

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA EM ANÁLISE DE DANO EM
ESTRUTURAS REFORÇADAS COM FIBRAS

por

Anna Celia Wagner Maggi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2018

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA EMISSÃO ACÚSTICA EM ANÁLISE DE DANO EM
ESTRUTURAS REFORÇADAS COM FIBRAS

por

Anna Celia Wagner Maggi

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 2 de julho de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais Miguel e Suzana e ao meu irmão Breno, por todo o apoio ao longo desta realização.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Miguel e Suzana, por todo o apoio ao longo da minha vida e por todos os valores que me passaram. Se hoje cheguei aqui, foi graças aos esforços realizados pelos dois. Obrigada por serem meus amigos, antes de serem pai e mãe. Agradeço também pelo maior presente que já me deram, meu irmão Breno (o melhor irmão que alguém poderia ter), sempre disposto a me animar e incentivar a perseguir meus objetivos.

Agradeço ao meu namorado (e amigo) Breno por estar presente em todos os momentos deste curso, principalmente na realização deste trabalho. Obrigada por todo o companheirismo, carinho e dedicação, não só na minha vida acadêmica, mas em todos os dias de nossa união.

Um agradecimento especial às minhas avós, Eloáh e Nair, por todas as rezas e velas acesas e também à Deus e à todos os santos que atenderam às preces delas (e as minhas). E obrigada também, à minha “madinha” Glória, por sempre ter palavras de incentivo em todos os momentos que necessitei.

Agradeço ao professor Ignacio, meu orientador (não só neste trabalho), mas antes de tudo, amigo, por todo o conhecimento que me foi passado e ao amigo Gabriel Birck por toda ajuda concedida ao longo deste curso e pela participação especial na banca avaliadora.

Obrigada aos amigos feitos ao longo desta graduação, em especial Diego e Adriele, que sempre compartilharam aflições e alegrias comigo.

Por fim, gostaria de agradecer ao GMAp e aos professores Juan Pablo e Tiago Becker pelo auxílio no ensaio realizado.

*“Viva como se fosse morrer amanhã.
Aprenda como se fosse viver para sempre.”
Mahatma Ghandi*

MAGGI, A.C.W. **Aplicação da técnica da emissão acústica na análise de dano em estruturas reforçadas com fibra**. 2018. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Materiais compósitos encontram ampla aplicação em estruturas e componentes mecânicos. O polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV) detém propriedades de grande interesse para uso em engenharia, como baixo peso e alta resistência, o que justifica o seu estudo. Este trabalho tem como objetivo monitorar e avaliar o dano causado à uma amostra deste material utilizando a técnica da emissão acústica, ensaio não destrutivo passivo. Um ensaio de flexão em três pontos foi realizado sobre um corpo de prova composto por fibra de vidro em matriz poliéster e durante o ensaio o sinal de emissão acústica foi capturado. Posteriormente, avaliou-se os parâmetros de emissão acústica como amplitudes máxima e tempo de ocorrência dos eventos. Obteve-se o valor-*b* que permitiu avaliar o dano da estrutura ao longo do período de ensaio e pode-se concluir que o comportamento do material é semelhante ao encontrado na bibliografia da área. O interesse neste método de monitoramento de dano dá-se pela possibilidade de realizar o controle da integridade de diversas estruturas, como por exemplo, pontes, vasos de pressão e guindastes, tendo sido adotada recentemente como requisito de homologação de equipamentos como as cestas aéreas fabricadas de PRFV.

PALAVRAS-CHAVE: Emissão acústica, Materiais compósitos, Avaliação do dano.

MAGGI, A.C.W. **Application of acoustic emission techniques in the analysis of damage in fiber reinforced structures**. 2018. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

Composite materials have found wide application in the building of structures and mechanical components. Glass-fiber reinforced polymers (GFRP) possess properties such as light weight and high resistance which are of utmost interest for engineering applications, hence the interest in its study. The aim of this paper is to monitor and evaluate the damage caused to a GFRP specimen during damage process through acoustic emission testing, which is a non-destructive test method. A bending test was applied in a glass-fiber reinforced polymers proof body and the acoustic emission signals were recorded. Posteriorly, acoustic emission parameters were evaluated, such as maximum amplitude and occurrence time of the events. For that the damage of the structure in the period tested could be evaluated, it was obtained the *b*-value. It made possible to conclude that the behavior of the material is similar to what was found at bibliography. Attention was given to this method of observation of damage because it is capable of performing integrity control of a wide variety of structures such as bridges, pressure vessels and cranes, besides being implemented as a requisite for the approval of such equipment as electrically insulated aerial work platforms.

KEYWORDS: Acoustic emissions, Composite materials, Damage assessment.

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 2 |
| 2.1 Emissão Acústica..... | 2 |
| 2.1.1 Eventos de emissão acústica..... | 3 |
| 2.1.2 Ondas Elásticas..... | 4 |
| 2.1.3 Valor- <i>b</i> | 4 |
| 2.2 Modos de falha do material..... | 5 |
| 3. METODOLOGIA..... | 6 |
| 3.1 Determinação das propriedades geométricas e mecânicas da estrutura..... | 6 |
| 3.1.1 Massa..... | 7 |
| 3.1.2 Densidade..... | 7 |
| 3.1.3 Momento de inércia..... | 7 |
| 3.1.4 Módulo de elasticidade..... | 7 |
| 3.1.5 Frequência natural..... | 8 |
| 3.2 Aquisição dos eventos de emissão acústica..... | 9 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 10 |
| 4.1 Emissão Acústica..... | 10 |
| 4.2 Cálculo do valor- <i>b</i> | 11 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 14 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 15 |
| ANEXO I - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO..... | 15 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – (a) Layout da realização do ensaio de carga com registro de emissão acústica e (b) detalhe da fabricação lança de PRFV..... | 1 |
| Figura 1.2 – Registros da carga e amplitudes de eventos de emissão acústica pelo tempo para (a) estrutura rejeitada pelo teste e (b) estrutura aceita no teste..... | 2 |
| Figura 2.1 – Parâmetros de emissão acústica. Adaptado de Aggelis et al.,2013. | 3 |
| Figura 2.2 – Evolução do valor- <i>b</i> em teste experimental (Carpinteri et al.,2009)..... | 5 |
| Figura 2.3 – Tipos de falhas comuns em compósitos com fibras orientadas. Adaptado de Jung, 2016. | 6 |
| Figura 2.4 – Registros típicos de emissões acústicas de materiais compósitos formados por matriz e fibras, associadas a tipologias de rupturas característicos (a) no domínio tempo e (b) no domínio frequência. Adaptado de Haselbach e Lauke (2003). | 6 |
| Figura 3.1 – (a) Ensaio de flexão simples, (b) esquema da viga ensaiada e (c) rigidez da viga | 7 |
| Figura 3.2 – (a) Esquematização do corpo de prova ensaiado na flexão em três pontos e (b) gráfico da força pelo deslocamento. | 8 |
| Figura 3.3 – (a) Vista geral do corpo de prova na máquina de ensaio e (b) configuração final do corpo de prova ensaiado..... | 10 |
| Figura 3.4 – Corpo de prova (a) antes e (b) depois do ensaio, com detalhe da fratura. | 10 |
| Figura 4.1 – Sinal obtido pelo acelerômetro entre 68,3 e 68,4 segundos. | 11 |
| Figura 4.2 – Distribuição da amplitude normalizada pelo tempo normalizado. | 11 |
| Figura 4.3 – Gráfico da força de carregamento, amplitude normalizada e valor- <i>b</i> pelo tempo normalizado. | 12 |
| Figura 4.4 – Localização da região de Áquila na Itália, onde ocorreu um forte sismo em abril de 2009. Em vermelho indica-se a posição das falhas sísmicas na região. Fonte: Cotugno, 2016. | 13 |
| Figura 4.4 – Variação do valor- <i>b</i> na região de Aquila de fevereiro de 2008 a dezembro de 2010. A magnitude dos principais sismos em escala Richter são indicados no gráfico. Fonte: Cotugno, 2016. | 13 |
| Figura 4.6 – Valor- <i>b</i> para períodos (a) região I, (b) região II e (c) região III..... | 13 |
| Figura 4.7 – Três eventos típicos nas regiões (a) I, (b) II e (c) III, identificados na Figura 4.3 no domínio do tempo e da frequência. | 14 |
| Figura 4.8 – Gráfico do número de eventos instantâneos e número de eventos acumulados pelo tempo normalizado. | 14 |
| Figura AI 5.1 – Acelerômetro PCB 352A60. | 16 |
| Figura AI 5.2 – Equipamentos utilizados: (a) amplificador e computador com sistema de aquisição de dados Pulse e (b) máquina de ensaios Emic DL-2000. | 16 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Tabela 3.1 – Frequências naturais obtidas por análise numérica. Resultados obtidos utilizando o modelo dos elementos finitos empregando elementos de viga..... | 8 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

