

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS UTILIZANDO A  
TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA

por

Adriano Meneghetti de Oliveira

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Abril de 2014

ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS UTILIZANDO A  
TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA

por

Adriano Meneghetti de Oliveira  
Engenheiro de Controle e Automação

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Aprovada por:

Prof. Dr. Wang Chong, PPENG/UNIPAMPA - Alegrete

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, PPGEE/UFRGS

Prof. Dr. Rogério José Marczak  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 28 de Abril de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ignacio Iturrioz, pelas tantas horas de orientação, incentivo, disposição e amizade.

A empresa John Deere, que propiciou a realização deste mestrado disponibilizando os períodos para assistir às aulas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, aos professores e funcionários, que possibilitaram toda a estrutura necessária para realização do trabalho.

Ao colega Lisandro Maders da UFRGS pelo auxílio nos experimentos e uso das ferramentas experimentais.

Aos colegas Angélica Colpo e Leandro Friedrich da UNIPAMPA, que realizaram a modelagem computacional no DEM.

## RESUMO

A utilização de técnicas de emissão acústica para detectar e mapear o dano em estruturas tem sofrido grandes avanços nos últimos anos, em parte devido a possibilidade de poder contar com instrumentos de maior exatidão e precisão. Metodologias são utilizadas para, através dos resultados adquiridos, obter informação de como e onde a estrutura investigada está rompendo. Desenvolvimentos teóricos importantes na área de análise sísmica tem trazido um ferramental teórico que pode ser aplicado em estudos de estruturas e corpos de prova. Dentro deste contexto, neste trabalho é apresentado o estudo da localização e caracterização de defeitos utilizando técnicas conhecidas de emissão acústica. Ensaio em materiais de baixo módulo de elasticidade (poliestireno expandido) possibilitou o trabalho com os microfones de baixa frequência disponíveis para realização dos experimentos. Juntamente com os ensaios experimentais, simulações utilizando o método numérico dos elementos discretos (DEM) foram realizadas. Os resultados obtidos nos ensaios e nas simulações foram processados e conclusões sobre a forma de ruptura esperada foram feitas. Informações relativas à evolução das cargas durante os ensaios e simulações, e comparativos da evolução com o número de eventos são apresentados. Ensaio de três tamanhos diferentes de corpos de prova permitiram medir o efeito de escala esperado. Técnicas de localização dos eventos em corpos de prova de maiores dimensões também são aplicadas para efetuar a localização de defeitos utilizando emissão acústica, bem como a interpretação e análise dos dados obtidos. Utilizando o cálculo da velocidade de propagação da onda sonora no material, uma técnica de localização foi apresentada e utilizada para calcular posições de zona de fratura, a fim de identificar regiões que possuem defeitos.

Palavras-chave: emissão acústica, localização, sinais, aquisição de dados, detecção de trincas

## **ABSTRACT**

The usage of acoustic emission techniques in order to detect damage in structures has undergone great advances in the last years, partly because of the possibility to rely on instruments of highest accuracy and precision. Methodologies are used to obtain information about how and where the structure cracks. Important theoretical developments in the seismic analysis field have provided tools that can be applied in studies on structures and specimens. This work aims to study the localization and characterization of defects using acoustic emission techniques. Experimental tests on specimens with low elasticity modulus gave the possibility to work with the piezoelectric sensors available. Computational analyses using the discrete elements method (DEM) were performed. Conclusions about the expected rupture characteristics are shown. Information about the evolution loading during the tests, and a comparative of events evolution are shown. Tests on three different sizes of specimens allowed the scale effect analysis. Event location techniques on higher length specimens, using acoustic emission, are used to perform defects localization in order to obtain information about the defects position.

Keywords: acoustic emission, localization, signal, data acquisition, crack detection

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	Objetivos .....	13
1.2	Organização do Trabalho .....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	Mecânica da Fratura .....	14
2.2	Emissão Acústica (EA) .....	18
2.2.1	Fundamentos do ensaio não destrutivo de Emissão Acústica .....	18
2.2.2	Técnicas de Emissão Acústica (TEA) .....	19
2.2.3	Propagação de Ondas no Meio Elástico .....	21
2.2.4	Fontes de Emissão Acústica .....	24
2.2.5	Formas de detecção e Instrumentação utilizada em EA .....	25
2.2.6	Emissão acústica no contexto da sismologia.....	28
2.2.7	Análise do Valor “b” .....	29
2.2.8	Identificação de eventos de Emissão Acústica .....	30
2.2.9	Técnicas de Localização em Emissão Acústica .....	31
2.2.10	Interpretação e análise de dados de EA .....	35
2.2.11	Efeito de Escala .....	36
2.2.12	Vantagens e limitações da técnica de EA .....	38
2.3	Método Numérico dos Elementos Discretos (DEM).....	39
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>43</b>
3.1	Descrição dos Equipamentos.....	43
3.2	Metodologia utilizada nos ensaios de Emissão Acústica.....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>51</b>
4.1	Análise dos Eventos .....	57
4.1.1	Comparativo Número Máximo de Eventos X Volume .....	57
4.1.2	Histogramas das Amplitudes .....	58
4.1.3	Histogramas dos Eventos.....	59
4.1.4	Valor “b”.....	61
4.2	Localização de defeitos .....	63
4.2.1	Cálculo da velocidade de propagação da onda-P .....	63
4.2.2	Verificação da técnica de localização .....	66
4.2.3	Localização de defeito utilizando a técnica de localização por EA .....	67
4.3	Aplicação do Método Numérico DEM .....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>78</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>81</b>
	<b>ANEXO I</b> .....	<b>85</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Definição de CTOD.....	16
Figura 2.2	Representação do caminho arbitrário $\Gamma$ escolhido para o cálculo da integral J .....	17
Figura 2.3	Comparação entre as técnicas ativas e passivas.....	20
Figura 2.4	Exemplo de uma comparação entre, (a) sinal típico de emissão acústica (b) emissão contínua.....	21
Figura 2.5	Ilustração esquemática de ondas primárias (a), secundárias (b), de superfície (c) .....	22
Figura 2.6	Esquema ilustrativo de propagação de ondas em meio elástico.....	23
Figura 2.7	Sistema de detecção de EA.....	26
Figura 2.8	Parâmetros de EA .....	26
Figura 2.9	Esquemático de um sensor piezoelétrico.....	27
Figura 2.10	Exemplo valor “b”.....	29
Figura 2.11	Caracterização de um evento.....	31
Figura 2.12	Três sensores perto de um defeito receberão sinais de emissão em Tempos diferentes.....	35
Figura 2.13	Interpretação e avaliação de dados de teste não destrutivo.....	36
Figura 2.14	Efeito do volume em $N_{max}$ .....	38
Figura 2.15	Discretização no DEM: (a) modelo cúbico básico, (b) geração do corpo prismático com DEM.....	39
Figura 2.16	Representação da Lei Bi-linear em elementos discretos.....	41
Figura 3.1	(a) Amplificador Bruel & Kjaer 3035 ; (b) Microcomputador para controle do amplificador e (c) Especificação do amplificador 3035.....	44
Figura 3.2	Microfone Bruel & Kjaer 4189-A-021.....	44
Figura 3.3	(a) Prensa hidráulica e (b) Especificação técnica.....	45
Figura 3.4	Dimensões das amostras e posicionamento dos microfones.....	46
Figura 3.5	Posicionamento microfones amostras proporcionais.....	47
Figura 3.6	Dimensões viga 1 metro de comprimento e posicionamento microfones..	47

Figura 3.7	Posicionamento microfones para a viga de 1 metro de comprimento.....	47
Figura 3.8	Imagem corpos de prova (a) Pequeno, (b) Médio e (c) Grande.....	48
Figura 3.9	Imagem corpo de prova viga de 1 metro de comprimento.....	49
Figura 3.10	(a) Peça posicionada na prensa e (b) Software de controle da prensa.....	49
Figura 4.1	Carga X Deformação Amostras.....	51
Figura 4.2	Gráfico de Amplitude em função do tempo durante todo o ensaio para a amostra média.....	53
Figura 4.3	Sinal sem filtragem (a) e com filtragem (b).....	54
Figura 4.4	(a) Sinal de EA obtido no ensaio experimental, (b) Típico sinal de EA mostrado por Charles J. Hellier.....	55
Figura 4.5	Espectro de frequências amostra média.....	56
Figura 4.6	Contagem dos eventos.....	57
Figura 4.7	Contagem de eventos segundo bibliografia.....	58
Figura 4.8	Histograma amplitudes amostras (a) pequena, (b) média e (c) grande...	59
Figura 4.9	Histograma dos eventos amostra (a) pequena, (b) média e (c) grande....	60
Figura 4.10	Valor "b" amostra média.....	61
Figura 4.11	Valores de b durante teste de compressão em um corpo de prova de concreto.....	62
Figura 4.12	(a) engaste, (b) ponto de aplicação de excitação.....	63
Figura 4.13	Amplitude sonora ao longo do tempo.....	65
Figura 4.14	Tempo de chegada das ondas nos microfones 1 e 2.....	66
Figura 4.15	Resultados verificação da técnica de localização.....	67
Figura 4.16	(a) viga bi-apoiada ensaio ruptura, (b) esforço aplicado.....	68
Figura 4.17	(a) viga 1 metro rompida, (b) posição do defeito gerado.....	69
Figura 4.18	Gráfico de amplitude sonora em função do tempo.....	70
Figura 4.19	Localização pelo método dos círculos.....	70
Figura 4.20	configuração geométrica da viga pequena utilizando DEM.....	72
Figura 4.21	configurações finais obtidas na simulação do DEM.....	73
Figura 4.22	balanço energético da simulação realizada.....	74
Figura 4.23	sinais de EA.....	75
Figura 4.24	(a) Histograma amplitudes e (b) Histograma Eventos.....	76



Figura 4.25	Tempo de chegada dos sinais de emissão acústica em cada microfone (eixo X) .....	77
Figura A.1	Curva de calibração do transdutor 1.....	85
Figura A.2	Curva de calibração do transdutor 2.....	85
Figura A.3	Curva de calibração do transdutor 3.....	85
Figura A.4	Curva de calibração do transdutor 4.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Valores que relacionam coeficiente de poisson e razão entre as velocidades das ondas de Rayleigh e S.....	23
Tabela 4.1	Parâmetros de entrada amostra pequena.....	71

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
DEM	<i>Discret Element Method</i>
EA	Emissão Acústica
GMAP	Grupo de Mecânica Aplicada
GR	Gutenberg-Richter
MFEL	Mecânica da Fratura Linear-Elástica
NDT	<i>Non destructive test</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_{\text{máx}}$	tensão máxima nas extremidades do defeito.
$\sigma_a$	tensão aplicada
$\rho$	raio de curvatura
$K_t$	fator de concentração de tensões
$\Delta L$	Elongação
$K_{Ic}$	Fator de intensidade de tensões
$K_I$	fator de intensidade de tensões para o modo de carregamento I
$R$	distância da ponta da trinca
$\emptyset$	ângulo medido a partir do plano da trinca
$f_{ij}$	função adimensional de $\emptyset$
$G$	Taxa de liberação de energia
$W_s$	Trabalho requerido para geração das superfícies da trinca
$A$	Área da trinca
$\sigma_f$	Tensão de falha
$a_c$	Comprimento crítico da trinca
$W$	densidade de energia
$T$	vetor tração
$u$	deslocamento
$\Gamma$	Curva de contorno ao redor da ponta da trinca na qual é o caminho de integração.
$m$	magnitude-logaritmo da amplitude $A$
$A$	amplitude do evento de EA
$N$	número de eventos de EA, ou contagem de EA
$b$	freqüência relativa dos eventos de baixa amplitude comparado aos de alta amplitude
$D$	dimensão fractal
$R$	distância de um sensor até a fonte de EA
$z$	distância do plano de sensores até a fonte de EA
$v$	velocidade de propagação da onda no material
$N_{\text{inst}}$	número de eventos instantâneo
$N_{\text{acum}}$	número de eventos acumulados
$\Delta t$	diferença de tempo

# 1 INTRODUÇÃO

A técnica de emissão acústica tornou-se um reconhecido método não destrutivo (NDT) para detecção e localização de falhas em estruturas submetidas a carregamentos mecânicos (exemplo: pontes sob carregamento, detecção de vazamentos em óleo-dutos, etc...). A técnica pode fornecer informações do início de uma descontinuidade numa estrutura tensionada e também informação do desenvolvimento desta descontinuidade em uma estrutura sujeita a tensões contínuas ou repetitivas. Se uma estrutura está sujeita a carga mecânica ou está tensionada, as descontinuidades liberam energia. Esta energia se propaga na forma de ondas de alta frequência (Charles H., 2001). Estas ondas são detectadas através de sensores piezoelétricos que convertem a energia em tensão elétrica. Esta tensão é amplificada e transformada em sinais de Emissão Acústica.

A maior diferença entre o método não destrutivo de Emissão Acústica (EA) e outros métodos não destrutivos é que o método de EA é passivo, ou seja, não necessita de energia externa para poder detectar os defeitos, a própria ruptura interna do material durante uma solicitação é utilizada na detecção. No caso dos métodos ativos, como as técnicas de Ultrassom, Radiográficas entre outras, a informação surge ao aplicar sobre a peça que está sendo investigada, um campo de energia externa que permite medir o estado da mesma. Na EA, a energia gerada ao produzir-se algum tipo de ruptura interna no material é capturada através de sensores posicionados no material (Grosse C. U, 2008).

A tecnologia de EA utiliza sensores ultrassônicos (20kHz – 1MHz) que detectam os ruídos e as falhas da estrutura. As frequências de Emissão Acústica ficam geralmente na faixa de 150 a 300 kHz. Propagação de trincas em razão da fragilização por Hidrogênio, fadiga, corrosão e deformações podem ser detectadas e localizadas utilizando a técnica de EA. A técnica de EA é muito utilizada na detecção prematura de defeitos em estruturas que possam vir a falhar no futuro (Charles H., 2001).

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral do presente trabalho é aplicar técnicas existentes de emissão acústica para a medição, o tratamento e a interpretação dos dados de EA realizados sobre corpos de prova de poliestireno expandido.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- realizar a montagem e execução de ensaios de 3 vigas de tamanhos diferentes que possuem dimensões proporcionais submetidas a flexão, sobre as quais são posicionados sensores de emissão acústica;
- interpretar os resultados processados para obter informações a respeito do efeito de escala no material estudado, relacionando-o com a teoria fractal;
- realizar a montagem e execução de ensaios em uma viga de maiores dimensões, submetida a flexão, sobre a qual são posicionados sensores de emissão acústica e realizar neste corpo de prova estudos de localização de defeitos;
- processar os resultados obtidos dos ensaios realizados;
- modelar algum dos ensaios realizados com as vigas de tamanho proporcional utilizando o método dos elementos discretos formado por barras.

## **1.2 Organização do Trabalho**

Após esta introdução, no Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica do trabalho desenvolvido juntamente com a revisão bibliográfica de trabalhos realizados na área e que auxiliaram no desenvolvimento do presente estudo. No Capítulo 3 a metodologia utilizada para realizar a medição, processamento e interpretação dos resultados é descrita. Já no Capítulo 4, se descrevem os ensaios realizados e se apresentam os resultados obtidos junto com a sua discussão. Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e no Capítulo 6 sugestões para a continuação deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Mecânica da Fratura

Normalmente, em engenharia, quando se quer verificar a segurança de uma estrutura, é calculada a  $\sigma_{máx eq}$  (tensão máxima equivalente) a que uma estrutura está submetida. Para este cálculo, algumas teorias, tais como von Mises, Rankine, Tresca, etc, podem ser utilizadas. Este valor  $\sigma_{máx eq}$  é comparado com o  $\sigma_{rup eq}$  (tensão de ruptura equivalente), o qual identifica, ou caracteriza a ruptura de um corpo de prova do mesmo material submetido a um valor de tensão simples e normalizado, o qual terá uma geometria também, simples e normalizada. A tensão de ruptura equivalente,  $\sigma_{rup eq}$ , depende do material e das condições em que o teste experimental foi realizado para obtê-la (temperatura  $T$ , velocidade de aplicação da carga  $\dot{\sigma}$ ). Já a tensão máxima equivalente,  $\sigma_{máx eq}$ , é uma função das condições de contorno, da geometria, e das cargas aplicadas ( $\sigma$ ). Normalmente é utilizado um coeficiente de segurança ( $\gamma$ ) que seja suficientemente pequeno para evitar consumo desnecessário de material e peso excessivo reduzindo assim seu custo, e que seja grande o suficiente para evitar falhas provocadas por aspectos que não foram levados em consideração (Kanninen e Popelar, 1985).

Portanto, tem-se:

$$\sigma_{rup eq} (\text{Material, } T, \dot{\sigma})/\gamma \geq \sigma_{máx eq} (\text{Cond. de Contorno, Geometria, } \sigma) \quad (2.1)$$

O valor das tensões equivalentes nas proximidades das pontas dos defeitos será muito elevado, para a Mecânica Linear Elástica, caso a estrutura que está sendo analisada tenha defeitos para valores de cargas relativamente pequenos. Está provado que as estruturas com defeitos resistem, apesar de não ser possível usar a expressão (2.1) para dimensioná-las, pois sempre se verifica que  $\sigma_{máx eq} \geq \sigma_{rup eq}$  irá acontecer. Assim, para que seja possível analisar estruturas com defeitos, uma solução seria comparar parâmetros da estrutura e do material e que não sejam diretamente tensões equivalentes. Esta expressão terá que ser função de um parâmetro alternativo, denominado  $Z$ . Este parâmetro será função das condições de contorno aplicadas, da geometria e do tamanho da trinca ( $a$ ). Ele será comparado com o valor de

parâmetro  $Z_{mat}$  que é medido no momento de colapso em um corpo de prova com geometria e condições de contorno simples. Portanto, considerando um meio com trincas, tem-se a seguinte expressão de dimensionamento equivalente à Equação (2.1):

$$Z_{mat}(\text{Material, } T, \dot{\sigma})/\gamma \geq Z(\text{Cond. de Contorno, Geometria, } a) \quad (2.2)$$

Considera-se que a trinca não propaga em forma instável quando a expressão (2.2) se confirma. Muitas propostas para o parâmetro  $Z$  podem existir, sendo duas válidas dentro da chamada Mecânica de Fratura Elástica Linear (MFEL). Nos materiais com trincas, que obedecem à Lei de Hooke, podem-se aplicar os conceitos da mecânica da fratura elástica linear nos quais o comportamento global tem caráter linear e elástico. Para estes, é possível prever a vida útil das estruturas através de uma descrição quantitativa da criticidade do defeito analisado.

Assim, na MFEL existem duas maneiras para realizar o estudo. A primeira é através do critério energético de Griffith ou critério global, o qual se baseia na determinação da energia disponível para o avanço ou extensão instável da trinca pré-existente, que se obtém ao fazer um balanço energético em toda a estrutura. A segunda maneira se refere ao critério do fator de intensidade de tensões de Irwin ou critério local, o qual se baseia na determinação do estado de tensões da estrutura nas proximidades da ponta da trinca (Kanninen e Popelar, 1985).

O fato da deformação não linear do material ser confinada em uma pequena região próxima da ponta da trinca faz com que a Mecânica de Fratura Elástica Linear (MFEL) possa ser aplicada. É necessário um modelo alternativo de mecânica de fratura, pois é virtualmente impossível para muitos materiais, caracterizar o comportamento da fratura com MFEL (Kanninen e Popelar, 1985).

Assim, apresentam-se dois parâmetros clássicos dentro da mecânica de fratura não linear, a qual considera a interação da propagação instável de uma trinca com a plasticidade:

#### **- CTOD – Crack Tip Opening Displacement**

Em 1961 Wells, na tentativa de medir o fator de intensidades de tensões ( $K_{Ic}$ ) de vários materiais, verificou que a mecânica da fratura elástica linear não se aplicava a grande variedade de materiais e também observou que quanto maior a plastificação do material antes da propagação da trinca, maior era a deformação na ponta da trinca nos instantes que



precediam a nucleação. A distância entre as faces da trinca foi proposta por Anderson (2005) como parâmetro alternativo para medir a tenacidade à fratura em materiais com regime elastoplástico, este parâmetro é usualmente definido como tamanho de abertura da trinca, representado por “ $\delta$ ”. A Figura 2.1 mostra de forma esquemática a dimensão definida como “ $\delta$ ”.

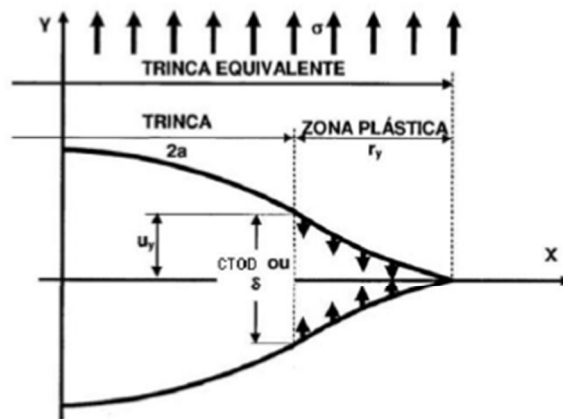


Figura 2.1 – Definição de CTOD (Fonte: Donato, 2008)

### - Integral J

A integral J é um parâmetro da Mecânica da Fratura que descreve muito bem o comportamento de materiais não lineares, onde é uma integral de contorno, que não depende da curva de contorno ao redor da ponta da trinca, na qual é o caminho de integração  $\Gamma$  escolhido pressupondo um comportamento elástico não linear, ou seja, uma aproximação ao comportamento elastoplástico, desde que não haja descarga. Rice em 1968 desenvolveu este parâmetro, baseado no Teorema da Conservação de Energia formulada por Eshelby em 1956. A Figura 2.2 mostra o contorno considerado na determinação da integral J. A representação analítica está descrita na Equação (2.3).

$$J = \int_{\Gamma} w dy - \vec{T} \frac{\partial u}{\partial x} ds \quad (2.3)$$

Onde:

$w$  = densidade de energia

$T$  = vetor tração

$u$  = deslocamento

$ds =$  elemento de contorno

$\Gamma =$  Curva de contorno ao redor da ponta da trinca na qual é o caminho de integração.

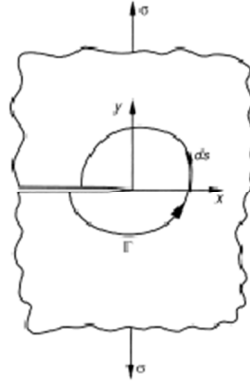


Figura 2.2 – Representação do caminho arbitrário  $\Gamma$  escolhido para o cálculo da integral J (Fonte: Liu, 2005)

Apesar da expressão da Equação 2.3 mostrar uma formulação complicada, a interpretação física da integral J é a variação da energia potencial com o aumento do comprimento da trinca, é uma extensão do conceito de taxa de liberação de energia G que é aplicado no regime elástico.

Textos de mecânica da fratura de Kaninnen e Popelar, 1985; Anderson, 2005; detalham as características dos parâmetros CTOD e Integral J.

Para levar em consideração a plasticidade na ponta da trinca, atualmente existem métodos alternativos, mas não consolidados, tais como:

- O *Crack Tip Open Angle* (CTOA), ângulo da ponta da trinca. [Newman e James, 2001, e Newman *et al.*, 2003].
- O  $\delta_5$  (versão do COD) é um método apresentado por Heinz Schwalbe e o grupo GKSS [Schwalbe *et al.*, 2005 e Schwalbe, 2010].
- O critério da densidade de energia de deformação (do inglês SED), desenvolvido por Sih [Sih, 1975].

Estes parâmetros descrevem as condições da ponta da trinca em materiais onde já não é válido o comportamento elástico linear, e cada um pode ser utilizado como um critério de falha. Os valores críticos do CTOD,  $\delta_5$ , ou da integral J dão uma medida da tenacidade à fratura, inclusive para relativamente grandes quantidades de plasticidade na ponta da trinca. Existem limites para a aplicação destes parâmetros, mas estes limites são muito menos restritivos que os requisitos de validade da MFEL.

