

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

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA NA CARACTERIZAÇÃO DE
DANO EM ESTRUTURAS

por

Adriel Liamar Justen

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, Dezembro de 2012



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA NA CARACTERIZAÇÃO DE DANO EM
ESTRUTURAS

por

Adriel Liamar Justen

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. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: **Prof. Juan Pablo Raggio Quintas**

Co-Orientador: **Prof. Ignacio Iturrioz**

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 19 dezembro de 2012.

Dedico este trabalho aos meus familiares, que sempre me apoiaram em minhas decisões e me deram suporte emocional e financeiro durante todo o período de graduação, tornando possível esta realização. Em especial, o dedico em memória de minha mãe, Liselote Ana Justen, um exemplo de pessoa, mãe, educadora e grande mulher.

Agradeço aos professores Juan Pablo Raggio Quintas e Ignacio Iturrioz pelos ensinamentos e pela atenção dedicada durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos colegas Lisandro Maders e Rodolfo Rodrigues pela ajuda nos experimentos e ensaios realizados que serviram de base para este trabalho de conclusão. No geral, agradeço a todos os professores que durante minha graduação se dispuseram a compartilhar seu conhecimento transmitindo valiosos ensinamentos.

JUSTEN, A. L. **Aplicação de Técnicas de Emissão Acústica na Caracterização de Danos em Estruturas**. 2012. 15 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Devido ao desenvolvimento de instrumentos de medição mais precisos, técnicas de monitoramento têm sofrido sensíveis avanços. Entre elas a técnica de Emissão Acústica não é uma exceção. Ela consiste essencialmente em medir as vibrações que estruturas produzem ao sofrer algum tipo de dano quando submetidas a cargas, sendo de muita utilidade na caracterização de materiais em laboratório, e também em aplicações tecnológicas relacionadas com o monitoramento de equipamentos industriais e estruturas em serviço em geral. Os fundamentos teóricos e relações entre a informação capturada com os sensores e com os processos que se desejam medir (energia dissipada, vida útil da estrutura), não são simples. Neste sentido a sismologia tem fornecido uma bagagem de relações utilizadas hoje também em estruturas de dimensões da ordem de metros. Neste contexto, no presente trabalho se realizaram medições de emissão acústica para o processo de dano em estruturas simples, a informação obtida foi processada calculando índices globais, entre eles a avaliação do espectro de frequências da resposta em diversas etapas do processo de carga. Verificou-se que com o equipamento existe é possível realizar ensaios neste tipo de material, e que é possível realizar leituras de até 65 kHz. As medições foram realizadas no laboratório do Gmap do DEMEC da UFRGS e os dados foram processados no Programa Matlab.

PALAVRAS-CHAVE: Emissão Acústica, Vibrações, Estruturas, Espectro de Frequências.

JUSTEN, A. L. **Acoustic Emission Application Techniques in Characterization of Damage in Structures**. 2012. 15 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

From the development of more accurate measuring instruments, monitoring techniques have been having sensitive advances. Between them, acoustic emission technique is no exception. It consists essentially in measuring the vibrations produced by structures suffering some kind of damage when subjected to loads, being very useful for the characterization of materials in the laboratory, and also in technological applications related to monitoring industrial equipment and structures in loading service. The theoretical and relations between the captured information, with sensors, and processes that one wishes to measure (energy dissipated, life of the structure) there are not simple. In this sense, seismology has provided a baggage of relationships that are also used, today, in structures with dimensions in order of meters. In this context, in the present study was performed measurements of acoustic emission to the process of damage in simple structures, and the information obtained was processed by calculating global indices, including the assessment of the frequency spectrum of the response at different stages of the loading process. It was found that the equipment can perform tests in such material, and it is possible to perform readings of up to 65 kHz. Measurements were performed in the laboratory of Gmap's DEMEC UFRGS and the data will be processed in the program Matlab.

KEYWORDS: Acoustic Emission, Vibrations, Structures, Frequency Spectrum.

SUMÁRIO

	Pág
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1. EMISSÃO ACÚSTICA	1
2.1.1 INSTRUMENTAÇÃO	2
2.1.2 INTERPRETAÇÃO DO SINAL	3
2.2. CONCEITOS DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS	5
2.2.1 TENACIDADE	5
2.2.2 FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL DE VIBRAÇÃO	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4. METODOLOGIA	6
4.1. CÁLCULO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS	6
4.1.1 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	7
4.1.2 CÁLCULO DA TENACIDADE	8
4.1.3 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA NATURAL DE VIBRAÇÃO	9
4.2. ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA	9
5. RESULTADOS	11
5.1 INTERPRETAÇÃO DOS SINAIS DE EA	11
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS	12
5.3 ANÁLISE DOS ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS	123
6. CONCLUSÕES	15
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

LISTA DE SÍMBOLOS

f_n = Frequência natural de vibração;
 K = Rigidez do material;
 m = Massa equivalente da viga suspensa.
 E = Módulo de Elasticidade;
 I = Momento de Inércia da seção transversal da viga;
 $v(x)$ = Deslocamento em função do comprimento;
 P = Carregamento;
 L = Comprimento do corpo de prova em balanço;
 x = posição onde está sendo realizado o carregamento;
 V_{max} = Deslocamento máximo;
 Gf = Tenacidade do material;
 K_I = Fator de Intensidade de Tensões;
 K_o = Fator de Normalização;
 K_{IC} = Fator de Intensidade de Tensões Crítico;
 a = Tamanho da trinca;
 b = Largura do corpo de prova;
 h = Altura do corpo de prova.
 L_o = Distância da trinca até a aplicação da Carga.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1a:** Típicos eventos de uma medição de emissão acústica.
- Figura 2.1b:** Sinal contínuo proveniente do ruído de uma máquina o de meio ambiente.
- Figura 2.2:** Visualização de alguns parâmetros extraídos de um evento.
- Figura 2.3:** Parâmetros relacionados com o espectro de frequências.
- Figura 2.4:** Classificação das trincas através da obtenção dos parâmetros citados anteriormente.
- Figura 4.1a:** Corpo de prova.
- Figura 4.1b:** Detalhe da granulometria do corpo de prova.
- Figura 4.2:** Ilustração do ensaio da obtenção do E.
- Figura 4.3a:** Esquemática do ensaio para obtenção da tenacidade
- Figura 4.3b:** Gráfico que permite calcular o fator de intensidade de tensões K_I para a configuração geométrica adotada segundo Branco, 1999.
- Figura 4.4:** Ilustração do ensaio de emissão acústica.
- Figura 4.5a:** Computador.
- Figura 4.5b:** Amplificador.
- Figura 5.1:** Eventos característicos do sinal.
- Figura 5.2:** Comparativo do evento registrado no MIC 1 e no MIC 2.
- Figura 5.3a:** Parâmetros clássicos característicos de um evento de emissão acústica.
- Figura 5.3b:** Parâmetros do espectro de frequência.
- Figura 5.4a:** Número de eventos acumulados ao longo do tempo para o corpo de prova 1.
- Figura 5.4b:** Quantidade de eventos por segundo no corpo de Prova 1.
- Figura 5.5:** Intensidade dos Eventos Registrados - Corpo de prova 1.
- Figura 5.6a:** Frequência dos eventos do intervalo A (0 a 32s).
- Figura 5.6b:** Frequência dos eventos do intervalo B (33 a 64s).
- Figura 5.7a:** Frequências dos eventos do intervalo C (65 a 96s).
- Figura 5.7b:** Frequências dos eventos do intervalo D (97 a 128s).
- Figura 5.8:** Frequências dos eventos do intervalo E (129s até a fratura).

1. INTRODUÇÃO

O uso de técnicas de Emissão Acústica (EA) pode ser uma alternativa interessante em ensaios destrutivos e não destrutivos que visam o monitoramento de estruturas submetidas a carregamentos. Artigos como os de Drouillard, 1979, e Drouillard, 1987, nos dão um panorama geral sobre a história da Emissão Acústica e de suas técnicas, das quais importam diversos conceitos da sismologia. Pode-se dizer que basicamente levou-se o nível macroscópico do monitoramento de sismos ao nível microscópico da nucleação de trincas em estruturas sob efeitos de carregamentos. Esta condição só foi possível com o avanço tecnológico dos instrumentos e sensores cada vez mais precisos e capazes de processar grande quantidade de informação.

Nos experimentos realizados neste trabalho foram utilizadas técnicas e conceitos da Emissão Acústica em corpos de prova de isopor submetidos a deslocamentos prescritos quase estáticos. O uso do isopor se justifica devido a sua baixa rigidez e por sua estrutura quase frágil (menor conteúdo de frequências dos eventos de emissão acústica durante os ensaios), o que vai de encontro ao aproveitamento do equipamento existente que são microfones capazes de fazer a leitura de até 65 kHz. Em casos de usar metais ou concreto, seriam necessários equipamentos capazes de realizar medições em uma faixa de MHz.