1. INTRODUÇÃO

A técnica de emissão acústica (TEA) é um método de destaque dentre os ensaios não destrutivos, pois, diferentemente dos demais ensaios, pode ser utilizado durante o carregamento da estrutura e não antes ou depois, como outros ensaios. Segundo Grosse et al. (2008), esta técnica é considerada não destrutiva, pois não necessita de aplicação de carregamento externo para sua aplicação. Desta forma, a emissão acústica pode ser utilizada para monitorar o desenvolvimento do dano de diversas estruturas e prever a falha antes do colapso. A TEA pode ser empregada em diferentes materiais, como metal, concreto, rochas ou plásticos, por isso ela é amplamente utilizada em vários setores da engenharia.

Outra característica marcante desta técnica é o tipo de informação obtida. A técnica da emissão acústica detecta ondas elásticas provenientes do dano (Grosse et al., 2008), e ela é classificada como um ensaio não destrutivo passivo, pois capta apenas sinais emitidos durante o processo de crescimento do dano. Sensores piezoelétricos são utilizados para captar os sinais provenientes das ondas elásticas.

O polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) é um material amplamente empregado na engenharia devido às vantagens apresentadas, como leveza e resistência de trabalho, entre outras, porém estão sujeitos a defeitos que podem ocorrer durante sua manufatura ou serviço (Dahmene et al., 2015), como delaminação, descolamento ou fratura das fibras, no caso de compósitos com fibras orientadas.

A motivação original deste trabalho deu-se após conhecimento de um processo de certificação realizado pela empresa IMAP (IMAP, 2018), que confecciona cestos aéreos isolados fabricados em polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), por razões de segurança (manter isolado o operário ao realizar atividades em redes elétricas). A partir da norma NBR16593:2017, a empresa realizou testes de emissão acústica para certificação do cesto de acesso com a lança metálica do equipamento apresentado na Figura 1.1 (a). Na Figura 1.1 (b) apresenta-se a construção da conexão da lança com PRFV. Este material pode apresentar fluência significativa em temperatura ambiente. O teste realizado consiste em medir a quantidade de atividade acústica (quantidade de emissões) durante ensaio de carga e descarga controlada sob o equipamento. Na Figura 1.2 (a) tem-se um registro de carga e descarga com atividade de emissão acústica indicada, em um caso no qual o equipamento não passou no teste e os resultados obtidos após modificações no processo de fabricação da estrutura de PRFV. Como se observa na comparação entre as Figuras 1.2 (a) e (b), após modificar-se o processo de fabricação, a atividade acústica na estrutura diminuiu drasticamente e o equipamento foi certificado.



Figura 1.1 – (a) Layout da realização do ensaio de carga com registro de emissão acústica e (b) detalhe da fabricação lança de PRFV.

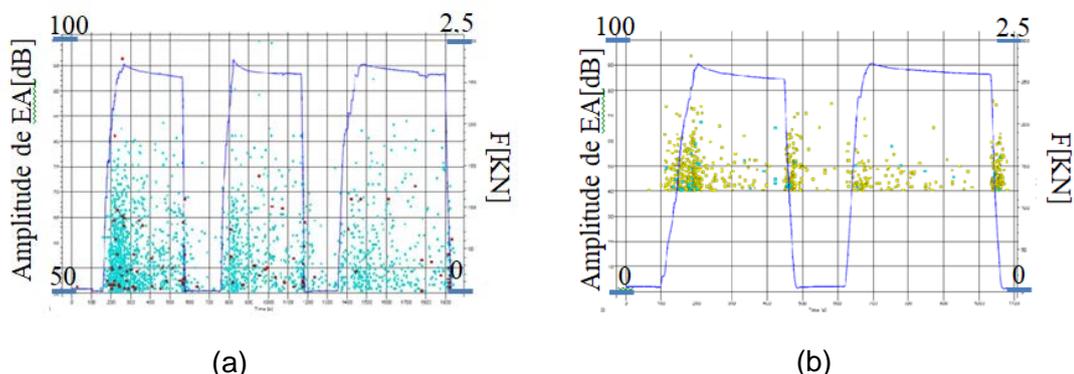


Figura 1.2 – Registros da carga e amplitudes de eventos de emissão acústica pelo tempo para (a) estrutura rejeitada pelo teste e (b) estrutura aceita no teste.

O conhecimento do problema citado motivou este estudo, procurando adquirir experiência na realização de ensaios de emissão acústica em PRFV com os equipamentos disponíveis no laboratório e utilizando técnicas de tratamento adequadas para interpretar os mesmos.

Objetivos: O presente trabalho tem como **objetivo geral** explorar as técnicas de emissão acústica na evolução do dano em estruturas de PRFV. Como **objetivos específicos** realizar: (a) ensaios de emissão acústica sobre um corpo de prova de geometria simples e (b) tratamento de dados adequados sobre os registros obtidos e interpretação dos mesmos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Emissão acústica

A técnica da emissão acústica, por identificar apenas danos que se desenvolveram durante o teste e captar sinais emitidos pelo dano gerado na própria estrutura, sem a necessidade de aplicação de carregamento externo, é classificada como um ensaio não-destrutivo passivo (Grosse et al., 2008). A cada trinca ou ruptura que se forma na estrutura, ocorre a propagação de sinais provenientes de movimentos dinâmicos da superfície que são captados por transdutores e convertidos em sinais elétricos, para que os parâmetros de interesse possam ser estudados.

Devido às características citadas, esta técnica usualmente é utilizada para monitoramento de estruturas como vasos de pressão, tubulações, pontes e construções históricas. Desta forma, a emissão acústica é utilizada para identificar a formação de novas trincas e o desenvolvimento dos danos já existentes, para permitir que falhas catastróficas possam ser previstas e evitadas (Shull, 2002).

A TEA apresenta algumas vantagens quando comparada a outros ensaios não-destrutivos. Por exemplo, pode ser aplicada durante o serviço da estrutura, ela é utilizada para uma análise global da mesma e não há a necessidade de movimentar os sensores para a percepção dos sinais. Como desvantagem desta técnica, pode-se citar que um teste particular não pode ser reproduzido de forma fiel, devido à heterogeneidade do material, desta forma, em tentativas de reprodução, obtém-se apenas sinais similares. Sendo assim, o teste de emissão acústica normalmente é acompanhado de outros métodos, como ultra-som, raio-X ou inspeção visual.

