

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CARLA MORAES DE MENEZES

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DANO EM ESTRUTURAS IMPRESSAS 3D
UTILIZANDO A TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA**

**Alegrete
2024**

CARLA MORAES DE MENEZES

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DANO EM ESTRUTURAS IMPRESSAS 3D
UTILIZANDO A TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA**

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**

CARLA MORAES DE MENEZES

**ANÁLISE DO PROCESSO DE DANO EM ESTRUTURAS IMPRESSAS 3D UTILIZANDO A
TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06/12/2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof.^º Dr. Luis Eduardo Kostaschi
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2024, às 09:09, 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 09:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/12/2024, às 09:14, 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 **1617946** e o código CRC **1373D2C4**.

Dedico este trabalho aos meus pais Elódi e Terezinha, aos meus irmãos Guilherme, Juliana e Isadora, ao meu companheiro Thauan, vocês são a razão de tantas conquistas e de toda a minha perseverança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Leandro Ferreira Friedrich pela orientação, paciência e sugestões valiosas que foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios deste projeto. Seu comprometimento e profissionalismo são uma inspiração, e levo comigo um profundo respeito e admiração por sua orientação ao longo deste processo.

Agradeço ao acadêmico em Engenharia Mecânica Thauan de Oliveira Littiere e ao Técnico em Mecânica Ivan Mangini Lopes Junior por todo conhecimento e apoio que propuseram ao produzir as amostras impressas 3D para a realização deste trabalho.

Agradeço a técnica do Laboratório de Metalografia Dr^a Clarissa Angrizani por todo amparo e auxílio durante os ensaios de flexão das amostras para coleta dos dados de emissão acústica.

Agradeço em especial à minha família, meu companheiro e aos amigos pelo apoio e carinho ao longo desta jornada. Cada gesto de carinho, palavra de incentivo e demonstração de confiança foram essenciais para que eu pudesse concluir esta etapa com determinação e gratidão. Obrigado por acreditarem em mim e estarem sempre ao meu lado.

“Nunca fiz nada dar certo por acidente, nem nenhuma das minhas invenções surgiu por acidente, elas vieram do meu trabalho.”

Thomas Edson

RESUMO

A Técnica de Emissão Acústica (TEA) é um método não destrutivo amplamente utilizado para monitoramento e análise de falhas em materiais. A técnica baseia-se na detecção de ondas acústicas geradas durante o processo de deformação ou falha de um material sob estresse. Quando ocorre uma microfissura, trinca ou deslocamento interno, o material libera energia na forma de ondas elásticas, que são captadas por sensores posicionados na superfície. O presente trabalho visa a análise do processo de fratura em vigas com entalhes centrais impressas em 3D em ABS com preenchimentos internos distintos de 30%, 40% e 50% por meio da aplicação de TEA durante ensaios de flexão em três pontos. O objetivo foi compreender como diferentes níveis de preenchimento influenciam na atividade de emissão acústica, na evolução dos danos e o modo de falha predominante. A técnica permitiu não apenas correlacionar o número e a intensidade dos eventos acústicos com o percentual de preenchimento das amostras, mas também identificar o modo de falha predominante e monitorar a progressão das trincas com o uso do valor-*b*. Demonstrando que o número de eventos acústicos aumentou significativamente em amostras com menor preenchimento devido à sua menor resistência estrutural. O modo de falha predominante foi por tração (Modo I), especialmente em regiões de maior concentração de tensões, embora eventos de cisalhamento (Modo II) também tenham sido registrados. A TEA provou ser uma ferramenta poderosa na análise experimental, oferecendo insights valiosos sobre a integridade estrutural e o comportamento de materiais impressos 3D submetidos a esforços mecânicos.

Palavras-chave: Emissão acústica, impressão 3D, ABS, valor-*b*.

ABSTRACT

Acoustic Emission Technique (AET) is a widely used non-destructive method for monitoring and analysing material failure. The technique is based on the detection of acoustic waves generated during the deformation or failure process of a material under stress. When a microcrack, crack or internal displacement occurs, the material releases energy in the form of elastic waves that are detected by sensors placed on the surface. This work aims to analyse the fracture process in 3D printed ABS beams with central notches and different internal fillings of 30%, 40% and 50% by applying AET during three-point bending tests. The aim was to understand how different filling levels affect the acoustic emission activity, damage evolution and the dominant failure mode. The technique not only allowed the number and intensity of acoustic events to be correlated with the percentage filling of the specimens, but also allowed the predominant failure mode to be identified and the crack propagation to be monitored using the b -value. It was shown that the number of acoustic events increased significantly in samples with lower filler content due to their lower structural strength. The predominant failure mode was tensile (Mode I), particularly in regions of higher stress concentration, although shear events (Mode II) were also recorded. TEA has proven to be a powerful tool for experimental analysis, providing valuable insight into the structural integrity and behaviour of 3D printed materials under mechanical loading.

Keywords: Acoustic emission, 3D printing, ABS, b -value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Esquemática do funcionamento de um teste de emissão acústica.....	18
Figura 2- Caracterização de um evento de EA	18
Figura 3- Modos de propagação de trincas.....	20
Figura 4- Ondas acústicas características para (a) Modo I e (b) Modo II.	20
Figura 5- Evolução do valor-b.....	22
Figura 6- Vista 3D da geometria no SolidWorks.....	23
Figura 7- Especificação geométrica das estruturas (em milímetros).	24
Figura 8 - Amostra no Software Ultimaker-Cura.	24
Figura 9 - Parâmetros utilizados no Ultimaker-Cura.....	25
Figura 10 – Impressora Ender V3- neo.	26
Figura 11– Impressão 3D da amostra de 40% de preenchimento interno.	26
Figura 12 – Configuração do ensaio de flexão.	27
Figura 13– Estrutura impressa 3D com 30% de preenchimento.	27
Figura 14 – Exemplo de acelerômetro utilizado nos ensaios de EA	28
Figura 15– Modo de fixação das estruturas no equipamento de teste.	28
Figura 16– Configuração para realização dos ensaios de emissão acústica.	29
Figura 17– Onda de emissão acústica a) antes do ajuste e b) ajustada.....	30
Figura 18– Resultados de EA das amostras com preenchimento a) 30%, b) 40% e c) 50%....	32
Figura 19- Valor-b para amostras de preenchimento a) 30%, b) 40% e c) 50%.	33
Figura 20 - Eventos de EA para as amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50% de preenchimento.	34
Figura 21– Amostras fraturadas após ensaio experimental de EA.....	35
Figura 22– Modo de falha predominante nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.....	36
Figura 23- Ondas acústicas características para (a) Modo I e (b) Modo II.	37
Figura 24 - Eventos de Modo I nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.	37
Figura 25 - Eventos de Modo II nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.	38
Figura 26– Modo de falha predominante nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Valores estabelecidos como parâmetros de impressão.....	25
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrila butadieno estireno

AF – *Average Frequency* - Frequência média

EA – Emissão acústica

MA – Manufatura aditiva

MFD – Modelagem por fusão e deposição

PETG – Polietileno tereftalato glicol

PLA – Ácido polilático

RA – *Rise Angle* - Ângulo de elevação

RT – *Rise Time* - Tempo de subida

TEA – Técnica de emissão acústica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Impressão tridimensional por MFD	16
2.1.1 ABS.....	16
2.2 Técnica da Emissão Acústica.....	17
2.2.1 Determinação do Modo de Propagação	19
2.2.2 Criticidade da Estrutura: Valor- <i>b</i>	21
3 METODOLOGIA	23
3.1 Geometria e detalhes da impressão 3d	23
3.2 Ensaio de flexão de três pontos	26
3.3 Análise do sinal de ea.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 Análise dos eventos de emissão acústica	31
4.1.1 Atividade de EA.....	31
4.1.2 Avaliação da evolução do dano: valor- <i>b</i>	32
4.2 Influência do preenchimento dos corpos de prova.....	34
4.3 Identificação do modo de falha	36
5 CONCLUSÕES.....	40
6 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.	41
7 REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Os avanços da impressão 3D têm tido um impacto significativo em várias indústrias, principalmente no ramo de prototipagem rápida, proporcionando inovações e melhorias em processos de fabricação. Um entendimento aprofundado é crucial para garantir a integridade estrutural e o desempenho confiável das peças impressas, especialmente em aplicações onde a tolerância a falhas é mínima e a precisão mecânica é fundamental.

A impressão tridimensional (3D) é um processo de manufatura aditiva (MA), sendo um processo de fabricação que constrói objetos tridimensionais camada por camada a partir de dados digitais (ALIHEIDARI *et. al*, 2017). Essa tecnologia oferece diversas vantagens em comparação aos métodos tradicionais de fabricação (CAMPBELL *et. al*, 2011), principalmente pelo fato de permitir a produção de geometrias mais complexas.

Uma das formas de ampliar a aplicação destas novas estruturas é entendendo como ocorre o processo de fratura destes materiais. Neste contexto, a técnica da emissão acústica tem se mostrado como uma boa alternativa para compreender melhor a evolução deste processo, devido esta técnica permitir obter conhecimento do comportamento interno e a previsão de falha do material em análise (OHNO e OHTSU, 2010).

A técnica de emissão acústica (TEA) é um ensaio não destrutivo, sendo aplicável a diversas formas e a uma ampla variedade de materiais, incluindo aço, concreto, rochas, polímeros e compósitos em geral. A fundamentação dessa técnica repousa no estudo das ondas de tensão elásticas liberadas pelo material durante o processo de dano, desencadeado por cargas externas aplicadas. A característica do sinal de emissão acústica está condicionada ao mecanismo que a originou, ao material por meio do qual ela se propagou e ao sensor responsável por converter a onda em sinal elétrico.

A combinação da impressão 3D com a análise por emissão acústica constitui uma abordagem inovadora para avaliar a integridade estrutural de componentes fabricados por esse processo. Neste presente trabalho, busca compreender como as falhas e danos se manifestam nesses materiais, utilizando a detecção de ondas acústicas geradas durante a aplicação de cargas em ensaios de flexão em amostras fabricadas por meio da impressão 3D, apresentando variações nos preenchimentos internos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a utilização da técnica de emissão acústica na análise do processo de dano em estruturas simples impressas em 3D.

