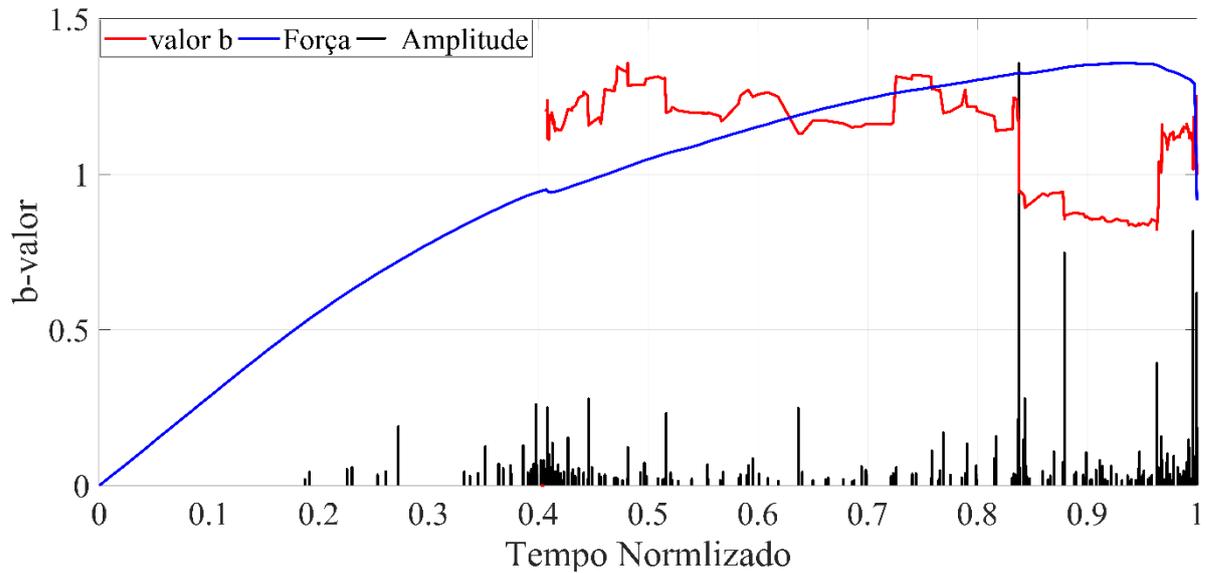


Fonte: Autor (2024).

Pode-se observar que no início não se têm muitos eventos, logo depois começam vários eventos de amplitudes baixa até ter um pico onde houve a falha do material. Nota-se que neste caso um pequeno número de eventos foi registrado, aproximadamente 300.

A Figura 26 mostra a evolução do valor-b durante o carregamento para os dados do sensor 1. A amplitude dos eventos e a força são também apresentados na Figura. Observa-se que o valor-b permanece próximo de 1,25 durante quase todo ensaio, e apenas uma queda é registrada com a ocorrência de um evento de grande amplitude. Após o evento o valor-b permanece menor que 1 até o pico de força.

Figura 26 - Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 3 sensor 1.