Segundo Carpinteri et al. (2008a, 2009), os sensores necessários para a captação dos sinais provenientes da emissão acústica em materiais compósitos devem ser de elevada sensibilidade, pois os sinais provenientes são de baixas amplitudes e elevadas frequências, normalmente em faixas de kHz a MHz. Os sensores ficam suscetíveis aos ruídos do ambiente, sendo necessário submeter o sinal à amplificação e filtro. No caso particular do estudo realizado, a frequência de corte dos acelerômetros utilizados (captam até 20kHz) representa um limite muito baixo para a captação de sinais de emissão acústica, tendo sido um dos condicionantes para determinar a utilidade do ensaio realizado.

A técnica da emissão acústica inicialmente foi empregada na área de sismologia, no estudo de estruturas de grandes dimensões (centenas de quilômetros) e são estudadas ao longo de anos. Posteriormente, com o desenvolvimento dos sensores, muitos dos parâmetros de análise desenvolvidos para a área de sismologia foram aplicados na análise de estruturas de dimensões civis ($10^2 - 10^1\text{m}$), ou no estudo de ruptura de materiais ($10^0 - 10^{-2}\text{m}$). A este respeito pode-se consultar o trabalho capital de Richter (1958), onde propõe a escala utilizada atualmente para classificação da Magnitude Sísmica e o livro de Aki e Richards (2002) que apresentam os fundamentos da sismologia moderna.

2.1.1 Eventos de emissão acústica

Cada evento de emissão acústica pode ser caracterizado por alguns parâmetros, como ilustrados na Figura 2.1 e o sinal é considerado um evento quando ultrapassa um limite de amplitude determinado pela faixa limite.

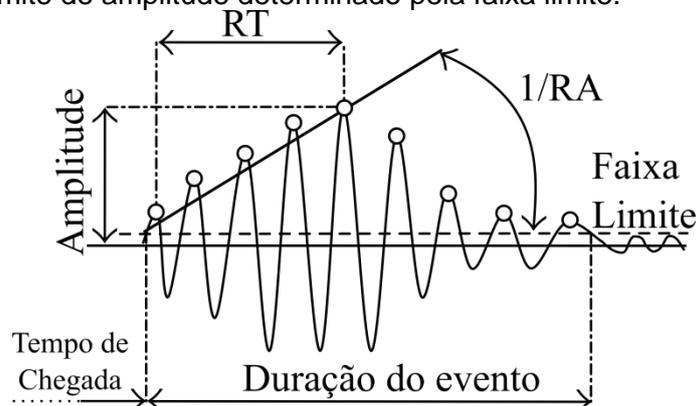


Figura 2.1 – Parâmetros de emissão acústica. Adaptado de Aggelis et al.,2013.

Além dos parâmetros descritos a seguir, outra forma de caracterizar o evento é verificar se a sua faixa de frequência corresponde à frequência esperada para um sinal de emissão acústica ou se é apenas uma vibração natural da estrutura estudada.

- **Amplitude:** valor máximo de amplitude do sinal. A amplitude está diretamente relacionada com a magnitude do evento e representa a resposta do sensor à emissão da fonte após a perda de energia devido à propagação da onda;
- **Duração do evento:** tempo de duração do sinal;
- **Faixa limite:** nível de valores de amplitude, a partir do qual, o sinal é considerado um evento de emissão acústica;
- **Tempo de chegada:** tempo até que a faixa limite seja cruzada pela primeira vez;
- **Tempo de subida (RT):** intervalo de tempo entre o primeiro valor de amplitude acima da faixa limite até o valor máximo de amplitude do sinal;

- **Valor RA:** é a razão entre RT e a amplitude máxima do evento, em ms/V.

2.1.2 Ondas elásticas

A emissão acústica é a perturbação capturada pelo sensor devido à propagação de ondas elásticas que viajam da região onde ocorre a ruptura interna até o sensor. Estas ondas interagem de forma complexa com dimensões finitas da estrutura e com irregularidades do material antes de chegar ao sensor. Considerando-se um volume sólido infinito elástico isótropo e homogêneo que sofre uma perturbação em uma posição deste domínio, ter-se-ão dois tipos de ondas elásticas, as principais são as ondas-P, relativas à mudança de volume, e as ondas-S, associadas à mudança de forma no contínuo. A onda-P se desloca no material como uma série de compressões e trações, sendo uma onda mais veloz. Como ela tem uma velocidade de propagação característica e a emissão acústica tem sempre uma componente de onda-P, ao combinar-se informações de vários sensores com o tempo de chegada das emissões ao sensor, é possível identificar a região onde se produz a ruptura interna que gerou a emissão (Shull, 2002).

A velocidade de propagação da onda está relacionada diretamente com o material. Segundo Potel e Bruneau (2009), as expressões para as velocidades da onda-P (v_p) e da onda-S (v_s) são:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.2)$$

onde E é o módulo de elasticidade, em Pa, ρ é a densidade do material, em kg/m^3 e ν é o coeficiente de Poisson. Outros tipos de ondas, como as ondas de Rayleigh e ondas de Lamb, surgem devido a heterogeneidade do material e das reflexões e refrações que possam acontecer dos dois tipos básicos de ondas indicados.

2.1.3 Valor- b

O valor- b é um parâmetro que muda ao longo do desenvolvimento do dano. O grande número de microfissuras geradas no início do dano acarreta em vários eventos de emissão acústica de baixa amplitude. Na sequência, as microfissuras geram menos eventos, mas de maior amplitude. Segundo Carpinteri et al., 2009, o valor- b progressivamente diminui seu valor enquanto o dano da estrutura aumenta.

O valor- b surge a partir da análise estatística da distribuição de amplitudes dos sinais de emissão acústica que são captados durante o carregamento da estrutura. Desta forma, calcula-se a frequência com que eventos de determinadas amplitudes ocorrem ao longo de um período de tempo. O estudo do valor- b começa com a expressão da magnitude (m) da amplitude (A) do evento, na equação 2.3.

$$m = \log A \quad (2.3)$$

A lei de Gutenberg-Richter (GR) (Shiotani, 1994) descreve a distribuição estatística do sinal de amplitudes da emissão acústica:

$$N(\geq A) = \zeta A^{-b} \quad (2.4)$$

Sendo ζ o coeficiente que caracteriza o comportamento do modelo e N o número de sinais de emissão acústica com amplitude maior ou igual a A . Assim, o valor- b caracteriza a frequência relativa dos eventos de baixa amplitude em comparação com os eventos de alta amplitude. Um valor- b de pequena magnitude indica a presença de poucos eventos de grande amplitude, já um valor- b alto indica o contrário. Para obter o valor- b , aplica-se logaritmo na expressão:

$$\text{Log}N = \text{Log}\zeta - b * m \quad (2.5)$$

Na última expressão, observa-se que o valor- b é o coeficiente angular da tendência linear do gráfico em escala logarítmica do número de eventos acústicos acumulados e sua amplitude. A Figura 2.2 ilustra como o valor- b em geral varia durante o processo de dano em estruturas. Vários autores, entre eles Carpinteri et al. (2009) e Aki e Richards (2002) discutem o significado físico do valor- b , propondo que o mesmo poderia ser interpretado como a dimensão fractal do domínio sobre o qual emanam as fissuras, sendo que num começo este domínio é um volume ($b = 1,5$; $D = 3,2xb$). Pode-se dizer que os eventos podem ser emitidos a partir de qualquer região do corpo estudado, mas quando ocorre o avanço do processo de dano, este tende a se concentrar em uma determinada localização e os eventos emanam de uma região específica com dimensões próximas a uma superfície ($b = 1$; $D = 3,2xb$). Quando isto acontece, há a diminuição do número de eventos, porém de maior magnitude. Tal interpretação não é um consenso na comunidade científica, mas não deixa de ser uma interpretação interessante da realidade.