As leituras de intensidade de sinal obtidas durante processo de carga dão informação sobre as características do corpo de prova e sobre a forma em que o dano vai progredindo ao longo do processo. As aplicações destas técnicas são muito variadas e tem sido de grande importância no âmbito industrial, como por exemplo, em vasos de pressão, tanques, canalizações, etc., além de diversas aplicações na construção civil monitorando estruturas construídas com concreto e madeira.

Como grande motivação para a realização deste tipo de experimento, foi a oportunidade de utilização de equipamentos do Grupo de Mecânica Aplicada e de aprender sobre técnicas de como interpretar as informações contidas nos eventos de EA. Em função disto, se estabeleceram os seguintes objetivos:

- **Objetivo Geral:** Aumentar os conhecimentos nas técnicas de medição e interpretação de eventos de emissão acústica.
- **Objetivos específicos:** Realizar um ensaio de emissão acústica participando em todas as etapas do mesmo, planejamento do ensaio, captura do sinal, tratamento dos dados e sua interpretação; Procurar índices globais obtidos dos registros de emissão acústica que permitam correlacionar a evolução do registro de EA com a evolução do dano.

Na seção subsequente será apresentada uma fundamentação teórica mostrando os conteúdos teóricos para compreensão do trabalho e posteriormente na seção 3 será apresentada uma revisão bibliográfica com alguns trabalhos realizados recentemente que auxiliam na compreensão do estudo da Emissão Acústica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. EMISSÃO ACÚSTICA

Os testes utilizando técnicas de Emissão Acústica podem ser considerados não destrutivos, pois na maioria das vezes as estruturas que estão submetidas ao monitoramento ainda estão sujeitas a carregamentos usuais de serviço, e na grande maioria das vezes não leva ao colapso da estrutura. Estas técnicas podem ser muito úteis na detecção prematura de falhas e trincas evitando a falha completa da estrutura.

Diferentemente de técnicas de ultrassom onde, padrões na distorção das ondas geradas artificialmente por uma fonte externa (técnicas ativas) quando passam através do sólido estão sendo monitorados, a Emissão Acústica (EA) consegue captar ondas elásticas

geradas pela nucleação e do crescimento de algum defeito dentro da estrutura quando a mesma é solicitada, e por esse motivo pode ser considerada uma técnica passiva”, pois não depende de outro equipamento emissor para captar o sinal desejado.

A figura 2.1 mostra que é possível diferenciar o sinal do ruído ambiente ou do ruído de uma máquina em funcionamento (sinal contínuo) com o sinal da intensidade da energia liberada durante a abertura de uma trinca, o que pode ser caracterizado como um evento.

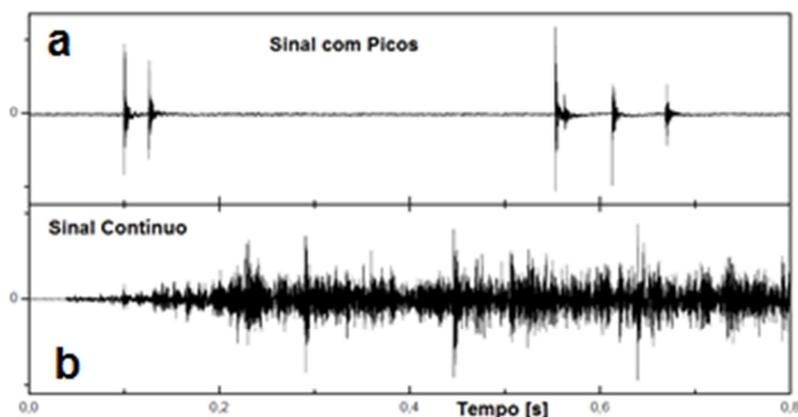


Figura 2.1: Diferenciação entre sinais: a) Típicos eventos de uma medição de emissão acústica; b) Sinal contínuo proveniente do ruído de uma máquina o do meio ambiente.

Existem vantagens e desvantagens do uso das técnicas de EA. Pelo lado positivo, a facilidade de instrumentar os testes em locais ou estruturas que estão submetidas a carregamentos reais e em situações de serviço, sem que haja necessidade de levá-los a falha. Como o método depende das rupturas internas que possam acontecer em diferentes escalas, ele será capaz de captar nucleação de novas trincas ou propagação das existentes. Por outro lado, é praticamente impossível reproduzir o sinal obtido de testes realizados sob as mesmas condições provavelmente devido à heterogeneidade do material, resultando sempre em sinais similares.

Além disto, para conseguir captar o sinal muitas vezes são necessários sensores de elevada sensibilidade, que por sua vez estão sujeitos ao ruído ambiente. Nestes casos em que o ruído ambiente é um fator considerável, é necessária a aplicação de diferentes métodos, para que de alguma maneira seja filtrado a parte do sinal que realmente importa.

Resumidamente, conforme Grosse e Ohtsu, 2008, “Emissões Acústicas podem ser consideradas uma forma de microssismo gerada durante o processo de falha de materiais sujeitos a carregamentos. Emissões Acústicas podem ser definidas como uma liberação espontânea e localizada de energia de deformação em materiais submetidos a tensões”.

Portanto, existe uma relação muito estreita entre os fundamentos da Sismologia e os conceitos de EA podendo existir aplicações similares e estudos dos quais os resultados possam ser aproveitados de maneira produtiva.

2.1.1 INSTRUMENTAÇÃO

A fratura no material libera uma grande quantidade de energia que é consumida na nucleação de novas trincas e na emissão de ondas elásticas. Essas ondas são conhecidas como ondas de Emissão Acústica e se propagam no interior do material e podem ser lidas por um sensor específico que é fixo na superfície do corpo de prova.

Sensores piezelétricos (acelerômetros) são geralmente aplicados, pois fornecem uma combinação de baixo custo, alta sensibilidade, fácil manejo e faixa de frequências amplas. Para casos específicos também podem ser usados sensores capacitivos (transdutores, acelerômetros e microfones), assim como no experimento deste trabalho.

O sinal característico é detectado como movimentos dinâmicos na superfície do material e é convertido em sinais elétricos. Este sinal é amplificado e filtrado de acordo com a necessidade.

Os sinais medidos geralmente são de baixas amplitudes comparados com outros provenientes de outros métodos de aquisição, necessitando serem amplificados significativamente para serem detectados e gravados.

2.1.2 INTERPRETAÇÃO DO SINAL

O principal ganho no monitoramento de fenômenos de EA é que o sinal fornece informações sobre a forma da falha da estrutura em estudo. Este monitoramento é feito em tempo real e os eventos gerados são aleatórios e espontâneos e estes sinais geralmente estão dispostos em frequências acima da nossa capacidade de audição. Inicialmente, define-se uma faixa de amplitude na qual o sinal ultrapassa e partir daí, identificam-se as características clássicas como, picos, amplitudes, quantidade de picos, duração, etc. Além disso, podem ser encontrados instantaneamente com o auxílio da transformada rápida de Fourier (FFT), parâmetros como pico de frequência e centroide do espectro.

Seguem abaixo alguns dos parâmetros que são úteis na identificação do processo de dano da estrutura em estudo:

- Evento: Parte do sinal que excede a faixa limite estabelecida e pode ser usado para caracterizar uma atividade de Emissão Acústica com picos de intensidades registrados durante um determinado intervalo.
- Contador de emissões: Número de vezes que são registrados os picos durante um evento. Podem ser contadas emissões até o pico máximo do evento e também após, durante o amortecimento das emissões.
- Amplitude: Maior pico de voltagem registrado no evento.
- Duração: Intervalo de tempo que dura um evento.
- Período de crescimento: intervalo de tempo do crescimento do evento até seu pico máximo.
- Energia: É definida como a área abaixo da curva e interpretada como a magnitude da fonte dos eventos durante os picos e é sensível a duração e amplitude dos eventos.
- Frequência Média de Picos: É um parâmetro calculado obtido através do número picos de emissões divididas pela duração do evento.
- Frequência Inicial dos Picos: Recurso calculado a partir da divisão do número de eventos até o pico máximo pelo período de crescimento.
- Frequência de Reverberação dos Picos: É um recurso calculado a partir da divisão do número de picos de emissão após o pico máximo pelo período de amortecimento.
- Valor RA: Parâmetro calculado a partir do período de crescimento dividido pela amplitude. Este valor RA pode ser usado para classificar os tipos de trincas.
- Centroide das Frequências dos Picos: É um parâmetro calculado a partir das frequências e é definido como o somatório das frequências que possuem magnitude considerável dividido pela soma das magnitudes destas frequências.
- Máxima Frequência dos Picos: Parâmetro observado no espectro que define a amplitude de picos que tem maior frequência.