## **2.2 Emissão Acústica (EA)**

### **2.2.1 Fundamentos do ensaio não destrutivo de Emissão Acústica**

Scruby (1987) realizou um trabalho com o intuito de realizar uma introdução ao estudo de Emissão Acústica. Neste trabalho, relata que a técnica de emissão acústica (EA) utiliza um ou mais sensores para detectar uma grande variedade de eventos que podem ocorrer em um material sólido. Dependendo da detecção de alta frequência realizada, é possível aplicar o estudo em três áreas: teste estrutural, processo de monitoramento e controle e na caracterização de materiais. No primeiro caso, a fonte provável é um defeito que realiza radiação de ondas elásticas à medida que o mesmo cresce. Partindo do princípio que estas ondas são detectáveis, EA pode ser usada em conjunto com outras técnicas não destrutivas para avaliar a integridade estrutural. No segundo caso, a assinatura acústica dos processos que estão sendo monitorados, podem detectar mudanças significativas em um processo produtivo, permitindo assim o controle dos processos monitorados. No terceiro caso, EA é usada como uma técnica de diagnóstico adicional para estudo de informações relativas a crescimento de defeitos em um material.

Miller e Hill, 2005, citam que a energia elástica liberada por um material quando submetido a alguma deformação é chamada de Emissão Acústica (EA). Por volta dos anos 60, esta nova tecnologia de ensaio não destrutivo surgiu quando foi percebido que seria possível detectar o crescimento de trincas em vasos de pressão através de seus sinais de Emissão Acústica. A Emissão Acústica pode ser definida como um fenômeno onde ondas elásticas transientes são geradas através da rápida liberação de energia devido a rupturas localizadas dentro do material. Estas ondas chegam a superfície e são capturadas por sensores de emissão acústica localizados em posições estratégicas. Em razão das acelerações capturadas pelos sensores ser de baixa amplitude, os sensores de EA devem ser acoplados a amplificadores de sinal. Em geral, os sensores de emissão acústica trabalham na faixa dos 20kHz a 1 MHz, ou seja, tem-se frequências muito altas, exigindo assim técnicas especiais para o tratamento dos sinais gravados. Como normalmente o ensaio se desenvolve em um período de tempo geralmente alto e a taxa de aquisição é elevada, técnicas especiais para o tratamento da informação registrada devem ser desenvolvidas. Sistemas de filtros muitas vezes também são empregados para minimizar ruídos do sinal adquirido.

Segundo Miller e Hill, 2005, as ondas de Emissão Acústica são ondas elásticas devido a movimentos de deslocamento em um meio sólido. Elas são de diferentes tipos : Ondas-P (ondas longitudinais ou volumétricas), Ondas-S (ondas transversais) e outras ondas interfaciais, como ondas de superfície (ondas Rayleigh e ondas Love), ondas refletidas, ondas difratadas, e ondas guiadas (ondas Lamb). Na seção 2.2.3 é realizada uma descrição detalhada dos principais tipos de ondas que se propagam no sólido.

Carpinteri, Lacidogna e Niccolini (2009) realizaram uma efetiva avaliação da distribuição de amplitudes dos sinais de emissão acústica gerados pelo crescimento de micro trincas de estruturas de concreto, também calcularam o valor  $b$ , que permite relacionar o número acumulado de eventos e sua magnitude. Os valores de  $b$  encontrados, e como estes evoluem durante o processo de dano, permite verificar que no começo do processo de dano, fontes de emissão acústica aparecem igualmente distribuídas em todo o corpo de prova estudado. Isto implicaria na determinação de fator  $b=1,5$ , sendo que este valor é a metade da dimensão fractal na qual esta distribuição de fontes de emissão acontece ( $D= 2xb =3$ ). Na medida em que o processo de dano avança, as fontes tendem a concentrar-se em certas regiões, o que indica a formação de um aglomerado de trincas. Este aglomerado de trincas tende a formar uma única macro trinca, neste caso, o valor de  $b$  diminui e tende a 1. O que implica que a dimensão fractal na qual acontecem as fontes dos eventos de emissão acústica é próxima a  $D=2$ . Outros trabalhos de Carpinteri mostram esta tendência, entre eles pode-se citar Carpinteri e Corrado (2009) e Carpinteri *et al* (2006).

É interessante também salientar o trabalho desenvolvido em Carpinteri *et al* 2012, no qual se verificou a forma como o número de eventos máximos de emissão acústica mudam com a escala. É realizada a relação do número de eventos máximos com o volume da cada amostra estudada.

## **2.2.2 Técnicas de Emissão Acústica (TEA)**

Entre os testes não destrutivos, a Técnica de Emissão Acústica (TEA) é considerada um método singular, pois, diferente de outros métodos, as Técnicas de Emissão Acústica são aplicadas geralmente durante o carregamento da estrutura. Na maioria dos outros ensaios, as técnicas são aplicadas antes ou depois do carregamento aplicado (Grosse; Ohtsu, 2008).

Geralmente, a emissão acústica é utilizada para detectar uma falha em um estágio prematuro, muito antes que uma estrutura venha a falhar completamente. As TEA são consideradas ensaios não destrutivos (testes que não irão inutilizar o material no futuro), pois a estrutura é avaliada com o estado de carga previamente definido em projeto, não adicionando qualquer outro tipo de carga (Grosse; Ohtsu, 2008).

O ultrassom, por exemplo, é um método chamado de “ativo”, capaz de detectar a forma geométrica de um defeito em uma amostra usando uma fonte de sinal que é gerada artificialmente e um receptor. Já o método de emissão acústica (EA) é considerado uma técnica “passiva” não destrutiva, pois geralmente, identifica defeitos somente enquanto eles se desenvolvem durante o ensaio. As TEA detectam ondas elásticas irradiadas por uma fratura em crescimento. As TEA são muito utilizadas para detecção de falhas em um estágio inicial, antes mesmo de uma estrutura falhar por completo (Grosse; Ohtsu, 2008). A aplicação das técnicas ativas e passivas é ilustrada na figura 2.3.

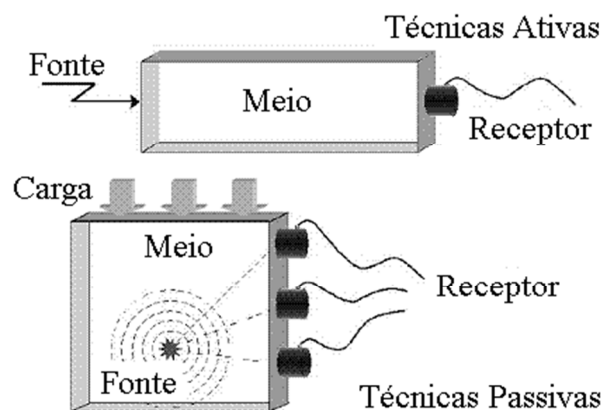


Figura 2.3 – Comparação entre as técnicas ativas e passivas. (Grosse; Ohtsu 2008)

As técnicas usadas para captura e tratamento dos dados obtidos em emissão acústica são adequadas para os tipos de sinais esperados, os quais são característicos. A Figura 2.4 (a) mostra um típico registro de EA, no qual ocorre uma liberação espontânea de energia durante a fratura. Já na Figura 2.4 (b) tem-se um exemplo de registro de emissões acústicas provenientes de corte de metal ou pela fricção na rotação de rolamentos.

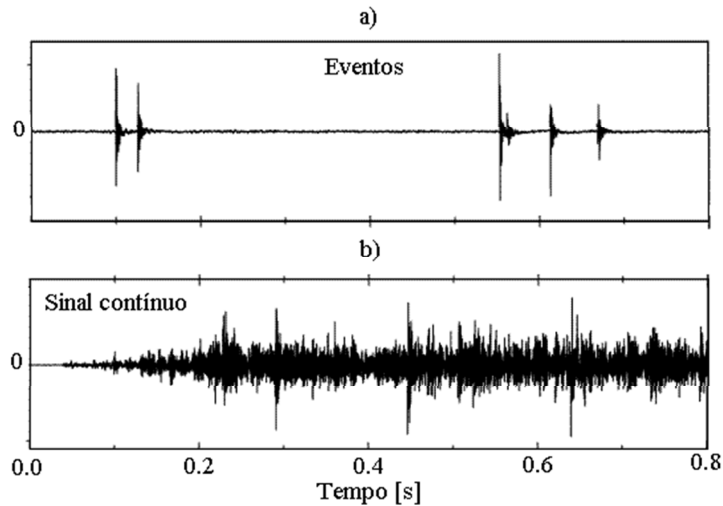


Figura 2.4 - Exemplo de uma comparação entre, (a) sinal típico de emissão acústica (b) emissão contínua. (Grosse.C. U. Ohtsu M. 2008)

### 2.2.3 Propagação de Ondas no Meio Elástico

Dowding, 1985, cita que em um corpo qualquer, quando uma carga repentina pontual é aplicada, as regiões mais próximas serão afetadas antes do que as regiões mais distantes. Ao longo de todo o corpo, as deformações geradas pela excitação produzida irá se propagar na forma de ondas mecânicas, até que a energia se dissipe gradualmente. As ondas possuem algumas características que serão expostas a seguir considerando corpos elásticos e homogêneos.

#### *Velocidades*

Quando se trata de vibrações em um meio elástico, as ondas podem ser classificadas em Primárias, de Corte e Ondas de Superfície.

#### - Ondas Primárias (P)

As ondas primárias (P) ou “compressivas” possuem a maior velocidade de propagação. Na Figura 2.5 (a) é possível perceber que a direção de propagação destas ondas possui a mesma direção de movimentação das partículas. Para o caso de uma carga pontual tem-se a propagação na forma radial.

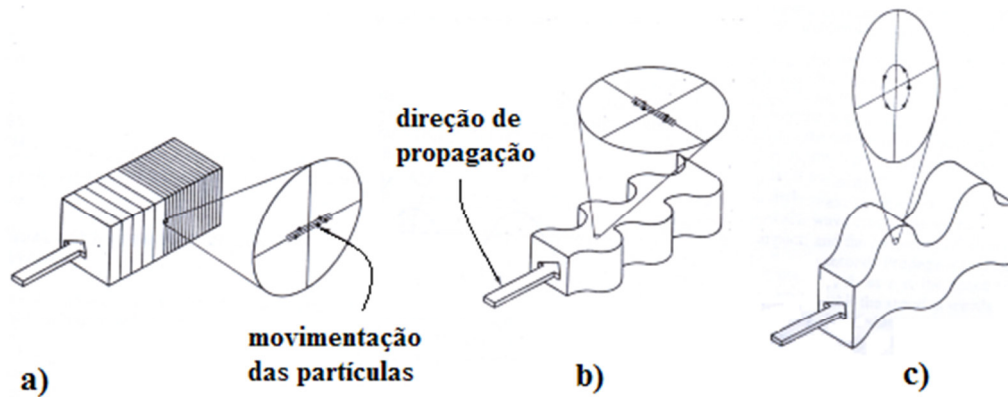


Figura 2.5 – Ilustração esquemática de ondas primárias (a), secundárias (b), de superfície (c) (Dowding, 1985).

Na Equação (2.4) está representada a velocidade das ondas P (Dowding, 1985):

$$V_P = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{E}{\rho}} \quad (2.4)$$

Onde:

$\nu$  - Coeficiente de Poisson;

$V_P$  - Velocidade da onda P [m/s];

E - Módulo de Elasticidade [N/m<sup>2</sup>];

$\rho$  - Densidade mássica [kg/m<sup>3</sup>].

- Ondas de Corte (S)

Nas ondas de corte “S” (*shear waves*), chamadas também de distorcionais, tem-se velocidades mais baixas que as ondas P. Isto se deve ao fato do movimento das partículas estarem em uma direção perpendicular à direção radial (ver Figura 2.5 (b)). As ondas de corte (S) podem ser verticais e/ou horizontais (Dowding, 1985). Na Equação (2.5) é representada a velocidade de propagação das ondas S:

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.5)$$

Onde:

$V_S$  - Velocidade da onda S [m/s];

G - Módulo de cisalhamento [N/m<sup>2</sup>];  
ρ - Densidade mássica [kg/m<sup>3</sup>].

- Ondas de Superfície

Por fim, as ondas de superfície possuem menores velocidades e maiores amplitudes, principalmente quando medidas nas superfícies dos corpos. As mais significativas ondas de superfície são as de Rayleigh (r), sendo descritas por (Siskind, 2000) como “ondas parecidas com as ondas nos oceanos batendo nas praias”. Na Figura 2.5 (c) pode-se ver a representação deste tipo de onda. O autor (Das, 1982) apresenta a Tabela (2.1) que quantifica a partir de um coeficiente de Poisson, a razão ( $\gamma$ ) entre as velocidades das ondas de Rayleigh e das ondas S.

$\nu$	$\gamma = V_R / V_S$
0,25	0,919
0,29	0,926
0,33	0,933
0,4	0,943
0,5	0,955

Tabela 2.1 – Valores que relacionam coeficiente de poisson e razão entre as velocidades das ondas de Rayleigh e S (Das, 1982)

É importante observar que a velocidade das ondas de Rayleigh é de 5% à 9% menor quando comparadas às secundárias. Em pequenas distâncias, existe certa dificuldade em diferenciar uma onda tipo (S) de um onda de Rayleigh (Das, 1982).

No esquema da Figura 2.6, a partir de uma explosão, pode-se ver a propagação no solo para os três tipos de ondas.

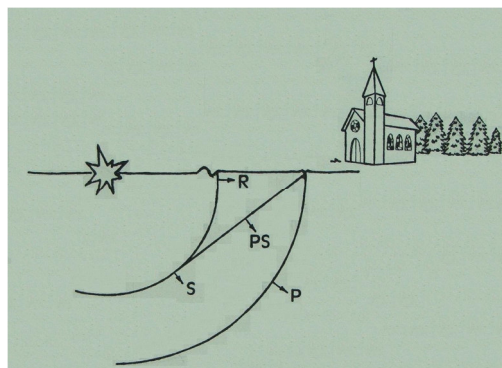


Figura 2.6 - Esquema ilustrativo de propagação de ondas em meio elástico (Persson et al., 1993)



## *Atenuação*

Charles J. Hellier, 2001, relata que a atenuação, de forma geral, é a perda de amplitude quando a onda propaga-se em direção ao exterior a partir da fonte. Isto é importante quando se detecta ondas de fontes distantes. Quando a onda acústica se propaga através da estrutura sua amplitude diminui, este efeito é conhecido como atenuação. Atenuação ocorre por muitos fatores. Na maioria das estruturas, ocorre em razão da distribuição geométrica, dispersão nos limites da estrutura e absorção. Os efeitos da distribuição geométrica são fundamentais para a propagação de ondas. Basicamente, ocorre uma “tentativa” da onda sonora se propagar completamente pelo volume da estrutura perto da fonte geradora; a alteração no campo estático de tensões e o movimento das ondas em amplitude estão no máximo. Em teoria, em uma estrutura que possui grandes dimensões, uma onda de tensão simplesmente se propagaria e atenuaria. Em estruturas reais, os limites da estrutura obrigam as ondas a permanecerem em um espaço confinado, em que a atenuação é limitada. A segunda maior causa de atenuação é a reflexão nos limites da estrutura e nas descontinuidades geométricas. As ondas elásticas sempre são refletidas quando atingem uma descontinuidade. Mais detalhes a respeito de atenuação podem ser vistos com profundidade em Jacques R. (2009).

### **2.2.4 Fontes de Emissão Acústica**

Segundo Miller e Hill, 2005, a Emissão Acústica é a energia elástica espontaneamente liberada pelos materiais quando estão sob deformação. A energia liberada do campo de tensões cria novas deformações que vão produzir Emissão Acústica. Em outras palavras, a fonte de energia de Emissão Acústica é a energia armazenada no campo elástico de tensões produzido pelo carregamento da estrutura. Emissão Acústica é produzida na fonte, na forma de um pulso curto de energia elástica e cinética que percorre o material como uma onda elástica.

Charlies 2001, cita a teoria de espectro de frequências mostrando que, sendo um pulso curto, a onda carrega energia em todas as frequências, da mais baixa até as mais altas, (da ordem de 1 MHz). Algumas emissões de baixa frequência, da ordem de aproximadamente (50Hz a 15kHz), podem ser até mesmo ouvidas. Isto confirma a idéia de que a energia da emissão acústica está distribuída ao longo de uma grande faixa de frequências. A teoria mostra que as frequências que vão até zero são evidenciadas pelas grandes Emissões

Acústicas provenientes de terremotos, que sacodem prédios a uma grande distância, em frequências muito baixas.

A quantidade de energia liberada na Emissão Acústica, e a amplitude da onda resultante, dependem da velocidade e da magnitude do evento. Uma trinca repentina vai gerar um sinal maior do que uma fissura que avança lentamente, ao longo da mesma distancia. A amplitude da emissão é proporcional a velocidade com que a trinca avança.

Charles 2001, divide as fontes de Emissão Acústica em 3 classes distintas:

- Atividades primárias em que ocorrem novas mudanças permanentes no material original. Isto é causado principalmente em razão de tensões locais que são mais elevadas que os níveis de tensão originais.
- Atividades secundárias dos materiais, que não fazem parte do processo de fabricação original, como a ocorrência de corrosão.
- Atividades secundárias provenientes de processos repetitivos, como o atrito entre as superfícies de uma trinca, que não geram novas mudanças permanentes no material. Atividades secundárias podem ser úteis ou incômodas, dependendo da forma como é trabalhada. Emissão secundária é diferente de “ruído”, que é sempre um grande problema para quem trabalha com Emissões Acústicas.

Ruído, em Emissão Acústica, significa qualquer sinal inesperado. Os principais tipos de ruídos são atrito e impacto, que podem ser resultados de alguma ação do ambiente. Uma parte intrínseca da técnica de Emissão Acústica é eliminar as fontes de ruído e concentrar no que é relevante. Ruídos podem ser evitados realizando uma boa instrumentação, tomando alguns cuidados no ambiente para evitar fontes de ruído (se possível) e por último, reconhecer e remover fontes de ruído dos dados coletados (interpretação dos dados).

### **2.2.5 Formas de Detecção e Instrumentação utilizada em EA**

Segundo OHTSU 2008, sensores de Emissão Acústica devem ser sensíveis o bastante para detectar sinais de EA gerados por uma estrutura, levando em consideração o acoplamento acústico. Os sensores de EA devem ser robustos para suportar mudanças de temperatura, condições de umidade e ambientes contendo vibrações mecânicas.

Um sistema usual de medição está esquematicamente representado na figura 2.7.

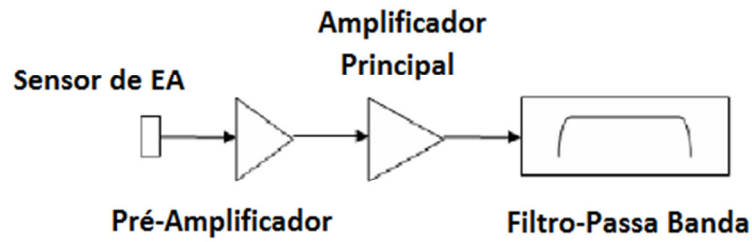


Figura 2.7 - Sistema de detecção de EA (OHTSU, 2008)

Diversos parâmetros de EA podem ser obtidos do sistema de aquisição de dados. Através de um sistema de medição e aquisição de dados, os sinais podem ser obtidos e processados em dados tais como contagens, eventos, amplitude máxima, energia, tempo de subida, duração, tensão RMS, espectro de frequências e diferença de tempos de chegada (OHTSU 2008). Alguns destes parâmetros estão ilustrados na figura 2.8:

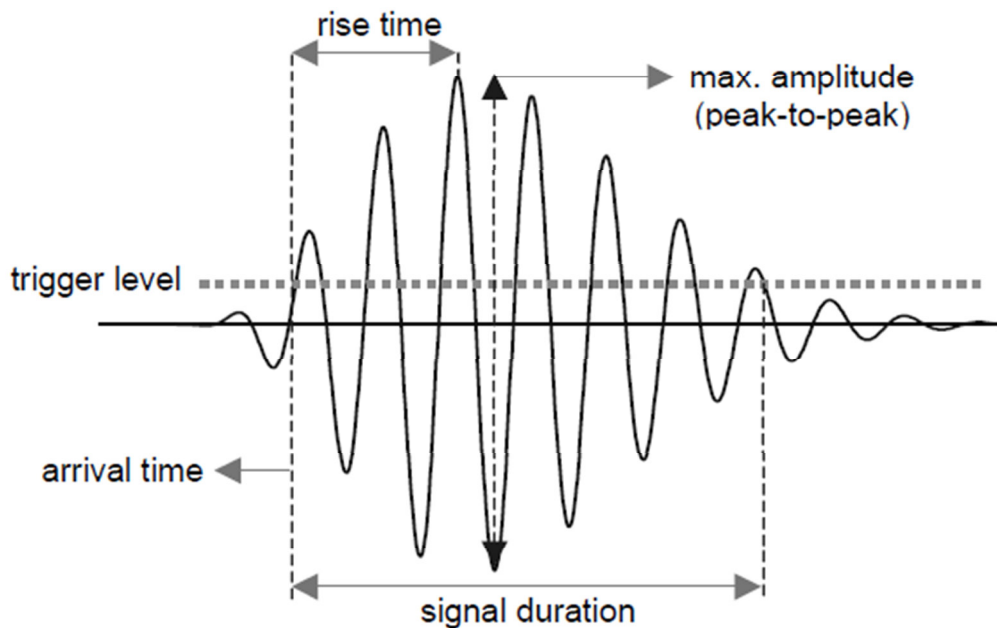


Figura 2.8 – Parâmetros de EA (OHTSU, 2008)

Segundo Miller e Hill, 2005, os sensores usados em Emissão Acústica para o monitoramento da vida útil de estruturas devem ser facilmente instalados e de boa faixa de detecção de frequências para capturar o rompimento ou falha da estrutura monitorada. Os sensores geralmente atuam na faixa de 30kHz até 1MHz. Grande parte das aplicações, tais como concreto, metais, ocorre no monitoramento de frequências de 100 a 300kHz. No

mercado existem diversos modelos de sensores (de contato e não contato) de vários tamanhos e baseados em uma grande gama de diferentes fenômenos.

Os sensores mais usados em Emissão Acústica são os Piezoelétricos. A Figura 2.9 apresenta o esquema de um sensor Piezoelétrico.

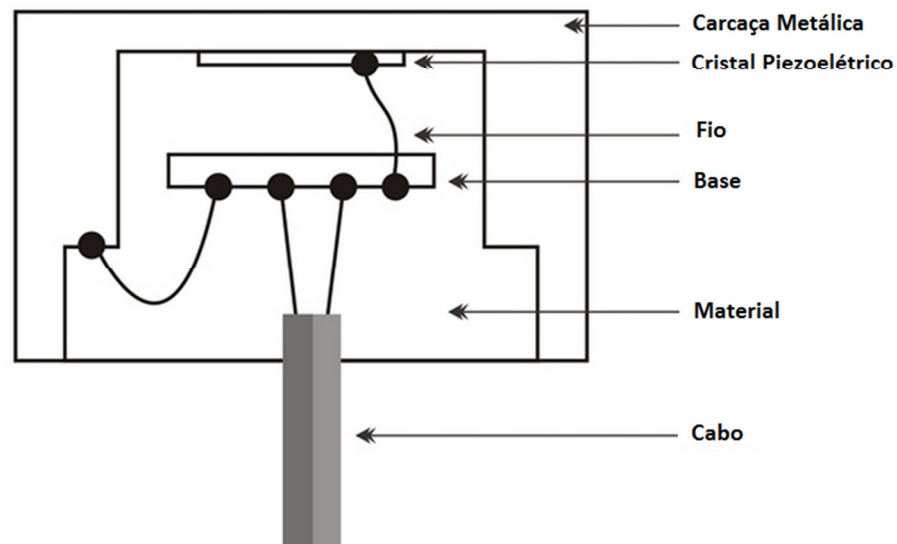


Figura 2.9 – esquemático de um sensor piezoelétrico (Fonte: <http://www.ibertec.com.br/iframes/suporte1.php>)

Entre duas placas metálicas que suportam a tensão e atuam como eletrodos, tem-se montado o material piezoelétrico. Quando nenhuma tensão é aplicada, as cargas positivas e negativas possuem centro de gravidade em comum e então acaba ocorrendo polarização nula (Cheeke, 2002). Quando uma tensão é aplicada, ocorre uma distribuição assimétrica das cargas, o que faz com que os centros de gravidade não coincidam e ocorra um momento de dipolo, causando um acúmulo de carga nos eletrodos e uma tensão entre eles. Portanto, a passagem de uma onda sonora na superfície do material, gera uma diferença de potencial no sensor piezoelétrico que é transferida para o sistema de aquisição de dados. Em geral, os sensores possuem já embutidos pré-amplificadores, pois existe uma máxima distancia aceitável entre o pré-amplificador e o sensor de EA. Isso ocorre para haver uma boa relação de sinal/ruído e também por ser mais prático. Outro ponto importante se trata da fixação dos microfones. Os sensores não devem tremer e nem se deslocar, caso contrário tem-se possíveis problemas com ruídos que possam interferir na aquisição dos dados.