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar o processo de dano em estruturas impressas sob ensaio de flexão de três pontos.
- b) A influência do preenchimento das estruturas impressas na quantidade de sinais emitidos e coletados pelos acelerômetros bem como a evolução do dano.
- c) Identificação do modo de fratura dominante.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Impressão tridimensional por MFD

A impressão 3D é uma Manufatura Aditiva (MA), abrangendo todo o processo de fabricação, no qual o material é depositado ou unido em camadas para criar uma geometria tridimensional complexa, eliminando a necessidade de etapas adicionais de processamento (AGUIAR, 2016).

Em comparação com os métodos tradicionais de fabricação, a manufatura aditiva de peças pode ter suas propriedades influenciadas por parâmetros estruturais e de processo, não se limitando apenas às características intrínsecas do material. Esse fenômeno representa a principal limitação quando se utiliza peças produzidas por impressão, chamada de Modelagem por Fusão e Deposição (MFD), para componentes funcionais (DUDESCU e RACZ, 2017).

Segundo Wang (2017), dos métodos de MA, a técnica de MFD é baseada na extrusão de termoplásticos. Para Besko *et. al* (2017) o MFD, destaca-se como a única tecnologia de impressão 3D profissional que faz uso de termoplásticos de categoria de produção. Dessa forma, as peças produzidas por meio dessa técnica apresentam características incomparáveis em termos de resistência mecânica, térmica e química.

A impressão 3D por MFD, trata-se de um método de produção que utiliza a extrusão de um filamento fundido por meio de um bico aquecido de maneira controlada. Após o depósito do material na plataforma, ocorre o resfriamento e solidificação, repetindo-se esse processo camada após camada.

Os principais termoplásticos utilizados na impressão 3D são o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ácido polilático (PLA), polietileno tereftalato glicol (PETG) e Nylon, destacando-se o ABS como um dos materiais mais usados como filamento nas impressões por MFD, devido à sua baixa temperatura de fusão e excelentes propriedades de processamento.

2.1.1 ABS

Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) é um copolímero derivado do petróleo formado por três tipos diferentes de monômeros com proporções diferentes, despertando o interesse da indústria em diversas áreas, devido à sua temperatura de fusão e peso específico baixo, combinado com boa rigidez e resistência (BESKO *et. al*, 2017).

Para Wang (2017), o ABS é um polímero amorfo conhecido por sua notável resistência a baixas temperaturas, estabilidade dimensional excelente, baixa contração durante a moldagem, absorção reduzida de umidade e propriedades dielétricas vantajosas.

Ainda conforme Besko *et. al* (2017), em comparação com outros materiais utilizados na impressão 3D, o ABS tem melhores propriedades mecânicas, pois suporta temperaturas mais elevadas, é ligeiramente flexível.

2.2 Técnica da Emissão Acústica

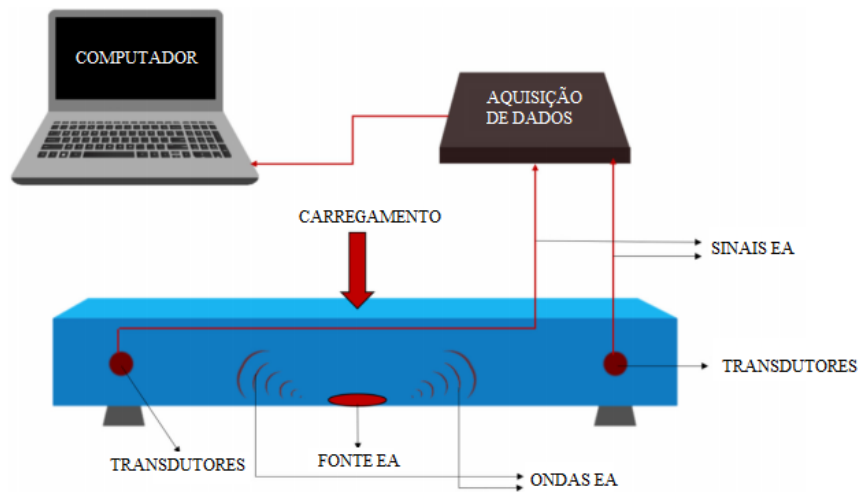
A Emissão Acústica (EA) constitui um método de inspeção não destrutiva que faz uso da energia elástica transitória derivada de eventos associados à propagação de trincas no interior de um material, fundamentando-se na identificação dessas ondas e a liberação de energia no momento em que ocorre a propagação ou surgimento das discontinuidades.

Segundo Stavrakas *et. al* (2016), a EA é amplamente reconhecida como uma das ferramentas mais valiosas para monitorar e compreender os mecanismos subjacentes aos processos de fratura. A expectativa é que a quantidade de sinais registrados durante um processo de carga possa ser correlacionada ao número efetivo de trincas ativas no material, proporcionando, assim, um diagnóstico preciso das condições estruturais reais.

As ondas de emissão acústica são capturadas e registradas por sensores piezoelétricos, fixados na superfície em análise ou de elementos estruturais, que transformam a energia das ondas elásticas em sinais elétricos. A Figura 1 apresenta a esquematização de um ensaio de EA de uma viga em flexão.

Apesar de a técnica da EA apresentar características vantajosas, a heterogeneidade natural dos materiais não permite replicar seus sinais de ondas mesmo quando em amostras idênticas e submetidas a carregamentos iguais, tornando cada análise única. Para Aggelis *et. al* (2012), as características qualitativas da forma de onda, incluindo amplitude, duração e frequência, têm o potencial de fornecer informações essenciais sobre o modo de dano e a intensidade de fratura presentes em um material.

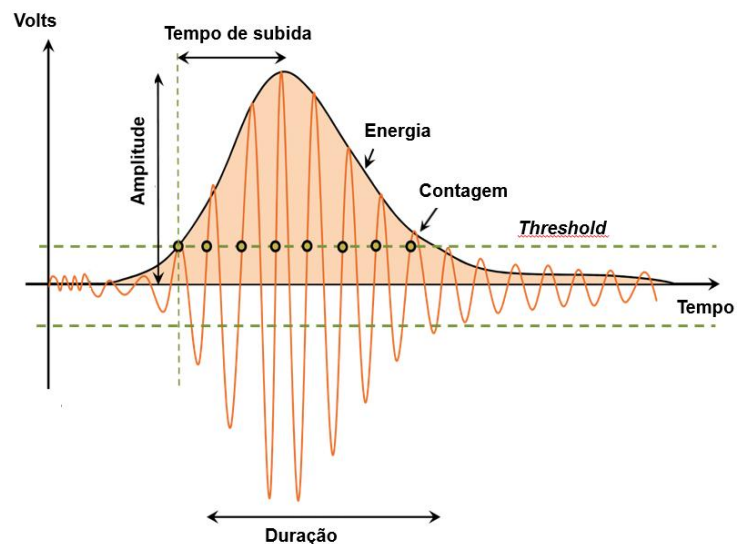
Figura 1-Esquemática do funcionamento de um teste de emissão acústica.



Fonte: Adaptado Friedrich *et. al* (2020).

Conforme Aguiar (2004), a filtragem dos dados coletados durante um ensaio de EA é essencial, para que se diferencie um ruído de fundo de um evento de EA, podendo ser executada por meio de *softwares*. No entanto, é crucial possuir o conhecimento necessário para identificar cada parâmetro de um evento de EA, a fim de interpretar corretamente e realizar ajustes, como visto na Figura 2.

Figura 2-Characterização de um evento de EA



Fonte: Adaptado Burud e Chandrakishen (2021).

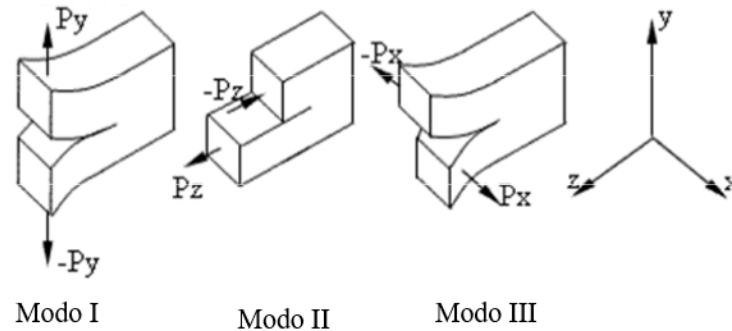
Os principais parâmetros que delimitam um evento acústico, de acordo Fillippin *et. al* (2017), Burud e Chandrakishen (2021), Grosse e Ohtsu (2008) são:

- **Threshold:** é uma linha limite, que representa um nível predefinido de amplitude, utilizado para filtrar o ruído do ambiente de eventos acústicos. Apenas os sinais que apresentarem picos de amplitude superiores ao valor estabelecido pela Threshold serão considerados sinais de emissão acústica.
- **Amplitude** é o pico de tensão mais elevado registrado na forma de onda do sinal delimitando o que é um evento de emissão acústica.
- **Tempo de subida** corresponde ao intervalo entre o primeiro valor de sinal que ultrapassa a linha de referência até o valor máximo de amplitude detectado no evento.
- **Frequência Média** está associada à divisão da contagem pela duração do sinal. Esse parâmetro permite a identificação de diversas formas de ondas e diferentes mecanismos de danos que ocorrem durante a evolução do dano na estrutura.
- **Contagem:** é o número de vezes que a faixa positiva do sinal passa da threshold durante um evento de emissão acústica.
- **Duração de sinal** é o intervalo entre a primeira ocorrência e a última em que o sinal ultrapassa o limite de referência.

2.2.1 Determinação do Modo de Propagação

Para Aggelis (2011) o formato da onda do sinal de Emissão Acústica é descrito como uma característica indicativa do modo de falha. O sinal de onda registrado pelos sensores pode ser associado ao modo de propagação de uma trinca. Para uma determinação precisa do tipo de ativação da trinca, são empregadas técnicas que analisam o campo de tensões na extremidade da trinca, sendo este o elemento determinante para diferenciar os modos de propagação. Existem diferentes modos de propagação de trincas que resultam em ondas acústicas, e a análise do modo específico pode depender do contexto em que a emissão acústica está ocorrendo, como visto na Figura 3. O modo I é caracterizado pela propagação de trincas por tração, modo II é caracterizado pela propagação de trincas por cisalhamento e o modo III pela propagação de trincas por cisalhamento fora do plano.

Figura 3- Modos de propagação de trincas.