As figuras 2.3 e 2.4 mostram estes parâmetros em um exemplo de evento de emissão acústica.

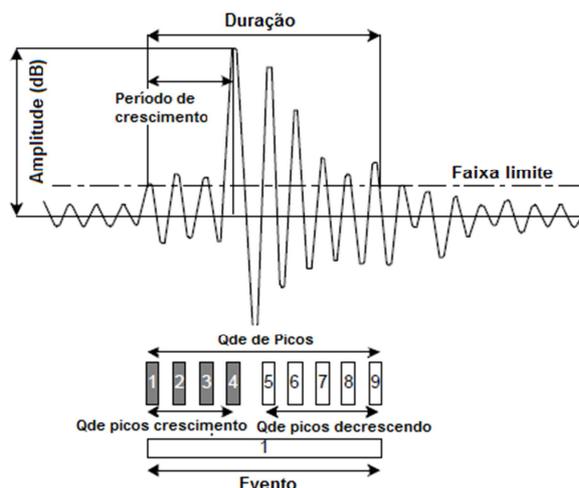


Figura 2.2: Visualização de alguns parâmetros extraídos de um evento.

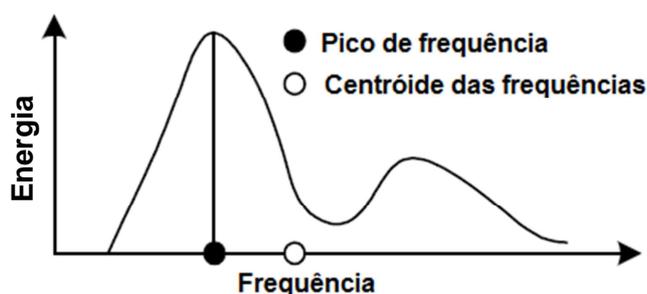


Figura 2.3: Parâmetros relacionados com o espectro de frequências.

Além dos parâmetros clássicos mencionados acima, é possível fazer uma análise paramétrica observando outros parâmetros que podem ser obtidos indiretamente, tais como: Efeito Kaiser, Tipo de Trinca e Distribuição de Amplitudes. Estes coeficientes paramétricos são derivados dos parâmetros clássicos aliados a dados estatísticos obtidos de repetidos ensaios.

A figura 2.5 mostra um gráfico onde é possível classificar a trinca de acordo com a sua característica do modo de falha.

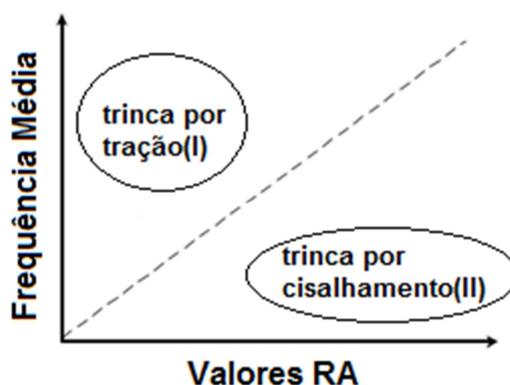


Figura 2.4: Classificação das trincas através da obtenção dos parâmetros citados anteriormente.

Essa definição pode ser útil quando é desejado saber quando a trinca que está se propagando troca de modo de falha.

2.2. CONCEITOS DE MECÂNICA DOS SÓLIDOS

Serão definidos alguns parâmetros utilizados para caracterizar o comportamento de materiais e estruturas dentro da Mecânica dos Sólidos.

2.2.1 TENACIDADE

Esta qualidade dos materiais de dissipar energia de deformação sem romper de forma abrupta pode ser medida através de parâmetros conhecidos como parâmetros fractomecânicos, e dentre eles, o mais conhecido é o parâmetro G definido por Griffith como a variação da energia de deformação acumulada quando a superfície do defeito aumenta. Seu valor crítico que dependera do material pode ser determinado através de ensaios.

2.2.2 FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL DE VIBRAÇÃO

A frequência natural pode ser definida como a frequência na qual a estrutura em análise vibra com a menor energia possível. É possível determinar em bibliografia técnica expressões para as geometrias usuais que permitem calcular esta frequência característica. Por ser de interesse neste trabalho, a seguir se apresenta a equação para a frequência fundamental para o caso de uma viga prismática engastada livre, Harris e Piersol, 2002, dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2.1)$$

Onde:

f_n = Frequência natural de vibração;

K = Rigidez do material;

m = Massa equivalente.

A rigidez do material pode se obtida através da equação 2.2 que corresponde à rigidez de uma viga em balanço:

$$K = \frac{3EI}{L^3} \quad (2.2)$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade (que será obtido experimentalmente);

I = Momento de Inércia da seção transversal da viga;

L = Comprimento da viga em balanço.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Grosse e Ohtsu, 2008, fazem uma introdução aos conceitos de Emissão Acústica servindo de base para este trabalho trazendo informações históricas e de detalhes sobre instrumentação. Além disso, traz um capítulo a parte sobre diversas técnicas de abordagem do sinal de Emissão Acústica, além de trazer aplicações com o uso de concreto e madeira. Moore, 2005, também foi utilizado como referência para introdução ao tema e fixação dos conceitos de Emissão Acústica.

O uso recente das técnicas de Emissão Acústica no monitoramento de falhas em concreto pode ser visto em Carpinteri et alli, 2008 e 2009, onde é feita uma análise estatística das distribuições das amplitudes dos eventos e definida com critérios de avaliação dos danos efetivos. Estas amplitudes são distribuídas de acordo com a Lei de Gutember-Richter que é utilizada na caracterização de sismos.

Já no artigo de Schiavi, A. et alli, 2010, é investigada a evolução do evento no domínio da frequência durante o ensaio de emissão acústica. A forma do espectro em frequência dos

eventos está relacionada com tipos e magnitudes de fraturas internas que acontecem no material e são discutidas neste trabalho.

4. METODOLOGIA

Tendo como objetivo a aplicação das técnicas de Emissão Acústica para monitorar a evolução do dano durante a aplicação da carga, o procedimento experimental se dará da seguinte forma:

- Determinação de parâmetros mecânicos: Esta etapa vai auxiliar na interpretação do sinal de emissão acústica. A partir dos ensaios experimentais, obter o Módulo de Elasticidade, Tenacidade, e determinação da densidade do material;
- Cálculo da frequência fundamental de vibração da geometria utilizada para realizar o ensaio;
- Monitorar utilizando microfones de alta sensibilidade o processo de dano sobre um corpo de prova de geometria simples.

Os experimentos foram realizados no laboratório do Grupo de Mecânica Aplicada da Engenharia Mecânica da UFRGS. O material utilizado nos procedimentos experimentais foi o isopor. A justificativa para selecionar este material está relacionada ao fato dele apresentar frequências de respostas dos eventos de EA compatíveis com o equipamento disponível. Para realizar ensaios similares com corpos de prova mais rígidos seria necessário utilizar sensores com taxas de aquisição muito maiores.

Os corpos de prova de isopor usados nos experimentos possuem as seguintes dimensões: comprimentos de 30 cm; largura e altura de 5 cm. A densidade calculada do isopor é de $6,67 \text{ kg/m}^3$ e o corpo de prova pesa aproximadamente 0,005 kg. A figura 4.1a mostra um exemplo de corpo de prova e a figura 4.2b mostra em detalhe a granulometria da estrutura que em média, é de aproximadamente 6 mm.

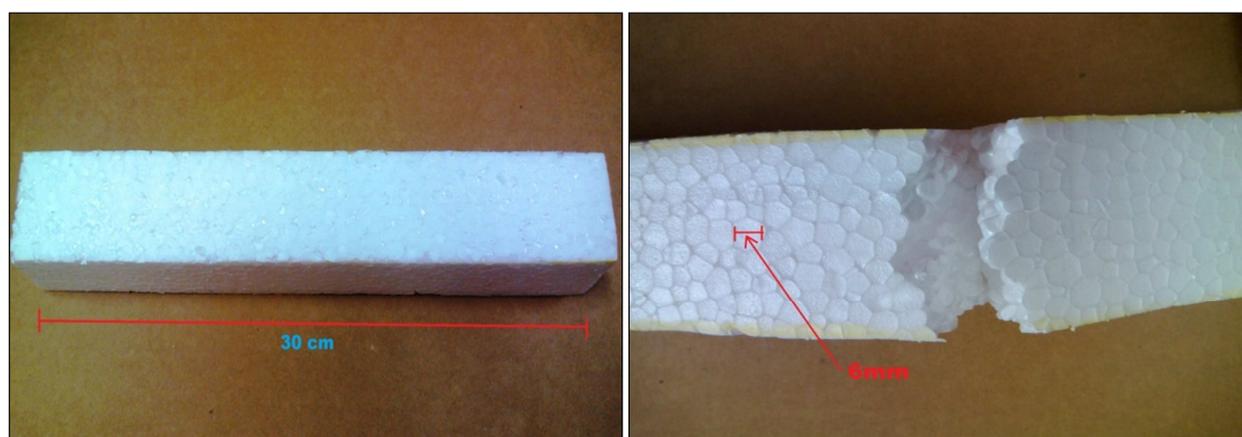


Figura 4.1: a) Corpo de prova. b) Detalhe da granulometria.