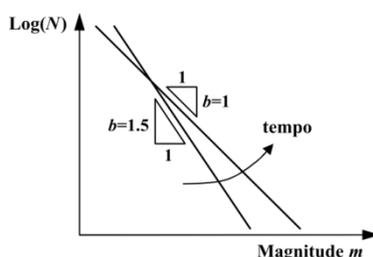


Figura 2.2 – Evolução do valor- b em teste experimental (Carpinteri et al.,2009).

2.2 Modos de falha do material

O PRFV é um material compósito constituído por uma matriz de resina, normalmente poliéster, reforçada com fibras de vidro, que confere resistência mecânica e química ao material. Materiais compósitos com fibras orientadas podem sofrer com vários tipos de fratura (Jung et al., 2016), como quebra da matriz, descolamento entre fibra e matriz e fratura da fibra (Figura 2.3). Segundo Hausebach e Lauke (2003), tais modos de fratura produzem padrões de eventos característicos que são apresentados na Figura 2.4.

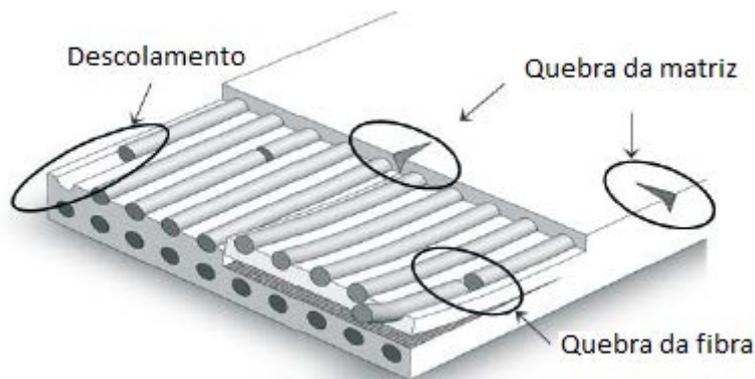


Figura 2.3 – Tipos de falhas comuns em compósitos com fibras orientadas. Adaptado de Jung, 2016

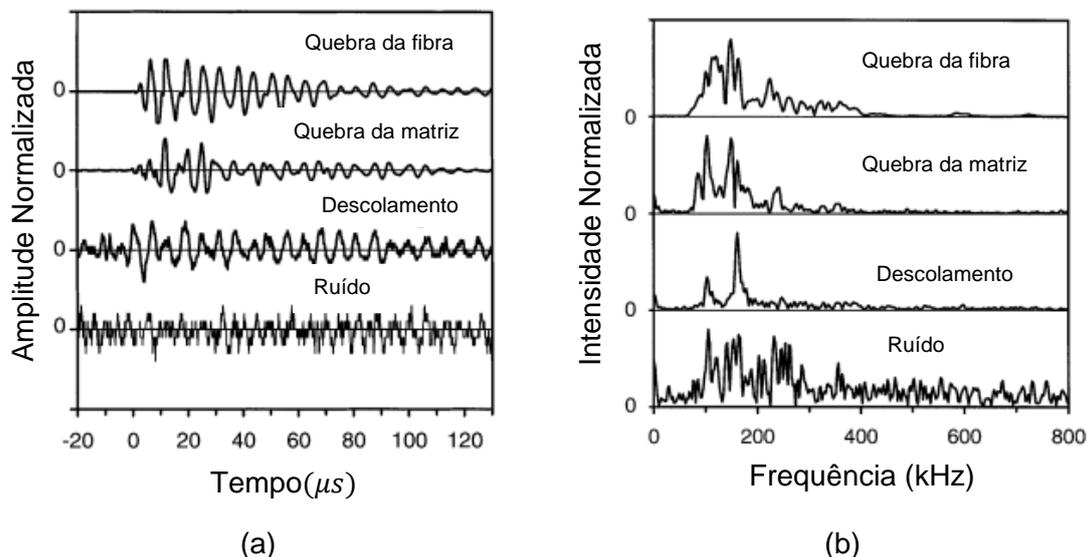


Figura 2.4 – Registros típicos de emissões acústicas de materiais compósitos formados por matriz e fibras, associadas a tipologias de rupturas característicos (a) no domínio tempo e (b) no domínio frequência. Adaptado de Haselbach e Lauke (2003).

3. METODOLOGIA

3.1 Determinação das propriedades geométricas e mecânicas da estrutura

O estudo da emissão acústica foi realizado a partir de um corpo de prova composto por fibra de vidro e resina poliéster (PRFV – polímero reforçado com fibras de vidro) sendo necessário, inicialmente, caracterizá-lo em termos de suas propriedades mecânicas. O PRFV é um composto de resina acrescida de inúmeros filamentos de fibra de vidro extremamente flexíveis, que conferem alta resistência à tração, flexão e impacto, tendo ainda a vantagem de ser um material leve e isolante elétrico. Existem diversas maneiras de fabricar uma peça em PRFV, o método adotado depende da aplicação do componente. Pode-se realizar a laminação manual, ou laminação contínua. Os detalhes sobre o processamento podem ser encontrados em Akovali (2001). A peça estudada é fabricada pelo procedimento de laminação manual

com fibras dispostas aleatoriamente na matriz. A seguir, discriminam-se as propriedades mecânicas e geométricas da estrutura estudada.

3.1.1 Massa

Para conferir a massa do corpo ensaiado, utilizou-se uma balança calibrada e obteve-se um valor de 181 ± 1 gramas.

3.1.2 Densidade

O cálculo da densidade foi feito a partir da medida de massa e do volume calculado pela geometria da amostra. O corpo de prova possui comprimento (l) de 0,39m, largura (b) de 0,16m e espessura (h) de 0,002m, resultando em um volume de $0,0001248\text{m}^3$ e uma densidade (ρ) de $1450,3\text{kg/m}^3$.

3.1.3 Momento de inércia

O momento de inércia (I) da seção retangular, segundo a equação 3.1, onde b é a largura do perfil e h é a altura resulta em $1,067E - 10\text{m}^4$.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.1)$$

3.1.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é determinado com um ensaio de flexão simples (Figura 3.1 (a) e (b)) aplicando pesos conhecidos na extremidade. Através do deslocamento medido foi calculado o módulo de elasticidade a partir da relação entre a força e o deslocamento da viga (Figura 3.1(c)), onde obtém-se a rigidez (K) de $801,2\text{N/m}$ do corpo de prova.

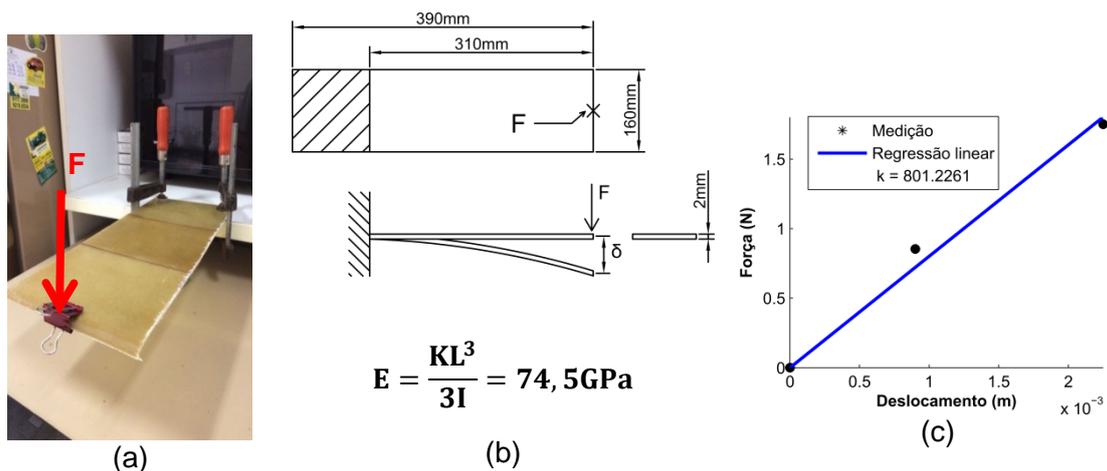


Figura 3.1 – (a) Ensaio de flexão simples, (b) esquema da viga ensaiada e (c) rigidez da viga.