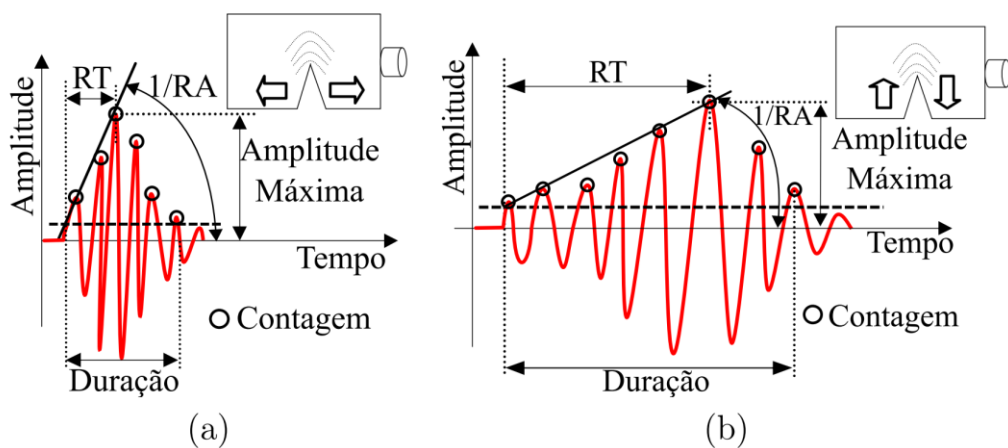


Fonte: Adaptado Puglia (2014).

A determinação do modo de fratura pode ser realizada por meio da relação envolvendo o tempo de subida da onda (*Rise Time - RT*), o valor da amplitude do pico e a Frequência Média (*Average Frequency - AF*). A relação entre o tempo de subida e a amplitude de pico estabelece o ângulo de elevação (*Rise Angle - RA*). Este parâmetro, RA, quando em relação com a AF, pode determinar o modo predominante de falha da estrutura em análise.

Eventos de EA devido à propagação de trincas por tração (Modo I), são caracterizados por possuir baixos valores de RA e altos valores de AF, enquanto eventos de EA oriundos do cisalhamento da trinca (Modo II) resultam em formas de onda mais longas, com RA mais altos e AF mais baixos, como mostra a Figura 4.

Figura 4- Ondas acústicas características para (a) Modo I e (b) Modo II.



Fonte: Adaptado Aggelis (2012).

2.2.2 Criticidade da Estrutura: Valor- b

O valor- b , também conhecido como coeficiente de Gutenberg-Richter (GR), desempenha um papel fundamental na análise das condições críticas que antecipam o colapso estrutural. Esta avaliação é conduzida através do valor- b da lei de Gutenberg-Richter (Equação 1), envolvendo uma análise estatística da distribuição da amplitude (A) dos sinais de emissão acústica gerados por microfissuras em crescimento.

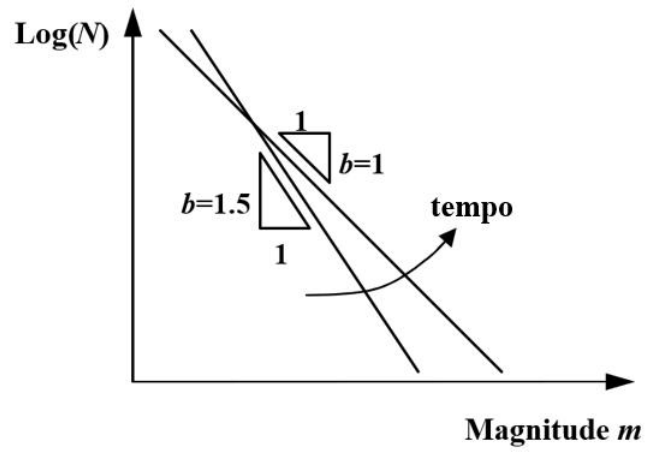
$$\log N (\geq m) = \alpha - bm \quad (1)$$

onde N é o número de eventos acumulados, α é uma constante, e a magnitude (m) é uma quantidade de escala logarítmica relacionada com a amplitude A , muitas vezes usada para medir a amplitude de um sinal elétrico gerado por um evento de emissão acústica, como mostrado na Equação 2.

$$m = \log A \quad (2)$$

Ao examinar a distribuição de amplitude dos sinais de EA resultantes das microfissuras em desenvolvimento, é possível monitorar de forma eficaz os danos que surgem nas estruturas, utilizando o valor- b como um coeficiente representativo. A observação detalhada dos dados das ondas de EA revela que microtrincas estão associadas a amplitudes baixas, enquanto amplitudes mais elevadas indicam macrotrincas (Jung *et. al*, 2017).

Essa distinção permite descrever o comportamento da fissura desde o início até o término da fratura de um corpo, proporcionando análises valiosas para a previsão e gestão da integridade estrutural. De maneira abrangente, o coeficiente b apresenta uma variação que se inicia em torno de 1.5 na fase inicial, alcançando o valor de 1 em estágios finais, especialmente quando a carga aplicada se aproxima ou iguala à última carga, como ilustrado na Figura 5. Essa variação pode ser influenciada por características específicas do material e do tipo de ensaio realizado.

Figura 5- Evolução do valor- b .

Fonte: Adaptado Carpinteri *et. al* (2009).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em:

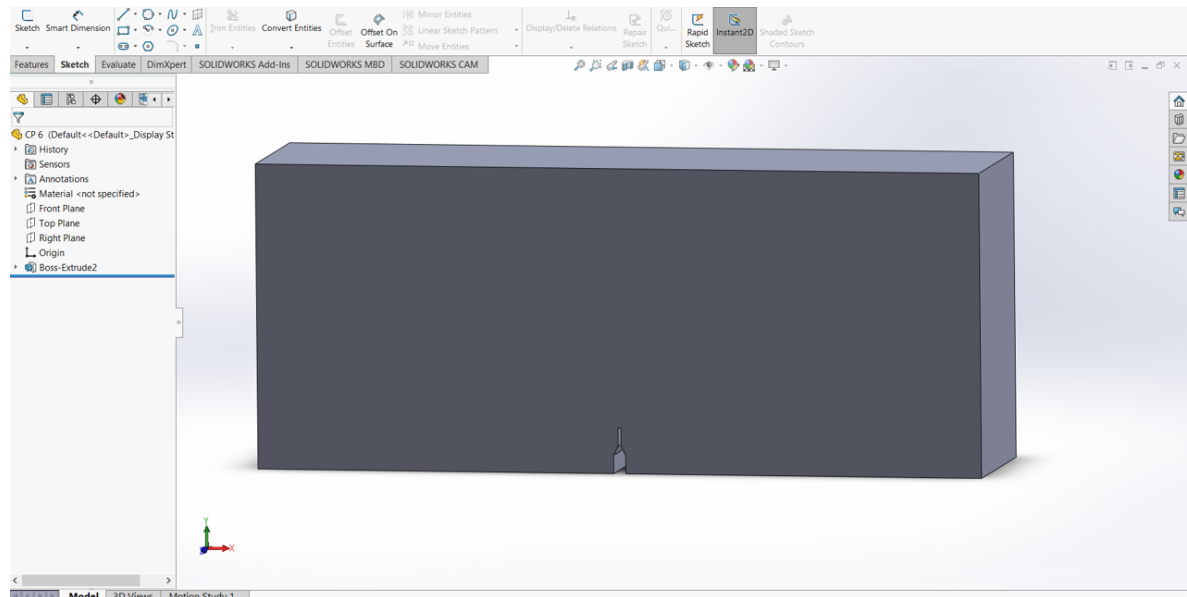
- Desenhar as geometrias no *Solidworks*;
- Obter os códigos Gs dos desenhos;
- Realizar a impressão 3D;
- Ensaiar as amostras sobre flexão em 3 pontos;
- Análise dos sinais de EA para separação dos eventos.

A seguir são apresentados os detalhes das etapas mencionadas acima.

3.1 Geometria e detalhes da impressão 3D

Todas as estruturas, ou seja, vigas, são primeiramente desenhadas através do *software* de desenho 3D digital *SolidWorks*, Figura 6, e salvo em formato “.STL”.

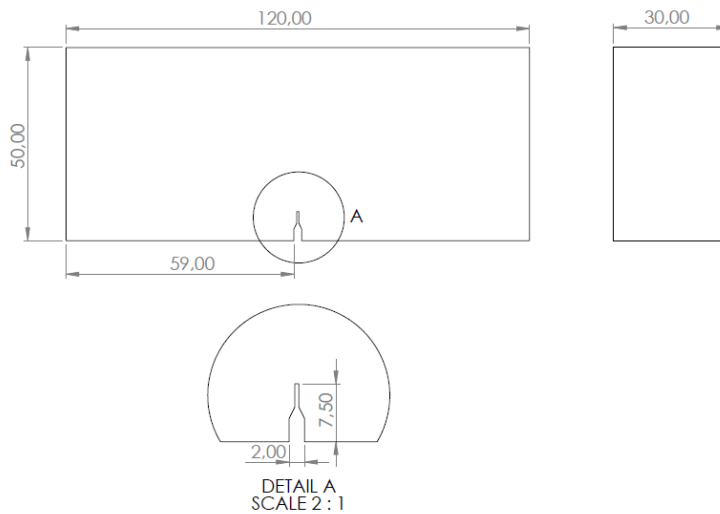
Figura 6– Vista 3D da geometria no *SolidWorks*.



Fonte: Autor.

A geometria e dimensões externas das estruturas para a impressão 3D, foram definidas para que todas as amostras fossem iguais, Figura 7.