4.1. CÁLCULO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS

É apresentada a continuação da metodologia utilizada para determinar experimentalmente o Módulo de Elasticidade do material, a sua Tenacidade e uma estimativa teórica da Frequência Fundamental de Vibração do corpo de prova estudado.

4.1.1 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para a obtenção do Módulo de Elasticidade do isopor foi utilizado um corpo de prova conforme figura 4.1. A figura 4.2 mostra o arranjo de como foi realizado o experimento e as figura 1 e 2 do apêndice I mostram fotos do experimento em si.

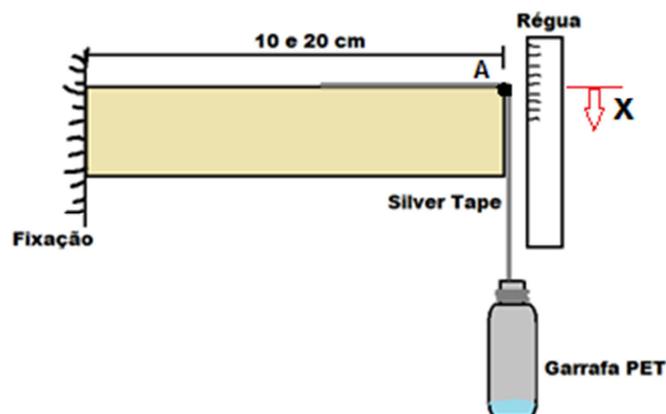


Figura 4.2: Ilustração do ensaio da obtenção do E.

O corpo de prova foi engastado de modo a permanecer 20 cm em balanço. Na extremidade livre, prendeu-se uma garrafa pet com o auxílio de fita adesiva *silver tape*. A garrafa foi carregada com incrementos de 50 ml de água, medindo o deslocamento gerado no ponto A indicado na figura 4.6. Calculou-se um E para cada carga aplicada com a expressão do deslocamento extraída do manual de Resistência dos Materiais segundo Pissarenko, 1985:

$$v(x) = \frac{P}{3IE \left(\frac{3Lx^2}{2} - \frac{x^3}{2} \right)} \quad (4.1)$$

Onde:

$v(x)$ = Deslocamento em função do comprimento;

P = Carregamento (peso da água);

I = Momento de inércia da seção transversal;

E = Módulo de Elasticidade;

L = Comprimento do corpo de prova em balanço;

x = posição onde está sendo realizado o carregamento.

Como estamos tomando o deslocamento na ponta do corpo de prova, $x=L$, então a equação 4.1 fica:

$$E = \frac{PL^3}{3Iv_{máx}} \quad (4.2)$$

Repetiu-se o processo para um corpo de prova com 10 cm em balanço. Na tabela 4.1 são apresentados os valores de E obtidos com diferentes comprimentos, além do valor médio e da dispersão dos resultados.

Deve-se ficar claro que este não é o procedimento correto para a obtenção do módulo de elasticidade do material, mas no momento da realização dos ensaios, o equipamento adequado do Gmap que faz o ensaio, e a partir dele se calcula o E através do ajuste dos mínimos quadrados, não estava disponível.

Com a carga crítica determinada na forma indicada, foi possível estimar o valor da tenacidade obtida, utilizando a mecânica linear elástica da fratura utilizando o gráfico da figura 4.3b. Neste caso $L/b = 4$, e a relação $a/b = 0,2$. A partir daí, conseguimos o valor da relação $K_I/K_0 = 1,025$ (figura 4.7b). Empregando a expressão de K_0 que se encontra na Figura 4.3b onde P é o carregamento que produz a propagação crítica da trinca no corpo de prova, L_0 é a distância da aplicação da carga até a trinca, a o tamanho da trinca, b altura do corpo de prova, foi possível achar os valores de K_I para uma espessura unitária. Estes valores multiplicados pela largura do corpo de prova permitem calcular o fator de intensidade de tensões crítico K_I , que pode ser convertido em G_f utilizando a expressão segundo Branco, 1999, que segue abaixo:

$$G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (4.4)$$

Foram realizadas medições em 4 corpos de prova para $L_0 = 20$ cm e os resultados obtidos junto com o valor médio e o desvio calculado são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores de tenacidade a partir dos resultados experimentais.

	P (g)	M (Nm)	K_0 (N/m ^{3/2})	K_I (N/m ^{3/2})	G_f (N/m)
Corpo de Prova 1	364,3	0,71	6080,99	6233,02	25,49
Corpo de Prova 2	415,0	0,81	6927,29	7100,47	33,08
Corpo de Prova 3	359,0	0,70	5992,52	6142,33	24,76
Corpo de Prova 4	352,4	0,69	5882,35	6029,41	23,85
Desvio = 4,24 N/m					
G_f Médio = 26,80 N/m					

Sobre a determinação da tenacidade é importante observar que:

- É preciso levar em conta uma série de cuidados e restrições na geometria do corpo de prova considerado e na determinação da carga aplicada. Estas restrições estão estabelecidas em normas para materiais convencionais. Neste caso o objetivo do ensaio é obter um valor da ordem da tenacidade;
- O valor de tenacidade não será diretamente aproveitado neste trabalho, mas sim em futuros processamentos que possam ser realizados a partir dos dados obtidos no experimento.

4.1.3 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA NATURAL DE VIBRAÇÃO

As dimensões da viga que será utilizada para realizar o ensaio de emissão acústica são $L = 20$ cm, $b = 5$ cm e $h = 5$ cm. Utilizando estas dimensões e a expressão apresentada na fundamentação teórica foi calculada de maneira teórica a frequência fundamental de vibração da viga, $F_n = 102$ Hz.

4.2. ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA

Este procedimento experimental consiste em monitorar com o auxílio de microfones de alta sensibilidade o corpo de prova com geometria e condições de contorno indicadas na figura 4.4. A excitação aplicada na extremidade livre da viga foi um deslocamento prescrito monotonicamente crescente com velocidade constante até atingir a falha do corpo de prova. Durante o ensaio foram utilizados os equipamentos indicados a seguir:

- Computador com o *Software Pulse*¹ instalado;

- Amplificador *Brüel & Kjær* de 6 canais Tipo 3035;
- Dois microfones *Brüel & Kjær* pré-amplificados 4189-A-021;
- Cabos *Brüel & Kjær* AO 0087-D-020;
- Duas morsas;
- Fita adesiva *Silver Tape*.

¹ - Características sobre o equipamento de aquisição utilizado podem ser encontradas no site do desenvolvedor do *Pulse (Brüel & Kjær)*.

No ensaio foram utilizados cinco corpos de prova fixados com morsas conforme ilustra a figura 4.1a. O microfone denominado (MIC1) é preso na região próxima ao engaste onde provavelmente acontecerá a localização da falha. O segundo microfone (MIC2) é preso aproximadamente 1,5m distante do corpo de prova com o objetivo de captar o ruído do ambiente para poder descartar possíveis eventos falsos dos registros. A outra morsa é utilizada para realizar o deslocamento prescrito. As figuras 5 e 6 do apêndice I mostram fotos de dois corpos de prova antes de realizar os ensaios.

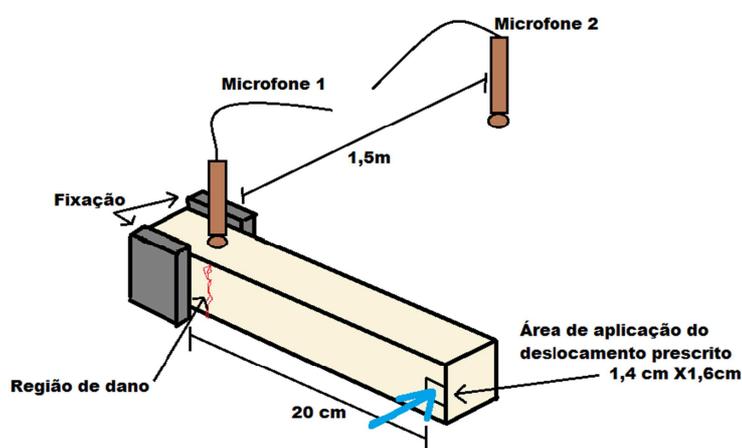


Figura 4.4: Ilustração do ensaio de emissão acústica.