A verificação do módulo de elasticidade foi feita a partir dos valores obtidos no ensaio de flexão em três pontos do corpo de prova ensaiado, conforme Figura 3.2(a),

no qual obteve-se o valor para a rigidez (K) da viga de 89,5N/mm na região elástica conforme o gráfico da Figura 3.2 (b). A velocidade do teste realizado foi de 0,1mm/s.

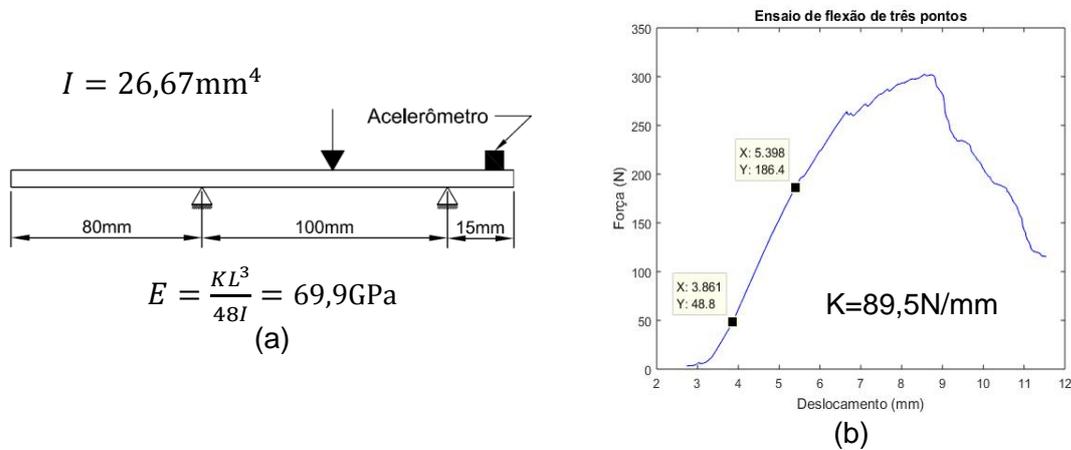


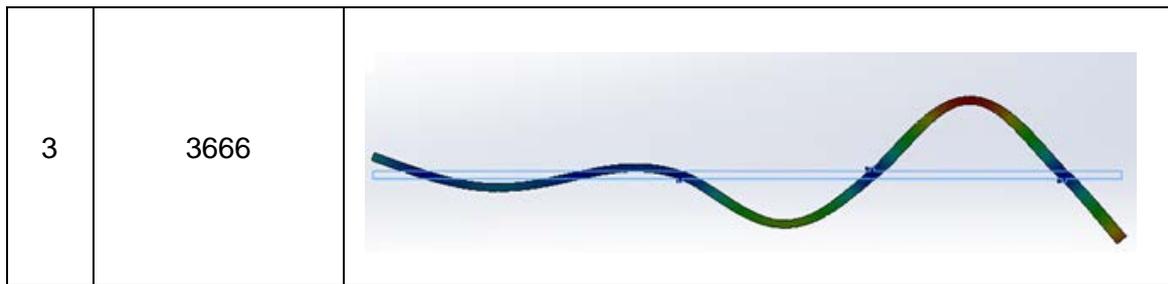
Figura 3.2 – (a) Esquematização do corpo de prova ensaiado na flexão em três pontos e (b) gráfico da força pelo deslocamento.

3.1.5 Frequência natural

Para possibilitar a distinção entre vibrações relativas à emissão acústica e vibrações naturais do corpo de prova, as três primeiras frequências naturais do corpo na configuração do ensaio, foram calculadas empregando *software* de elementos finitos com elementos de viga. Os resultados de frequência e modos de vibração estão Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Frequências naturais obtidas por análise numérica. Resultados obtidos utilizando o modelo dos elementos finitos empregando elementos de viga.

| Nº | Frequência (Hz) | Modo de vibração |
|----|-----------------|------------------|
| 1 | 318 | |
| 2 | 2021 | |



Para realizar a verificação das frequências obtidas numericamente, fez-se o cálculo do primeiro modo de frequência, considerando a equação 3.4 (Young and Richard, 2002), para uma viga engastada em uma extremidade e livre do outro, simulando o lado esquerdo da viga esquematizada na Figura 3.2.

$$f_n = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}} \quad (3.4)$$

$$E = 69,9 \text{ GPa} \quad I = 26,67 \text{ m}^4 \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad w = 1,4 \text{ N/m} \quad l = 80 \text{ mm}$$

Onde K_n é um coeficiente relativo ao modo de vibração (para este caso, $K_n = 22,4$), E é o módulo de elasticidade, em Pa, I é o momento de inércia, em m^4 , g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 , w é o peso distribuído da viga, em N/m , l o comprimento de viga considerado, em m e f_n resulta em rad/s. Assim sendo, o primeiro modo de vibração resultou em 320Hz. Como o resultado do modo fundamental calculado numericamente e o calculado utilizando a expressão 3.4 apresentam uma diferença ínfima assume-se que a simulação numérica apresenta valores condizentes com a realidade, tendo em vista que os dois resultados encontram-se na mesma ordem de grandeza.

3.2 Aquisição dos eventos de emissão acústica

O ensaio foi realizado no laboratório do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Foi utilizada uma prensa mecânica e um acelerômetro conectado a um sistema de aquisição de dados, tais equipamentos estão descritos no Anexo I. Um deslocamento prescrito como indicado na Figura 3.2 (a) foi aplicado e foram adquiridos os valores da força reativa correspondente ao deslocamento prescrito aplicado. A relação entre força e deslocamento obtida durante o ensaio encontra-se apresentada na Figura 3.2 (b). O sinal de emissão acústica foi registrado com o uso de acelerômetro medindo a amplitude de aceleração em mV durante todo o período do ensaio. O tempo de ensaio foi aproximadamente de 100 segundos. Na Figura 3.3 apresenta-se o corpo de prova sobre a máquina onde foi realizado o ensaio e uma vista da configuração final do corpo de prova. Na Figura 3.4 antes e após o ensaio é apresentado o corpo de prova.

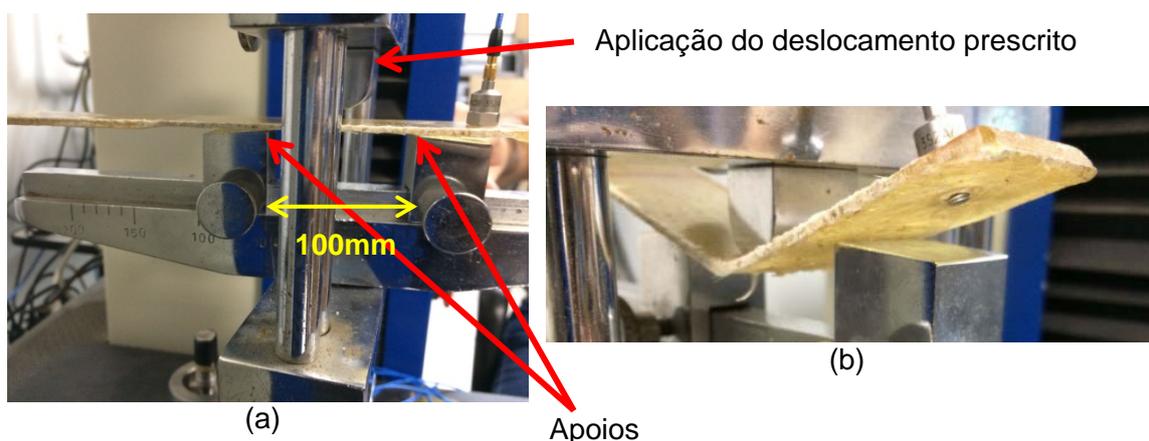


Figura 3.3 – (a) Vista geral do corpo de prova na máquina do ensaio e (b) configuração final do corpo de prova ensaiado.