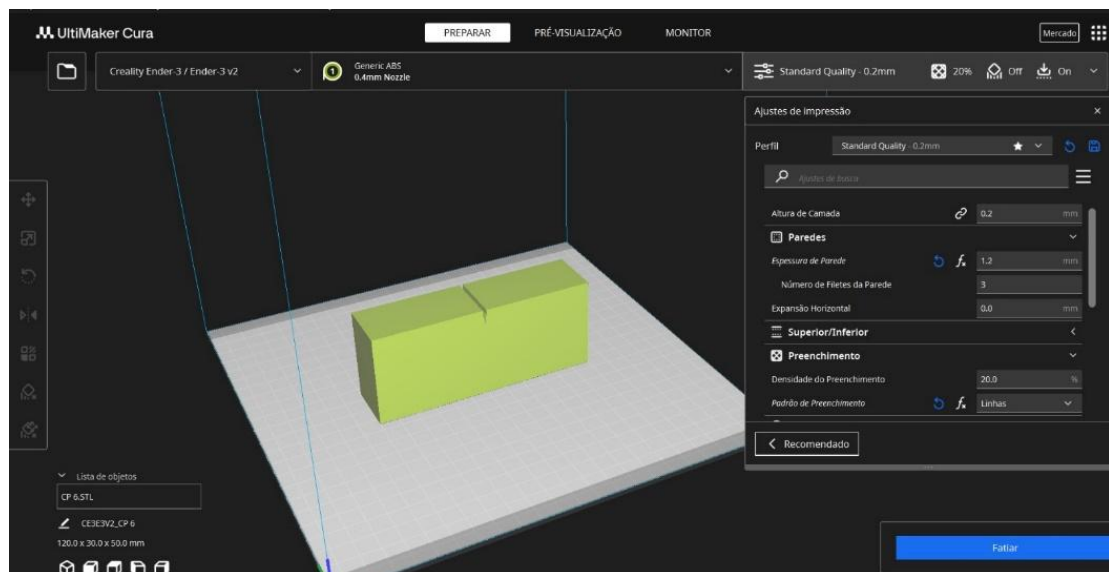
Figura 7– Especificação geométrica das estruturas (em milímetros).



Fonte: Autor.

Através do *software* de código aberto UltiMaker-Cura são criados os códigos G do desenho digital para o processo de impressão das amostras, contendo os padrões de impressão e configuração da impressora 3D (Figura 8), assim como estabelecendo a variação do preenchimento das amostras. Os padrões estabelecidos para as impressões são vistos na Tabela 1 e ilustrado na Figura 9.

Figura 8 - Amostra no *Software* Ultimaker-Cura.



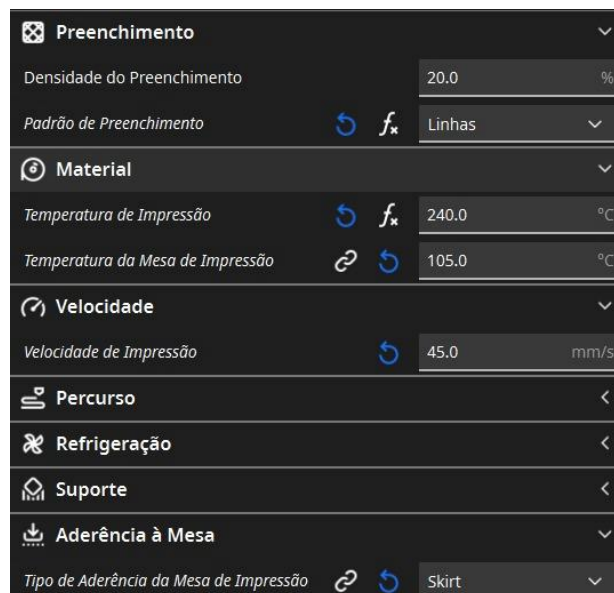
Fonte: Autor.

Tabela 1– Valores estabelecidos como parâmetros de impressão.

Parâmetros utilizados para impressão	
Velocidade de impressão (mm/min)	45
Altura de camada (mm)	0,2
Camadas externas (mm)	1,2
Temperatura de mesa (°C)	105
Temperatura de impressão (°C)	240
Tipo de aderência	Aba
Tipo de preenchimento	Linhas

Fonte: Autor.

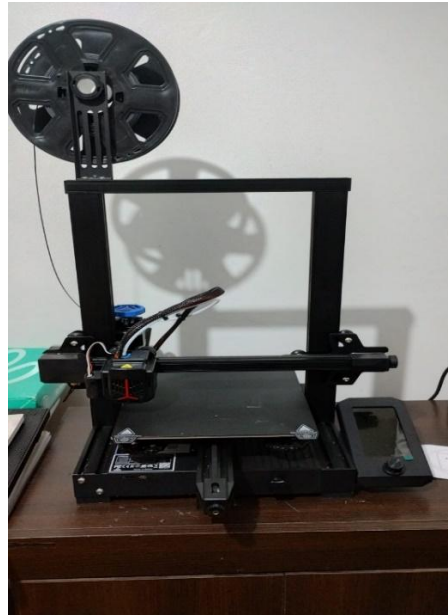
Figura 9 - Parâmetros utilizados no Ultimaker-Cura.



Fonte: Autor.

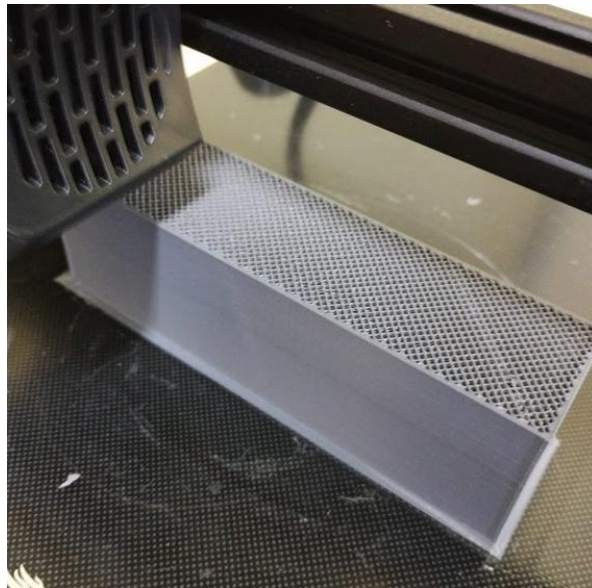
As amostras foram produzidas em impressora MFD modelo Ender V3- neo (Figura 10) em ABS, com a variação de 30, 40 e 50% do preenchimento interno, utilizando o padrão de preenchimento em linhas. Na Figura 11, mostra o preenchimento interno durante a impressão da amostra de 40%.

Figura 10 – Impressora Ender V3- neo.



Fonte: Autor.

Figura 11– Impressão 3D da amostra de 40% de preenchimento interno.

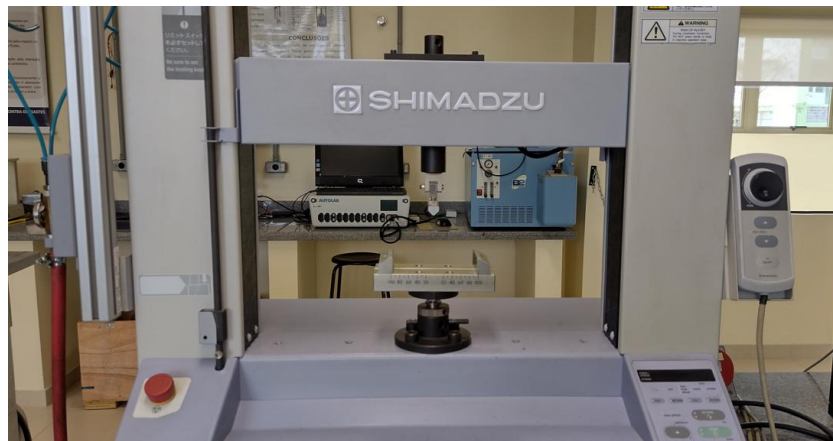


Fonte: Autor.

3.2 Ensaio de flexão de três pontos

Os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório de Ensaios Metalográficos da UNIPAMAPA em Alegrete por meio da máquina de ensaios Shimadzu modelo Autograph AGS-X, Figura 12, com capacidade de carga de 5kN.

Figura 12 – Configuração do ensaio de flexão.

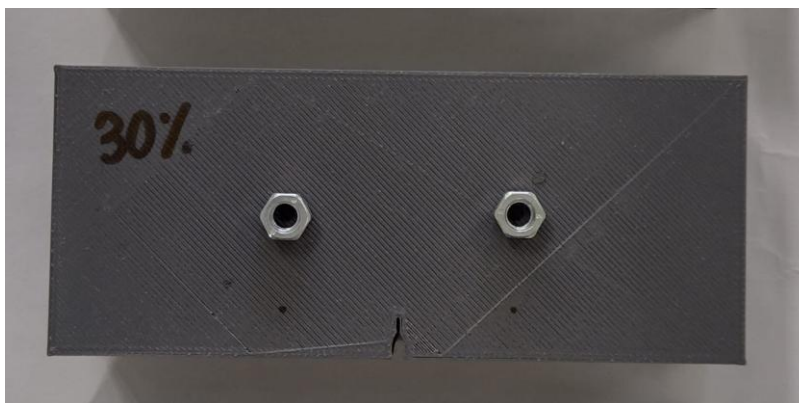


Fonte: Autor.

O equipamento de ensaio de flexão estabelece comunicação com um computador por intermédio do *software* disponibilizado pelo fabricante. Tal conexão viabiliza a configuração de parâmetros do ensaio, bem como o registro do tempo, força e deslocamento aplicado. Uma velocidade constante de 0,5mm/min será utilizada.

Foram ensaiadas três amostras impressas 3D em ABS de preenchimentos internos distintos entre eles. Na Figura 13, mostra a amostra de 30% de preenchimento pronta para ensaio experimental.

Figura 13– Estrutura impressa 3D com 30% de preenchimento.



Fonte: Autor.

Durante o ensaio de flexão, a aplicação de forças induz deformações na estrutura, resultando em microfissuras, trincas ou outros danos. Estes sinais emitidos durante o ensaio de flexão até a ruptura, serão coletados por dois acelerômetros (Figura 14) da fabricante PCB Piezotronics modelo 352c0 juntamente com o *hardware* e o *software* de aquisição RT Pro

Photon version 7.2000, Library Version 7.2000, Hybrid Server Version 1.00 da Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S.