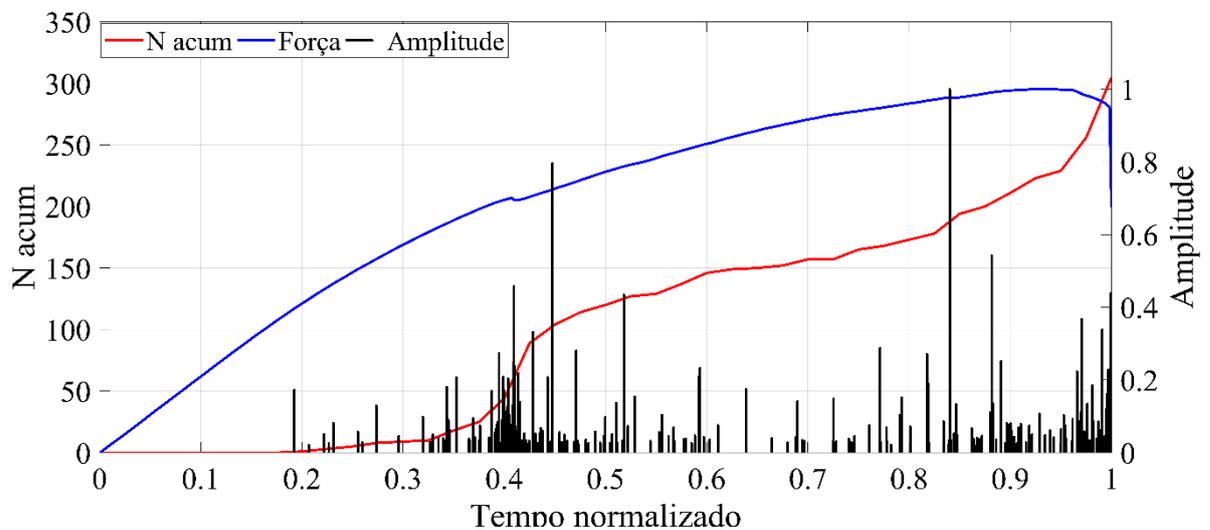


Fonte: Autor (2024).

#### 4.3.2. Amostra 3 sensor 2

A Figura 27 mostra a amplitude dos eventos, número acumulado e o carregamento registrado durante o ensaio da amostra 3 com o sensor 2. A atividade de EA é semelhante a do sensor 1 neste caso, e aproximadamente com a mesma quantidade total de eventos registrados.

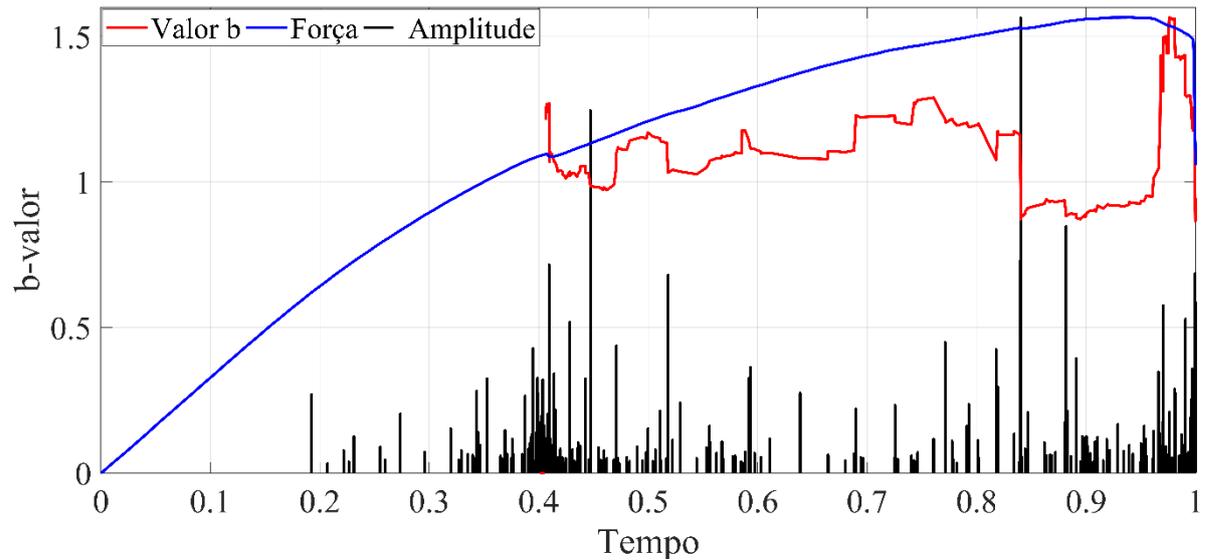
Figura 27 - Número acumulado de eventos, amplitude e a força registrada durante o ensaio para a amostra 3 e sensor 2.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 28 mostra a evolução do valor-b durante o carregamento para os dados do sensor 2. A amplitude dos eventos e a força são também apresentados na Figura. Observa-se que para o sensor 2 o mesmo comportamento do sensor 1 é obtido, sem grandes diferenças.

Figura 28 – Variação do valor-b, força e a amplitude dos eventos de EA para a amostra 3 sensor 2.



Fonte: Autor (2024).