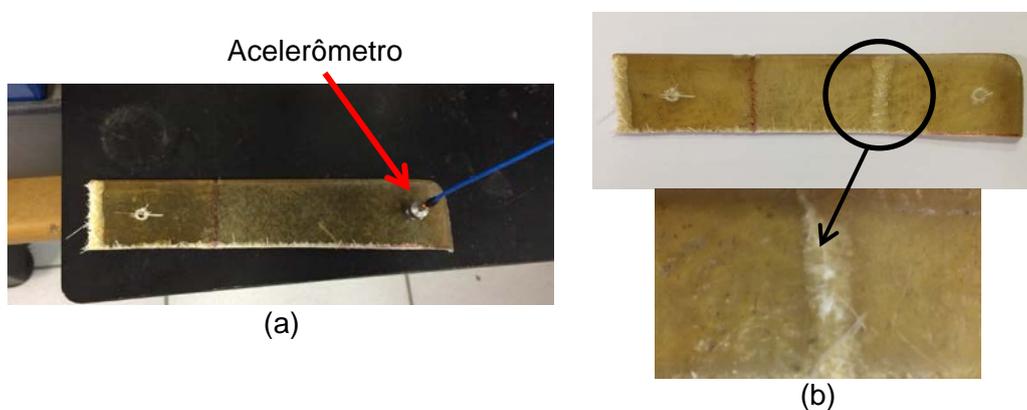


Figura 3.4 – Corpo de prova (a) antes e (b) depois do ensaio, com detalhe da fratura.

A análise da emissão acústica foi realizada a partir do sinal obtido pelo acelerômetro. A amplitude máxima do evento, seu respectivo tempo de ocorrência e o formato da onda foram identificados. Para distinguir os eventos acústicos de vibrações naturais da estrutura, foi necessário estabelecer uma faixa limite de amplitude para determinar o início e o fim dos eventos, tal valor foi arbitrado em 0,08473mV e foi estabelecido a partir de análise visual do sinal obtido. Os eventos foram selecionados manualmente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Emissão Acústica

O ensaio durou 151 segundos, porém a aquisição de dados deu-se a partir de 45 segundos. Por isso, considera-se a duração do ensaio de 105 segundos e foram captados 5962 eventos de emissão acústica durante este período. A Figura 4.1 mostra o sinal obtido pelo acelerômetro num período do ensaio e pode-se verificar a forma típica dos eventos de emissão acústica. Na Figura 4.2 é apresentada a distribuição de amplitudes normalizada ($A/A_{máx}$) pelo tempo normalizado (t/t_{total}) e se observa a ocorrência de alguns eventos de maior amplitude ao longo de todo o ensaio, porém a atividade é maior próximo ao colapso. Como o material é composto por fibras de vidro e resina poliéster, era esperado que ao longo de todo o ensaio alguns eventos fossem

de maior amplitude, devido à presença de possíveis defeitos de fabricação, bem como assentamento das fibras na matriz. No início do ensaio percebe-se uma atividade intensa, com alguns eventos de grande amplitude, tornando-se moderados entre 20 e 60% do tempo de ensaio. A seguir, tem-se altas amplitudes próximo da falha do corpo de prova em torno de 75% do tempo de ensaio).

No ensaio de certificação que motivou este estudo, tem-se como objetivo determinar se no processo de fabricação da estrutura em fibra de vidro não existe um número excessivo de defeitos ou se durante o processo as fibras não se mantêm perfeitamente unidas à matriz. Tais características podem ser detectadas realizando um ensaio de emissão acústica.

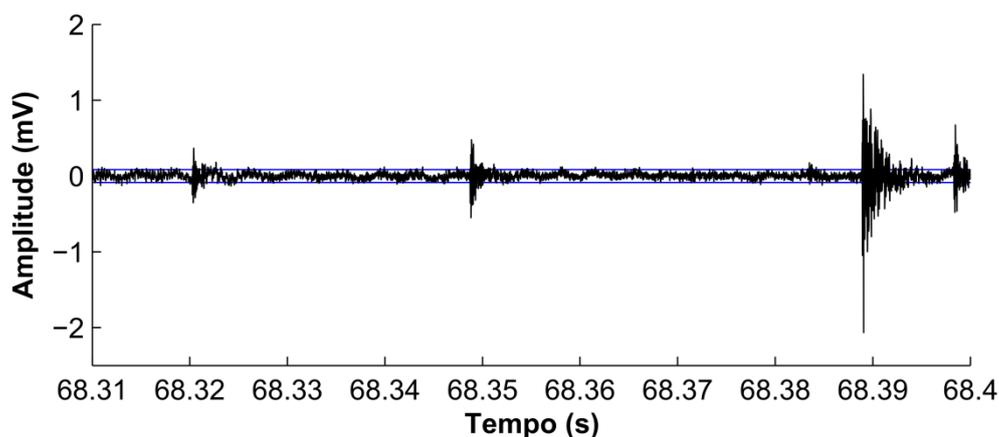


Figura 4.1 – Sinal obtido pelo acelerômetro entre 68,3 e 68,4 segundos.

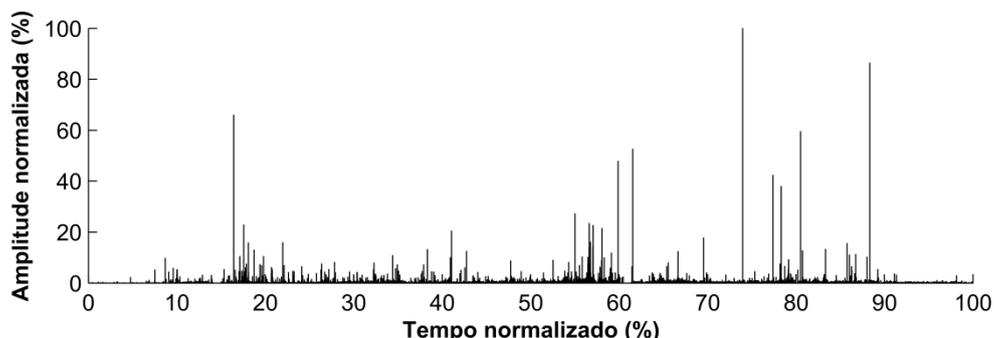


Figura 4.2 – Distribuição da amplitude normalizada pelo tempo normalizado.

4.2 Cálculo valor- b

O valor- b é o coeficiente angular da reta obtida ao relacionar, em escala logarítmica, o número de eventos acumulados com a amplitude dos mesmos. Esta análise é realizada sobre um intervalo de tempo. Na seção 2, apresentou-se o conceito e o cálculo deste parâmetro. O valor- b sofre mudanças ao longo do ensaio. No caso estudado, dividiu-se o tempo total de ensaio em 20 intervalos de 5,3 segundos e sobre cada intervalo calculou-se o citado valor- b . A variação do valor- b durante todo o ensaio, a distribuição das magnitudes dos eventos e a força reativa sobre o ponto onde o deslocamento prescrito foi aplicado em relação ao tempo normalizado são apresentados na Figura 4.3.