## 2.2.6 Emissão Acústica no Contexto da Sismologia

Ohtsu 1982 relata que um fenômeno sísmico é aquele resultante de movimentos subterrâneos de placas rochosas provenientes de atividade vulcânica ou por deslocamentos de gases no interior da Terra. O movimento é causado pela liberação rápida de grandes quantidades de energia sob a forma de ondas sísmicas. Essas ondas se propagam da fonte para fora em forma esférica, como consequência deste desequilíbrio o solo sofre vibrações.

Segundo Ohtsu 1982, as emissões acústicas (EA) podem ser consideradas uma forma de microssismos gerados durante o processo de fratura em estruturas carregadas. A emissão acústica é definida como a liberação espontânea de energia de deformação localizada numa determinada estrutura. Essa liberação de energia pode ocorrer, por exemplo, de microfissuras no material e podem ser registradas por transdutores de medição na superfície do modelo ensaiado. Esse é o motivo pelo qual TEA (Técnicas de Emissão Acústica) são tão semelhantes às técnicas aplicadas em sismologia. Os mesmos conceitos são aplicados, porém numa escala diferente. Na área da sismologia, a mesma investiga tremores de terra em grandes distâncias. Técnicas de emissão acústica são normalmente aplicadas em fontes receptoras com distâncias de até vários metros, mas também podem ser aplicadas em distâncias muito pequenas.

Ohtsu foi o primeiro cientista a utilizar técnicas de processamento de dados de terremoto para o uso do processamento de dados em Emissão Acústica. As técnicas de emissão acústica geralmente trabalham com altas taxas de aquisição de sinal em frequências relativamente altas (da ordem de kHz até MHz). Para isso, são necessárias poderosas técnicas de análise numérica e dispositivos de gravação para tratar os dados (Ohtsu, 1982).

### 2.2.7 Análise do Valor “b”

Segundo Iturrioz I; Lacidogna G; Carpinteri A 2013, o desenvolvimento de danos em uma estrutura pode ser avaliado através da técnica de EA, a partir da análise estatística da distribuição de amplitude de sinais de EA que surge das microfissuras crescentes. As microtrincas correspondem às baixas amplitudes, enquanto que as macrotrincas correspondem às altas amplitudes. É possível descrever o comportamento da fissura durante todo o processo da fratura em um corpo. Magnitude ( $m$ ) é o logaritmo da amplitude de um evento de emissão acústica, muitas vezes usada para caracterizar um sinal elétrico gerado por um evento de emissão acústica. A magnitude está relacionada com a amplitude  $A$ . O estudo teve início na geofísica, em que a magnitude ( $m$ ), Equação 2.6, é expressa igual ao logaritmo da amplitude ( $A$ ) do evento de EA.

$$m = \text{Log } A \quad (2.6)$$

A lei de Gutenberg-Richter (GR) permite relacionar o logaritmo do número de eventos (maiores ou iguais que  $m$ ) versus  $m$  e é muito utilizada para descrever eventos sísmicos. Usando uma distribuição estatística do sinal de Emissão Acústica, Richter verificou que a lei potencial de escala logarítmica pode ser expressa pela Equação 2.7, que descreve a distribuição estatística do sinal de amplitudes da EA, logo:

$$\text{Log } N (\geq m) = a - b \cdot m \quad (2.7)$$

Na figura 2.10 pode ser visto um exemplo do valor  $b$ , onde  $N$  é o número de eventos (sinal) com magnitude maior que  $m$ . O valor  $b$ , também chamado “coeficiente  $b$ ” possui inclinação negativa no gráfico  $\log N \times m$ .

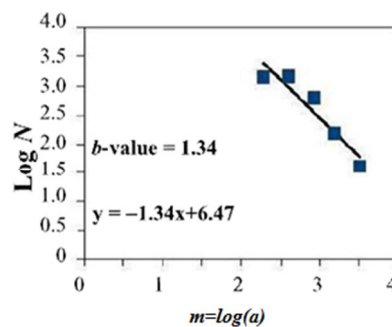


Figura 2.10 – exemplo valor  $b$  (Carpinteri Mec Mat 2012)

O Valor “b”, se altera com as diferentes etapas de crescimento dos defeitos: o microfissuramento inicialmente dominante gera um grande número de sinais de EA de baixa amplitude, enquanto que uma macrofissura gera menos sinais, mas de maiores amplitudes. Isto implica que, uma diminuição progressiva do valor “b” da amostra pode indicar que uma falha eminente está próxima. Esta observação é o fundamento da chamada “Análise do valor-b” usada para a avaliação de danos (Carpinteri, 2009 e Shiotani, 1994).

Mandelbrot, 1982, definiu que o processo de danos também é caracterizado por uma progressiva localização identificada através da dimensão fractal  $D$  do domínio danificado. Para superfícies, as mesmas podem ser representadas por fractais com dimensão entre 1 e 2. Já para volumes, os mesmos podem ter dimensão fractal entre 2 e 3. É possível provar que  $2b = D$  (Carpinteri, 2009). Portanto, pode-se identificar as modalidades de libertação de energia na estrutura durante o processo de monitoramento da EA, determinando o valor “b”. Os casos extremos previstos são  $D = 3,0$ , o que corresponde às condições críticas  $b=1,5$ , quando a liberação de energia acontece através de pequenos defeitos distribuídos em todo o volume, e  $D = 2,0$ , o que corresponde a um valor de  $b=1,0$ , quando a liberação de energia ocorre em uma superfície (uma única trinca). No primeiro caso, o dano difuso é observado, enquanto que no segundo, a localização numa macro trinca acontece. O valor-b é o coeficiente angular da reta de tendência linear do gráfico em escala logarítmica do número de eventos maiores ou iguais a  $m$  versus a sua amplitude (ver figura 2.10).

### **2.2.8 Identificação de eventos de Emissão Acústica**

A fase mais crítica da análise de EA é a identificação de eventos. Um evento é caracterizado principalmente pela sua amplitude máxima, entretanto, outros parâmetros também fazem parte, conforme apresentado na figura 2.11(a). É necessário definir uma magnitude limite para realizar o processamento do sinal. Após a magnitude ser atingida é que o sinal pode ser considerado um evento de EA.

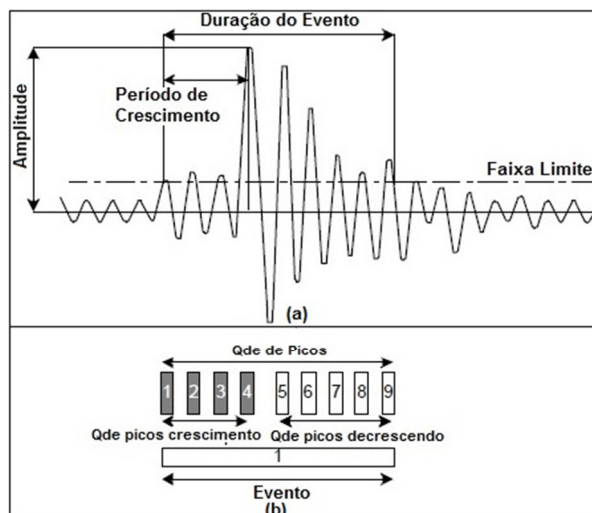


Figura 2.11 – Caracterização de um evento: (a) Aplicação de amplitude máxima, (b) N° de picos. (Grosse et al., 2008, p.43)

Também é possível analisar o evento de EA no domínio de frequência. Para isto, a frequência do sinal, identificado como um evento, é calculada. A sua frequência é verificada a fim de conferir se a mesma corresponde com a frequência típica de sinais de EA. A frequência média é calculada pelo número total de picos dividido pela duração do evento (ver figura 2.11(b)). Neste trabalho, para as análises de contagem de eventos e amplitudes de sinal, foi considerado como um evento de emissão acústica o sinal que possui um período de crescimento e decrescimento de amplitudes e no meio disto atinge uma amplitude máxima comparada às amplitudes desde o início do crescimento e o fim do decrescimento de amplitudes .

### 2.2.9 Técnicas de Localização em Emissão Acústica

Paul Rydelek e Jose Pujol (2004), desenvolveram um método simples que utiliza somente dois dos tempos de chegada das ondas P de um arranjo de detecção de ondas sísmicas. O objetivo deles foi mostrar um método de detecção e localização de terremotos. A habilidade de rapidamente localizar um terremoto potencialmente devastador, em um sistema em tempo real, é a chave para o sucesso na prevenção de catástrofes. Assumindo um modelo simples de velocidades, os tempos de chegada são usados para construir curvas hiperbólicas, em que se espera prever o epicentro do terremoto.

Dunegan (2004) realizou um trabalho na área de detecção de vazamentos/trincas em tubulações pressurizadas. Utilizou técnicas de emissão acústica para realizar a localização dos



defeitos. Foram realizadas medições de amplitudes em altas frequências e amplitudes em baixas frequências. Foi chamada de proporção modal (“Modal Ratio”), a técnica que consiste em dividir as amplitudes em alta frequência e baixa frequência, devendo o resultado ser proporcional à distância entre o vazamento da tubulação e os sensores que o detectam.

Athanasios Anastasopoulos, Dimitrios Kourousis e Konstantinos Bollas (2009) descrevem a importância na detecção de vazamentos em oleodutos abaixo do solo. Relatam que mesmo que os vazamentos estejam bem aparentes, muitas vezes, em grandes tubulações, é difícil detectar a localização sem o uso de uma técnica aprimorada. Esses autores consideram que a Emissão Acústica é uma excelente ferramenta para detecção e localização de vazamentos em tubulações abaixo do solo. Somente é necessário acessar a tubulação onde serão instalados os sensores de EA. O oleoduto é pressurizado e a Emissão Acústica é medida em trechos de até 1000m de extensão por vez. Os sensores de EA detectam o escoamento turbulento pelos orifícios de vazamento, com o uso de sistemas digitais de EA e com softwares específicos de interpretação dos dados, caracterizando a posição do vazamento. O trabalho descreve a técnica de EA e a física envolvida por trás do fenômeno, apresenta suas vantagens, limitações e requisitos do método. Finalmente o trabalho mostra diversos estudos de casos de sucesso na detecção e localização de vazamentos em oleodutos subterrâneos.

Tobias (1976) em seu trabalho, demonstra um método geral de cálculo de localização de defeitos em duas dimensões através dos tempos de chegada nos sensores. O método é uma simplificação do método de localização por hipérbolas, consiste em traçar círculos no entorno de cada sensor, utilizando os dados de velocidade de propagação das ondas no material, tempo de chegada da onda no sensor e distâncias. A fonte de emissão acústica estará localizada no ponto de interseção dos círculos.

No âmbito da UFRGS também pode-se citar o trabalho de Birck G. (2013), o qual realiza estudo de aplicação de técnicas de emissão acústica para monitoração de danos estruturais. Em seu trabalho ele correlaciona o sinal de emissão acústica com parâmetros que auxiliam a monitorar os danos causados na estrutura. Foram realizados ensaios experimentais juntamente com simulações numéricas (Método de Elementos Discretos) em vigas de poliestireno expandido (Isopor), uma com pré-trinca e outra sem. Resultados de cálculo de índices globais para monitorar o tipo de dano esperado, determinação dos modos de falha e localização na análise de eventos isolados são objetos deste estudo. Rodrigues R. S. (2012) realizou trabalho no âmbito de aplicação de técnicas de EA para localização de dano em

estruturas. Foram realizados ensaios em poliestireno expandido, determinando a posição da fonte através de técnicas de localização, a partir da medição dos sinais de vários sensores em uma placa quadrada com quatro sensores instalados. Comparações com simulações numéricas através dos métodos dos elementos discretos também foram realizadas.

Em um Sistema de Instrumentação para Emissão Acústica é possível posicionar vários sensores em diversas posições. Desta forma, um único evento de EA pode ser detectado por diversos sensores, chegando a informação em cada sensor, com amplitudes e em tempos diferentes. Utilizando a informação do tempo de chegada da onda nos diferentes sensores, é possível inferir aonde está posicionada a fonte desta onda, ou seja, a posição do defeito que ocasionou a emissão acústica. Diversas técnicas são utilizadas e, a partir da informação dos tempos de chegada, é possível determinar a posição do defeito no corpo de prova ou estrutura avaliada, a técnica utilizada neste trabalho foi a de localização pelo método dos círculos. Uma importante informação que é calculada antes de se aplicar as técnicas de localização é o valor da velocidade de propagação da onda-p no corpo de prova.

#### *Cálculo da velocidade de propagação da onda-P*

Os cálculos da localização das fontes de emissão acústica se baseiam no tempo de chegada das ondas da fonte de emissão até os microfones levando em conta a distância entre os microfones. Estes tempos de chegada da onda dependem da velocidade que a mesma se propaga, da fonte até os sensores. Para obter-se a velocidade de propagação da onda ao longo do material é levado em conta a distância entre os microfones e o cálculo da diferença de tempo de chegada das ondas entre os microfones instalados. Portanto, dividi-se o valor da distância entre os microfones pelo diferença de tempo de chegada das ondas medida com os microfones.

A seguir explica-se a técnica de Localização dos Círculos utilizada no presente trabalho.

*Método de Localização dos círculos:* quando sensores são instalados na superfície de um corpo que está sob o efeito de algum tipo de carga, os mesmos podem detectar ondas de Emissão Acústica vindas de algum defeito no material. A diferença de tempo de detecção das emissões em diferentes sensores nos fornece uma forma de localizar onde se encontra o defeito. Tobias (1976) desenvolveu um método geral para calcular o local de defeitos em duas

dimensões a partir dos tempos de chegada da onda nos sensores. Havskov (2002) também fez uso da técnica em seu trabalho sobre localização de eventos provenientes de terremotos.

A intersecção de círculos indica a localização da fonte de EA. Para isto, são utilizados os valores das distâncias entre os sensores, diferença de tempo entre os mesmos, velocidade de propagação da onda no material e posição dos microfones.

O método se vale de 3 círculos (Figura 2.12), ou seja, são utilizados 3 sensores para o desenvolvimento. A fonte de emissão acústica é localizada no ponto de intersecção dos círculos relativos aos centros que o autor nomeia de S0, S1 e S2. Estes centros são os próprios microfones. Os centros possuem raios  $r$ ,  $r+\delta_1$  e  $r+\delta_2$ , os quais  $\delta_1=t_1*V$ ,  $\delta_2=t_2*V$  e “ $r$ ” é calculado pela equação 2.8.

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (2.8)$$

Onde:

$R$ = distancia do sensor 1 até a fonte de EA (m)

$D_1$ = distancia entre sensores 1 e 2 (m)

$\Delta t_1$ = diferença de tempo de chegada da onda entre sensor 1 e 2 (s)

$V$  = velocidade da onda-P no material (m/s)

$\Theta$ = ângulo (radianos) entre um plano horizontal e a fonte de EA

$\Theta_1$ = ângulo (radianos) entre sensor 1 e sensor 2

Considerando um arranjo arbitrário (A.Tobias 1976) de três sensores localizado em pontos chamados de S0(0,0), S1(x1,y1) e S2(x2,y2), conforme Figura 2.12.

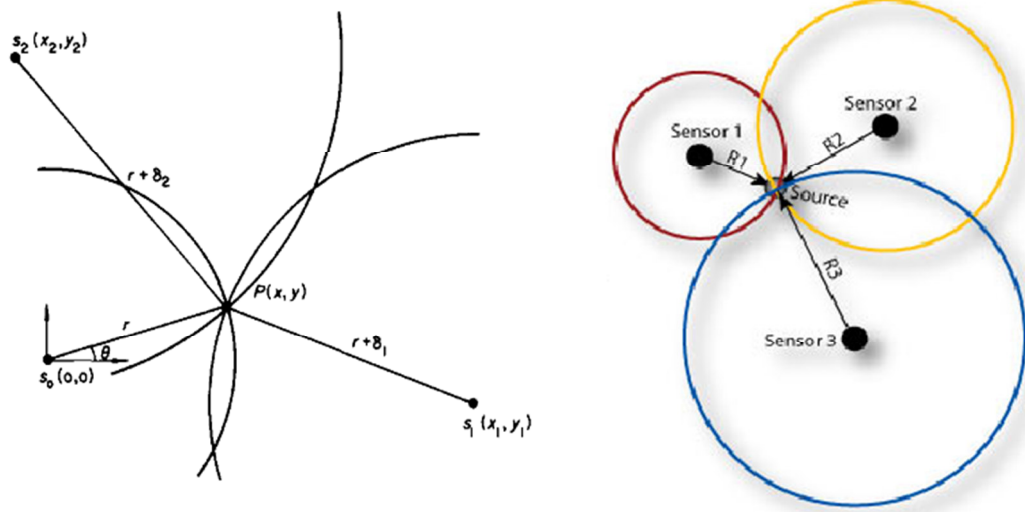


Figura 2.12 – Três sensores perto de um defeito receberão sinais de emissão em tempos diferentes (A. Tobias 1976)

Uma fonte de Emissão Acústica  $P(x,y)$ , uma distância  $r$  de  $S_0$ , irá gerar as diferenças  $\delta_1$  e  $\delta_2$  definidas por  $\delta_1=PS_1-PS_0=t_1*v$  e  $\delta_2=PS_2-PS_0=t_2*v$ , aonde  $v$  é a velocidade de propagação da onda no material e  $t_1$  e  $t_2$  são as diferenças nos tempos de chegada do ruído medidas a partir dos sensores  $S_1-S_0$  e  $S_2-S_0$  respectivamente. A fonte de emissão acústica no ponto  $P(x,y)$  é localizada no ponto de intersecção dos círculos formados por  $S_0$ ,  $S_1$  e  $S_2$ , com raios  $r$ ,  $r + \delta_1$  e  $r + \delta_2$  respectivamente. As equações dos três círculos são descritas em (2.9 a 2.11):

$$x^2 + y^2 = r^2 \tag{2.9}$$

$$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = (r + \delta_1)^2 \tag{2.10}$$

$$(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = (r + \delta_2)^2 \tag{2.11}$$

### 2.2.10 Interpretação e análise de dados de EA

Em testes não destrutivos, a análise e interpretação dos dados são parte integrante da avaliação (Figura 2.13). A ASTM desenvolveu as seguintes definições:

*Indicação:* Resposta ou evidencia de uma resposta em um teste não destrutivo.

*Interpretação:* As determinações de quais indicações são relevantes, não relevantes ou falsas.

*Avaliação:* A determinação da significância das indicações relevantes.

*Falso*: Dado obtido através de técnica ou processo impróprio.

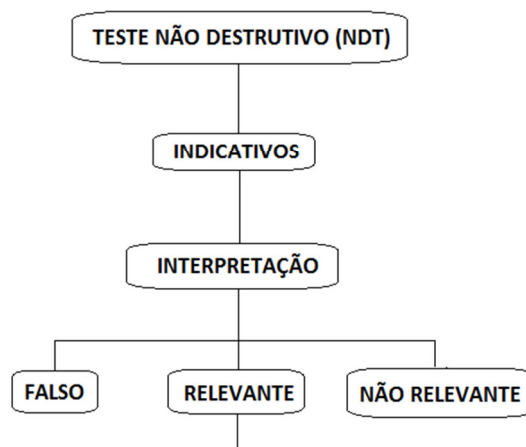


Figura 2.13 – Interpretação e avaliação de dados de teste não destrutivo (Charles J. Hellier 2001)

Charles J. Hellier (2001) observa que nos testes de EA, a indicação mais básica é um simples choque ou golpe. Indicações relevantes são choques produzidos por uma trinca. Indicações não relevantes incluem choques produzidos por fontes que não fazem parte da área de inspeção. Falsas indicações incluem choques em razão de “ecos”, resultado de uma possível má calibração ou instalação dos equipamentos de aquisição de dados de EA.

Em EA, a primeira tarefa a ser realizada na análise dos dados é identificar qualquer dado não relevante ou falso, se isto ocorrer deve-se então proceder com uma filtragem dos dados. Após a filtragem, um novo arquivo de dados é criado somente com dados relevantes para ser enfim avaliado. Este processo é usado em muitas aplicações de EA aonde técnicas foram padronizadas e procedimentos foram criados.

Procedimentos de avaliação têm sido criados para muitos tipos de aplicações de Emissão Acústica. Documentar condições e resultados com o uso de um banco de dados possibilita o uso em análises futuras.

### 2.2.11 Efeito de Escala

Conforme observado por Kostas, 2012, com relação ao efeito de escala, é preciso que seja feita uma diferenciação entre efeito de escala estrutural e efeito do tamanho nas quantidades mecânicas no estudo de mecânica dos sólidos. O efeito de escala estrutural pode ser evidenciado pela transição do comportamento dúctil ao comportamento frágil, quando

ocorre aumento da estrutura. Em todos os materiais utilizados na engenharia temos este tipo de efeito de escala (como exemplo, pequenos filamentos de vidro possuem ductilidade e grandes estruturas de aço possuem comportamento frágil). Assim, com o aumento do tamanho das estruturas, uma falha catastrófica é esperada, para isso é necessário que a taxa de liberação de energia durante a fratura seja progressivamente maior que a taxa da energia consumida na superfície da fissura. A energia dissipada para abrir uma fissura muda proporcionalmente com a área, já a energia acumulada num sólido muda proporcionalmente com o volume. Foi demonstrado por Carpinteri e Chiaia, 1996, que esta competição dimensional é suavizada quando, no volume, ocorre dissipação da energia. Este é o mesmo caso das zonas em que ocorrem dano e plasticidade, ou quando ocorre dentro dos domínios que possuem dimensão fractal maior que 2. Um colapso mais dúctil ocorre para todos estes casos.

O efeito do tamanho da estrutura sobre a resistência aparente (Bažant e Chen, 1997) é o mais importante efeito de escala nas propriedades nominais dos materiais. Primeiramente este problema foi abordado por Leonardo da Vinci, que pode ser considerado o primeiro a estudar o chamado efeito de tamanho estatístico. Ele afirmou, na verdade, que “se duas cordas têm a mesma espessura, a mais longa é a mais fraca”. A abordagem estatística moderna é baseada no conceito de elo mais fraco, originalmente proposto por Weibull, 1939, e posteriormente, desenvolvida por Freudenthal, 1968, e Carpinteri, 1986, entre outros. Neste contexto, o efeito de tamanho da resistência nominal é fornecido pela probabilidade de encontrar o defeito mais crítico (dependendo do seu tamanho e orientação), o que obviamente aumenta com o acréscimo do tamanho da estrutura.

Segundo Carpinteri *et al.* 2012, é possível relacionar a energia liberada com o número de eventos produzidos e o domínio fractal da estrutura conforme a relação (2.12):

$$W \sim N \sim V^{D/3} \quad (2.12)$$

Onde:

$W$ : energia

$N$ : número de eventos

$V$ : volume do corpo

$D$ : dimensão fractal 2b

Com isso, Carpinteri *et al.* 2012, relaciona o coeficiente angular da reta que vincula Log  $N_{max}$  com o logaritmo do volume do corpo de prova ensaiado. O caso analisado por Carpinteri se ilustra na figura 2.14, com a dimensão fractal, para o exemplo,  $D= 3 \times \theta = 3 \times 0,779 = 2,33$ . Ou seja, a dimensão sobre a qual emanam as emissões acústicas ou a dissipação de energia, está entre um volume e uma superfície, e este espaço pode ser caracterizado por ter uma dimensão de 2,33.