Nas cinco amostras utilizadas o deslocamento prescrito foi aplicado manualmente com uma velocidade angular de aproximadamente 4,2 rpm no eixo da morsa controlada com o auxílio de um cronômetro, correspondendo a 10,9 mm/min de velocidade linear média. Como o corpo de prova possui certa tenacidade, e durante boa parte do deslocamento não acontecem eventos significativos, segundo testes preliminares, a gravação já inicia com 40 mm de deslocamento a partir do repouso, limitando desta forma geração de arquivos muito extensos. As figuras 4.5a e 4.5b mostram o computador e amplificador utilizado no ensaio.



Figura 4.5: a) Computador. b) Amplificador.

As leituras dos microfones são salvas em um arquivo de extensão *ASCII* com um intervalo entre registros de 1.52588 E-05 (taxa de aquisição de aproximadamente 65 kHz). Após a aquisição, os dados são tratados em um programa que separa os canais e ordena a informação em um arquivo de extensão *dat* por sensor, adequando a mesma para ser lida e processado dentro do software *Matlab R2010a*.

Como o experimento tem um caráter preliminar para investigar o comportamento do sinal, não foi calculado o erro relacionado às medições. Os sinais de todos os corpos de prova foram processados, mas apenas o sinal do corpo de prova 1 foi utilizado para cálculo dos parâmetros, deixando a dispersão entre os ensaios para um etapa posterior.

No anexo I é apresentada informações de calibração dos microfones e dados do erro associado ao equipamento, assim como sua sensibilidade e condições ideais para utilização.

5. RESULTADOS

Segue a tabela 5.1 com informações e resultados para os cinco ensaios realizados:

Tabela 5.1: Informações gerais sobre os experimentos.

Corpo de prova	Peso[kg]	ρ [kg/m ³]	E [Mpa]	Gf [N/m]	Deslocamento até falha [mm]	Duração do ensaio [s]	V_m do deslocamento prescrito [mm/min]
1	0,005	6,67	1,524	25,4	72	167	11,49
2					53	85	9,17
3					70	162	11,11
4					60	109	11,01
5					72	162	11,85

Considerando que todo procedimento de aplicação do deslocamento prescrito foi de maneira manual, podemos verificar conforme a tabela 5.1 que a velocidade média do deslocamento prescrito de cada corpo de prova não variou muito, sendo que ficou muito próximo de 11 mm/min. Podemos ver que os corpos de prova 2 e 4 fraturaram em menor tempo, e isto se deve ao fato de haverem grãos muito maiores que o tamanho médio de 6mm na região fraturada. A relação entre tamanho de grão e tempo até a falha é um dos temas que deverá ser melhor investigado na continuação deste trabalho.

5.1 INTERPRETAÇÃO DOS SINAIS DE EA

Os dados captados durante o ensaio de monitoramento mostraram estar de acordo com a literatura estudada, diferenciando-se de um sinal contínuo conforme a figura 2.1. Pode-se observar na figura 5.1, eventos típicos de EA, caracterizados com uma variação brusca na intensidade do sinal além da alteração na frequência durante um pequeno intervalo de tempo.

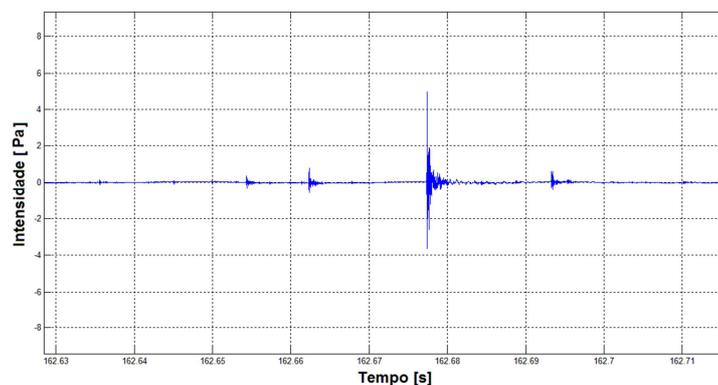


Figura 5.1: Eventos característicos do sinal.

Pelo fato do ruído do ambiente ser um elemento indesejado durante o experimento, o sinal obtido do microfone 2 que fica posicionado distante 1,5m do experimento, serve como um filtro qualitativo para verificar se a variação do sinal registrado no microfone 1 é apenas ruído ou um evento de EA. Entende-se que os sensores fazem a leitura da onda elástica que se propaga na superfície do material analisado e que o microfone 2 capta apenas o ruído. A figura 5.2 mostra uma comparação onde é observado o mesmo intervalo de tempo com magnitude de intensidade similar nos dois microfones, e o sinal característico do ruído ambiente pode ser visualizado nos dois sensores. Porém o evento de EA só é visualizado no microfone 1.

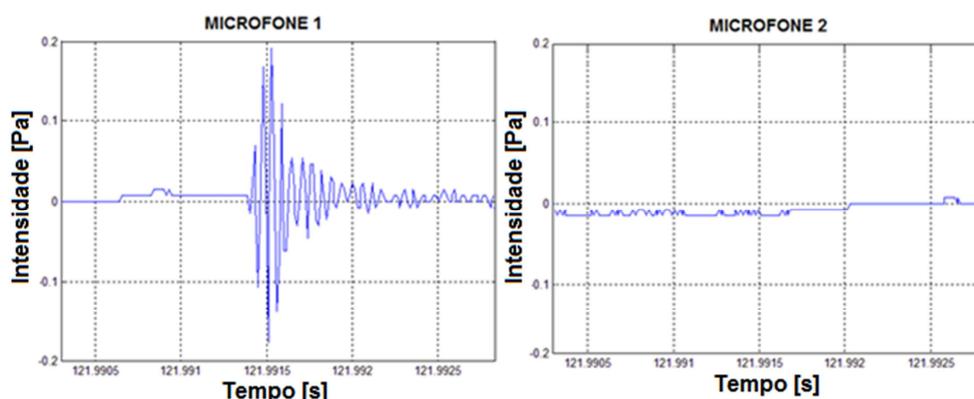
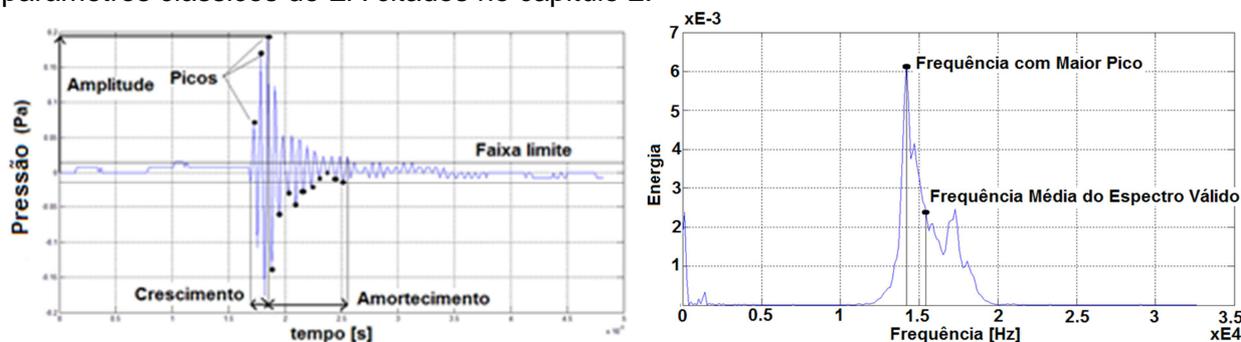


Figura 5.2: Comparativo do evento registrado no MIC 1 e no MIC 2.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS

Foi tomado como exemplo para análise um evento registrado com pico máximo no tempo de 121,9915 segundos de ensaio (a 41,128 segundos da falha). As figuras 5.3a e 5.3b mostram um evento e o espectro de frequências respectivamente, onde estão sendo vistos os parâmetros clássicos de EA citados no capítulo 2.



Figuras 5.3: a) Parâmetros clássicos característicos de um evento de emissão acústica. b) Parâmetros do espectro de frequência, respectivamente.

A tabela 5.2 apresenta os valores dos parâmetros calculados para este evento específico.