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho avaliou-se o processo de dano em vigas impressas 3D com diferentes excentricidades de entalhes utilizando a técnica da emissão acústica. O valor-b foi utilizado para indicar os pontos críticos que precedem a falha da estrutura. A partir da análise dos resultados pode-se concluir que:

- a metodologia desenvolvida para a captura de eventos de EA utilizando sensores do tipo *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMs) é promissora;
- foi possível identificar pontos críticos das amostras, sendo os resultados obtidos pelos sensores dentro do esperado para o comportamento do valor-b;
- em relação a posição do entalhe, pode-se concluir que quanto mais afastado do centro da viga, menor é a quantidade de eventos capturados;
- nos entalhes excêntricos, a trinca tendeu à se deslocar até o ponto de aplicação do carregamento, não criando trincas em modo misto como se esperava (saindo do entalhe e indo em direção ao ponto de aplicação da carga);
- a influência da posição do entalhe na evolução do dano não pode ser correlacionada.

Sendo assim os resultados obtidos de forma experimental, conseguem mostrar a promissora metodologia de uso dos sensores MEMs e sua utilização na técnica da emissão acústica para o monitoramento do dano em estruturas.

## 6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros a respeito da técnica de EA e a utilização dos sensores MEMs tem-se:

- Desenvolvimento de um sistema de EA de fácil instalação e funcionamento;
- Utilização de alguns parâmetros diferentes para o osciloscópio e sensores afim de aperfeiçoar a metodologia;
- Aplicação da técnica da localização linear em estruturas;
- Comparativo do uso de emissão acústica com outros sensores.

## 7. REFERÊNCIAS

AGGELIS, D.G.; MPALASKAS, A.C.; NTALAKAS, D.; MATIKAS, T.E. Effect of wave distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 35, p. 183-190, 26 mar. 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812001870>. Acesso em: 31 out. 2023.

ARAÚJO, Iolanda; BETTO, Janaína. Assédio moral na pós-graduação: uma situação corriqueira a ser combatida. **Assédio moral na pós-graduação: uma situação corriqueira a ser combatida**, [S. l.], p. 1, 6 set. 2015. Disponível em: <https://www.anpg.org.br/2015/09/assedio-moral-na-pos-graduacao-uma-situacao-corriqueira-a-ser-combatida/>. Acesso em: 7 dez. 2023.

BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; GRITTEN SIEBEN, Priscila. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gest. Tecnol. Inov: Gest. Tecnol. Inov**, [s. l.], ano 2017, v. 01, 7 dez. 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2023.

BIRCK, Gabriel. **ANÁLISE DO PROCESSO DE DANO EM MATERIAL QUASE-FRÁGIL ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DE UM MODELO DE BARRAS**. Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz. 2016. 111 p. Dissertação (Mestrado, Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/141091>. Acesso em: 24 out. 2023.

C. P. MARTINEZ, Andressa; L. DE SOUZA, Douglas; M. DOS SANTOS, Denise; G. PEDROTI, Leonardo; C. CARLO, Joyce; A. D. MARTINS, Marianna. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS ABS E PLA EM IMPRESSÃO 3D VISANDO SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ESTRUTURAL. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS ABS E PLA EM IMPRESSÃO 3D VISANDO SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ESTRUTURAL**, [s. l.], v. 14, n. 1, 14 set. 2019. Disponível em:

<https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/148289/155917>. Acesso em: 13 out. 2023.

COTTICA, PRICILA. **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA NO MONITORAMENTO DO DANO EM MATERIAIS QUASE FRÁGEIS UTILIZANDO A PERIDINÂMICA**. Orientador: Prof. Me. Leandro Friedrich. 2020. 53 p. Dissertação (Bacharel, Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, [S. l.], 2020.

CREALITY. Impressora 3D. *In*: CREALITY. **Impressora 3D**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.creality.com/br/products/ender-3-neo-3d-printer>. Acesso em: 18 jul. 2023.

DA ROSA MAGALHÃES, André Leandro. **Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D**. 2019. 67 p. Dissertação (Bacharel, Engenharia Aeroespacial) - Universidade de Brasília - UnB Faculdade UnB Gama - FGA Engenharia Aeroespacial, [S. l.], 2019. Disponível em:

[https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24042/1/2019\\_AndreLeandroDaRosaMagalhaes\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24042/1/2019_AndreLeandroDaRosaMagalhaes_tcc.pdf). Acesso em: 1 nov. 2023.