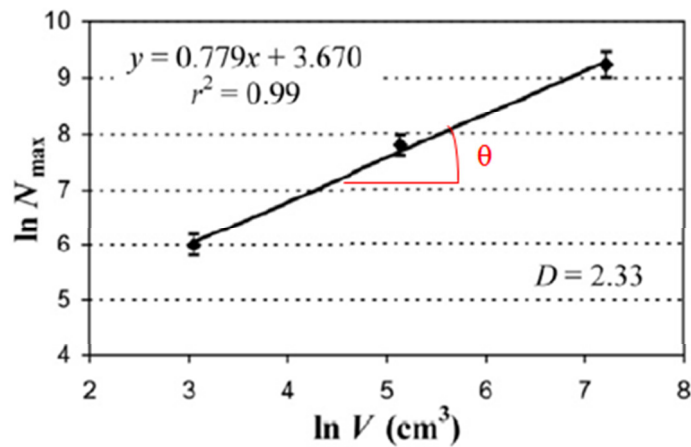


Figura 2.14 – Efeito do volume em  $N_{max}$  (Carpinteri et al. 2012)

### 2.2.12 Vantagens e Limitações da Técnica de EA

Charles J. Hellier, 2001, observa que em contraste com a maioria dos métodos não destrutivos (NDT), é na descontinuidade que ocorre a liberação da energia em testes de EA, gerando seu próprio sinal em resposta à tensão. Testes de emissão acústica detectam movimento, outros métodos detectam descontinuidades geométricas.

Algumas vantagens do método de Emissão Acústica são enumeradas por Charles J. Hellier, 2001, onde a EA pode ser utilizada em todos os estágios de teste:

- monitoramento em tempo real de componentes e sistemas
- detecção e localização de vazamentos
- monitoramento durante processo de solda
- teste e caracterização de propriedades mecânicas
- bom desempenho em materiais anisotrópicos (propriedades físicas de um mesmo corpo que dependem da direção em que são medidas)

- menos sensível à geometria
- menos intrusivo
- é possível realizar um monitoramento global e geral de todas as dimensões do corpo
- avaliação em tempo real
- monitoramento remoto

Também existem limitações no método de Emissão Acústica:

- repetitividade: EA possui respostas únicas e cada carga é diferente uma da outra, devido a característica aleatória do fenômeno
- atenuação: A estrutura que está sendo testada irá atenuar as ondas de tensão acústica
- histórico: Testes terão um melhor desempenho se o histórico de carregamento da estrutura já for conhecido
- ruído: Os testes de EA são sujeitos a muitos tipos de ruídos, tais como o barulho de um veículo, o funcionamento de uma máquina rotativa próxima do local de medições, etc.

### 2.3 Método Numérico dos Elementos Discretos (DEM)

No Método dos Elementos Discretos (DEM), proposto por Nayfeh e Hefzy (1978), o contínuo é representado por meio de um arranjo periódico de barras com a massa concentrada nos seus nós. A discretização básica é construída interconectando 20 elementos de barra e 9 nós, que podem ser vistos na figura 2.15 (a) e (b).

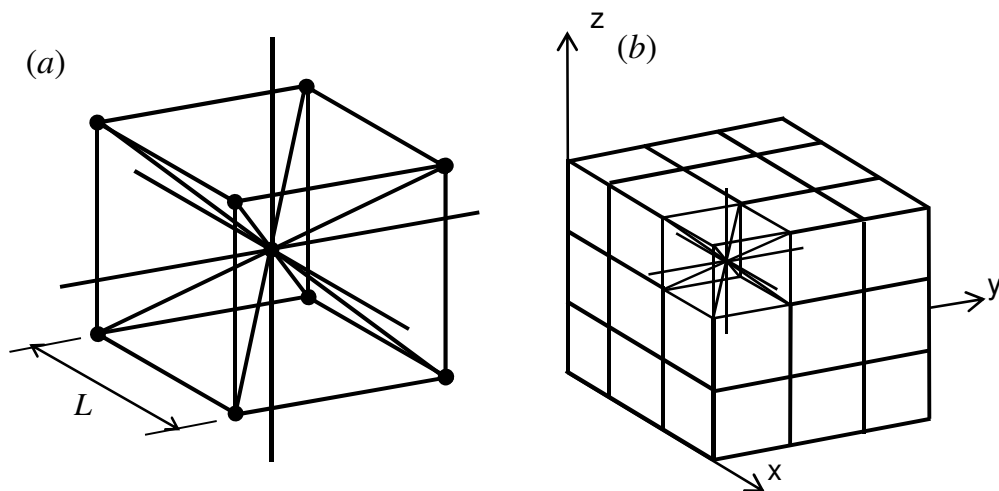


Figura 2.15 – Discretização no DEM: (a) modelo cúbico básico, (b) geração do corpo prismático com DEM, (Nayfeh e Hefzy 1978)



Cada um dos nós possui três graus de liberdade, que correspondem as componentes do vetor de deslocamentos, em um sistema de referências global. Para o caso de um material elástico isotrópico, a área da seção transversal das barras no modelo discreto equivalente,  $A_l$ , pode ser definida pela Equação (2.13):

$$A_l = \phi L^2 \quad (2.13)$$

onde  $L$  é o comprimento do módulo cúbico e  $\phi$  é o ângulo medido a partir do plano da trinca. De forma similar, a área dos elementos diagonais,  $A_d$ , é dada pela Equação (2.14):

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \delta \phi L^2 \quad (2.14)$$

cujos coeficiente  $2/\sqrt{3}$  leva em conta a diferença no comprimento entre os elementos diagonais e longitudinais. Para sólidos isotrópicos,  $\phi = (9 + 8\delta)/(18 + 24\delta)$  e  $\delta = 9\nu(4 - 8\nu)$ , onde  $\nu$  é o módulo de Poisson do sólido. Para chegar à expressão do  $\phi$  é necessário realizar a equivalência entre a matriz de coeficientes elásticos isotrópicos e as propriedades direcionais das barras, como proposto por Nayfeh e Hefzy (1978).

Segue a Equação (2.15) que representa o movimento resultante da discretização espacial:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{F}(t) - \mathbf{P}(t) = 0 \quad (2.15)$$

onde  $\mathbf{x}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}$  e  $\ddot{\mathbf{x}}$  são os vetores deslocamentos, velocidade e aceleração nodais, respectivamente,  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{C}$  são as matrizes de massa e amortecimento. Os vetores  $\mathbf{F}(t)$  e  $\mathbf{P}(t)$  contêm as forças internas e externas que atuam nas massas nodais.

Seguindo o critério de Courant-Friedrichs-Lewy (Bathe, 1996), a estabilidade do esquema de integração é garantida limitando o incremento de tempo. Para a presente implementação, os elementos em piores condições (isto é, aqueles que requerem um  $\Delta t$  menor) são os diagonais. Logo, considerando a relação entre os comprimentos dos dois tipos de barras, a limitação do incremento de tempo é:

$$\Delta t \leq \frac{0.6L}{C_p} \quad (2.16)$$

onde  $C_p$  é a velocidade de propagação da onda longitudinal, dado pela Equação (2.17),

$$C_p = \sqrt{E/\rho} \quad (2.17)$$

Sendo  $E$  o módulo de elasticidade do material e  $\rho$  a densidade do material.

Hayashi (1982), verificou a convergência do DEM para elasticidade linear e instabilidade elástica.

*Lei constitutiva não linear para representação de defeitos em materiais*

O método dos elementos discretos foi estendido por Rocha et al. (1991) para modelar a reação e comportamento de materiais quase frágeis. Foi utilizada uma lei constitutiva bi-linear apresentada na Figura 2.16 a qual permite a captura dos efeitos irreversíveis da nucleação de fissuras e da sua conseqüente propagação. A redução da capacidade de carga é levada em conta. No triângulo OAB da Figura 2.16, encontra-se a área fechada pela curva força versus deformação, a qual representa a densidade de energia consumida para realizar a fratura da área de influência do elemento. Portanto, para um ponto P, na curva de força versus deformação, a densidade de energia elástica guardada no elemento é representada pela área do triângulo OPC, a qual pode ser devolvida ao sistema. Já a área do triângulo OAP representa a densidade de energia dissipada na fratura. O elemento perde sua capacidade de carga à tração quando a densidade de energia dissipada é igual à energia de fratura necessária para romper um elemento. Porém, na compressão, o comportamento do elemento permanece linear elástico. Logo, o defeito em compressão é induzido por tração indireta.

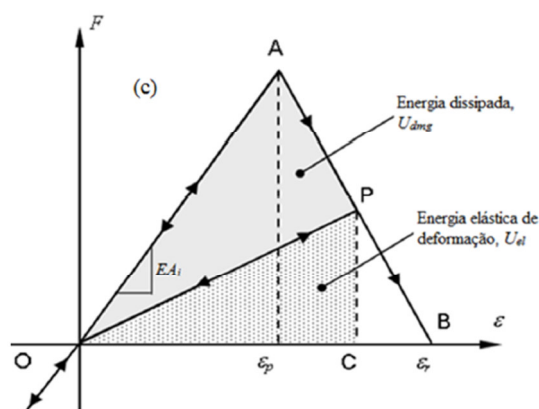


Figura 2.16 – Representação da Lei bi-linear em elementos discretos (Rocha, 1991)

Onde:

$A_1$  : área da fratura equivalente

$\varepsilon_r$ : deformação limite, valor de deformação em que o elemento perde sua capacidade de carregamento.

$\varepsilon_p$ : deformação de falha crítica, se refere à máxima deformação obtida pelo elemento antes do início do dano (ponto A na figura 2.16). A relação entre a taxa de liberação de energia de deformação,  $G_f$  e  $\varepsilon_p$  é dada pela equação (2.18)

$$\varepsilon_p = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E(1-\nu)}} \quad (2.18)$$

$R_f$  é chamado de fator de falha, o qual toma por base a presença de um defeito intrínseco com tamanho  $d$ .  $R_f$  pode ser calculado por:

$$R_f = \frac{1}{Y\sqrt{d}} \quad (2.19)$$

Sendo que  $Y$  é adimensional e depende da geometria da fratura e do corpo de prova. O tamanho do defeito intrínseco,  $d$ , é determinado, e pode ser considerado uma propriedade do material. Desordens nas propriedades do material podem ser introduzidas no modelo por uma distribuição aleatória da taxa de liberação de energia de deformação  $G_f$ .

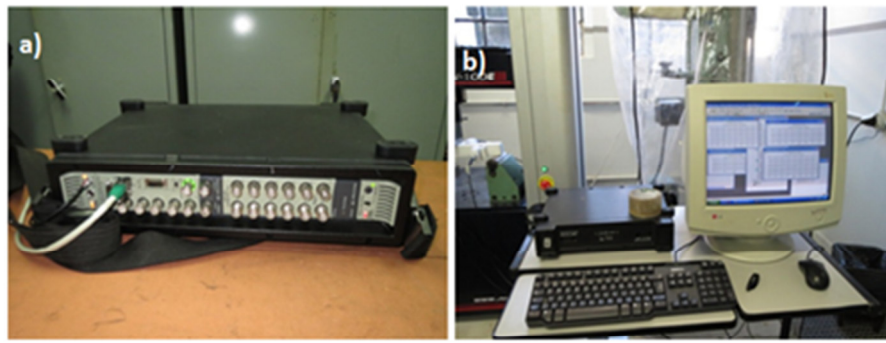
Maiores detalhes do método podem ser encontrados em Kostas (2012).

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Descrição dos Equipamentos**

Os ensaios foram realizados no GMAp (Grupo de Mecânica Aplicada) da Engenharia Mecânica da UFRGS. O equipamento de aquisição de dados disponível para realizar a coleta dos sinais de Emissão Acústica detecta sinais em uma faixa de frequências de no máximo 65kHz. Para corpos de material metálico ou concreto, seria necessário o uso de equipamento de aquisição com frequências de 100kHz a 1MHz. Com o intuito de verificar alguns fenômenos e premissas já comentadas da técnica de Emissão acústica, foi utilizado um material de grande flexibilidade, de forma que os sensores disponíveis fossem aplicáveis. O material utilizado foi o poliestireno expandido (Isopor), de comportamento frágil e baixa rigidez, o qual é adequado para trabalhar com a instrumentação disponível. Através da análise do espectro de frequências (seção “Resultados”) foi verificado que a instrumentação utilizada é adequada, pois as maiores amplitudes permaneceram abaixo do limite de aquisição de 20kHz. A mesma instrumentação também foi utilizada com sucesso em trabalhos de Rodrigues 2012, Justen 2012 e Birck 2013. Os equipamentos utilizados para a realização das aquisições de dados de sinais de Emissão Acústica são descritos a seguir:

- Amplificador de sinais de 6 canais da marca Bruel & Kjaer modelo 3035 e microcomputador com Software Pulse Labshop para controle e gravação dos dados de amplitude e tempo gerados (Figura 3.1). Arquivos na extensão .uff são gerados no software para posterior análise;



c)

Type	Product Name	Frequency Range	Aux. Channels	Simultaneous Channels	Connectors	Input Type
3035	6-ch. Charge & CCLD Input Module	0 Hz to 65kHz	-	6 Input	BNT/BNC and TNC	Charge/Direct/CCLD <sup>®</sup> Tacho Conditioning on BNT Connector

Figura 3.1 – (a) Amplificador Bruel & Kjaer 3035 ; (b) Microcomputador para controle do amplificador e (c) Especificação do amplificador 3035 (Fonte: Bruel & Kjaer website)

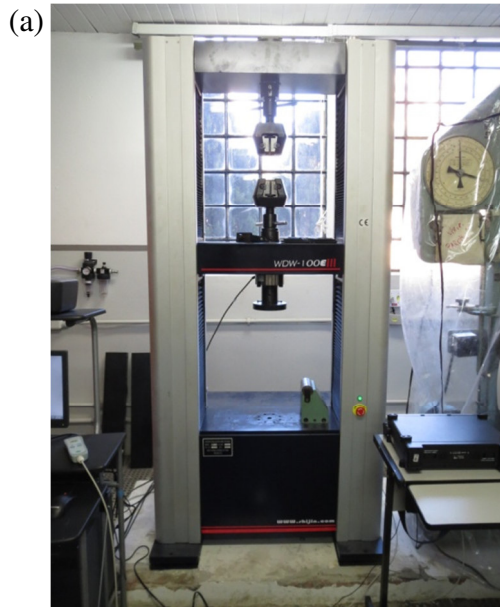
- 4 microfones Bruel & Kjaer modelo 4189-A-021, segue abaixo especificação técnica (Figura 3.2). As curvas de calibração dos microfones se encontram no anexo I.



ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	
Diâmetro	1/2 polegada
Faixa dinâmica	16.5 - 134 dB
Faixa de Frequências	20 - 20000 Hz
Ruído Inerente	16.5dB A
Sensibilidade	50mV/Pa
Normas	IEC 61094-4 WS2F
Conector	CCLD IEPE

Figura 3.2 – Microfone Bruel & Kjaer 4189-A-021 (Fonte: Bruel & Kjaer website)

- Prensa Time Group WDW-100E (Figura 3.3), utilizada para realizar o ensaio de flexão nos corpos de prova proporcionais. Por meio do software supervisor da prensa foi realizada a captura da curva de força aplicada e do deslocamento prescrito aplicado;



(b)

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	
Capacidade Máxima (kN)	100
Erro de leitura relativo	<+-1%
Resolução da carga	1/200000 da Capacidade Máxima=0,5N
Deformação máxima mensurável (mm)	10
Erro de leitura relativo de deformação	<+-1%
Erro de leitura relativo de deslocamento	<+-1%
Resolução de deslocamento (mm)	0.001
Faixa de velocidade (mm/min)	0.005-500
Largura para teste (mm)	600
Curso para Tensão (mm)	600
Curso para Compressão (mm)	600

Figura 3.3 – (a) Prensa hidráulica e (b) Especificação técnica (Fonte: Bruel & Kjaer website)

- O software utilizado para análise dos dados foi o Glyphworks (2014) da fabricante nCode. Através do software é possível realizar a análise dos arquivos .uff gerados no Pulse. É possível extrair o espectro de frequências, o uso de filtros de banda, corte de trechos, filtragem de picos e contagem, dentre inúmeras funcionalidades. Para a análise dos sinais de EA foi utilizado um filtro passa alta do tipo Butterworth de ordem 4 disponível no software Glyphworks (2014).

### 3.2 Metodologia utilizada nos ensaios de Emissão Acústica

Para a realização dos ensaios de Emissão Acústica foram confeccionados três diferentes tamanhos de corpos de prova prismáticos (Figura 3.4) que foram ensaiados como vigas com cargas em 3 pontos até a ruptura. Para os ensaios de localização utilizando a técnica de EA foi utilizada uma viga de 1 metro de comprimento (Figuras 3.6 e 3.7) em balanço (uma extremidade engastada e outra extremidade livre) para teste de localização em 6 pontos realizando pequenas pancadas e em um segundo momento, para o cálculo da localização de rompimento, com as duas extremidades apoiadas.

Sobre cada um dos corpos de prova proporcionais foram instalados 4 sensores na sua superfície. No corpo de prova da viga de 1 metro de comprimento foram instalados 3 sensores em sua superfície e realizadas marcações de 6 pontos para testes de localização. As dimensões das vigas, bem como as posições dos microfones se encontram nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7. A proporção de uma viga proporcional para a outra é de 1,4x, ou seja, de uma viga anterior em tamanho, até a seguinte, a proporção em todas as dimensões é de 1,4x. Os corpos de prova proporcionais possuem relação entre um e outro, pois, um dos objetivos do trabalho é analisar o efeito de escala nos resultados de EA obtidos.

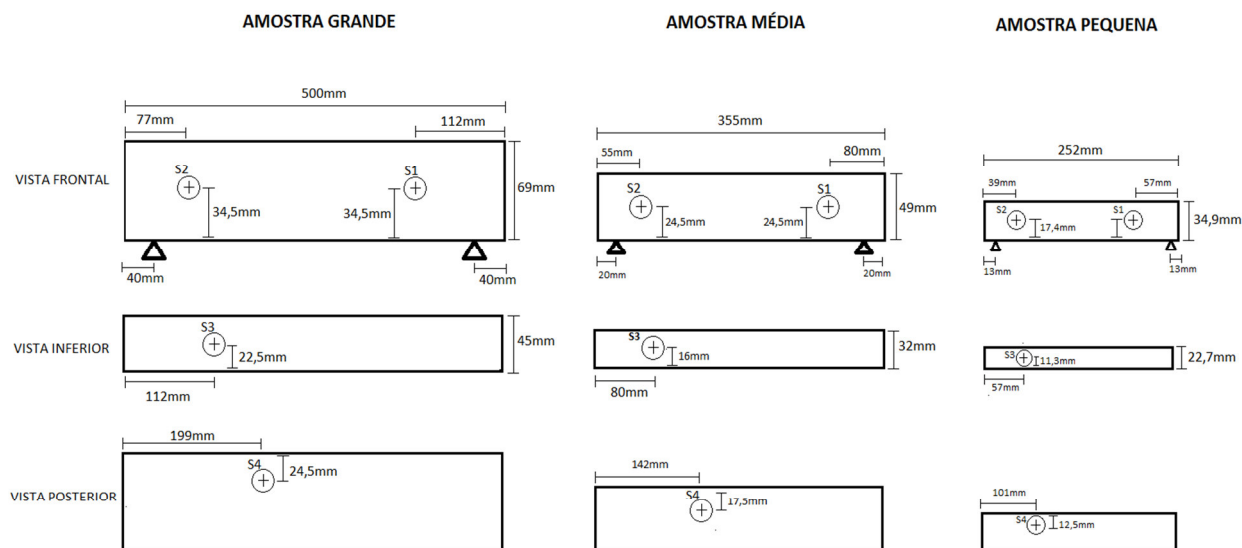


Figura 3.4 – Dimensões das amostras proporcionais e posicionamento dos microfones

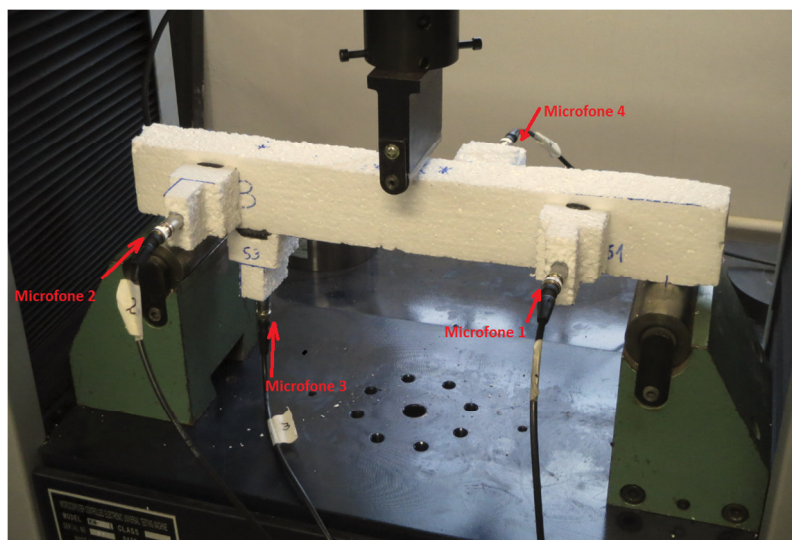


Figura 3.5 – Posicionamento microfones para as amostras proporcionais

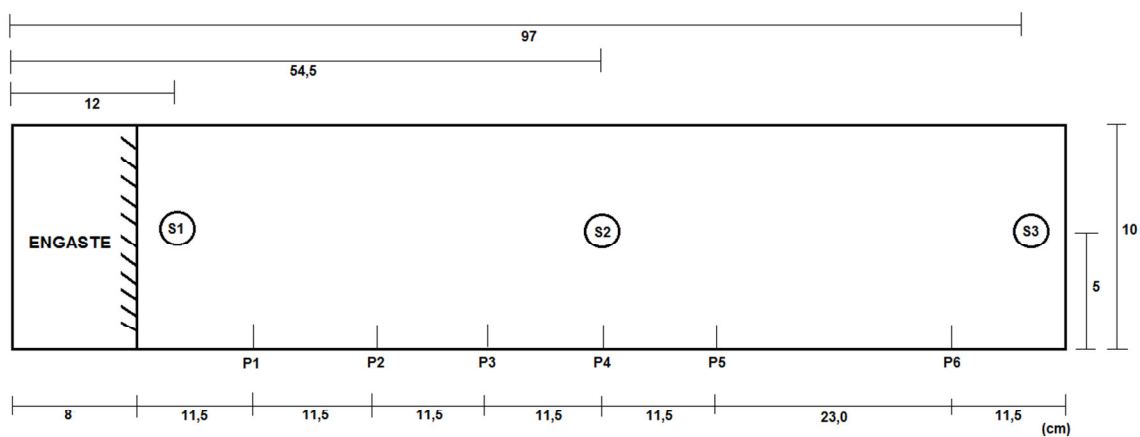


Figura 3.6 – Dimensões da viga de 1 metro de comprimento e posicionamento dos microfones

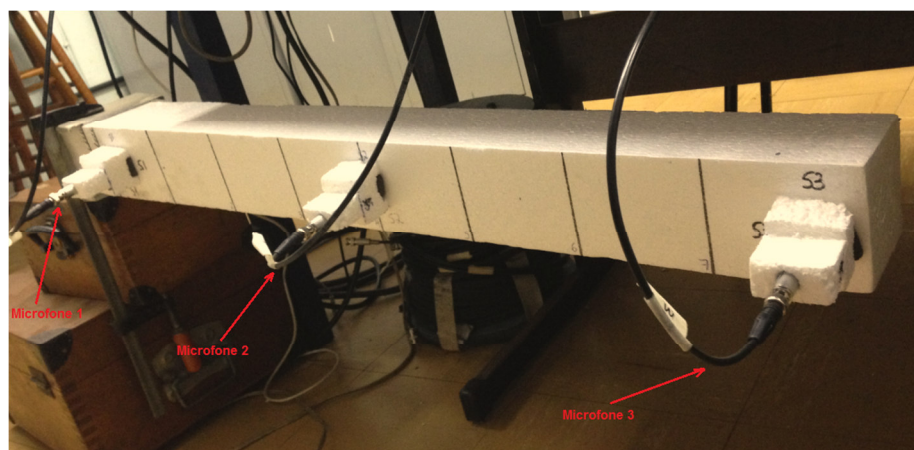


Figura 3.7 – Posicionamento microfones para a viga de 1 metro de comprimento



Imagens dos corpos de prova relativos às vigas proporcionais podem ser vistas nas Figuras 3.8 (a), (b) e (c). Suportes para os microfones foram construídos e colados nas vigas, com o objetivo de isolar os microfones parcialmente dos ruídos externos e fixar os mesmos sobre a superfície dos corpos de prova.