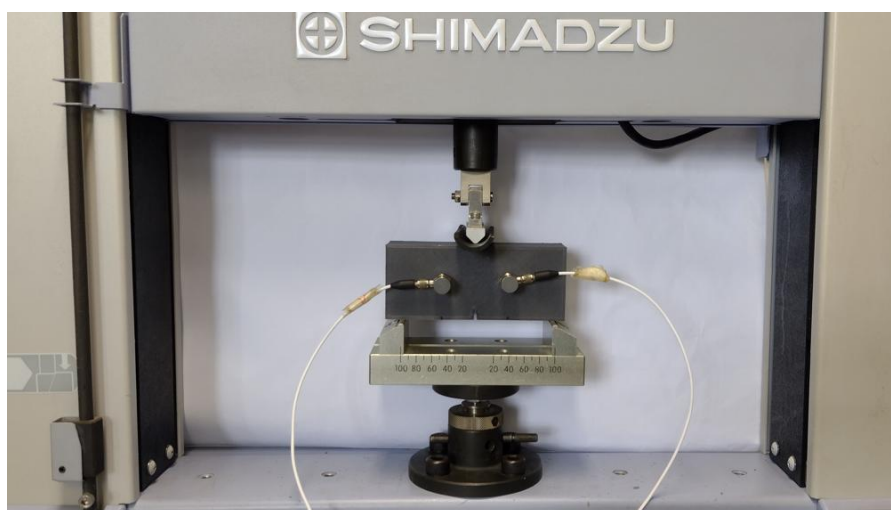
Figura 14 – Exemplo de acelerômetro utilizado nos ensaios de EA



Fonte: Autor.

Para os testes, os acelerômetros foram fixados na superfície frontal das amostras, como mostra a Figura 15, e ligados ao *hardware* conectado em um computador com o *software* de aquisição.

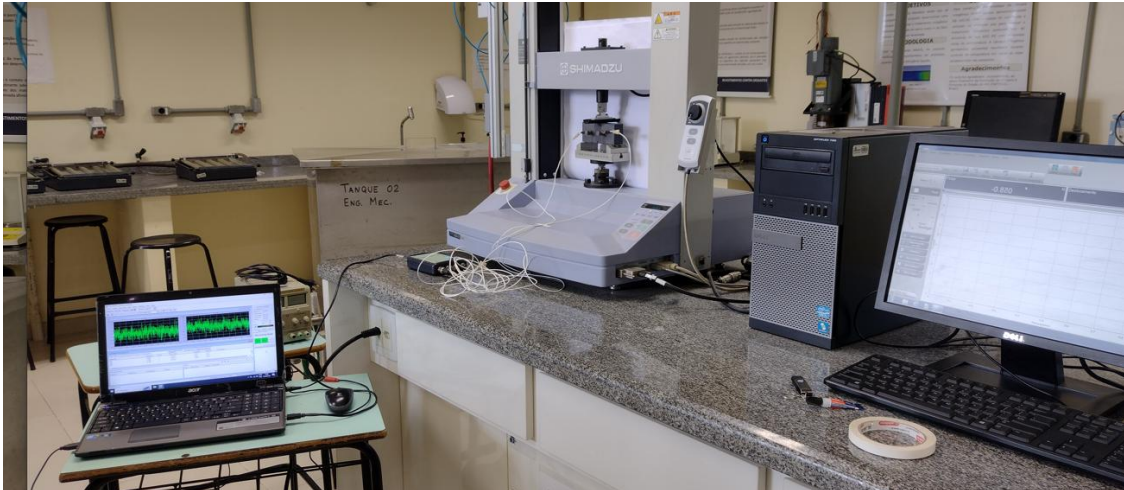
Figura 15– Modo de fixação das estruturas no equipamento de teste.



Fonte: Autor.

Na Figura 16, observa-se a configuração completa destinada à realização dos ensaios nas amostras. Nela, é possível visualizar, à esquerda, a análise instantânea da aquisição dos sinais, no centro, o dispositivo de teste, e à direita, o computador equipado com o *software* pertinente ao mencionado equipamento.

Figura 16– Configuração para realização dos ensaios de emissão acústica.



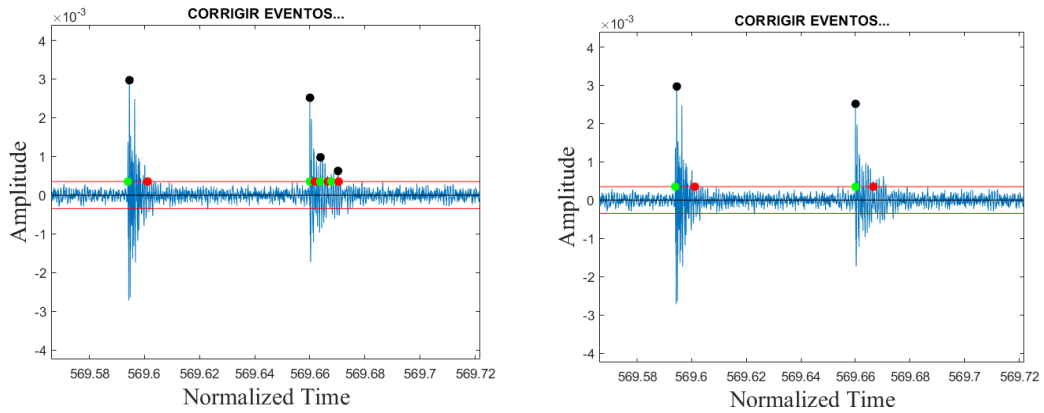
Fonte: Autor.

3.3 Análise do sinal de EA

Os sinais de emissão acústica foram experimentalmente registrados por meio dos acelerômetros posicionados na superfície das amostras. Os acelerômetros desempenham a função de converter as ondas recebidas resultantes da propagação de trincas em sinais elétricos. A identificação dos parâmetros de emissão acústica foi realizada por meio do *software* MATLAB, permitindo, inicialmente, a contagem e classificação dos eventos obtidos por meio experimental, sendo possível o ajuste manual da seleção dos eventos, como ilustrado na figura 17.

Foi realizado uma análise no domínio do tempo (amplitude vs. tempo), resultando na identificação e determinação de parâmetros, tais como amplitude máxima, energia de emissão acústica, a duração e eventos acumulados. Esses parâmetros fornecem uma visão comportamental inicial da emissão acústica nas amostras, indicando possíveis intervalos de tempo nos quais os danos no material em análise são concentrados e como o comportamento deste se modifica.

Figura 17– Onda de emissão acústica a) antes do ajuste e b) ajustada.



Fonte: Autor.

A figura 17, mostra a identificação e correção dos parâmetros das ondas de emissão acústica, onde os pontos destacados em verde e vermelho indicam o início e fim do evento, o ponto destacado em preto identifica a amplitude máxima captada deste sinal de emissão acústica.

Com a identificação do início-fim e a amplitude máxima dos sinais foi possível analisar diversos parâmetros de cada sinal que são 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 foram 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 frequências média (AF) e o ângulo de subida (RA).

Após a análise detalhada da emissão acústica em cada amostra, foi realizado um comparativo do número de eventos coletados, considerando a variação do preenchimento interno de cada uma. Avaliando como diferentes densidades de preenchimento em materiais impressos 3D influenciam a quantidade e a intensidade dos eventos de emissão acústica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos eventos de Emissão Acústica

Na etapa experimental deste estudo foi conduzida utilizando dois acelerômetros para registrar os sinais de emissão acústica (EA) em cada amostra. Contudo, nesse tópico, para os resultados foram considerados apenas os dados obtidos pelo acelerômetro 1, uma vez que os sinais captados por ambos os dispositivos apresentaram resultados equivalentes.

4.1.1 Atividade de EA

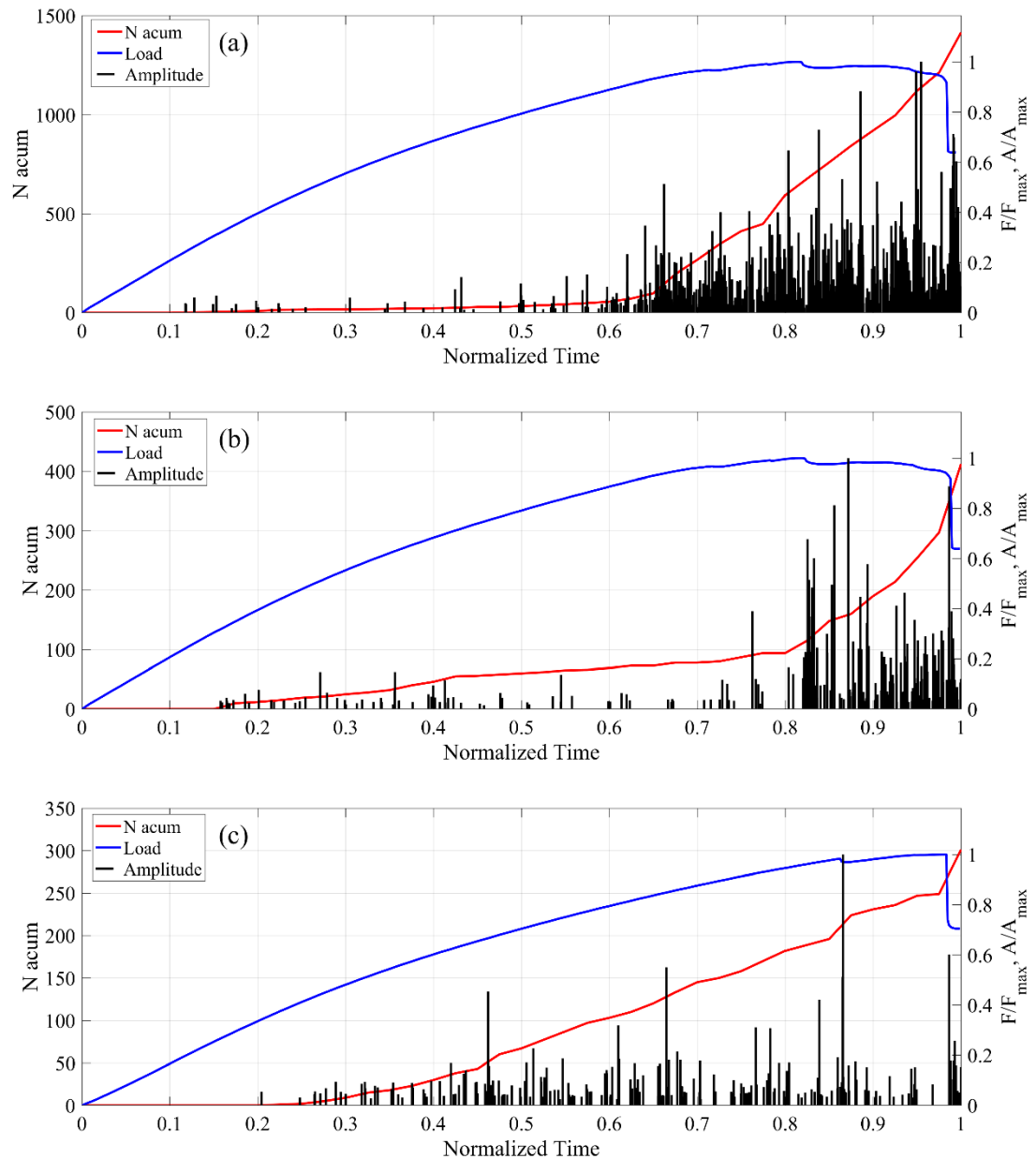
A análise dos resultados no domínio do tempo possibilita a observação das características gerais dos ensaios de EA. Conforme ilustrado na Figura 18, são apresentadas as amplitudes máximas, o número de eventos acumulados ao longo do carregamento, em função do tempo normalizado.