DA SILVA RODRIGUES, Rodolfo *et al.* **APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA NA LOCALIZAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/66463/000871315.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 nov. 2023.

DINIZ CAMPOS, LUAN VICTOR. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DO NÍVEL E DO TIPO DE PREENCHIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS POR IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO O MATERIAL ABS**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel, Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CAMPUS DE RUSSAS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, [S. l.], 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.013>. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/67067/1/2022\\_tcc\\_lvdcampos.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/67067/1/2022_tcc_lvdcampos.pdf). Acesso em: 2 nov. 2023.

DOS PASSOS MARTINS, WALDEMIR. **UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA NO ESTUDO DA TRINCA DE HIDROGÊNIO NA SOLDAGEM DE UM**

**AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA.** 2013. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel, Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA, [S. l.], 2013. Disponível em: [https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14751/1/UtilizacaoTecnicaEmissao\\_parte%201.pdf](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14751/1/UtilizacaoTecnicaEmissao_parte%201.pdf). Acesso em: 27 set. 2023.

DOS PASSOS MARTINS, WALDEMIR. **UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA NO ESTUDO DA TRINCA DE HIDROGÊNIO NA SOLDAGEM DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA.** [S. l.: s. n.], 2013. DOI DOI 10.1007/978-3-540-69972-9. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-69972-9>. Acesso em: 20 set. 2023.

EISENBLÄTTER, Jürgen; U. GROSSE, Christian; KÖPPEL, Stefan; H. KURZ, Jochen; N. LANDIS, Eric; M. LINZER, Lindsay; MANTHEI, Gerd; OHTSU, Masayasu; SCHECHINGER, Barbara; SHIGEISHI, Mitsuhiro; SHIOTANI, Tomoki; VOGEL, Thomas. Acoustic Emission Testing. **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, [s. l.], 2008. DOI DOI 10.1007/978-3-540-69972-9. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-69972-9>. Acesso em: 20 set. 2023.

ENGINEERING Fracturing Mechanics. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013794417301182>. Acesso em: 6 nov. 2023.

FERREIRA DAMASCENO, THALITA NATASHA. **ASSÉDIO MORAL EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR (IES): O CASO DOS SERVIDORES TÉCNICO-ADMINISTRATIVOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC).** 2012. Trabalho de conclusão de curso (Mestre em Políticas Públicas e Gestão da Educação Superior) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HUMANOS MESTRADO EM POLÍTICAS PÚBLICAS E GESTÃO DA EDUCAÇÃO SUPERIOR, [S. l.], 2012. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/5287/1/2012\\_tnfdamasceno.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/5287/1/2012_tnfdamasceno.pdf). Acesso em: 7 dez. 2023.

FILIPPIN, Carlo Giuseppe *et al.* **Emissão Acústica Conceitos e Aplicações.** [S. l.: s. n.], 2017.

FONTE. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.politerm.com.br/produto/fonte-de-alimentacao-modelo-pol-16a/1967611>. Acesso em: 12 set. 2023.

GREVE, David W. *et al.* Development of a MEMS Acoustic Emission Sensor System. **Science direct**, [s. l.], 2007.

HARUKA TSUBOUCHI, KAMILA. **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA NO MONITORAMENTO DO DANO EM MATERIAIS HETEROGÊNEOS**. Orientador: Prof. Me. Leandro Friedrich. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel, Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/8032>. Acesso em: 27 set. 2023.

JHONEOR REBOLLEDO LA TORRE, Kevin. **AVALIAÇÃO DA FALHA EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A COMPRESSÃO POR MEIO DO MONITORAMENTO DE EMISSÕES ACÚSTICAS**. Orientador: Prof. Dr. Luís Eduardo Kostaski. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel, Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/handle/rii/7730>. Acesso em: 18 out. 2023.

KABIR, Minoos *et al.* Piezoelectric MEMS Acoustic Emission Sensors. **Science direct**, [S. l.], p. 1-29, 19 maio 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092442471830339X>. Acesso em: 11 jun. 2024.

LI, Yongfang *et al.* IMPROVED PIEZOELECTRIC MEMS ACOUSTIC EMISSION SENSORS. **International Conference on solid State Sensors**, [S. l.], p. 1-4, 1 abr. 2021.