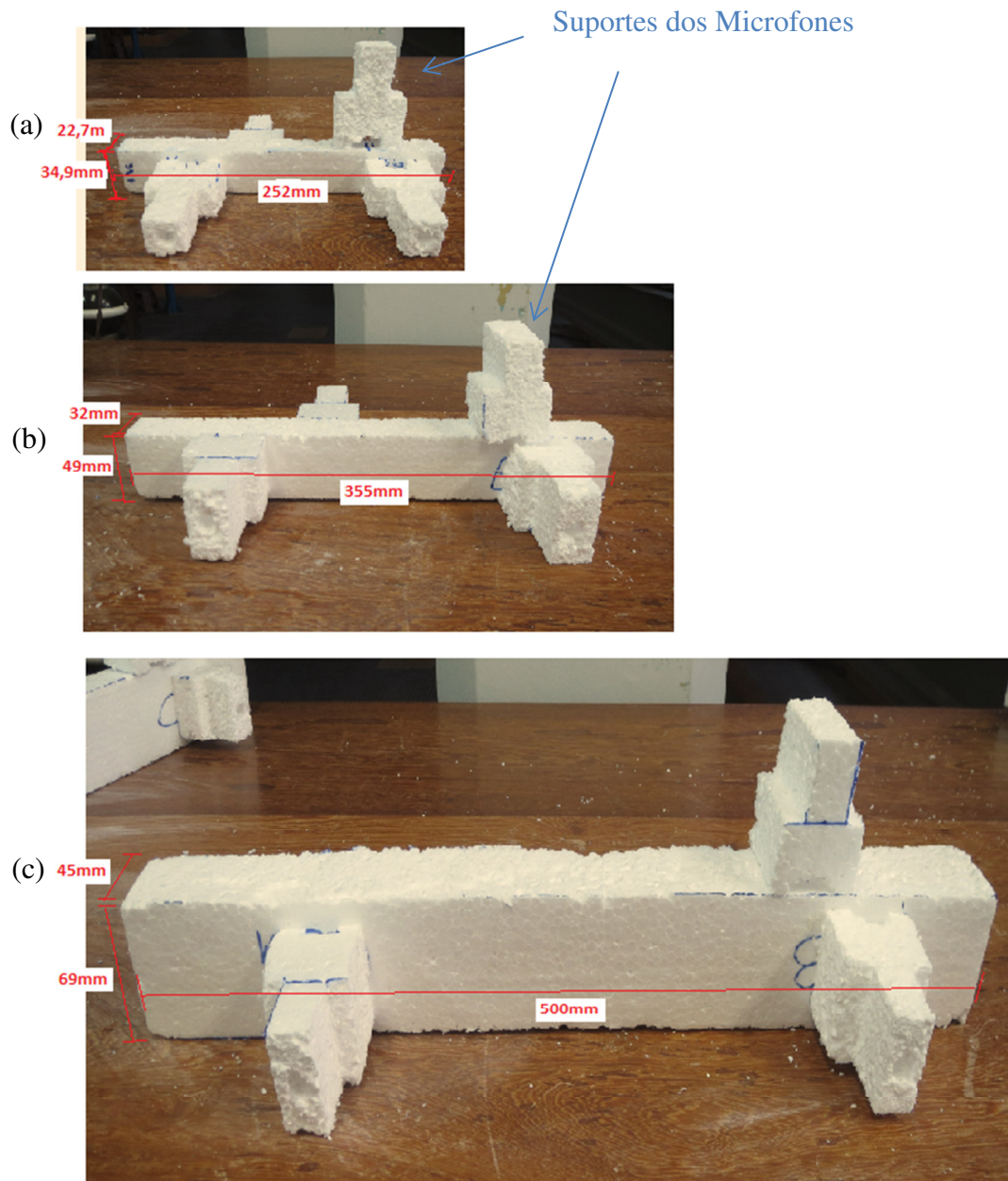


Figura 3.8 - Imagem corpos de prova proporcionais (a) Pequeno, (b) Médio e (c) Grande

Da mesma forma apresenta-se imagem (Figura 3.9) do corpo de prova para a viga de 1 metro de comprimento.

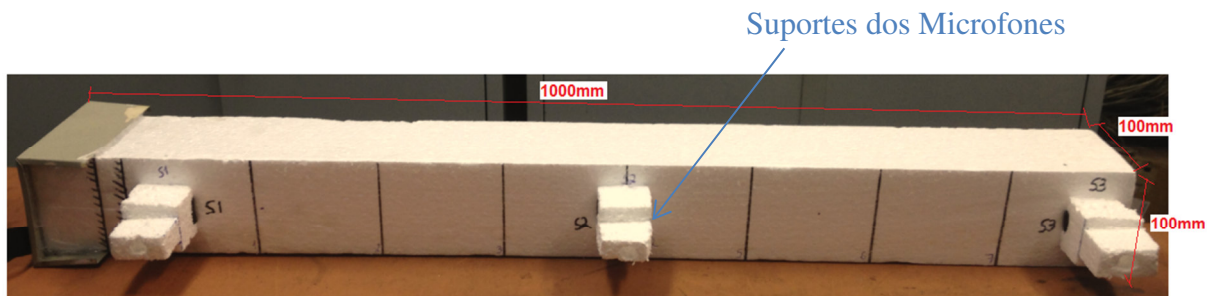


Figura 3.9 - Imagem corpo de prova viga de 1 metro de comprimento

A excitação dos corpos de prova proporcionais foi realizada aplicando sobre os mesmos uma flexão sobre a estrutura, que consiste basicamente em promover uma flexão dos corpos de prova através de um deslocamento prescrito aplicado no centro da viga (Figura 3.10). O deslocamento prescrito foi evoluindo até a ruptura dos corpos de prova.

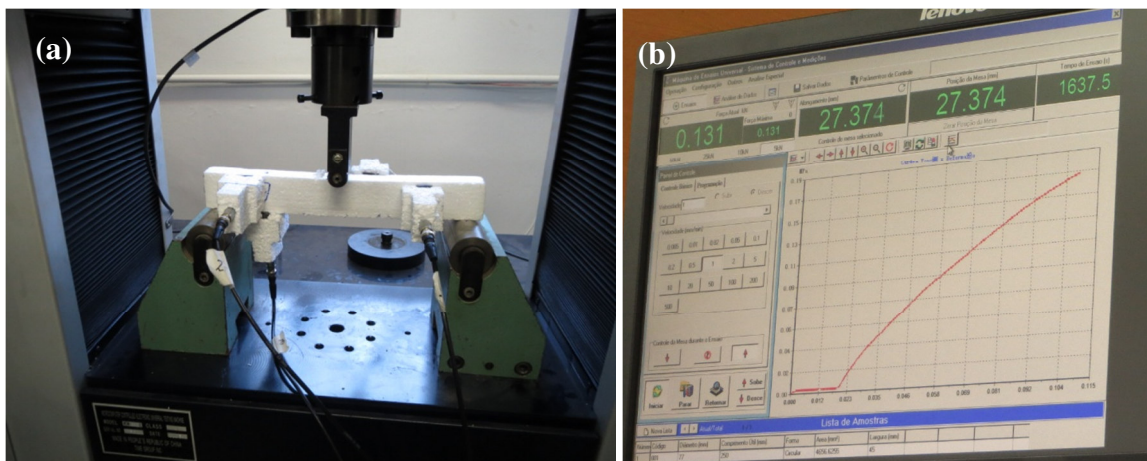


Figura 3.10 – (a) Peça posicionada na prensa e (b) Software de controle da prensa

Durante os ensaios dos três tamanhos de amostras proporcionais, foi realizada a medida da força utilizando uma célula de carga, e do deslocamento prescrito aplicado pela prensa.

Juntamente com isto foram realizadas coletas de dados das intensidades sonoras em função do tempo do ensaio. As leituras dos microfones foram salvas em arquivos de extensão ASCII (posteriormente convertida para .uff), geradas pelo software Pulse, com um intervalo de tempo na aquisição de  $1.52588 \text{ E-5}$  segundos (o que equivale a uma taxa de aquisição de

dados de 65kHz). Porém, conforme descrito na seção 3.1, a frequência máxima de captura dos microfones é de 20kHz. Portanto, a máxima sensibilidade de frequência que temos disponível para análise é de até 20kHz.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme mencionado na metodologia, foram realizados ensaios em três tamanhos diferentes de amostras proporcionais (corpos de prova chamados de Pequeno, Médio e Grande). Para análise da localização foram realizados ensaios em uma amostra de viga de comprimento de 1 metro.

Durante os ensaios das amostras proporcionais, deslocamentos prescritos foram aplicados nos centros das mesmas, conforme mostrado na figura 3.10 (a). Com os equipamentos já descritos na seção 3.1, foram realizadas as aquisições de curva de carga (N) aplicada pela prensa e deformação ocorrida (mm). Os eventos de EA foram gravados a partir dos 4 sensores instalados nas amostras, gerando curvas de Pressão Sonora (Pa) pelo Tempo (s). Através da avaliação dos dados obtidos é possível determinar parâmetros que podem caracterizar a falha e a evolução da mesma. O tempo dos ensaios para as três amostras foi de aproximadamente 10 minutos. O deslocamento prescrito para as amostras pequena e média foi de 2mm/min, já para a amostra grande foi de 4mm/min.

Na figura 4.1 se apresenta a curva de carga versus deformação obtida nos ensaios das amostras proporcionais. O gráfico gerado possui a forma abaixo, algo parecido com “degraus”, pois a resolução de leitura da carga do equipamento é da ordem de 0,5N, portanto, não são possíveis de serem registradas com o equipamento disponível variações menores que este valor (conforme figura 3.3-b “Resolução da Carga”).

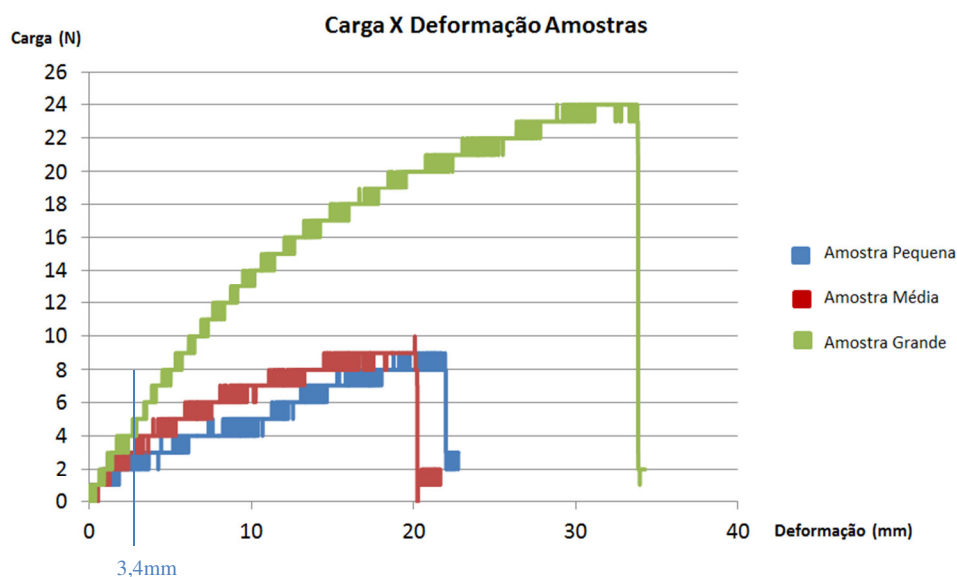


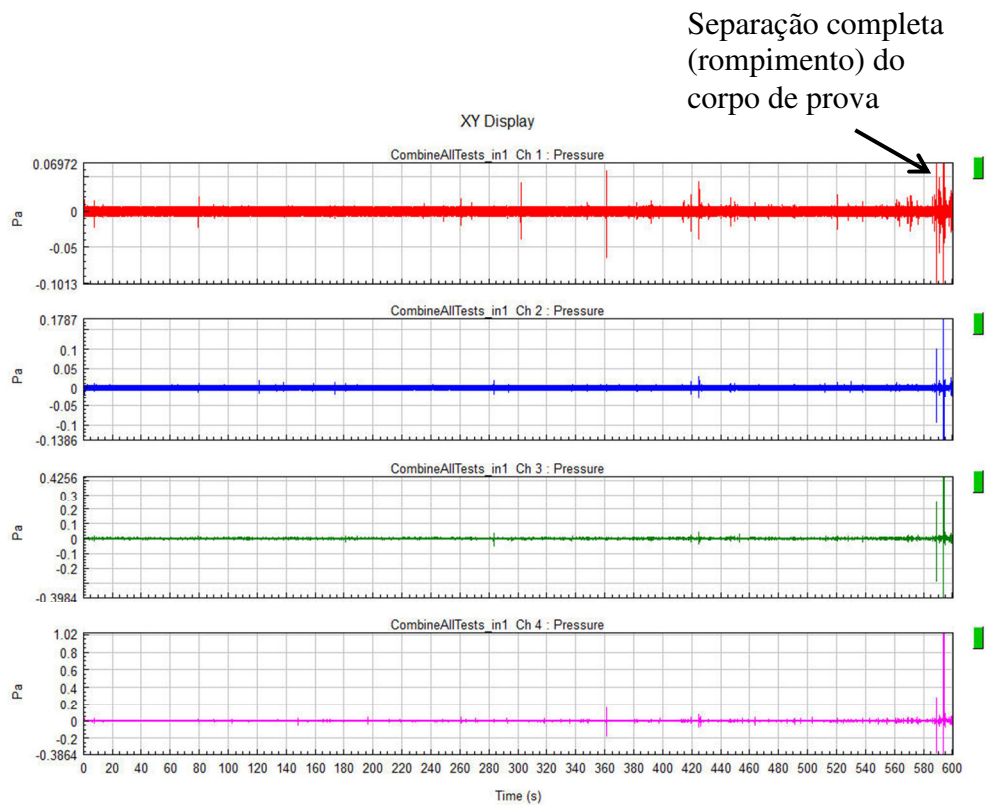
Figura 4.1 – Carga X Deformação Amostras

Porém, é possível realizar cálculos teóricos com informações do gráfico. Para a viga grande, por exemplo, é possível considerar o valor de 5N e verificar que o deslocamento correspondente é de 3,4mm. Com estes valores podemos calcular o módulo de elasticidade para a viga bi-apoiada pela expressão (4.1) .

$$E = \frac{PL^3}{48I\delta} \quad (4.1)$$

Como resultado, para o módulo de elasticidade teórico foi encontrado o valor de 3,1Mpa para a viga de isopor. Conforme equação 2.4 da seção 2.2.3, pode-se calcular a velocidade com o módulo de elasticidade  $E$  e a Densidade mássica  $\rho$  ( $=9,81kg/m^3$ ). Para a velocidade teórica da onda-p tivemos o valor de cerca de 562m/s.

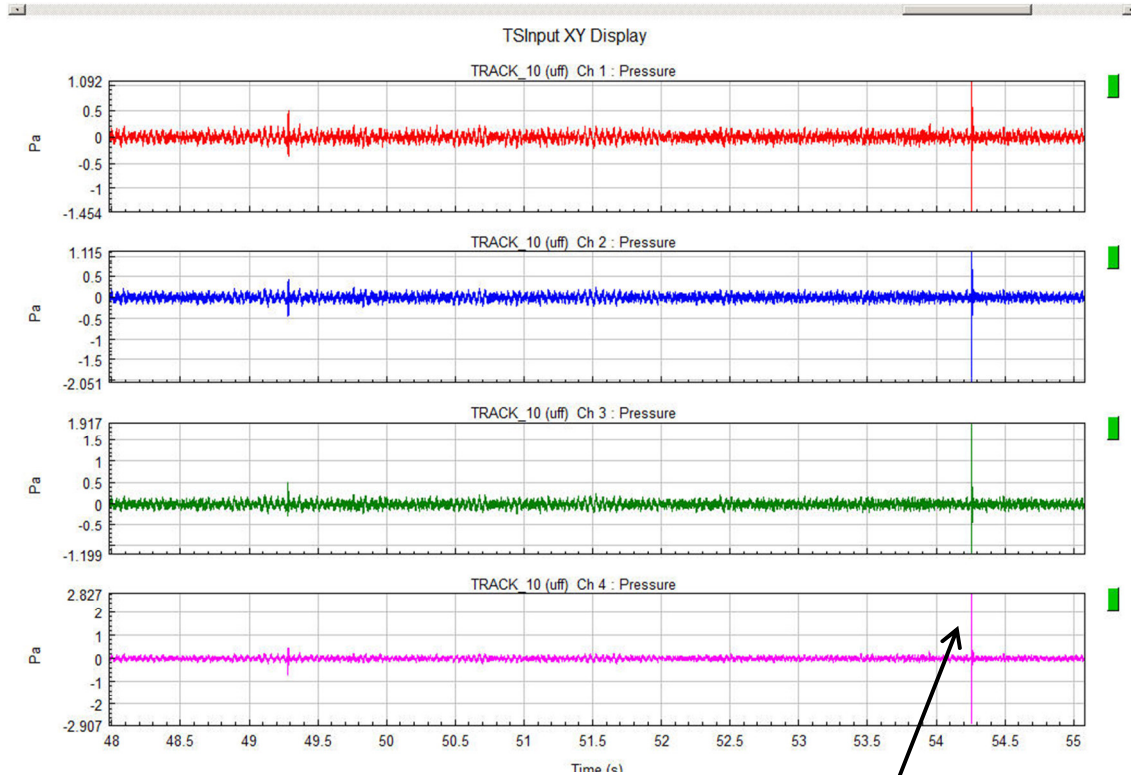
Na figura 4.2, relativa à amostra de tamanho médio, são apresentados os arquivos que registraram os eventos de emissão acústica, com o intuito de mostrar uma visão geral, durante todo o ensaio, da amplitude em função do tempo nos quatro microfones. No registro se percebe a aparição de vários sinais de emissão acústica. Conforme citado na seção 3.1, foi utilizado um filtro passa alta do tipo Butterworth com frequência de corte da ordem de 6000Hz, ou seja, apenas sinais da ordem de mais de 6000Hz aparecem nos registros. Para chegar ao valor de 6000Hz, como frequência de corte, se realizaram vários testes percebendo que abaixo deste valor não havia informação relevante sobre os sinais de emissão acústica.



**Figura 4.2 – Gráfico de Amplitude em função do tempo durante todo o ensaio para a amostra média**

Na figura 4.3 é apresentada uma das partes finais do ensaio da amostra média (gráfico de amplitude sonora em função do tempo) sem filtragem de sinal (a) e com filtragem (b) nos quatro microfones.

a)



b)

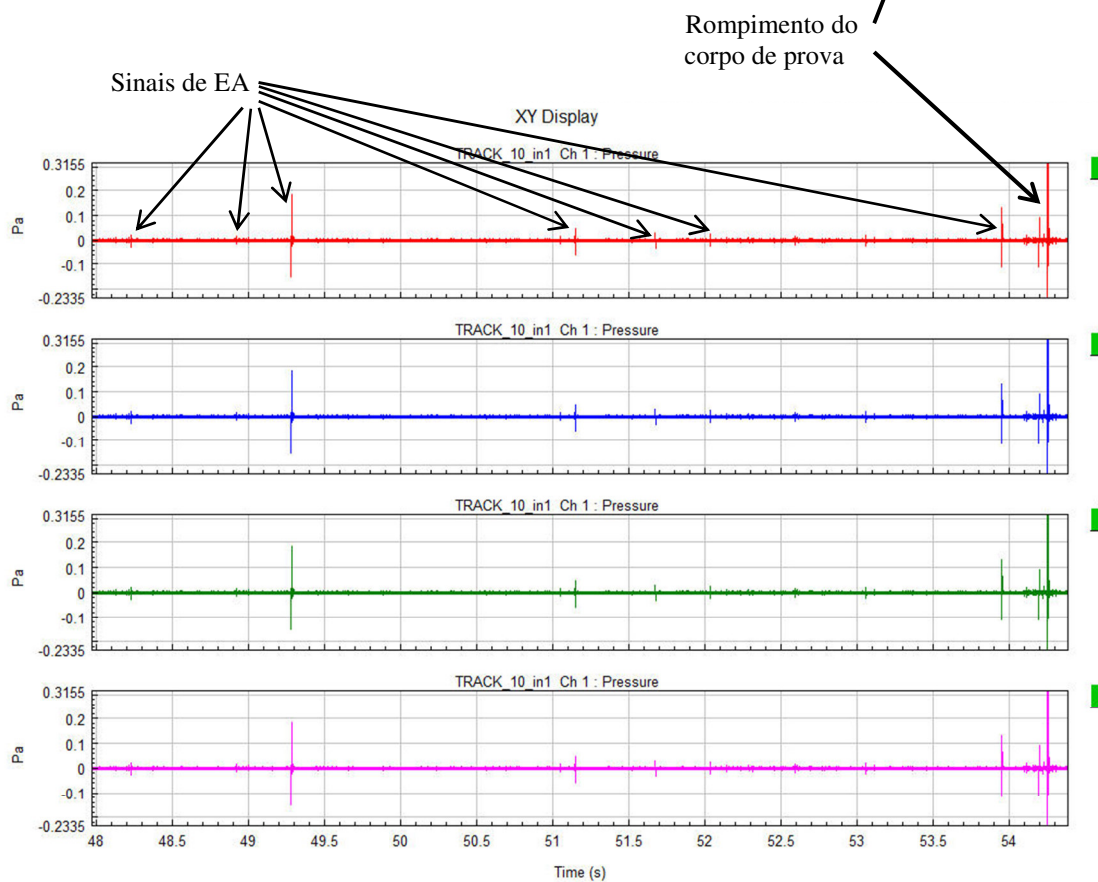


Figura 4.3 – Sinal sem filtragem (a) e com filtragem (b)

Pelas Figuras 4.2 e 4.3, pode-se perceber que diversos registros puderam ser visualizados com o uso do filtro Butterworth passa alta em 6000Hz. A Figura 4.4 (a) mostra o detalhe de um típico sinal de EA obtido no ensaio da amostra média nos últimos instantes antes da ruptura. Já na Figura 4.4 (b), é apresentado um típico sinal de EA segundo a bibliografia de Charles J. 2001. Pode-se perceber que o sinal obtido no experimento possui as características de um sinal de EA assim como o sinal apresentado na bibliografia, ambos possuem uma amplitude máxima definida, um período de crescimento, uma faixa limite e período de duração do evento, características apresentadas na figura 2.11 referente à seção 2.2.8.