Observa-se que os eventos de emissão acústica têm início no momento em que 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.

Nota-se que as amostras de diferentes densidades apresentam resultados similares. No início dos ensaios, ocorrem vários eventos com amplitudes pequenas nas três amostras. À medida que as amostras se aproximam-se da falha do material, representada pelo pico de carregamento, observam-se eventos com amplitudes maiores. Após a falha, ainda é registrada uma intensa atividade de emissão acústica em ambos corpos de prova.

Nas amostras com 30% e 40% de preenchimento, verifica-se que a curva do número acumulado de eventos (N_{acum}) inicia com uma inclinação relativamente baixa. À medida que ocorre um aumento na frequência e na amplitude dos eventos registrados, observa-se uma transição para uma inclinação significativamente mais pronunciada. Já a amostra de 50% de preenchimento para ter um aumento do número de eventos quase que linear até a fratura.

Figura 18– Resultados de EA das amostras com preenchimento a) 30%, b) 40% e c) 50%.

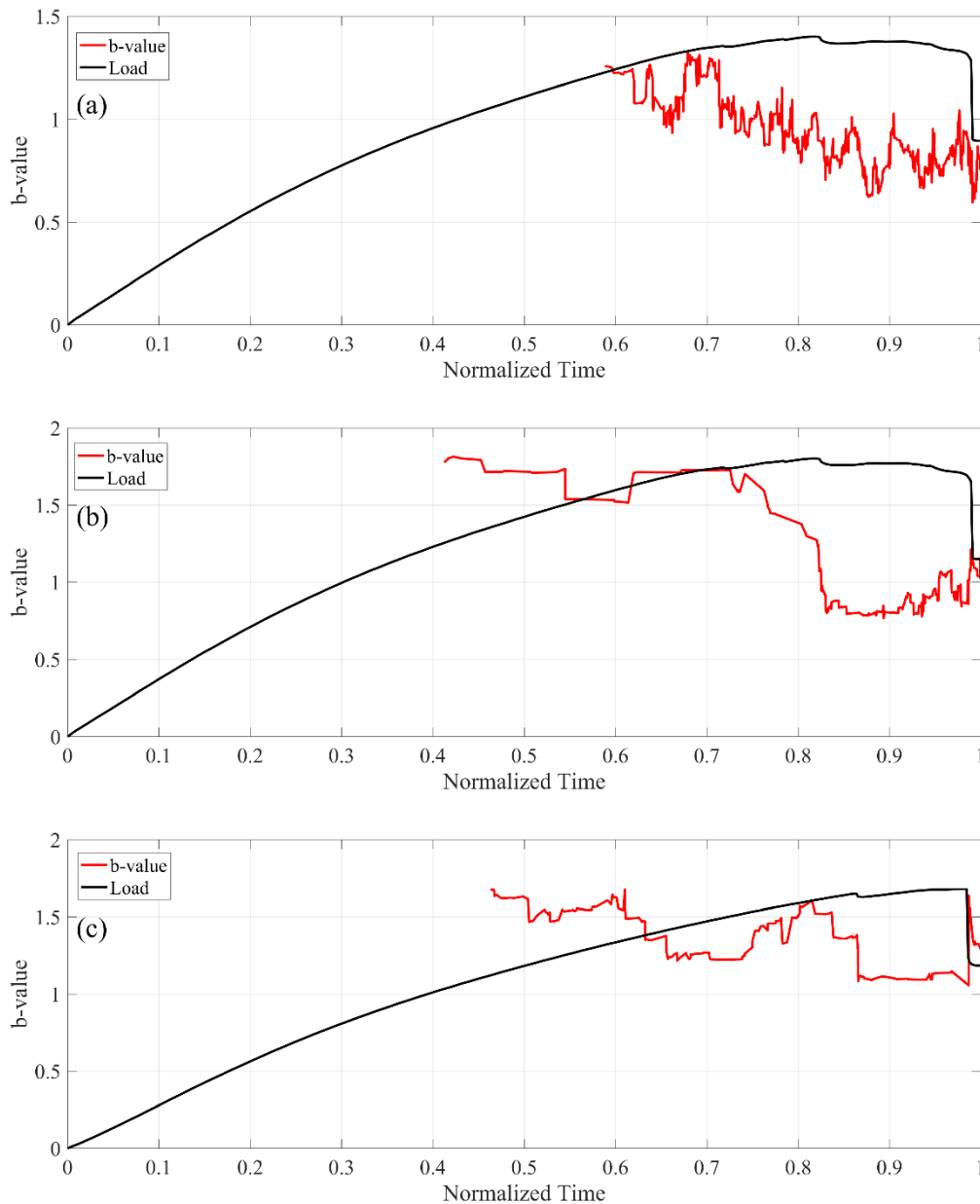


Fonte: Autor.

4.1.2 Avaliação da evolução do dano: valor- b

O valor- b é calculado considerando uma janela móvel de 50 eventos, ou seja, o valor- b no instante do evento 120, é calculado levando em conta o evento 1 ao 50, o valor- b no instante do evento 51 considera o evento 2 ao 51 e assim sucessivamente. Os resultados obtidos para o valor- b estão apresentados na Figura 19.

Figura 19- Valor- b para amostras de preenchimento a) 30%, b) 40% e c) 50%.



Fonte: Autor.

Dos resultados da Figura 19, nota-se quedas no valor- b conforme se aproximam da falha. Essa redução no valor de b indica uma concentração crescente de eventos de maior magnitude.

Na amostra com 30% de preenchimento, verifica-se que o valor de b inicia próximo de 1,2, seguido por um aumento gradual até alcançar aproximadamente 1,3. Esse comportamento sugere uma maior dispersão nos eventos de emissão acústica durante essa fase inicial. Entretanto, à medida que o carregamento avança, observa-se um declínio progressivo no valor de b , que atinge 0,8 no momento correspondente ao pico de carregamento da amostra.

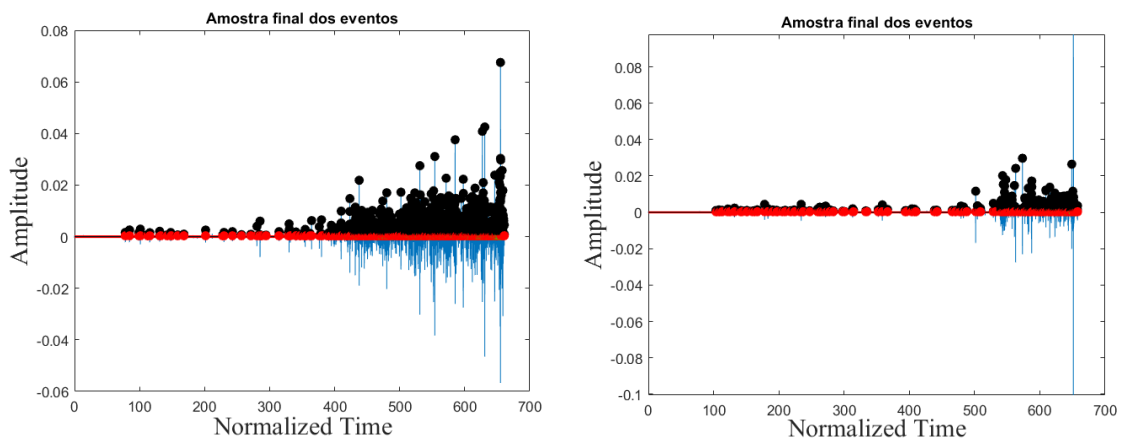
Na amostra com 40% de preenchimento, o valor de b apresenta-se inicialmente próximo de 1,8. Em seguida, observa-se um declínio progressivo, alcançando 0,8 no momento correspondente ao pico de carregamento. A amostra com 50% de preenchimento apresentou um valor inicial de b em aproximadamente 1,6, que diminuiu gradualmente até atingir 1,1 no momento correspondente ao pico de carregamento, refletindo o progresso do processo de dano no material.

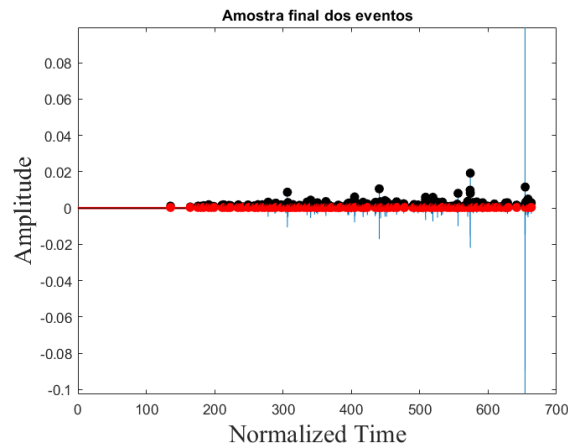
4.2 Influência do preenchimento dos corpos de prova

A amostra com 30% de preenchimento apresentou aproximadamente 3,5 vezes mais eventos de emissão acústica em comparação com as amostras de 40% e 50% de preenchimento, registrando um total acumulado de 1.414 eventos, em contraste com 412 e 405 eventos observados nas amostras de 40% e 50%, respectivamente.

A Figura 20 mostra os eventos obtidos durante os ensaios de emissão acústica para cada amostra, sendo possível a análise visual da diferença quantitativa de eventos nas amostras. A maior quantidade de eventos de EA na amostra com menor preenchimento pode ser atribuída a uma menor resistência estrutural interna, o que facilita o acúmulo e a liberação de energia em resposta ao estresse aplicado.

Figura 20 - Eventos de EA para as amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50% de preenchimento.