MAR?AVINA, Liviu; VALEAN, Cristina; MARGHITA?, Mihai; LINUL, Emanoil; RAZAVI, Nima; BERTO, Filippo; BRIGHENTI, Roberto. Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. **Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens**, [s. l.], 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794422004866>. Acesso em: 3 nov. 2023.

MENEGHETTI DE OLIVEIRA, Adriano. **ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS UTILIZANDO A TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado, Engenharia Mecânica) - ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS UTILIZANDO A TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA, [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/108500/000946417.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 nov. 2023.

MÁQUINA de ensaio de compressão AG-XPLUS series. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/shimadzu-europa/product-25210-988389.html>. Acesso em: 29 nov. 2023.

OZEVIN, Didem *et al.* MEMS Acoustic Emission Sensors. **Applied sciences**, [S. l.], p. 1-14, 14 nov. 2020.

PEREIRA PINHEIRO, Cristiano Max; EHLERS MOTA, Gabriela; STEINHAUS, Camilla; DE SOUZA, Mikaela. IMPRESSORAS 3D: UMA MUDANÇA NA DINÂMICA DO CONSUMO. **IMPRESSORAS 3D: UMA MUDANÇA NA DINÂMICA DO CONSUMO**, [s. l.], v. 10, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/3502/350259663002/350259663002.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2023.

PUGLIA, Vicente *et al.* **ESTUDO DA RUPTURA EM MATERIAIS HETEROGÊNEOS QUASE FRAGEIS APLICANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS FORMADO POR BARRAS JUNTAMENTE COM A TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/101211/000930600.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 jul. 2024.

ZHOU, Wu; LIU, Dahsin; LIU, Ning. Analyzing dynamic fracture process in fiber-reinforced composite materials with a peridynamic model. **Engeneering Fracturing Mechanics**, [s. l.],

2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013794417301182>. Acesso em: 6 nov. 2023.

## APÊNDICE A – Manual montagem osciloscópio e acelerômetro

### 1. Ajuste da fonte de energia

Verificar se a fonte está com no máximo 5V, não pode passar disso. A Figura 1A mostra a fonte e como deve ser ajustada.

Figura 29A - Fonte ajustada.



Fonte: Autor (2023).

### 2. Conexão para alimentação do aparelho

Conectar o negativo e positivo na entrada como indicado na Figura 2A.

Figura 30A - Indicação da conexão positivo e negativo.



Fonte: Autor (2023).

Após a conexão dos fios, verificar com voltímetro se a voltagem está correta.

### 3. Conexão ponteira-acelerômetro

Conecte todos os positivos na pinça vermelha e os negativos na preta, já para o neutro/terra no branco como mostra a Figura 3A abaixo.

Figura 31A - Conexão ponteira-acelerômetro.

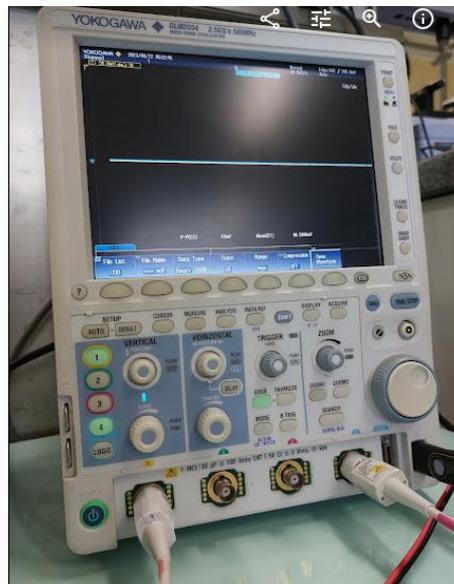


Fonte: Autor (2023).

### 4. Configurando o osciloscópio.

Cada canal tem uma cor específica. ex.: canal 1 é a cor verde. A escolha do canal não interfere em nada. Como mostra a Figura 4A com as ponteiras de prova conectadas nos canais.

Figura 32A - Conexão ponteiras de prova com os canais.



Fonte: Autor (2023).