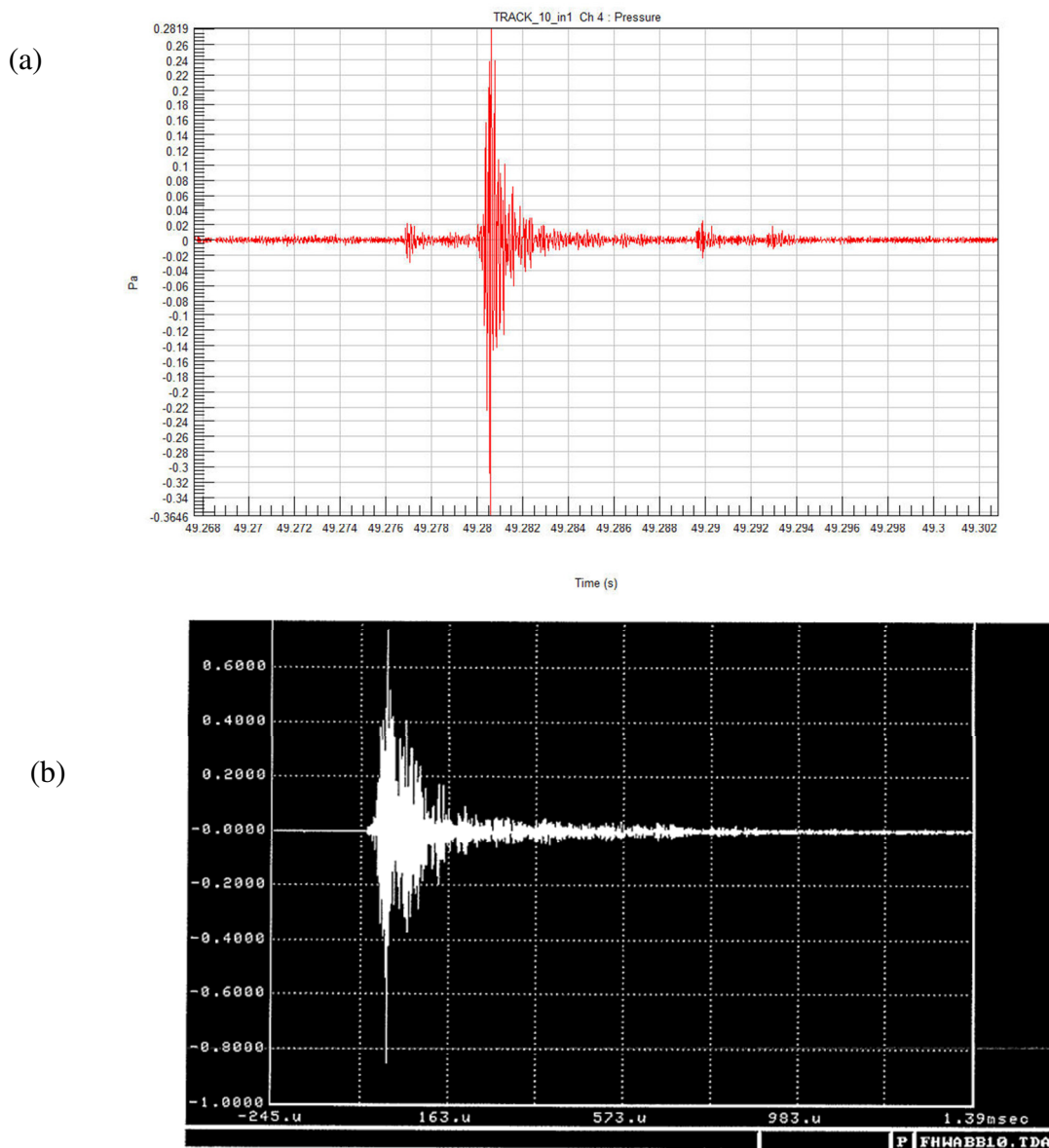


Figura 4.4 – (a) Sinal de EA obtido no ensaio experimental, (b) Típico sinal de EA mostrado por Charles J. Hellier (Handbook of Nondestructive Evaluation, 2001 chapter 10)



Na Figura 4.5 (a) é apresentada uma análise do espectro de frequências do trecho da Figura 4.4 (a) para os quatro canais. Pode-se perceber que ocorreram sinais de mais elevadas amplitudes em frequências entre 8000Hz à 14000Hz. Justen (2012) obteve resultados em termos de espectro de frequências semelhantes para sua viga de isopor, conforme apresentado na figura 4.5 (b).

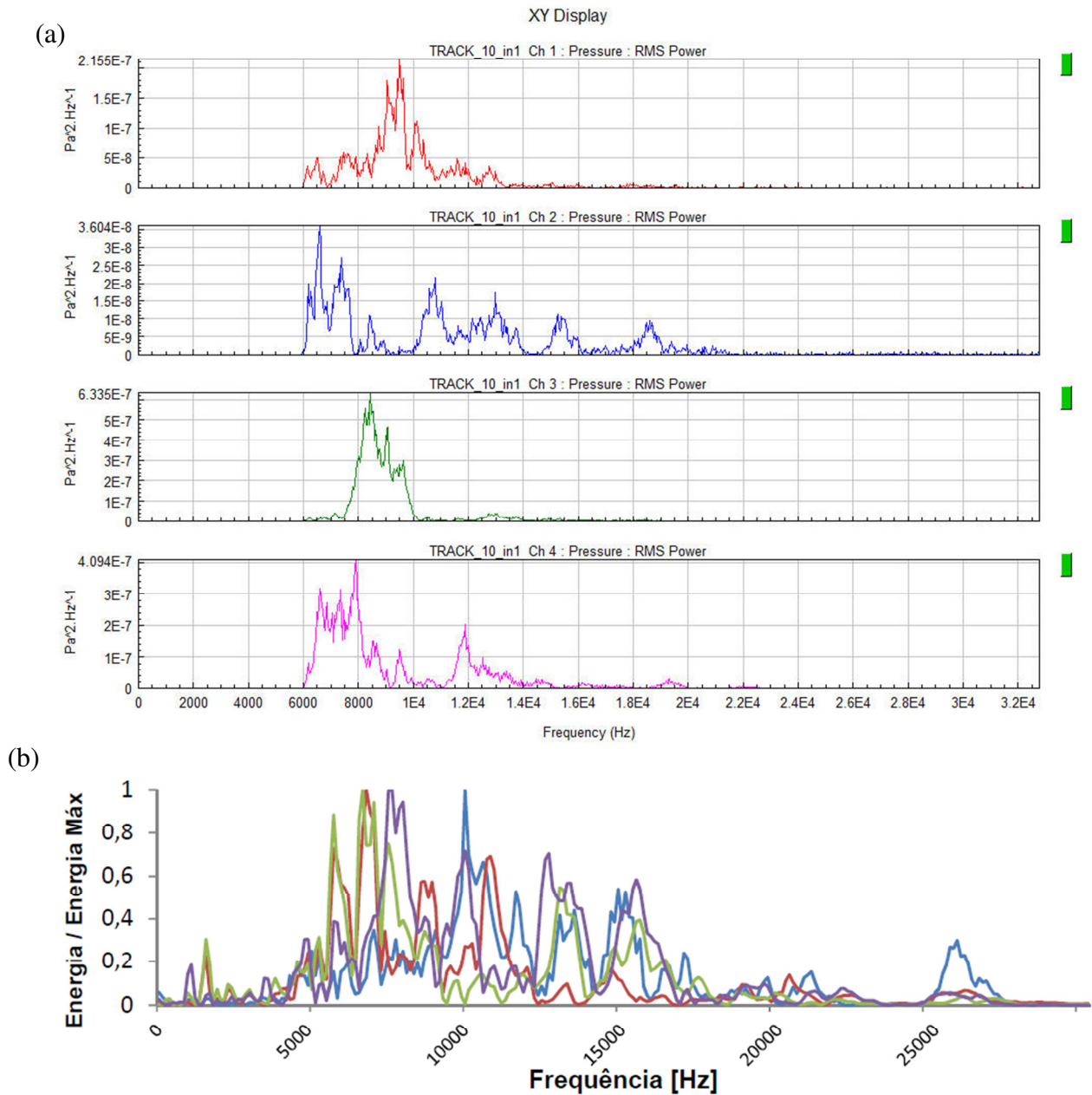


Figura 4.5 – (a) Espectro de frequências amostra média, (b) Espectro de frequências por Justen A. (2012)

## 4.1 Análise dos Eventos

### 4.1.1 Comparativo entre o Número Máximo de Eventos versus o Volume

Nesta análise será dada ênfase à comparação do número máximo de eventos de EA que foram detectados durante os ensaios nas amostras proporcionais (Pequena, Média e Grande) ao longo de todo o ensaio. Foi realizada a contagem de eventos no canal 4 (mais próximo da região de ruptura das peças) de cada um dos três tamanhos de amostras. O gráfico da Figura 4.6 mostra o número máximo de eventos ocorridos em função do volume de cada corpo de prova. Segue gráfico mostrando este comparativo (ver figura 4.6). Conforme apresentado na seção 2.2.11, sendo o coeficiente angular encontrado para a reta dos eventos deste experimento igual a 0,7118, tem-se que o expoente fractal  $D$  do experimento é igual a 2,14.

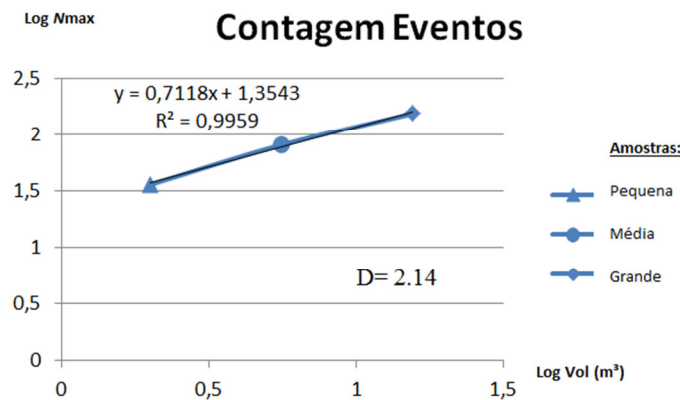


Figura 4.6 – Contagem dos eventos

Segundo Carpinteri (2012) (Figura 4.7), é esperado o aumento de  $N_{max}$  à medida que o volume da amostra aumenta. Estudo similar pode ser conferido em Carpinteri A; Lacidogna G; Pugno N; (2007). Os resultados experimentais mostrados nas figuras 4.6 e 4.7 confirmam que a liberação de energia é proporcional ao acúmulo dos eventos de emissão acústica e, que de acordo com a teoria da fractalidade, seção 2.2.7, ocorrem em um domínio fractal situado entre uma superfície e um volume.

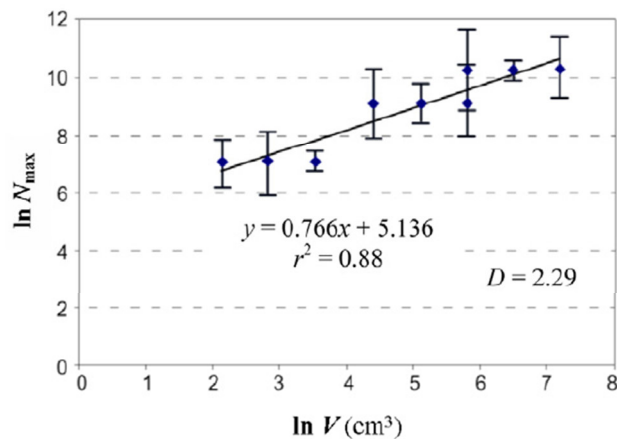
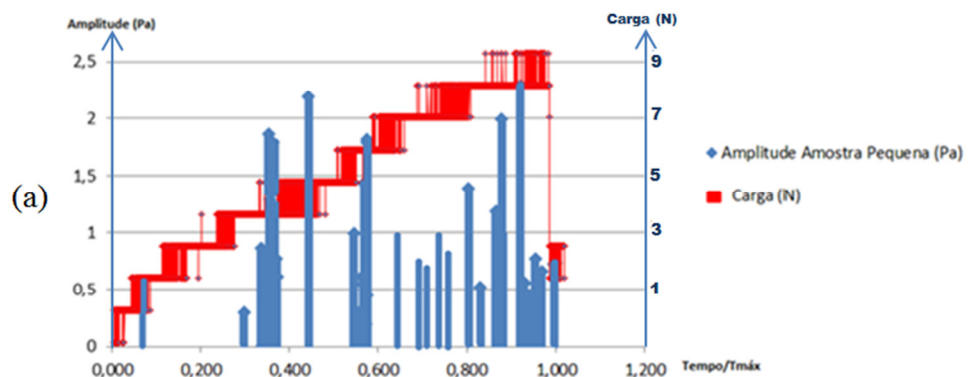


Figura 4.7 – Contagem de eventos segundo bibliografia (Carpinteri Mec Mat 2012 p 15-28)

#### 4.1.2 Histogramas das Amplitudes

Na análise abaixo foi mostrado graficamente as amplitudes sonoras ao longo do tempo (tempo normalizado para tornar possível a comparação entre as amostras, pois os tempos de ensaio não foram exatamente os mesmos), relativo aos eventos encontrados na primeira análise. Também está incluída no mesmo gráfico a curva de carga aplicada nas vigas. Segue nas Figuras 4.8 os resultados para as amostras (a) pequena, (b) média e (c) grande obtidos para os 3 tipos de vigas. Analisando os histogramas, é possível perceber que para o corpo de prova pequeno tem-se já nos períodos intermediários do teste eventos de grandes amplitudes sonoras, ao passo que para a amostra média, inicialmente obteve-se pequenas amplitudes sonoras, no período intermediário do ensaio poucas amplitudes elevadas e uma grande amplitude sonora ao final do ensaio, momento em que ocorreu a ruptura da amostra. No corpo de prova grande ocorreu um evento de alta amplitude por volta da metade do tempo de ensaio e outro evento com amplitude elevada, quando houve a ruptura.



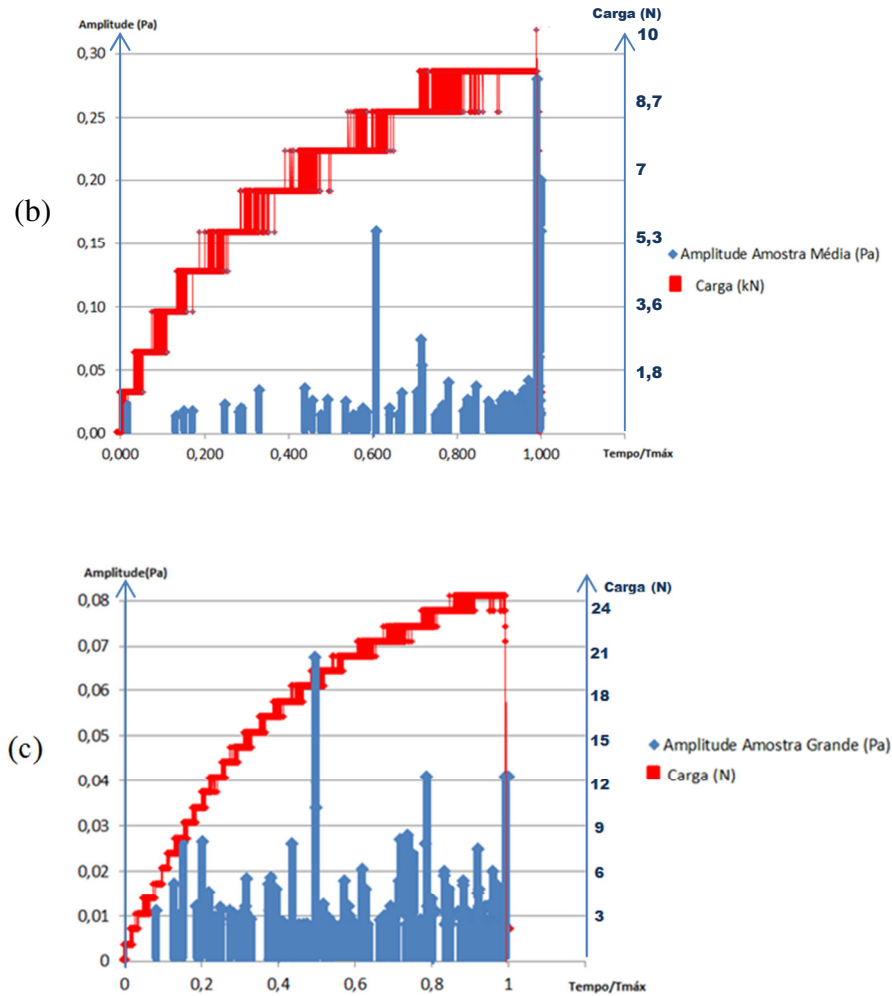


Figura 4.8 – Histograma amplitudes amostras (a) pequena, (b) média e (c) grande

### 4.1.3 Histogramas dos Eventos

Nos gráficos das Figuras 4.9 amostras (a) pequena, (b) média e (c) grande são apresentadas as curvas de Número Instantâneo de eventos e Número acumulado de eventos ao longo do tempo. Também foi incluído, no mesmo gráfico, a curva de carga aplicada nas vigas. Observando a variação do número de eventos acumulados ao longo do tempo é possível perceber que a quantidade de eventos vai crescendo à medida que a peça vai se aproximando da falha. Também é possível perceber que quanto menor for a peça, menor será a quantidade de eventos que ocorrem na mesma até acontecer a ruptura.

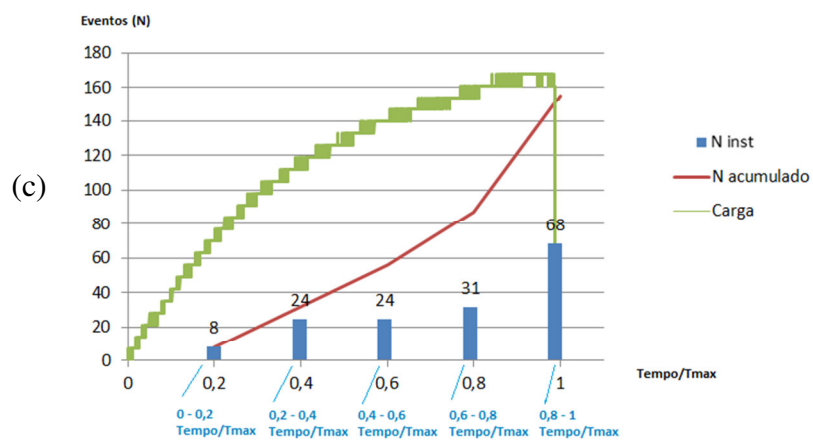
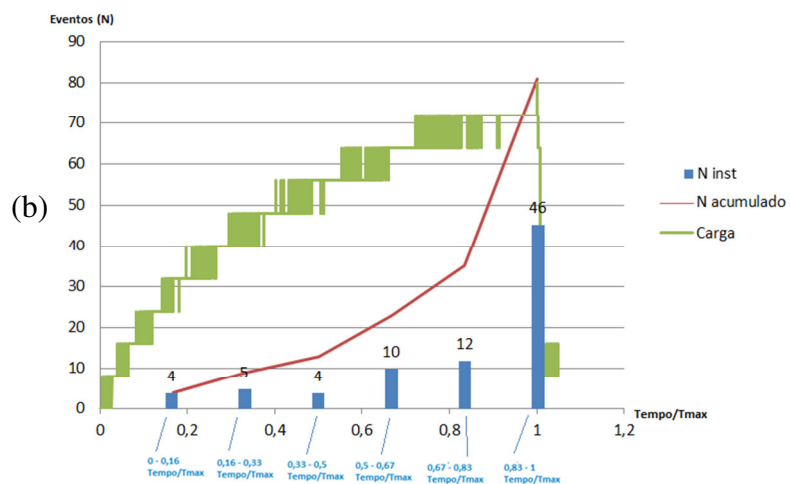
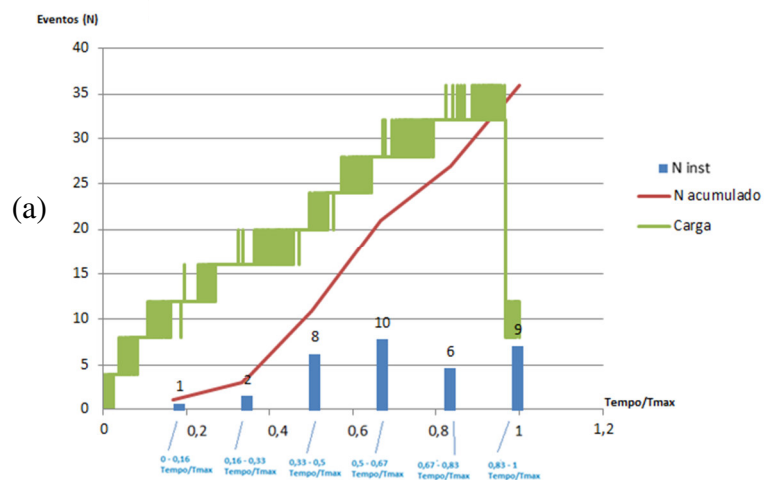


Figura 4.9 – Histograma dos eventos amostra (a) pequena, (b) média e (c) grande

#### 4.1.4 Valor “b”

Através de uma linha de tendência linear no gráfico do logaritmo do número de eventos maiores ou iguais que N versus o logaritmo da amplitude, é possível verificar o valor “b”(coeficiente angular da reta de tendência linear). Foram feitas análises das amostras dividindo a amostragem em dois intervalos de tempo, assim é possível avaliar a evolução do valor “b” (descrito na seção 2.2.7) em dois momentos.

Para a amostra média (Figura 4.10), é possível perceber que nos primeiros 300s o valor de “b” é de 1,61 (D próximo a 3). Após este trecho, de 300s até o final, o valor de b fica em 1,38 (D=2,76). Portanto, como dito na seção 2.2.7, percebe-se que inicialmente a liberação de energia acontece através de pequenos defeitos distribuídos em todo o volume. Já no trecho final, que corresponde a um valor de b que possui a tendência a se aproximar do valor 1, a liberação de energia ocorre em uma região mais concentrada e mais próxima de uma superfície.

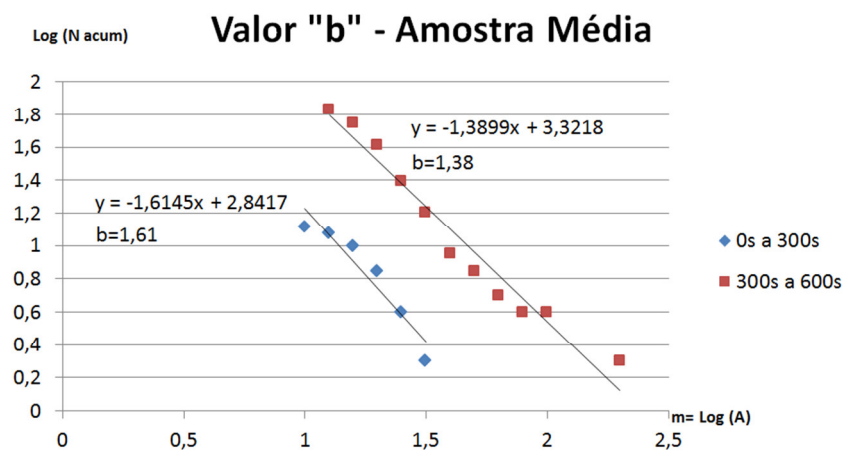


Figura 4.10 – Valor “b” amostra média

Segue Figura 4.11 contendo valores de b extraídos do trabalho de Carpinteri *et al.* 2012. É mostrada a evolução do valor b no decorrer de um experimento de compressão em um corpo de prova de concreto. Podemos perceber que ao longo do experimento o valor de b decresce, assim como ocorreu no experimento deste trabalho.