Tabela 5.2: Parâmetros calculados do evento da figura 5.2.

Período do Evento	0,000854 s	Valor RA (não convertido)	15,64 s/Pa
Período de Crescimento	0,000152 s	Sensibilidade Sensor	45,50 mV/Pa
Período de Amortecimento	0,000702 s	Valor RA	343762,9 ms/V
Amplitude	0,1918 Pa	Frequência Inicial	19737 Hz
Total de Picos	13	Frequência Média	15334 Hz
Picos de Crescimento	3	Frequência Reverberação	14245 Hz
Picos de Amortecimento	10	Frequência de Pico Máximo	14208 Hz

Podemos observar que este evento em especial está bem definido como um evento de EA. Porém, nem todos os eventos registrados apresentam estas características bem definidas.

Independente desta dificuldade, ficou evidente nos cinco ensaios que se tem um comportamento semelhante quanto a magnitude dos eventos e frequência com que eles vão surgindo no decorrer do ensaio. Sem dúvida, os dados extraídos poderiam servir para uma análise estatística mais detalhada como continuação deste trabalho.

A figura 5.4a apresenta um gráfico com os eventos acumulados ao longo do tempo e nos dá uma idéia de como a quantidade de eventos vai crescendo a medida que vamos nos aproximando da falha. Essa informação pode ser útil no monitoramento de algum equipamento industrial em serviço, durante uma inspeção preventiva de manutenção. Outra maneira de observar a instabilidade nos instantes finais do ensaio é através da figura 5.4b que fornece a quantidade de eventos registrados em cada segundo.

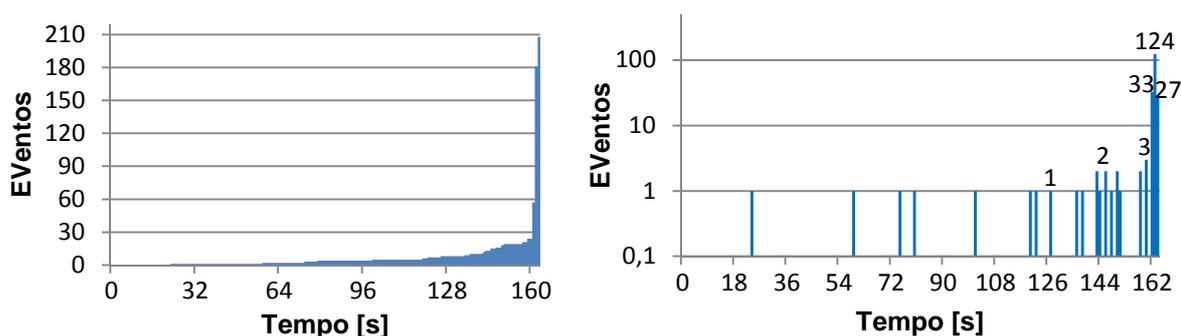


Figura 5.4: a) Número de eventos acumulados ao longo do tempo para o corpo de prova 1 b) Quantidade de eventos por segundo no corpo de Prova 1, respectivamente.

Já o gráfico da figura 5.5 fornece a amplitude de todos os eventos registrados em ordem de surgimento. Fazendo uma análise juntamente com o figura 5.4a, pode-se perceber que as magnitudes dos eventos começam a ter variações mais significativas nos últimos instantes, e consequentemente o número de eventos cresce de maneira muito brusca. Essa observação está de acordo com percepção de que que o sinal fica mais instável.

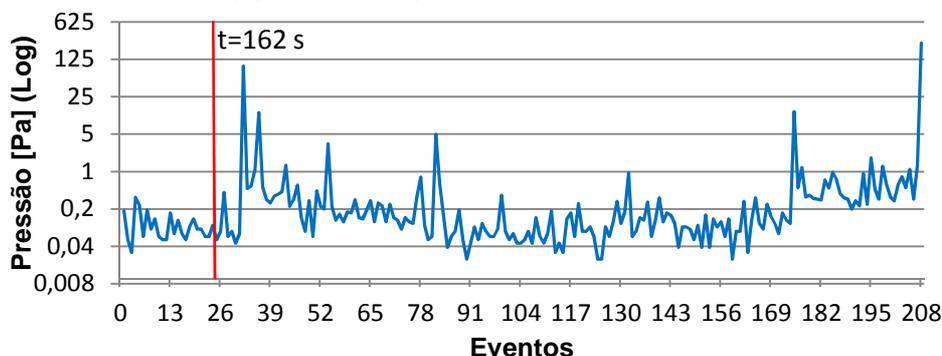


Figura 5.5: Intensidade dos Eventos Registrados - Corpo de prova 1.

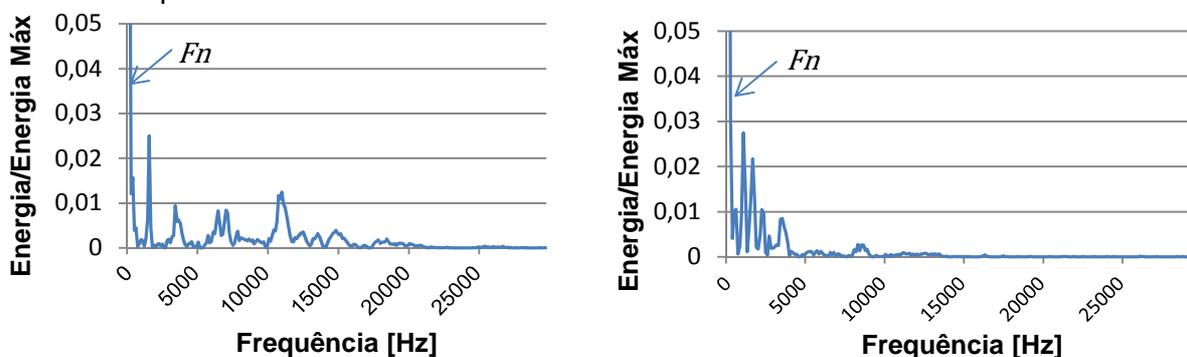
Outra maneira de observar a instabilidade nos instantes finais do ensaio é através da figura 5.4b que fornece a quantidade de eventos registrados em cada segundo.

5.3 ANÁLISE DOS ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS

Para esta análise, foi separado a duração total do ensaio em 5 intervalos iguais chamados de A, B, C, D e E onde cada intervalo corresponde a 32 segundos. Este artifício foi utilizado para que pudessem ser analisados os espectros das frequências dos eventos em diferentes momentos do ensaio. Para cada intervalo, foram selecionados eventos registrados e a partir deles foram calculados os seus espectros de frequências no Matlab. No caso do

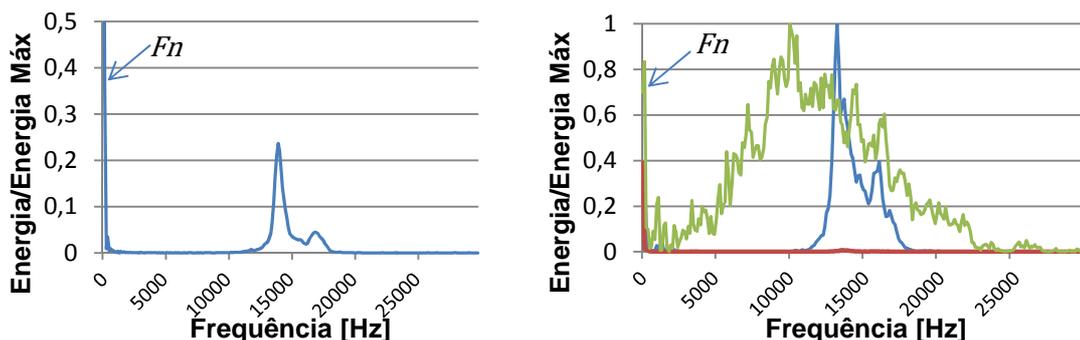
intervalo D e E existem mais de um evento e eles estão sobrepostos no mesmo gráfico como pode ser visto nas figuras 5.7b e 5.8.

Ao observar as figuras 5.6a e 5.6b percebe-se que as frequências dos eventos de EA podem se confundir com o ruído ambiente. Lembrando que a frequência natural do corpo de prova é de 102 Hz, observa-se que próximo a este valor a energia fica muito perto da máxima. Também é possível observar alguma atividade, mesmo que de baixa intensidade, em diversas faixas de frequência.



Figuras 5.6: a) Frequência dos eventos do intervalo A (0 a 32s) b) Do intervalo B (33 a 64s).

Nos dois intervalos seguintes (C e D) podemos observar mais atividade em frequências mais altas com maior intensidade no sinal, como pode ser visto nas figuras 5.10 e 5.11.