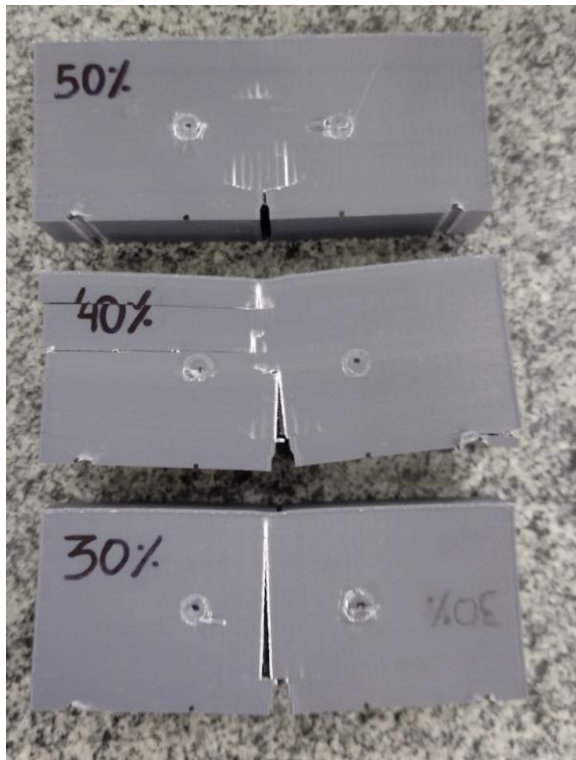




Fonte: Autor.

Esse aumento expressivo no número de eventos também pode estar associado ao modo de ruptura das amostras, conforme ilustrado na Figura 21. Observa-se que a amostra com 30% de preenchimento sofreu ruptura alinhada ao sentido da carga aplicada. Em contraste, as amostras com 40% e 50% de preenchimento apresentaram um comportamento distinto: embora a trinca inicial tenha se formado no sentido da carga, elas passaram a exibir estricção ao decorrer do ensaio e, eventualmente, romperam pelas laterais.

Figura 21– Amostras fraturadas após ensaio experimental de EA.

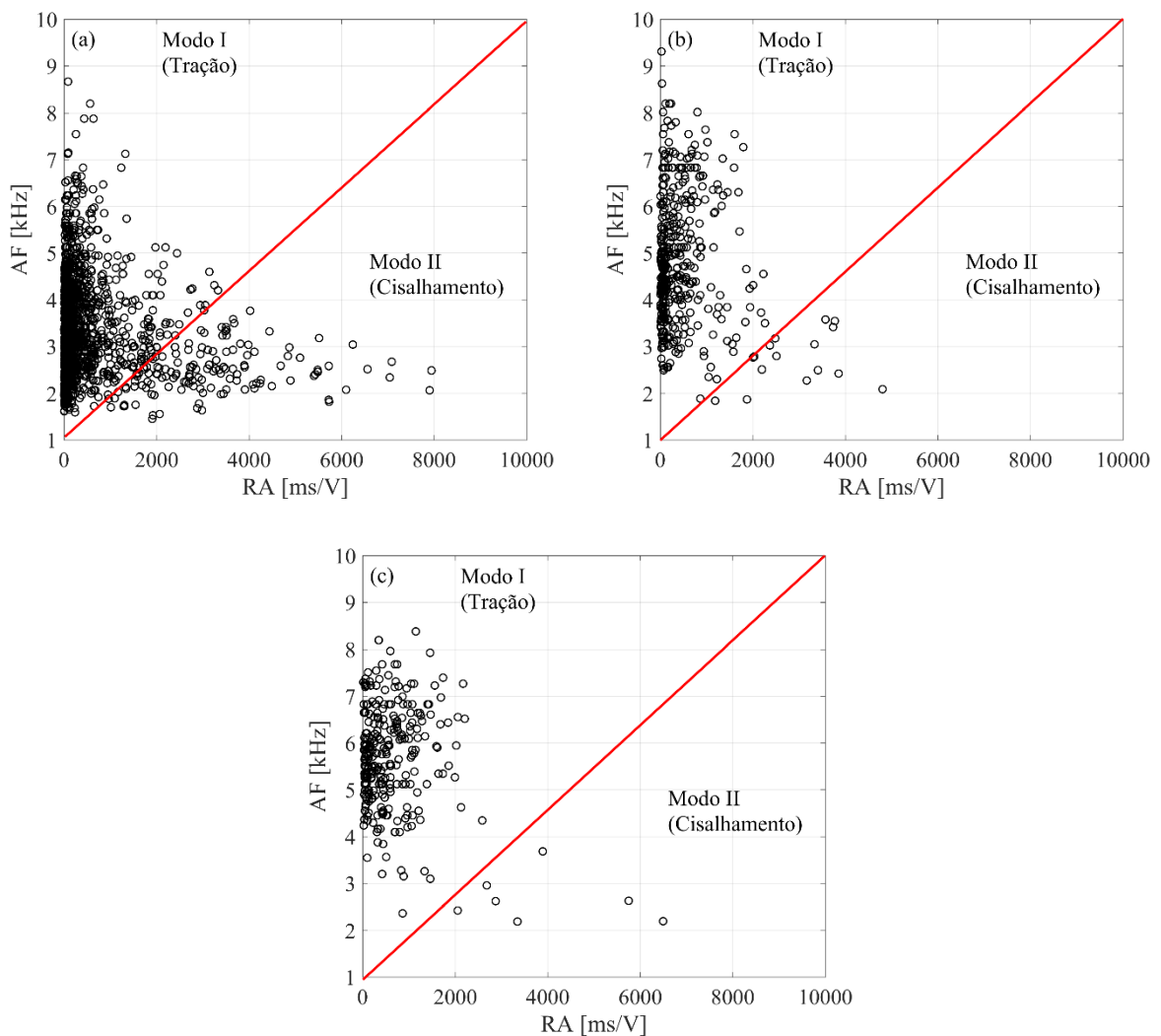


Fonte: Autor.

4.3 Identificação do modo de falha

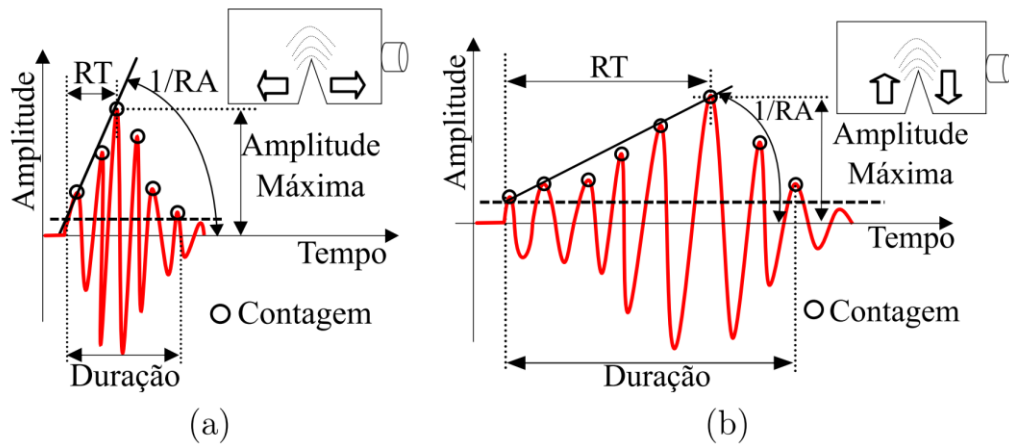
Com os parâmetros calculados dos sinais de EA, foi analisado o modo de falha predominante nas amostras (Modo I ou Modo II) a partir da correlação entre a frequência média (AF) e o ângulo de subida (RA). Essa avaliação de AF em função do RA permite identificar visualmente o modo de falha das amostras, como ilustrado na Figura 22 e 23, considerando uma escala de 10 vezes entre os eixos.

Figura 22– Modo de falha predominante nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.



Fonte: Autor.

Figura 23- Ondas acústicas características para (a) Modo I e (b) Modo II.

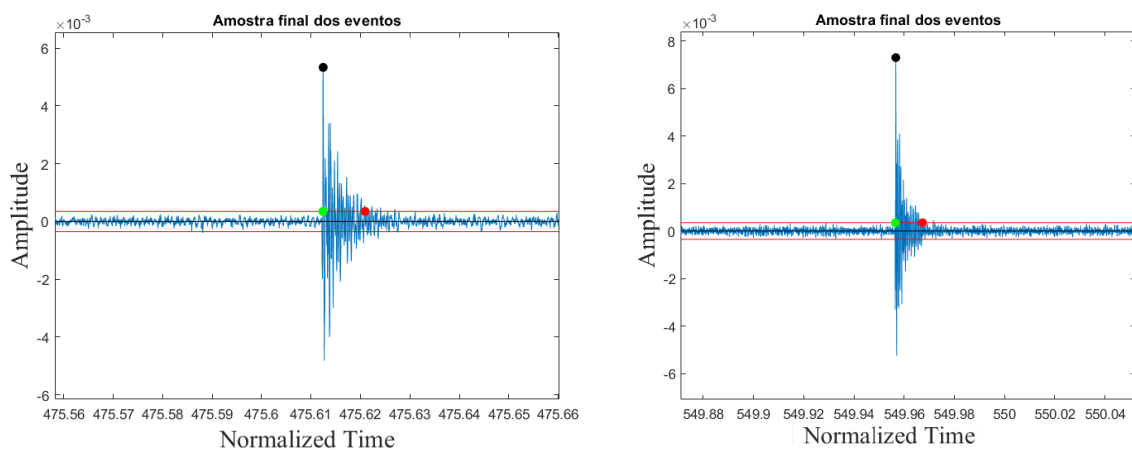


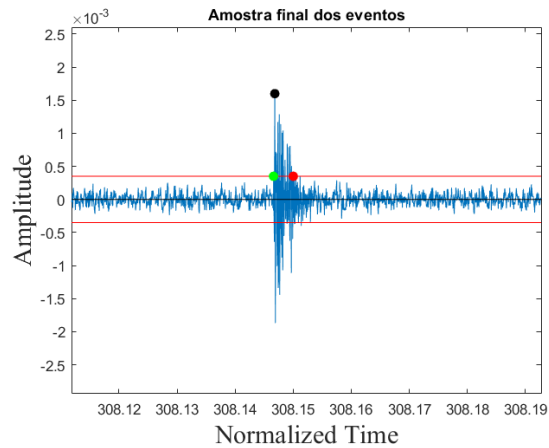
Fonte: Adaptado Aggelis (2012).