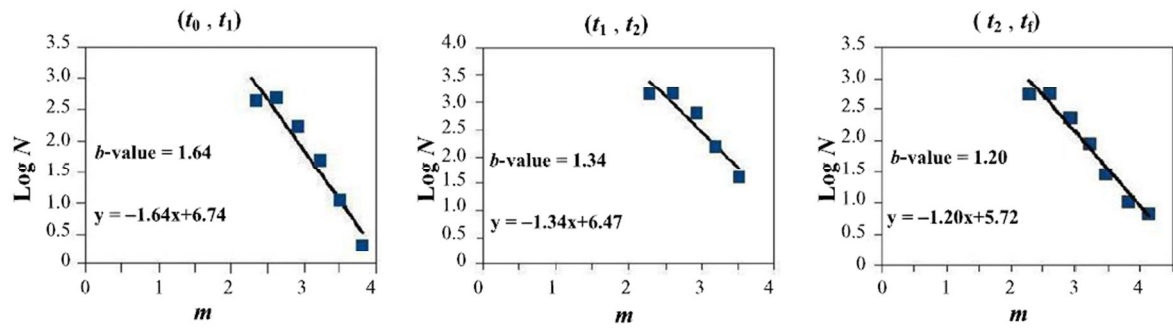


Figura 4.11 – Valores de b durante teste de compressão em um corpo de prova de concreto (Carpinteri *et al.* 2012)

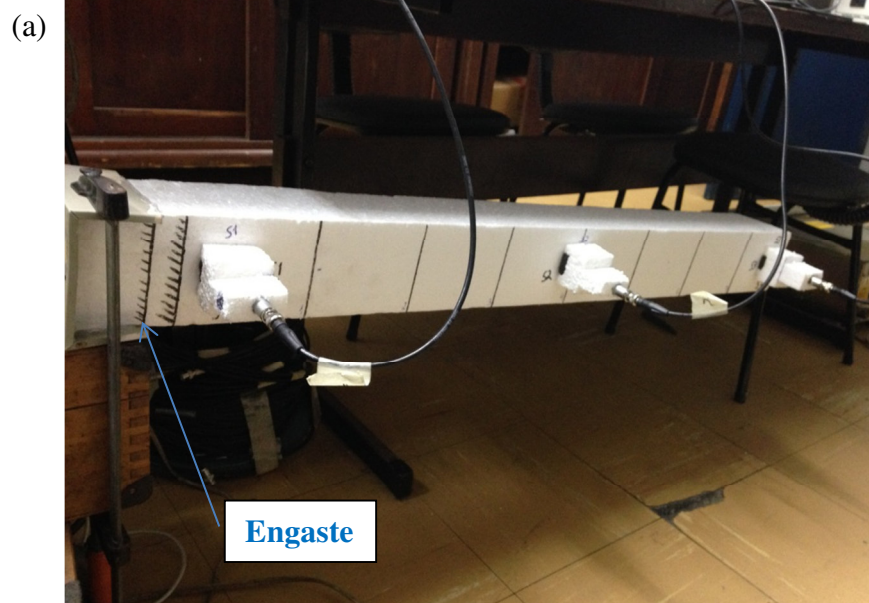
Mesma análise poderia ser feita para os outros dois corpos de prova ensaiados.

## 4.2 Localização de defeitos

Para realizar o estudo da localização, primeiramente foi efetuado experimento para calcular a velocidade de propagação da onda-P na amostra. Em seguida, foi realizada uma verificação da técnica de localização utilizada. Por último, foi calculada a localização de um defeito real na amostra.

### 4.2.1 Cálculo da velocidade de propagação da onda-P

Os cálculos da localização das fontes de emissão acústica se baseiam no tempo de chegada das ondas da fonte de emissão até os microfones. Estes tempos de chegada da onda dependem da velocidade que a mesma se propaga da fonte até os sensores. Foram aplicadas pequenas batidas (Figura 4.12-b) na extremidade de uma viga de 1 metro de comprimento em balanço (uma extremidade engastada e outra extremidade livre).





(b)

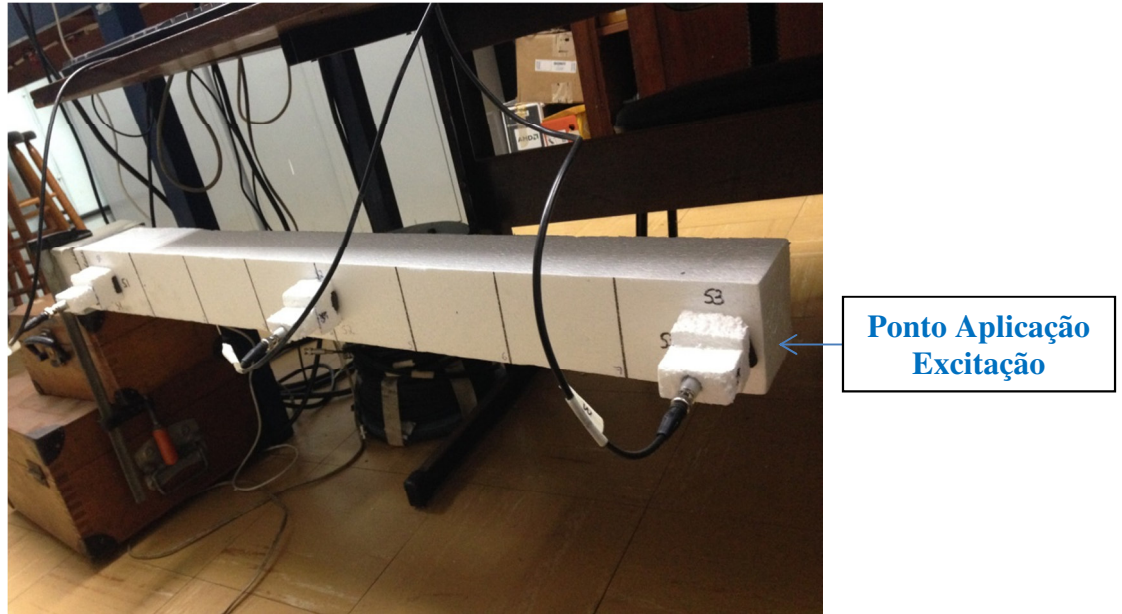
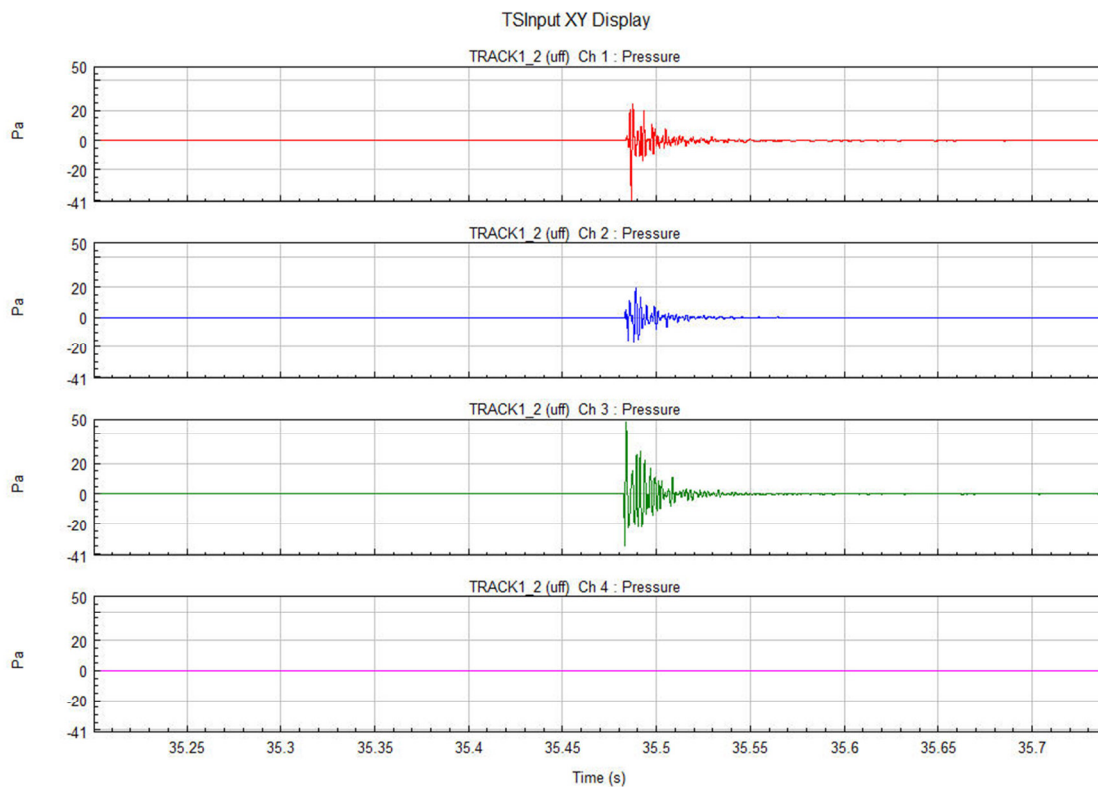


Figura 4.12 – (a) engaste, (b) ponto de aplicação de excitação

Três microfones (S1, S2 e S3) foram instalados ao longo da viga nas posições conforme mostram as Figuras 3.6 e 3.7. Um quarto microfone foi instalado no ambiente para capturar possíveis ruídos que possam não ser provenientes dos ensaios.

Segue na Figura 4.13 uma amostra do sinal adquirido ao longo do tempo nos 3 microfones e o sinal proveniente de ruído do ambiente no microfone 4 durante uma das batidas realizadas na viga.



**Figura 4.13 – amplitude sonora ao longo do tempo**

Para obter-se a velocidade de propagação da onda ao longo do material foi calculada a diferença de tempo de chegada das ondas entre os microfones 1 e 2 (Figura 4.14), foi utilizado o primeiro pico de cada onda para a análise. Também foi utilizada a distância entre estes dois microfones para o cálculo da velocidade de propagação da onda no meio.

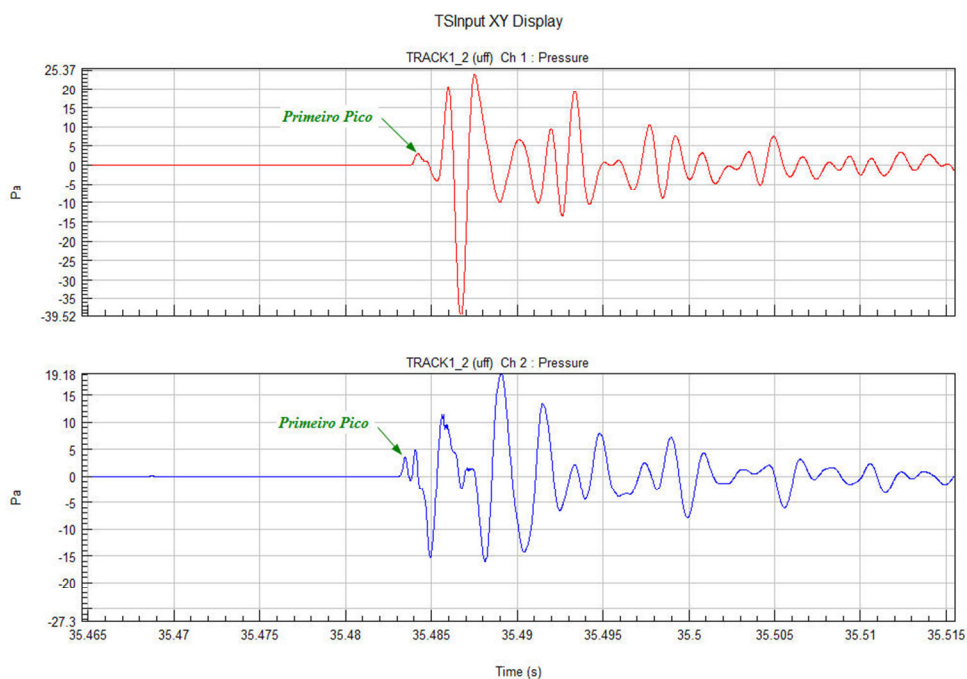


Figura 4.14 – tempo de chegada das ondas nos microfones 1 e 2

Foram realizados 10 impactos na posição indicada na Figura 4.12 (b) e calculadas a velocidade de propagação da onda no material para cada impacto. Destes impactos foi calculada a média dos mesmos, chegando ao valor de 563,2m/s (desvio padrão= 29,6 e  $Cv=5,25\%$ ).

#### 4.2.2 Verificação da técnica de localização

Para realizar a validação das técnicas de localização foram efetuados pequenos impactos em seis pontos (P1,P2,P3,P4,P5 e P6) marcados na viga de 1 metro de comprimento (ver Figura 3.6). Foram calculados através da técnica de localização dos círculos os valores de posição dos impactos em cada um dos pontos, fazendo uso da velocidade calculada na seção 4.2.1. Na Figura 4.15 (eixo horizontal corresponde a posição dos pontos ao longo do comprimento total da viga, eixo vertical corresponde ao valor calculado para o ponto referente ao eixo horizontal) pode-se verificar para cada ponto o resultado de 3 valores de localização calculados e sua respectiva média, estes valores foram divididos pelo valor da posição conhecida do ponto resultando em uma visualização normalizada, em torno do valor 1.

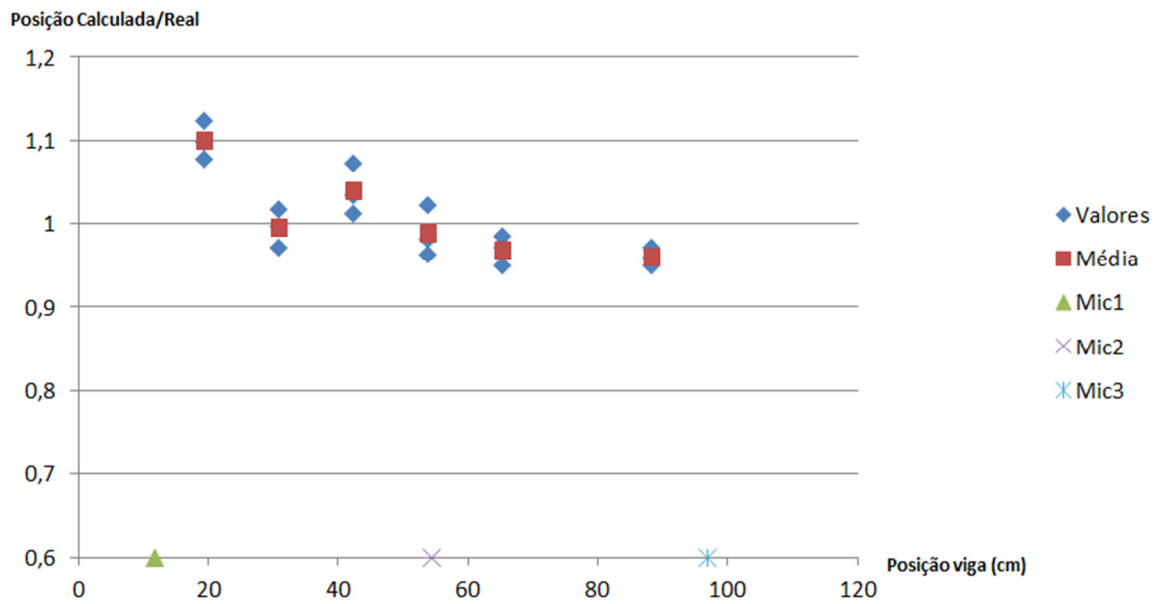


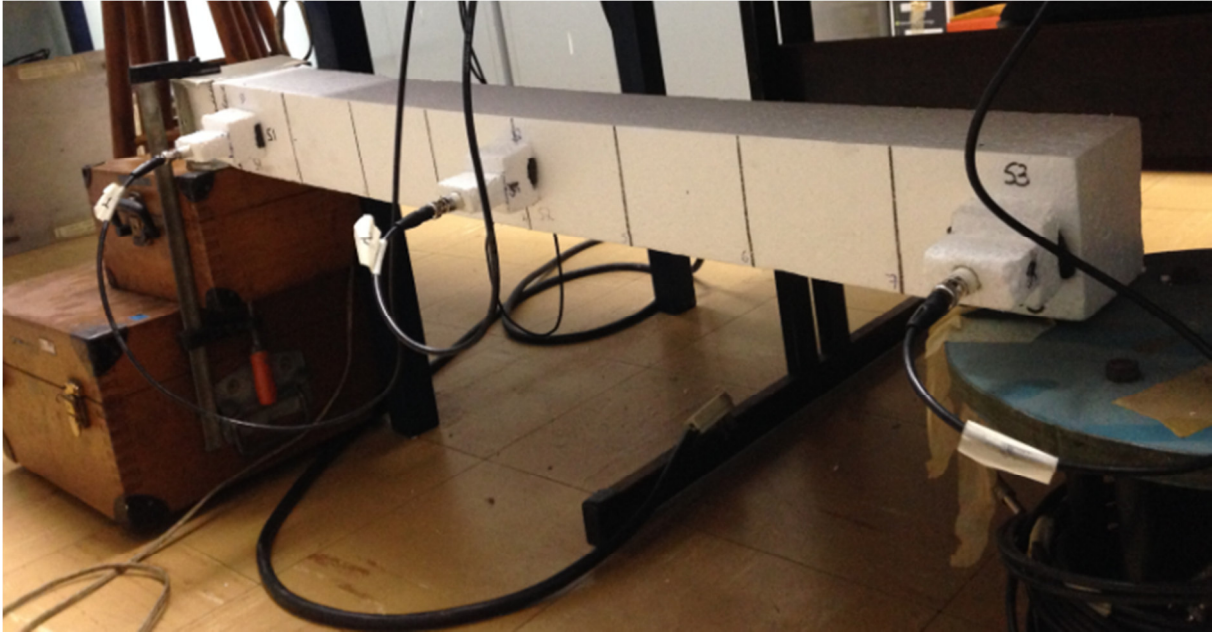
Figura 4.15 – resultados verificação da técnica de localização

É possível verificar que a máxima dispersão de resultados ocorreu no primeiro ponto testado, com cerca de 10% na sua média. Nos outros pontos obteve-se diferenças da ordem de 5 a 7% em relação ao valor nominal da localização. Levando em conta estas diferenças, julgou-se aceitável os erros para esta configuração de amostra. A seguir foi demonstrado uma localização de um rompimento efetuado na viga em questão.

#### 4.2.3 Localização de defeito utilizando a técnica de localização por EA

Utilizando a mesma amostra dos experimentos anteriores, foi realizada uma configuração na forma bi-apoiada com o intuito de aplicar um esforço na região central da viga levando-a até a sua ruptura. As Figuras 4.16 apresentam a (a) configuração realizada e (b) o esforço aplicado.

(a)



ESFORÇO APLICADO

(b)



Figura 4.16 – (a) viga bi-apoiada ensaio ruptura, (b) esforço aplicado

Foi realizado esforço manual na região central da viga, levando-a até a ruptura (Figura 4.17 (a)). A Figura 4.17 (b) mostra as medidas referentes à posição real do defeito ocorrido. Enquanto a pressão manual era aplicada, os microfones registraram os eventos de emissão acústica ocorridos durante o ensaio. Eventos gerados alguns segundos antes da ruptura da viga podem ser visualizados na Figura 4.18.

(a)



(b)

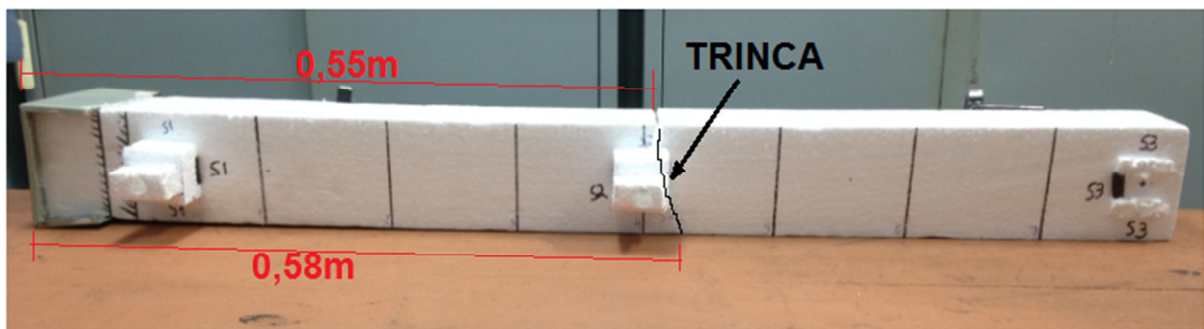


Figura 4.17 – (a) viga 1 metro rompida, (b) posição do defeito gerado

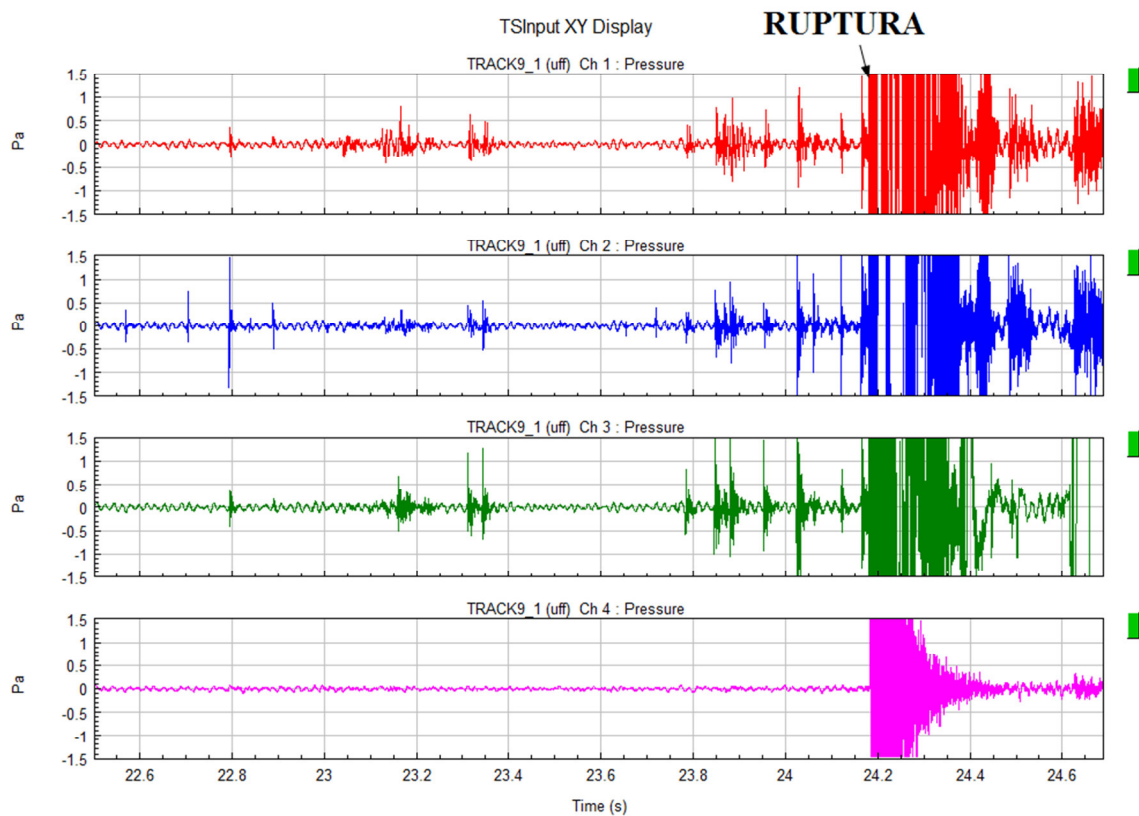


Figura 4.18 – Gráfico de amplitude sonora em função do tempo

Foi realizada a verificação dos tempos de chegada em alguns sinais antes da ruptura e aplicada a técnica de localização dos círculos. Na Figura 4.19 pode ser verificado um dos cálculos utilizados na localização da ruptura na viga de 1 metro de comprimento.