No botão auto o osciloscópio faz um auto setup, fica em 5 ms por divisão, em cada divisão mostrada no display tem 5 ms totalizando 10 divisões e com 50 ms.

Para diminuir a escala em x, utiliza-se o *dial button* indicado na Figura 5A abaixo.

Figura 33A - indicação do *dial button*.



Fonte: Autor (2023).

A divisão usada no experimento é máxima, que é mostrada na tela, total de 8 minutos ou 500 s. Ajuste da escala em Y é dada pelo *dial button* ao lado, indicado na Figura 6A abaixo, a unidade de mV por divisão.

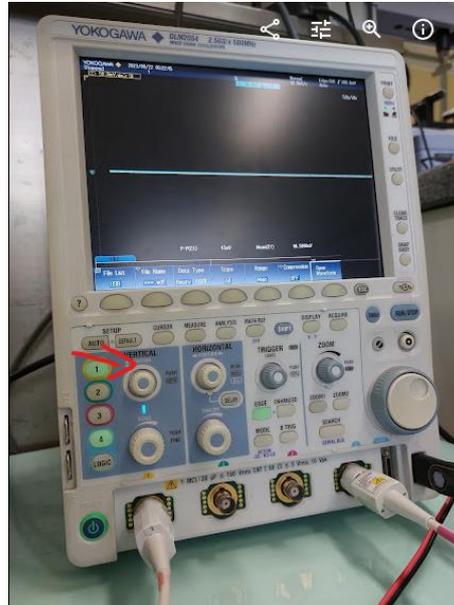
Figura 34A - Indicação da escala em Y.



Fonte: Autor (2023).

O ajuste do *ground*, pode puxar a referência para cima ou para baixo usando o *dial button* acima, mostrado na Figura 7A abaixo:

Figura 35A- indicação do ajuste do *ground*.

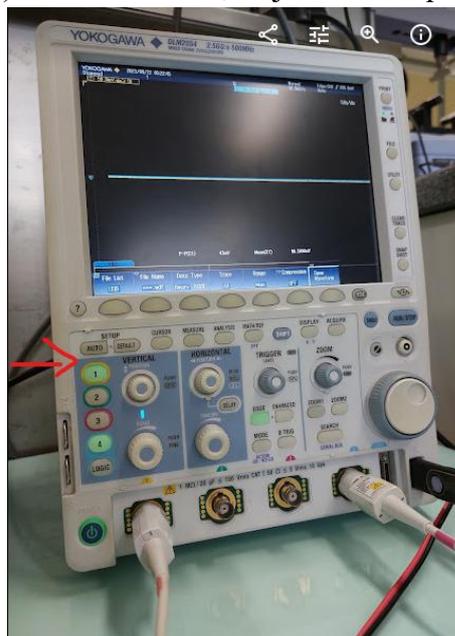


Fonte: Autor (2023).

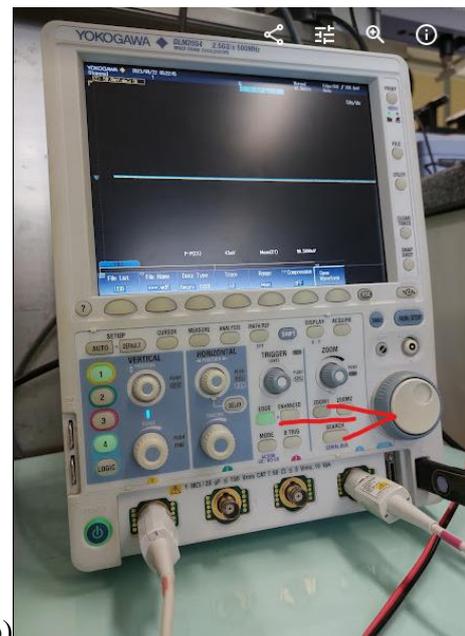
## 5. Utilizando os canais

Os canais podem ser conFigurados separadamente, utilizando o acoplamento DC ou AC. Ex.: clicando no canal 1 ele abre o menu de conFiguração do canal. Como mostrado na Figura 8A abaixo.

Figura 36A- (a) Troca de canais, e ajuste de frequência de corte.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2023).