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.

As Figuras 24 e 25, ilustram os eventos típicos de tração (Modo I) e de cisalhamento (Modo II), respectivamente, coletados durante os ensaios das amostras impressas.

Figura 24 - Eventos de Modo I nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.

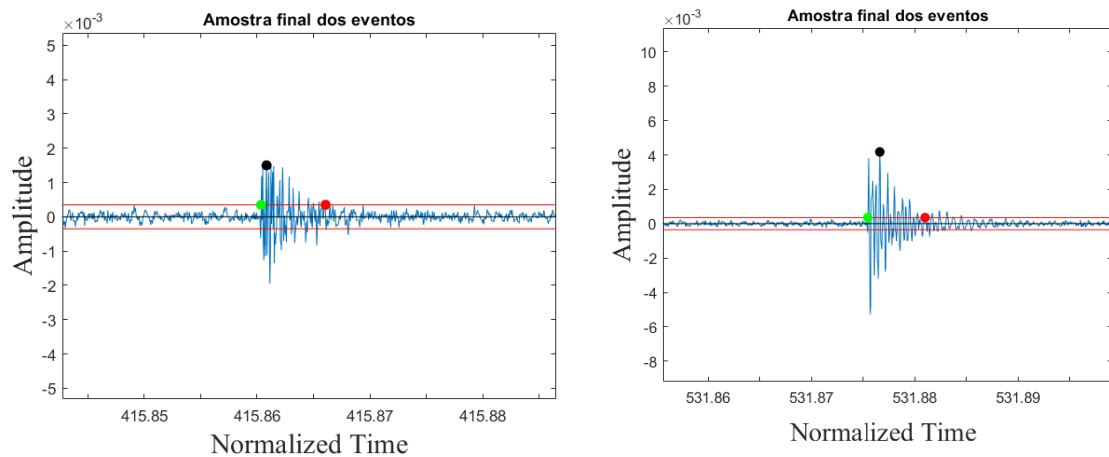


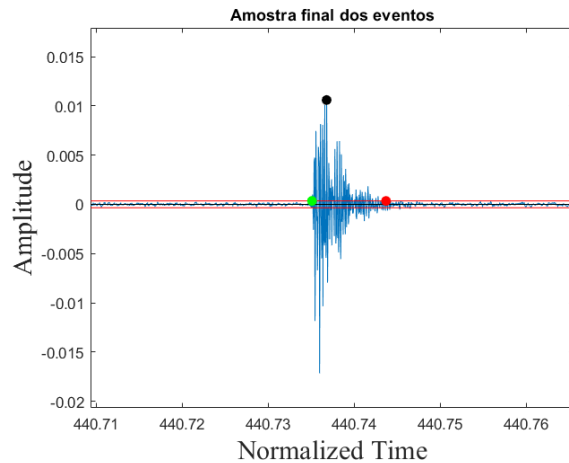


Fonte: Autor.

Ao analisarmos os modos de falha característicos obtidos pela relação R_{AxAF}, juntamente com a visualização da fratura das amostras após o ensaio de flexão, observa-se que embora as amostras de 40% e 50% de preenchimentos tenham cedido pelas laterais, os dados de EA estão em concordância com as fraturas experimentais das amostras, conforme observado anteriormente na Figura 21.

Figura 25 - Eventos de Modo II nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.

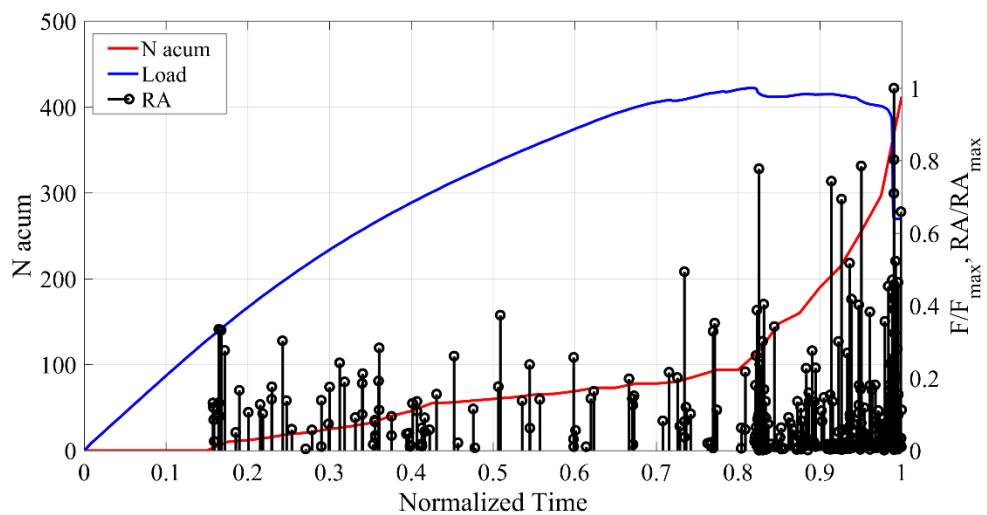




Fonte: Autor.

A Figura 26, mostra a evolução do parâmetro RA (normalizado em relação ao seu valor máximo de 4800 ms/V) para a viga com 40% de preenchimento. Como pode ser visto na Figura 21, a viga começou a falhar inicialmente a partir do entalhe central e posteriormente falhou pelo cisalhamento da lateral da amostra. Essa mudança do modo de falha pode ser vista na Figura 25, onde eventos com RA grande (ou seja, maiores que 2000) só aparecem no final do ensaio, justamente quando o modo mudou de I para II.

Figura 26– Modo de falha predominante nas amostras de a) 30%, b) 40% e c) 50%.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo, avaliou-se o processo de dano em vigas entalhadas impressas em 3D com diferentes porcentagens de preenchimento por meio da técnica de emissão acústica. Os parâmetros calculados através da TEA foram utilizados para identificar os pontos críticos que precedem a falha das amostras, valor-b, assim como determinar o modo de falha por meio da relação de frequência média (AF) e ângulo de subida (RA). A partir da análise dos resultados, pode-se concluir que:

- a) não há uma relação direta entre a atividade de EA (ou seja, do número máximo de eventos) e o percentual de preenchimento das amostras;
- b) os resultados do valor-b estão perfeitamente alinhados com o que se espera do parâmetro. A impressão 3D mostra-se uma ferramenta potencial para o estudo portanto, de outros parâmetros de monitoramento de estruturas;
- c) outro resultado promissor da aplicação da técnica da EA, foi a identificação do modo de falha predominante, que está de acordo com as observações feitas experimentais da fratura das amostras.

6 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.

Como sugestões para trabalhos futuros a respeito da técnica de EA e a utilização de amostras impressas 3D tem-se:

- Realizar ensaios de EA onde diferentes modos de falha sejam ativados, como por exemplo, um bloco com e sem um entalhe interno (simulando a presença de uma trinca);
- Aplicação da técnica da localização linear em estruturas;
- Aplicação de outros índices e parâmetros de monitoramento.

7 REFERÊNCIAS

- AGGELIS, D. G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters, **Mechanics Research Communications**, vol. 38, n. 3, p. 153–157, 2011.
- AGGELIS, D.G *et al.* Effect of wave distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials. **Construction And Building Materials**. vol. 35, p. 183-190, 2012.
- AGUIAR, Juliano de. **CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS CTOD POR ANÁLISE FRACTAL**. 2004. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.
- ALIHEIDARI, N. *et al.* Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers, **Polymer Testing** (2017), doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.03.016.
- BESKO, M. *et al.* Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão, Tecnologia e Inovação**. Vol.01 n.3, 2017.
- BURUD, N. B.; CHANDRAKISHEN, J.M. Response based damage assessment using acoustic emission energy for plain concrete. **Construction And Building Materials**. 2021.
- CAMPBELL, T. Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, **Atlantic Council**. 2011.
- CARPINTERI, A. *et al.* Structural damage diagnosis and lifetime assessment by acoustic emission monitoring, **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 74(1), p. 273 – 289, 2007.
- CARPINTERI, A. *et al.* From criticality to final collapse: Evolution of the "b-value" from 1.5 to 1.0, **Chaos, Solitons & Fractals**, vol. 41(2), p. 843–853, 2009.
- CASAGRANDE, C.A.; JOCHEM, L.F. LAB - Ciência, tecnologia e resistência dos materiais. Indaial: UNIASSELVI, 2019. 198 p. (2020).
- DUDESCU, M.C.; RACZ, L. Effects of Raster Orientation, Infill Rate and Infill Pattern on the Mechanical Properties of 3D Printed Materials. **ACTA Universitatis Cibiniensis**. 2017.
- FILIPPIN, C. *et al.* Emissão acústica: conceitos e aplicações. Instituto Lactec -UEG, 2017. 128 p
- FRIEDRICH, L. *et al.* **Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition**. **Composite Structures**, vol 256. 2020.
- GIRI, J. *et al.* Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process. **Materials Today: Proceedings**. 2021.
- GROSSE, C. U.; OHTSU, M. **Acoustic Emission Testing**. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- JUNG, D.Y. *et al.* Frequency Dependence of the b-Value Used for Acoustic Emission Analysis of Glass Fiber Reinforced Plastics. **Open Journal of Composite Materials**, 7, 117-129, 2017.

MAGALHÃES, A.L.R. Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D. 2019. 65 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Aeroespacial) — Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

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

PUGLIA, Vicente Bergamini. **Estudo da ruptura em materiais heterogêneos quase frágeis aplicando o método dos elementos discretos formado por barras juntamente com a técnica da emissão acústica**. 2014. 171 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

STAVRAKAS, I. *et al.* Acoustic Emission Analysis of Cement Mortar Specimens During Three Point Bending Tests. **Acoustic Emission Analysis Of Cement Mortar Specimens During Three Point Bending Tests**. p. 2283-2297. 2016

VALENTE, R.L. *et al.* 3D PRINTING PARAMETERS EFFECT ON THE FLEXURAL STRENGTH OF POLYLACTIC ACID (PLA) PARTS. 26th International Congress of Mechanical Engineering. 2021.

WANG, X. A 3d printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B*, v. 110, p. 442–458, 2017.