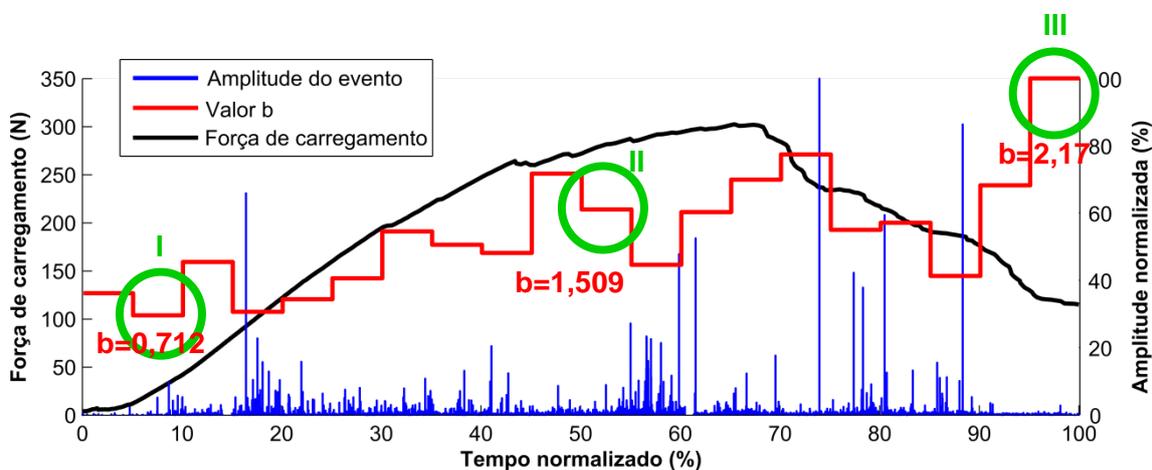


Figure 4.3 – Gráfico da força de carregamento, amplitude normalizada e valor-b pelo tempo normalizado.

Pode-se ver que o valor- b varia entre 0,712 e 2,17 em um intervalo próximo do esperado, caso seja interpretado como a dimensão fractal do espaço sobre o qual a emissão acústica acontece ($b = 1; 1,5$). O valor- b diminui localmente quando eventos acústicos de maior amplitude acontecem no ensaio. Isso identificaria o valor- b como um parâmetro global que detecta a aparição de uma atividade acústica acentuada. No contexto da sismologia Cotugno (2016) obteve resultados similares ao analisar a evolução do valor- b em uma região de Áquila, na Itália, ao longo de três anos de estudo. Na Figura 4.4 identifica-se a região citada dentro da Itália e em vermelho a posição das falhas sísmicas. Neste período, aconteceram sismos de alto poder destrutivo em 2009 e várias réplicas (sismos posteriores menores). A correlação entre mínimos locais da evolução do valor- b e de sismos importantes é notável, como verifica-se na Figura 4.5.



Figura 4.4 - Localização da região de Áquila, na Itália, onde ocorreu um forte sismo em abril de 2009. Em vermelho indica-se a posição das falhas sísmicas na região. Fonte: Cotugno, 2016.

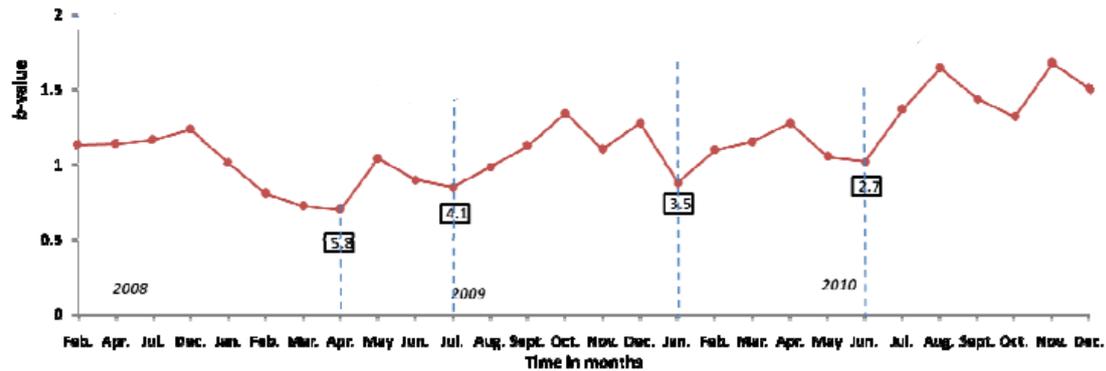


Figura 4.5 - Variação do valor- b na região de Áquila de fevereiro de 2008 a dezembro de 2010. A magnitude dos principais sismos em escala Richter são indicados no gráfico. Fonte: Cotugno, 2016

Na Figura 4.6 apresenta-se o cálculo do valor- b para três intervalos de 5,3 segundos localizados nas regiões I, II, III da Figura.4.3.

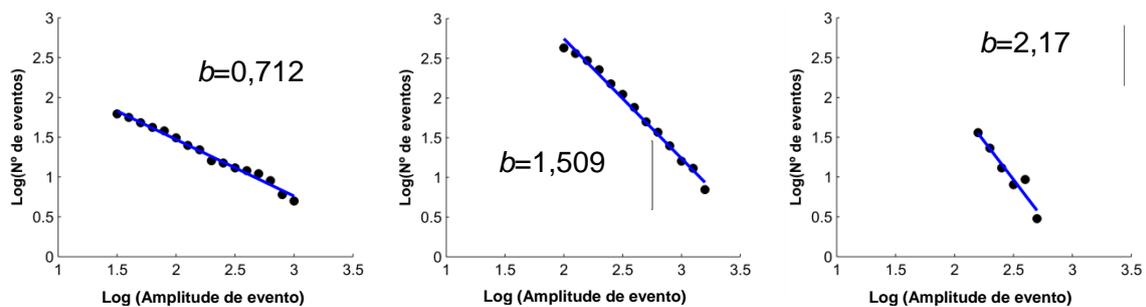
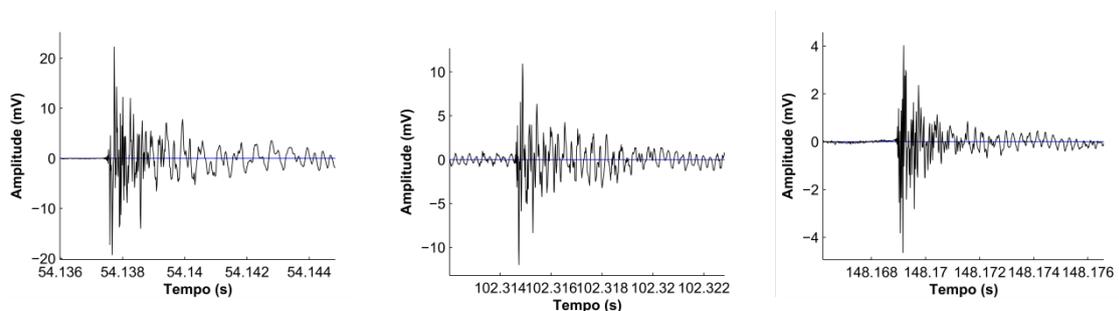


Figura 4.6 – Valor- b para períodos (a) região I, (b) região II e (c) região III.

A seguir na Figura 4.7, apresentam-se três eventos que também remetem aos períodos I, II e III da Figura 4.3, com suas respectivas FFTs. Quando os eventos são postos no domínio da frequência, fica evidente que o sensor captou o terceiro modo de frequência de vibração da estrutura (apresentado na Tabela 3.1). Este modo foi captado mais facilmente, pois a amplitude do deslocamento no ponto onde está posicionado o sensor é alta.