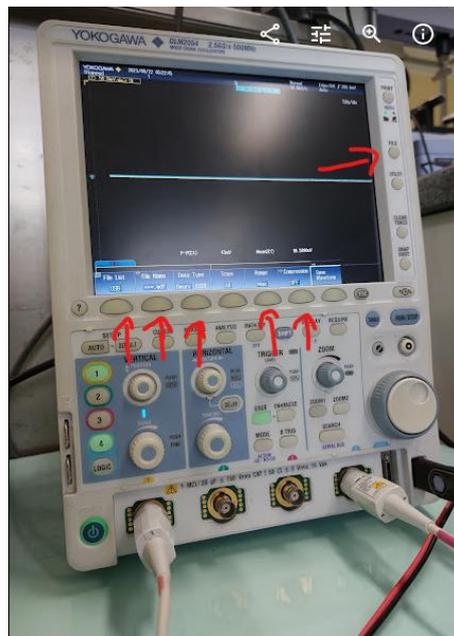
No menu do canal deixa-se o ganho de 1:1, escala linear e por fim a banda que é a frequência de corte (filtro do sinal), se queremos adquirir 50khz, devemos colocar pelo menos o dobro, utiliza-se o *dial button* indicado na Figura 9A abaixo:

OBS.: o equipamento salva só o que está na tela e quando chega no final da tela e vai apagando os dados anteriores.

## 6. Salvar os dados

Os dados podem ser salvos no *pen drive*, para isso aperta-se o botão *file*, depois *waveform*, seleciona o tipo binário, todos os canais, *wave* seleciona *main* que é toda tela, na aba *file list* selecione o USB. A Figura 10A indica os botões utilizados para navegação.

Figura 9A - Botões de navegação.



Fonte: Autor (2023).

## APENDEICE B – Código para o cálculo do valor b

O código abaixo ilustra a metodologia para encontrar o parâmetro valor b.

```

clc
clear all
close all

load('Nome do arquivo')
load('arquivo referente aos dados da força máxima e tempo normalizado')
T=t;
ACY=y;

TIME=TF(:,1);
FORCA=TF(:,2);
%%N inst Vs N Acum Vs Load
figure(1)
tmax2=max(POSMAX);
Amp=MAXVEC;
nt=40;
tf=0:1/nt:1;
datao=POSMAX/tmax2;
data=POSMAX/tmax2;
for i=1:nt
    lowerbound=tf(i);
    upperbound=tf(i+1);
    count(i,1) = sum(data()>=lowerbound & data<=upperbound(:));
end
count=[0;count];
B = cumsum(count);

p1=plot(tf,B,'r');
hold on
xlabel('Normalized Time','FontName','Times New Roman','FontSize',20,'Rotation',0)
ylabel('N acum','FontName','Times New Roman','FontSize',20,'Rotation',90)
yyaxis right
hold on
p2=plot(TIME/max(TIME),FORCA/max(FORCA),'k')
p3=plot(datao,Amp/max(Amp),'m')
%p4=plot(datao,BB/max(BB),'m')
xlim([0 1])
legend([p1(1) p2(1) p3(1)],'N acum','Load','Amplitude')
yyaxis right
ylim([0 1.185])
ylabel('F/F_m_a_x, A/A_m_a_x')
%print('Figure12','-dpng','-r300');

%% VALOR B - PARTE 1
tpico=POSMAX'/tmax2;
win=50;
    for jj=401%:size(tpico) %
        jj
    % Interval=[tpico(jj-win) tpico(jj)];
    Interval=[tpico(1) tpico(jj)];
    Mi=0.05;
    [Datav,p1,p2,p3,error,D]=EA_Calc_POT2(Amp',tpico,Interval,Mi,'NHist');
    pp1(jj)=p1;

```

```
pp2(jj)=p2;
pp3(jj)=p3;
DD(jj)=D;
end
%%
hold on
plot(datao,max(-pp2)*Amp/max(Amp),'k')
plot(tpico,-pp2,'r')
% plot(tpico,-pp3,'b')
plot(TIME/max(TIME),max(-pp2)*FORCA/max(FORCA),'m')
xlabel('Time','FontName','Times New Roman','FontSize',20,'Rotation',0)
ylabel('b-valor','FontName','Times New
Roman','FontSize',20,'Rotation',90)
```