Figuras 5.7: a) Frequências dos eventos do intervalo C (65 a 96s). b) Do intervalo D (97 a 128s).

Na figura 5.8 temos os espectros de frequências de 4 eventos do intervalo E. Podemos visualizar que existem algumas frequências com picos em todos os eventos sugerindo algum tipo de padrão, o que poderia levar a um estudo mais aprofundado.

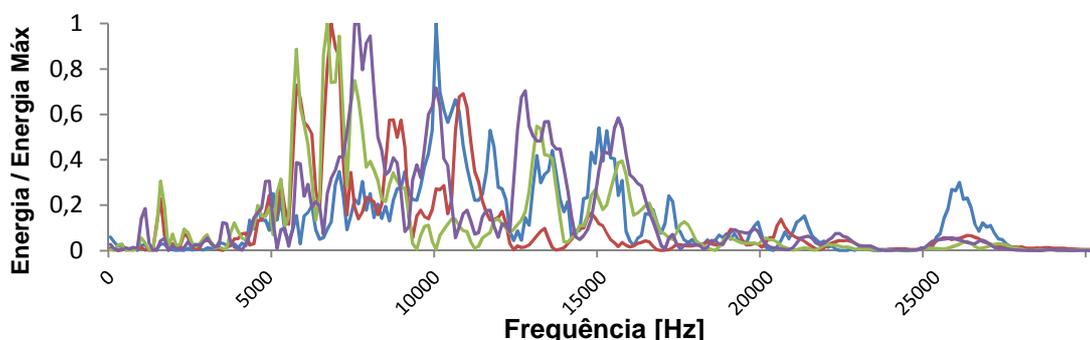


Figura 5.8: Frequências dos eventos do intervalo E (129s até a fratura).

É importante observar que a maior parte da atividade registrada nos espectros de frequências esta abaixo de 20 kHz, como pode ser visto nos gráficos do apêndice III que registram as atividades de todo o experimento. Isto permitir observar que o equipamento utilizado foi adequado para a realização dos ensaios com este tipo de material (taxa de

aquisição de 65kHz *software Pulse*). Os microfones evidenciam uma perda de sensibilidade a partir de 20kHz, e a influência desta limitação deverá ser melhor estudada na continuação deste trabalho.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho se realizaram ensaios de corpos de prova de geometria simples de isopor submetidos a um estado de carga de flexão até a ruptura. Foram registrados resultados em termos de eventos de emissão acústica. Os resultados foram adquiridos processados e interpretados. Durante as diversas etapas do trabalho foi possível obter as seguintes conclusões:

- A interpretação preliminar realizada sobre os dados permitiu perceber a riqueza de informação sobre o processo de dano que aconteceu durante os ensaios.
- É necessário maiores cuidados na velocidade de aplicação da carga, e seria interessante complementar o estudo com a relação entre o deslocamento prescrito aplicado e a reação durante todo o ensaio.
- Com o equipamento existente é possível adquirir resultados em termos de sinais de emissão acústica para este tipo de material, mas ensaios de materiais mais rígidos implicariam em adquirir sensores que capturem faixas de frequência da ordem de centenas de kHz.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Branco, C. M., **“Fadiga de Estruturas Soldadas”**, Segunda Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- Brüel & Kjær, **“Pulse Analyzer Software”**, www.bksv.com acessado em 01/10/2012.
- Carpinteri, A., Lacidogna, G., Niccolini G., **“Fractal Analysis of Damage Detected in Concrete Structural Elements Under Loading”**, Chaos, Solitons and Fractals, Elsevier, 2009
- Drouillard, T. F. **“Acoustic emission: A Bibliography with Abstracts”**. ed. Laner FJ, New York: Plenum Publ., 1979
- Drouillard, T.F. **“Introduction to Acoustic Emission Technology. Nondestructive Testing Handbook”**, eds. Miller RK and McIntire P, ASNT, Vol. 5:1-10, 1987.
- Grosse, C. U., Ohtsu, M., **“Acoustic Emission Testing”**, Springer, 2008.
- Gutenberg, B., Richter, C. F., **“Seismicity of the Earth and Associated Phenomena”** Princeton University Press; 1949.
- Harris, C. M., Piersol A. G., **“ Shock and Vibration Handbook “**, McGraw Hill 5th Edition, 2002.
- Mathworks, **“Matlab”**, www.mathworks.com/products/matlab acessado em 10/10/12.
- Moore, P. O., **“Acoustic Emission Testing – Nondestructive Testing Handbook”**, American Society for Nondestructive Testing, Third Edition, Vol 6, 2005.
- Pissarenko, G. S., **“Prontuario de Resistência de Materiais”**, Mir, Moscow, 1985.
- Richter C. F., **“Elementary seismology”**, W.H. Freeman and Company, San Francisco and London, 1958.
- Schiavi, A., Niccolini, G., Tarizzo, P., Carpinteri, A., Lacidogna, G., Manuello, A., **“Acoustic Emissions at High and Low Frequencies During Compression Tests in Brittle Materials”**, Strain, A International Journal for Experimental Mechanical, Blackwell Publishing Ltd 2010.

ANEXO I

Informações do fabricante dos microfones.



Brüel & Kjær

Microphone Unit
Type 4189-A-021

Calibration Chart

IEEE P1451.4 calibration, UTID = 769

Serial No. : **2597076**
 Serial No. (Microphone: Type 4189) 2595604
 Serial No. (Preamplifier: Type 2671) 2596824

Combined Sensitivity: **-27.1** dB re 1V/Pa
 Equivalent to: **44.4** mV/Pa
 Uncertainty, 95 % confidence level 0.2 dB

Valid At:
 Temperature: 23 °C
 Ambient Static Pressure: 101.3 kPa
 Relative Humidity: 50 %
 Frequency: 251.2 Hz
 Polarization Voltage, external 0 V

Sensitivity Traceable To:
 DPLA: Danish Primary Laboratory of Acoustics
 NIST: National Institute of Standards and Technology, USA

Procedure: 780231 Date: 25. Jun. 2007 Sign.: S.L.



Brüel & Kjær

Prepolarized Free-field
1/2" Microphone Type 4189

Calibration Chart

Serial No: **2595604**

Open-circuit Sensitivity*, S₀: **-26.8** dB re 1V/Pa
 Equivalent to: **45.5** mV/Pa
 Uncertainty, 95 % confidence level 0.2 dB

Capacitance: **12.9** pF

Valid At:
 Temperature: 23 °C
 Ambient Static Pressure: 101.3 kPa
 Relative Humidity: 50 %
 Frequency: 251.2 Hz
 Polarization Voltage, external: 0 V

Sensitivity Traceable To:
 DPLA: Danish Primary Laboratory of Acoustics
 NIST: National Institute of Standards and Technology, USA

IEC 61094-4: Type WS 2 F

Environmental Calibration Conditions:
 101.4 kPa 23 °C 53 % RH

Procedure: 704215 Date: 20. Jun. 2007 Signature: S.L.

*K₀ = -26 - S₀ Example: K₀ = -26 - (-26.2) = +0.2 dB
 BC 0224 - 12

Figura 1 e 2: Dados de sensibilidade dos microfones.

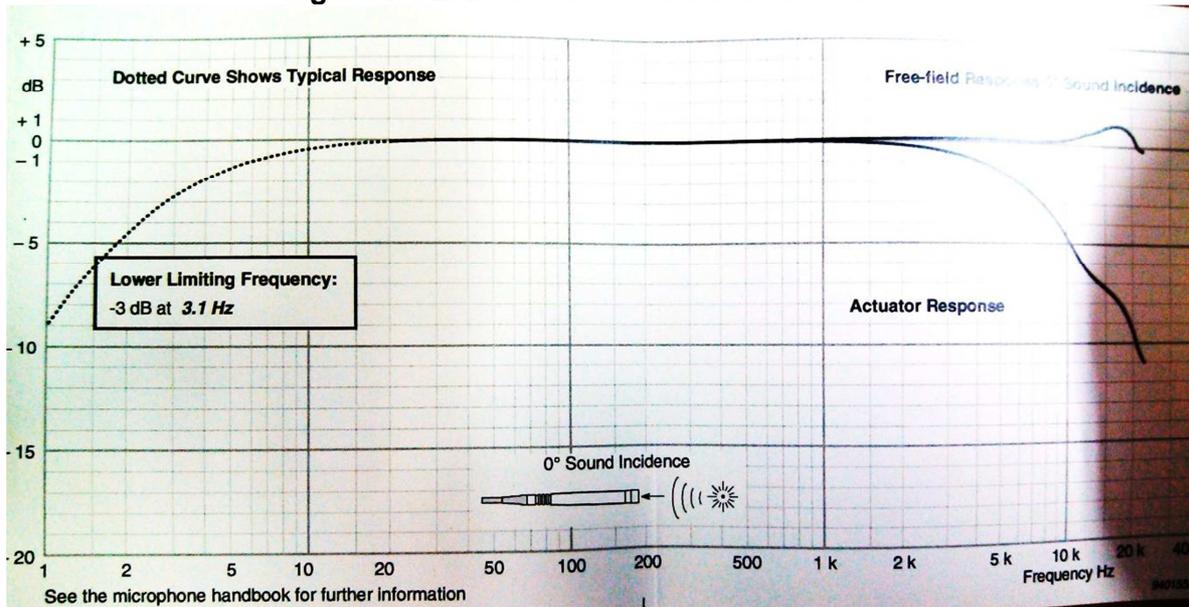


Figura 3: Curva de calibração dos microfones.