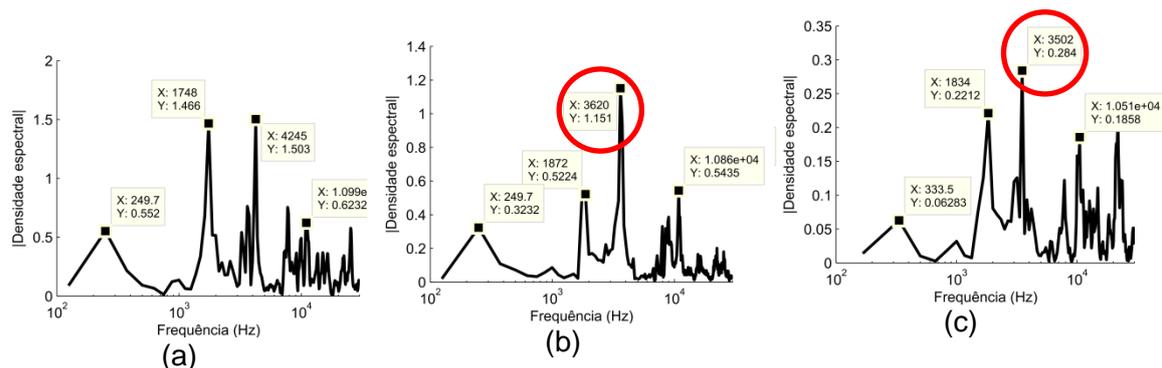


Figura 4.7 - Três eventos típicos nas regiões (a) I, (b) II, e (c) III identificados na Figura 4.3 no domínio do tempo e no domínio da frequência.

A Figura 4.8 relaciona o número de eventos instantâneos e o número de eventos acumulados no tempo normalizado, pode-se perceber que ao longo de todo o ensaio há uma grande atividade acústica.

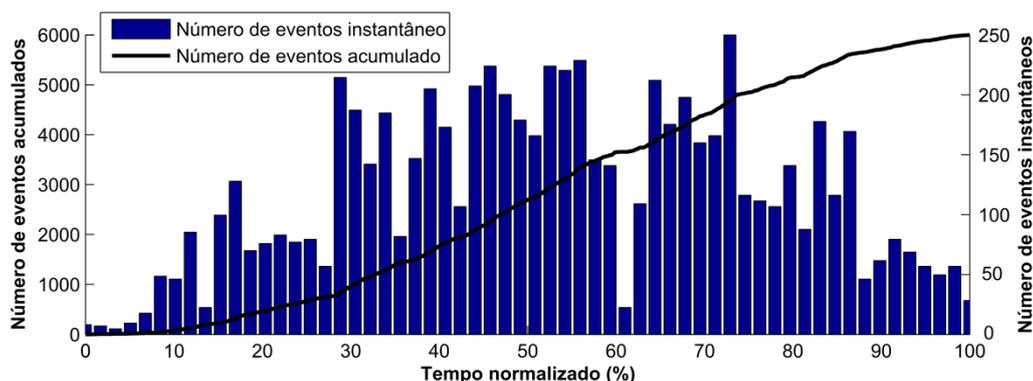


Figure 4.8 – Gráfico do número de eventos instantâneos e número de eventos acumulados pelo tempo normalizado

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um ensaio de emissão acústica em corpo de prova de polímero reforçado com fibras de vidro e os resultados obtidos foram processados e discutidos no transcurso do trabalho. As principais conclusões obtidas apresentam-se na sequência:

- Os ensaios de emissão acústica obtidos com um equipamento que capta apenas frequências consideradas baixas para emissão acústica (0-20kHz) permitiu captar um grande volume de eventos e os resultados e parâmetros obtidos se mostraram compatíveis com o previsto pela bibliografia na área;
- O valor- b se mostrou um bom indicador global de rupturas localizadas. A comparação dos resultados obtidos no corpo de prova comparado com registros sísmicos obtidos em bibliografia mostram como a mecânica presente na sismologia é semelhante, apesar da diferença de escala dos dois casos estudados;
- Os resultados obtidos foram importantes para iniciar o estudo da emissão acústica em estruturas reforçadas com fibras. Os objetivos traçados foram atingidos e permitem que novos estudos sejam realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aki, K.; Richards, P. **“Quantitative Seismology. Geology: Seismology”**. University Science Books, 2nd edition, 2002.
- Akovali, G.: **“Handbook of Composite Fabrication”** Rapra Technology LTDA, 2001.
- Carpinteri, Alberto; Lacidogna, Giuseppe (Eds.). **“Acoustic Emission and Critical Phenomena: From Structural Mechanics to Geophysics”**. Taylor & Francis Group, 2008a, Londres. p46-66.
- Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G., Puzzi S.: **“Critical defect size distributions in concrete structures detected by the acoustic emission technique”**. Meccanica 2008b; 43: 349–63.
- Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G.: **“Fractal analysis of damage detected in concrete structural elements under loading”**. Chaos, Solitons and Fractals 2009; 42: 2047–2056.
- Cutugno P. C.: **“Space-time correlation of earthquakes and acoustic emission monitoring of historical constructions.”** Tese de Doutorado. Politécnico de Torino, Truim, Itália. 2016
- Dahmene F., Yaacoubi S., El Mountassir M.: **“Acoustic Emission of Composites Structure: Story, Success, and Challenges”**. Physics Procedia 2015, 70: 599-603.
- Grosse, Christian U.; Ohtsu, Masayasu (Eds.). **“Acoustic Emission Testing”**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- Haselbach W., Lauke B., **“Acoustic Emission of debonding between fibre and matrix to evaluate local adhesion”**. Composite Science and Technology 63 (2003). 2155-2162.
- Imap. <https://imap.com.br>. Acessado em 28/05/2018.
- Jung D., Mizutani Y., Tdoroki A., Suzuki Y.: **“Change in B-Value by AE Propagation Length in CFRP”**. Journal of Acoustic Emission . 2016, Vol. 33, pS123-S129. 7p
- Richter CF. **“Elementary seismology”**. San Francisco and London: W.H. Freeman; 1958.
- Shiotani T., Fujii K., Aoki T., Amou K. **“Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model tests”**. Prog Acoust Emission 1994; 7:529–34.
- Shull P.J.: **“Nondestructive evaluation: Theory, Techniques, and Applications”** CRC press, 2002
- SolidWorks Simulation. <http://www.solidworksbrasil.com.br/sw/>. Acessado em 06/06/2018
- PCB. **“Produtos”**. <http://www.pcb.com/Products.aspx?m=352A60>. Acessado em 06/06/2018
- Potel, Catherine; Bruneau, Michel (Eds.). **“Materials and Acoustics Handbook”**. London: ISTE Ltd, 2009, p3-28.
- Young, Warren C.; Bunydas Richard G.. **“Roark’s Formulas for Stress and Strain”**, 7. Ed. [S.I.]: McGraw-Hill, 2002. 854 p

ANEXO I - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO

|  | Acelerômetro PCB 352A60 | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|
| | Sensibilidade ($\pm 15\%$) | 10mV/g |
| | Measurement range | ± 500 g pk |
| | Broadband resolution | 0,002 g rms |
| | Sensing Element | cerâmico |
| | Peso | 6 g |

Figura AI – 5.1- Acelerômetro PCB 352A60



(a)



(b)

Figura AI – 5.2- Equipamentos utilizados: (a) amplificador e computador com sistema de aquisição de dados Pulse e (b) máquina de ensaios Emic DL-2000