APÊNDICE I

Rotinas do programa Matlab para obtenção dos gráficos:

- Amplitudes e frequências.

```
clear all
clc
tic
format long

load CP01_MIC1_B_Evento1.txt; %CARREGA ARQUIVO EXTERNO COM AS ACELERAÇÕES
x = CP01_MIC1_B_Evento1;

DT = 1.52588E-05; %1/Fs;

minimo =DT/DT;
maximo = length(x);
num_linha = maximo-minimo;

Fs = 1/DT;
Tf = maximo*DT;
Ti = minimo*DT;
TIME = Ti:DT:Tf;

x_dir = x(minimo:maximo,2);

SINAL_t = x_dir;

% FFT DA ACELERAÇÃO - SEM FILTRO
length_x = length(SINAL_t); % Window length
trans_comp = pow2(nextpow2(length_x)); % Transform length
FFT_sinal = fft(SINAL_t,trans_comp); % DFT
f = (0:trans_comp-1)*(Fs/trans_comp); % Frequency range
power = FFT_sinal.*conj(FFT_sinal)/trans_comp; % Power of the DFT
max_power = power/max(power);

figure(1)
plot(TIME,SINAL_t,'b-');%TIME,MMt,'b',TIME,MM_dMM,'g');
xlabel('t [s]','FontName','Times New Roman','FontSize',18,'Rotation',0)
ylabel('Intensidade [Pa]','FontName','Times New Roman','FontSize',14,'Rotation',90)
grid on

figure(2);
plot(f(1:floor(trans_comp/2)),power(1:floor(trans_comp/2)),'b-')
xlabel('Frequência [Hz]','FontName','Times New Roman','FontSize',18,'Rotation',0)
ylabel('Intensidade [Pa]','FontName','Times New Roman','FontSize',14,'Rotation',90)
grid on

figure(3);
plot(f(1:floor(trans_comp/2)),max_power(1:floor(trans_comp/2)),'b-')
xlabel('Frequência [Hz]','FontName','Times New Roman','FontSize',18,'Rotation',0)
ylabel('Intensidade Normalizada','FontName','Times New Roman','FontSize',14,'Rotation',90)
grid on

break;
sound(SINAL_t,65540)
```

- Espectrogram.

```
clear all
close all
clc

[Tempo, acel]=textread('CP01_MIC1_A_Evento1','%f %f');
nfft=20000; % ate que frequencia tu quer ver
fs=65540; % 1/delta t
%specgram((acx_mid),nfft,fs)
%!=specgram((acx_mid),nfft,fs);
%!title('Spectrogram')
specgramdemo(acx_mid,fs)
```

APÊNDICE II

Fotos do procedimento experimental.



Figura 1: Ensaio obtenção do E(20mm)



Figura 2: Ensaio obtenção do E(10mm)



Figura 3: Ensaio obtenção Gf



Figura 4: Ensaio obtenção Gf

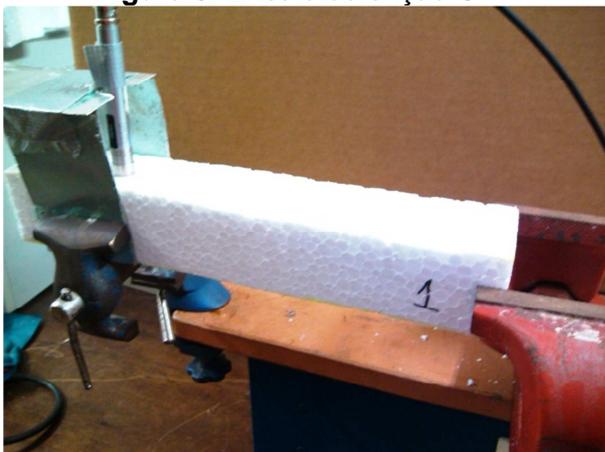


Figura 5: CP01 – Monitoramento do Dano

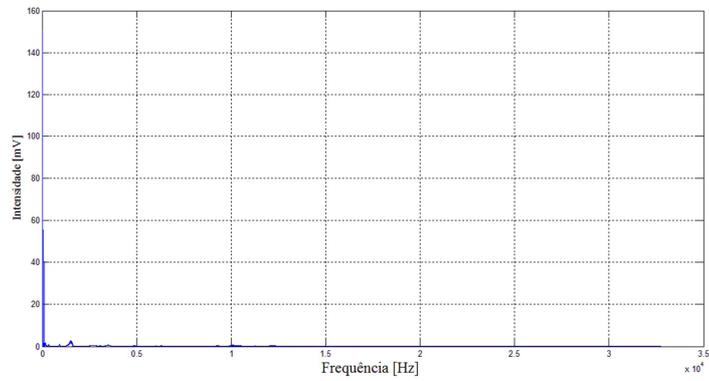
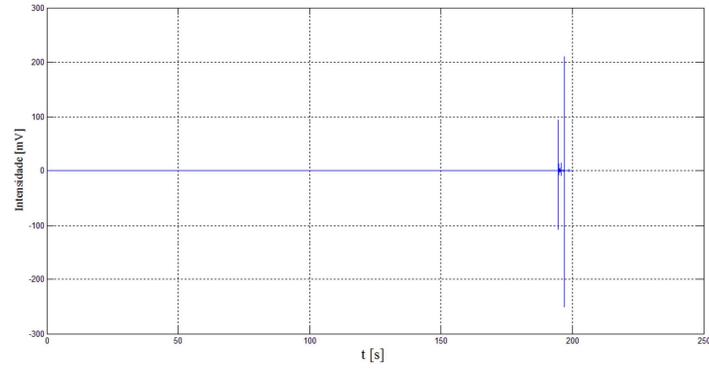


Figura 6: CP04 – Monitoramento do Dano

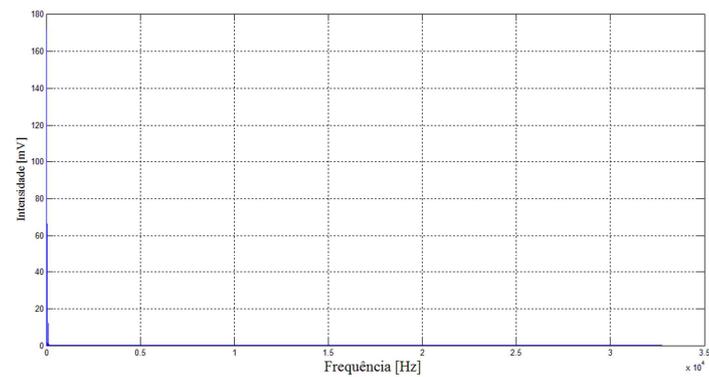
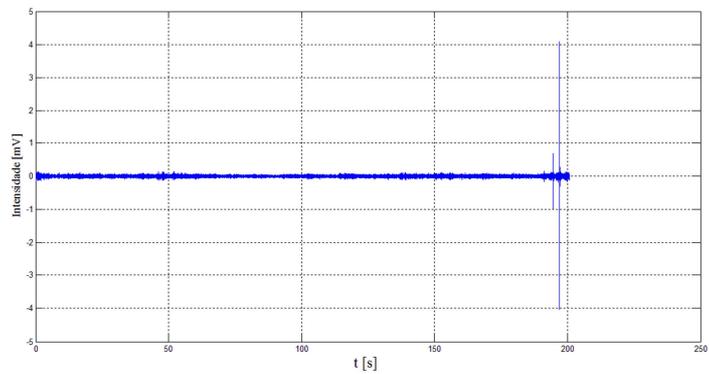
APÊNDICE III

- Sinal completo dos dois microfones do corpo de prova 1 e seu domínio de frequência.

MICROFONE 1:



MICROFONE 2:



- Gráfico de dispersão para encontrar o valor do Módulo de Elasticidade do isopor.