### MÉTODO DO CÍRCULO VIGA BI-APOIADA

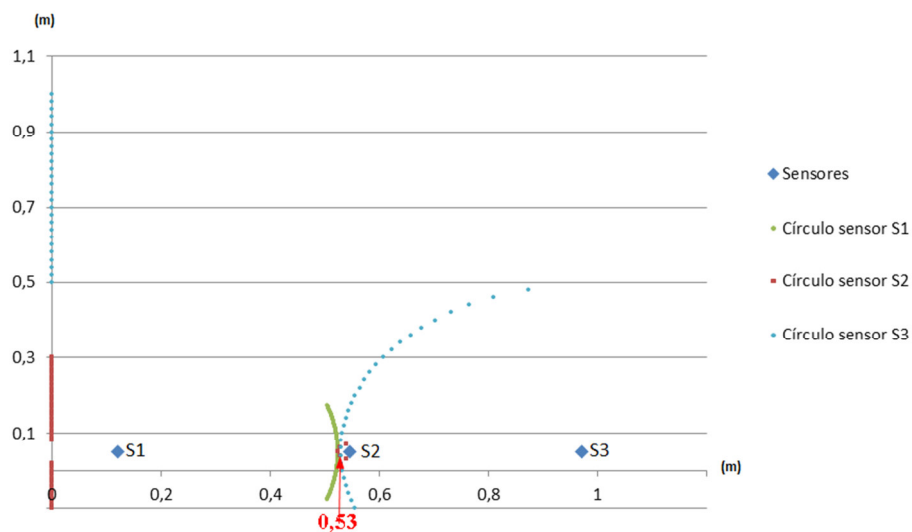


Figura 4.19 – Localização pelo método dos círculos

Conforme dito anteriormente, alguns sinais antes da ruptura da viga foram analisados. A localização média de ruptura encontrada foi o valor de 0,535m. Conforme mostrado na Figura 4.17 (b), a trinca ocorreu de forma diagonal, com a posição real de ruptura entre 0,55m e 0,58m. Dado que a maior taxa de aquisição dos microfones é da ordem de 20000kHz, o que equivale a um período de  $5E10^{-5}$  s, e sendo a velocidade de propagação da onda cerca de 563,2m/s, chega-se a conclusão de que valores menores que 3cm não podem ser detectados pelos microfones utilizados nos experimentos. Portanto, levando em consideração a resolução da instrumentação utilizada, conclui-se que a diferença entre o valor de localização medido e o valor real são coerentes.

### 4.3 Aplicação do Método Numérico DEM

Foram realizadas simulações por colegas da UNIPAMPA (2013) das amostras proporcionais com o método dos elementos discretos (DEM). Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros de entrada utilizados para os modelos da amostra pequena. As condições de contorno são apresentadas na Figura 4.20, a posição dos sensores foi realizada seguindo as mesmas posições do ensaio experimental (Figura 3.5). A excitação foi aplicada como um deslocamento prescrito de 2mm/min, aplicado com uma velocidade constante no meio da viga como se indica na Figura 4.20. O coeficiente de poisson foi calculado utilizando a equação 2.4 referente à seção 2.2.3.

Módulos dir x	125	Rho (densidade)	8.85kg/m <sup>3</sup>
Módulos dir y	18	E	2.26MPa
Módulos dir z	28	Gf (tenacidade)	27N/m
Lc (comprimento módulo)	0.0018m	Cv(Gf), coeficiente de variação	50%
Coef. poisson	0.25	Rfc (fator de falha)	11

Tabela 4.1 – Parâmetros de entrada amostra pequena



Com estes valores se chega a uma lei para cada elemento, onde  $\varepsilon_p=0.039$ , e  $\varepsilon_t=\varepsilon_p k_r$ , para  $k_r=3$ . Na Figura 4.20 se apresenta a discretização realizada no DEM, onde a distribuição dos nós e as condições de contorno são visualizadas.

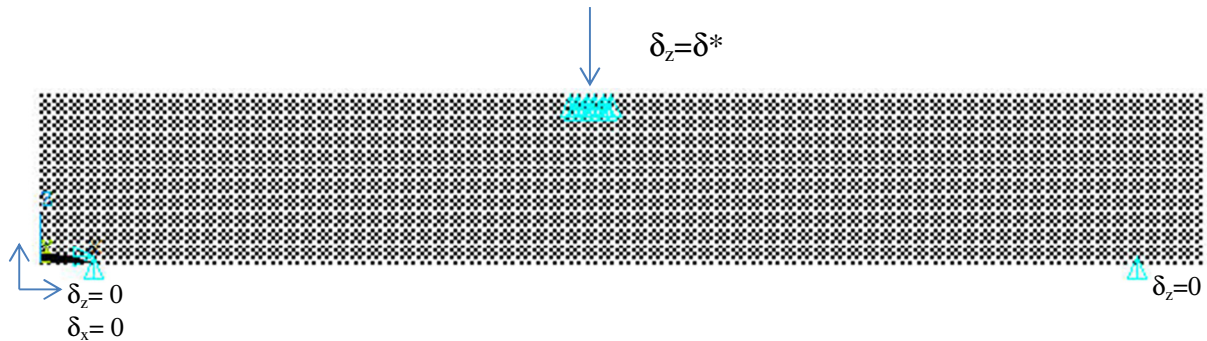


Figura 4.20 – configuração geométrica da viga pequena utilizando o método dos elementos discretos. As condições de contorno aplicadas estão indicadas em azul celeste. Para facilitar a visualização da discretização utilizada, somente os nós estão visíveis.

Na Figura 4.21 são apresentadas três vistas laterais da configuração final obtida na simulação do DEM. Na primeira Figura 4.21(a) é possível ver a posição dos nós, na segunda Figura 4.21 (b) está marcado em preto a posição das barras rompidas junto com as não danificadas, nesta é possível ver que mesmo tendo uma concentração de rupturas na região onde se gera a macrotrinca também existem elementos que rompem relativamente longe da posição da trinca central. Isto acontece no início do processo simulado, sendo que à medida que o dano avança o efeito de localização vai concentrar as barras rompidas somente na região central. Esta observação se vê mais clara na última Figura 4.21(c), onde somente estão representadas as barras rompidas. Observa-se também, que cada barra rompida, ou o conjunto destas rompendo simultaneamente, está associado a um evento de emissão acústica.



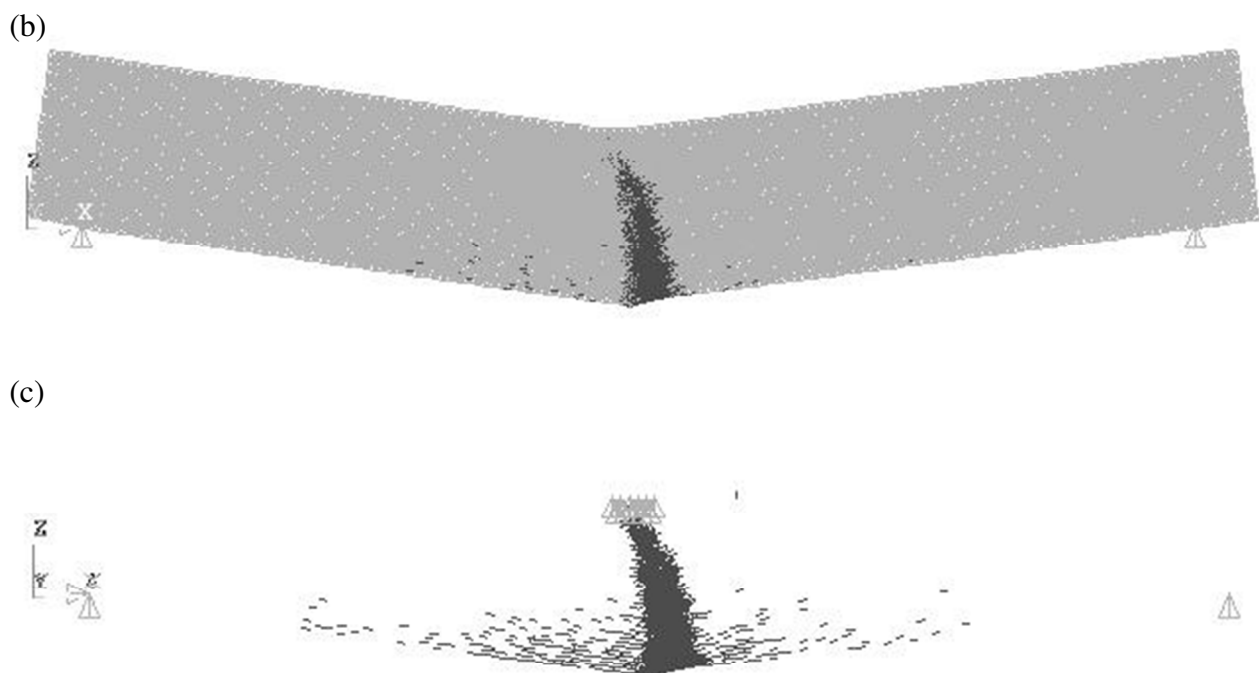


Figura 4.21 - Configurações finais obtidas na simulação do DEM, (a) na vista lateral superior só estão graficadas as posições dos nós, (b) na configuração central se apresentam em cinza os elementos sadios e em preto os elementos rompidos da configuração final. (c) na configuração inferior se apresentam somente as barras rompidas.

Finalmente, na Figura 4.22, se apresenta o balanço energético obtido na simulação da viga pequena utilizando o DEM. É possível observar neste gráfico a forma como a viga acumula energia elástica até o final, produzindo assim maior dissipação de energia no fim da simulação. Isto é característico das rupturas explosivas. O balanço energético também justifica porque não foi obtido um grande volume de eventos de emissão acústica, e que estes se concentram no fim da simulação.

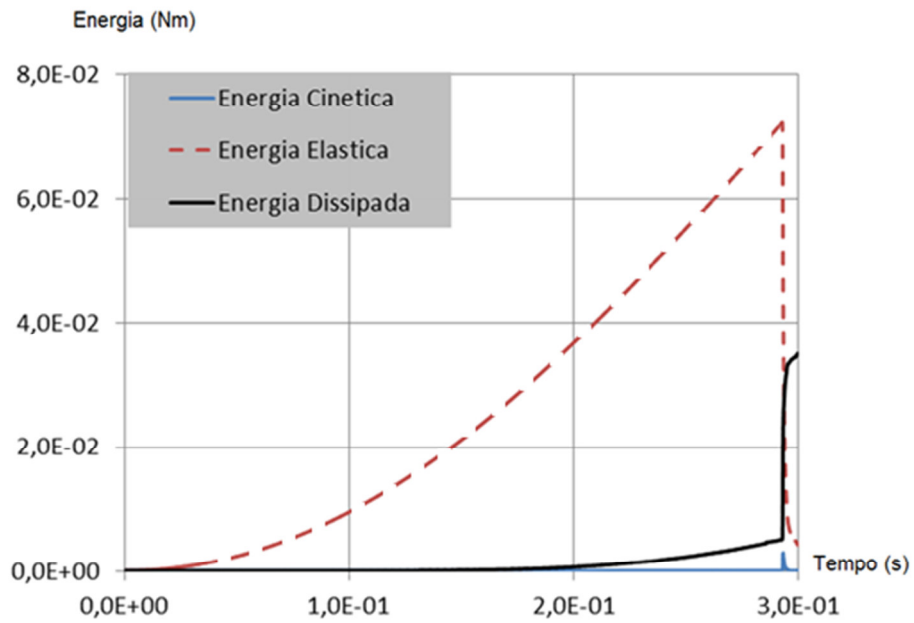
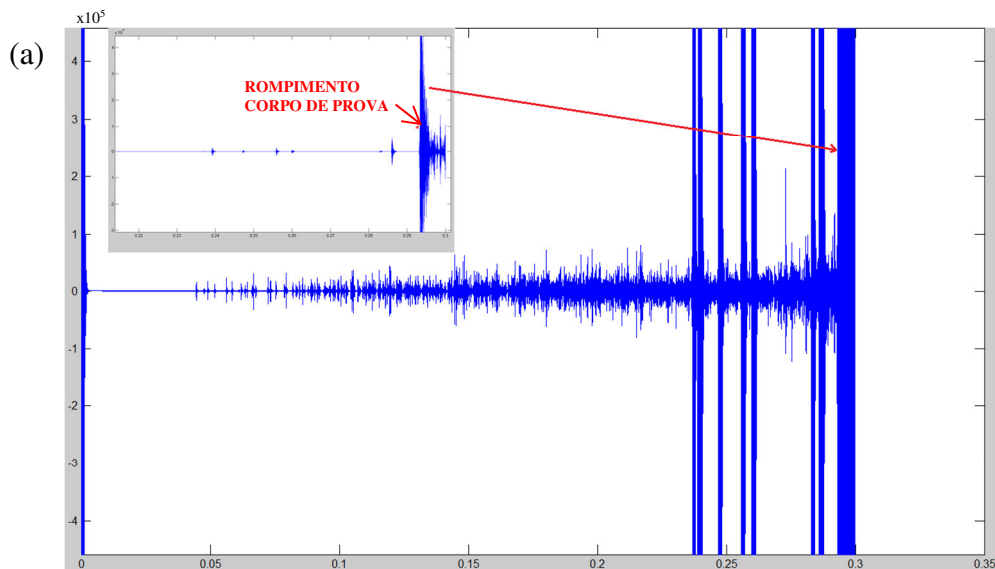
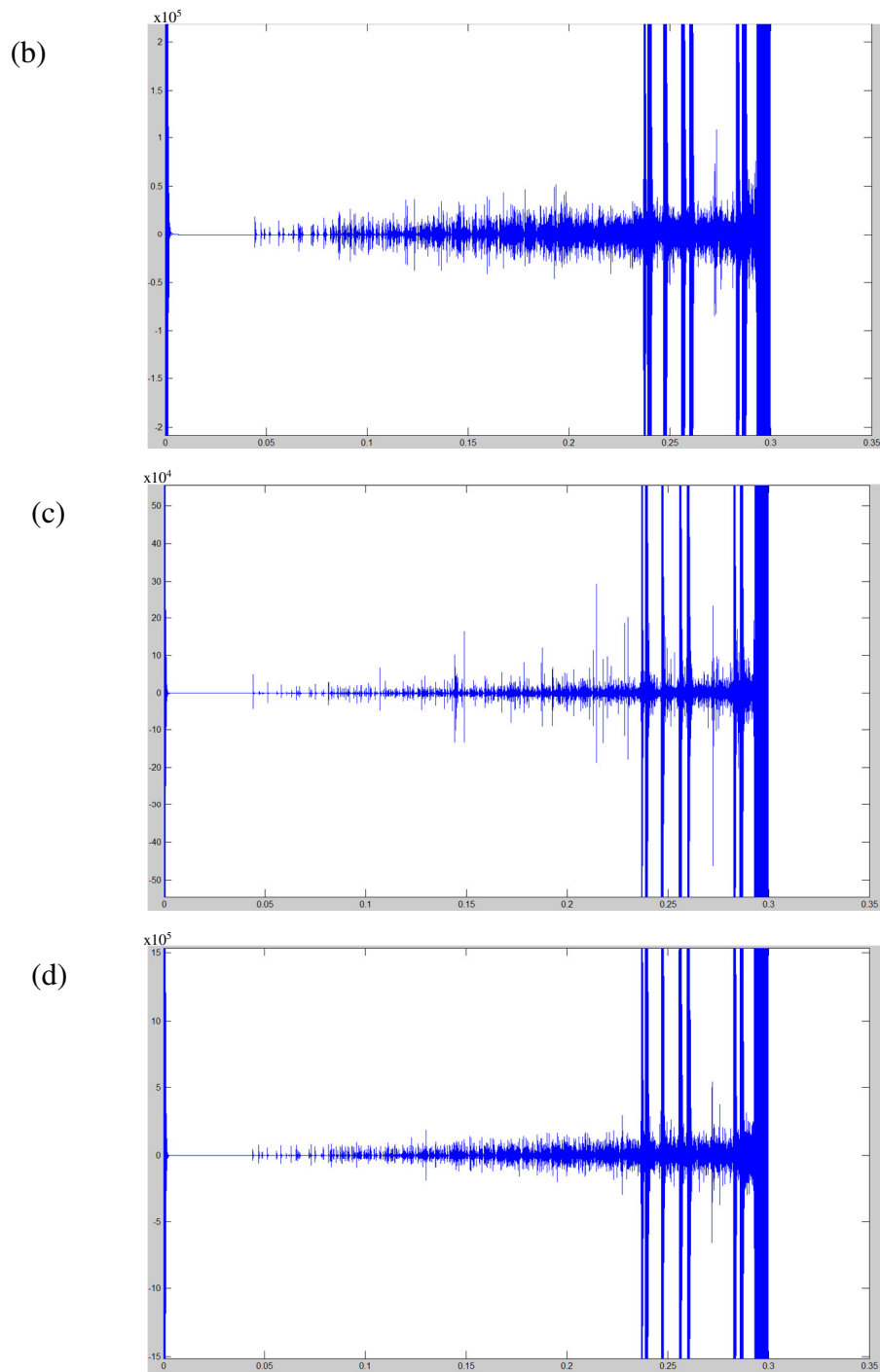


Figura 4.22- balanço energético da simulação realizada

Na figura 4.23 é apresentada o histórico de eventos de aceleração, geradas durante a simulação numérica (DEM) para os (a) Microfone 1, (b) Microfone 2, (c) Microfone 3 e (d) Microfone 4, na amostra pequena. No eixo horizontal tem-se o tempo em (segundos) e no eixo vertical tem-se a aceleração ( $m/s^2$ ). Estes valores não possuem sentido físico real, devido ao fato de que não foi feito um ajuste do amortecimento que o corpo de prova ensaiado possui. Os valores obtidos servem para serem comparados entre eles.



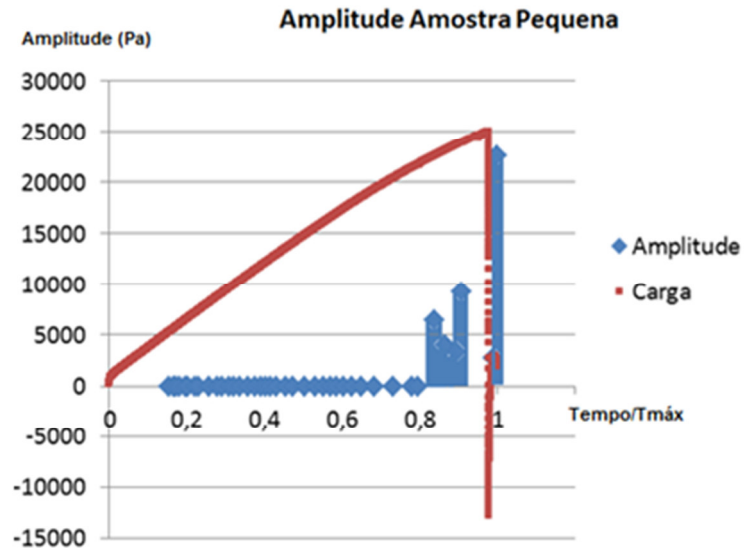


**Figura 4.23 – sinais de EA (a)Microfone 1, (b) Microfone 2, (c) Microfone 3 e (d) Microfone 4**

Com os sinais obtidos, apresenta-se, na Figura 4.24 (a), o levantamento das amplitudes versus tempo e do número de eventos instantâneos e acumulados versus tempo na Figura 4.24 (b). Cabe salientar que o tempo durante a simulação foi adimensionalizado nos dois gráficos e que também é apresentada a variação da força aplicada durante a simulação. Os valores de

amplitude medidos na simulação são muito altos e seu valor absoluto não tem sentido físico, isto é devido ao fato de que não foi feito um ajuste do amortecimento que o corpo de prova ensaiado possui. Os valores obtidos servem para serem comparados entre eles.

(a)



(b)

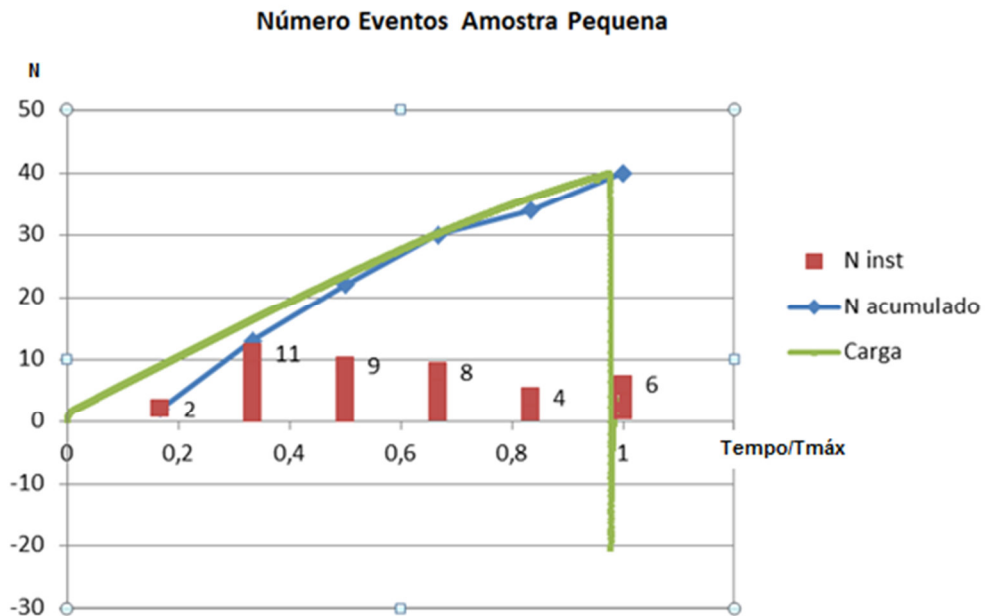


Figura 4.24 – (a) Histograma Amplitudes e (b) Histograma Eventos

Na Figura 4.25 são apresentados os tempos de chegada dos 4 microfones, com estes tempos seria possível também calcular a localização da fonte da emissão acústica utilizando os métodos apresentados anteriormente.

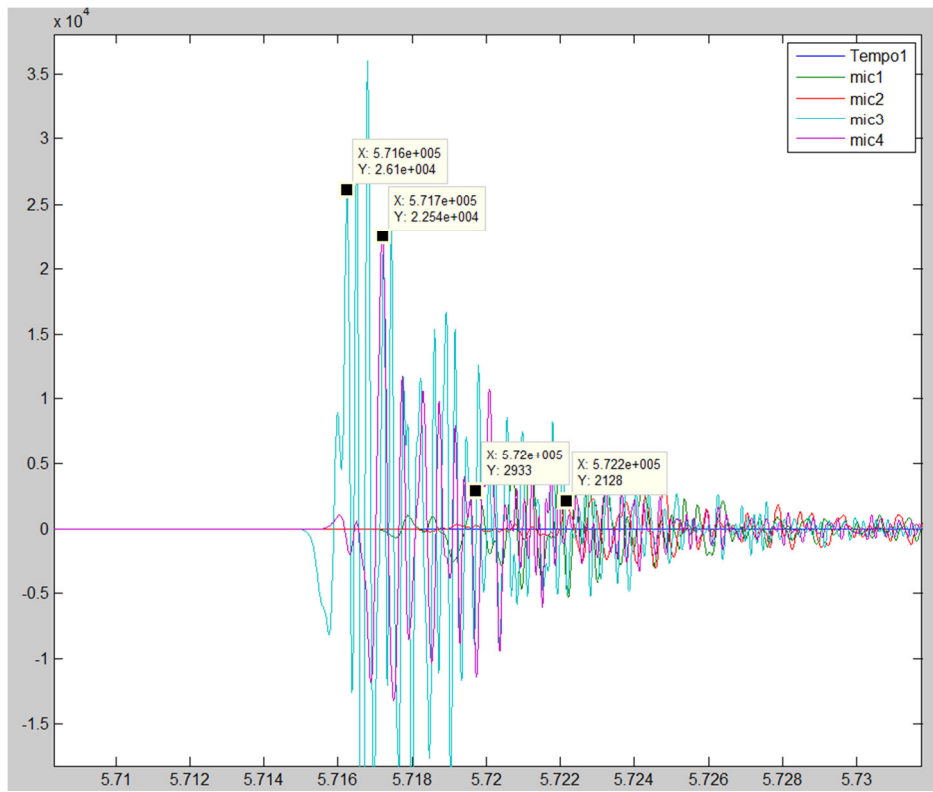


Figura 4.25 – Tempo de chegada dos sinais de emissão acústica em cada microfone (eixo X)

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados estudos de Emissões Acústicas em três tamanhos diferentes de amostras e também foi desenvolvido estudo de técnicas de localização de defeitos através do uso de Emissão Acústica em uma amostra de grandes dimensões. Foi possível realizar o comparativo dos resultados experimentais com os defeitos reais encontrados nas amostras. Também foi realizado um estudo numérico dos corpos de prova proporcionais ensaiados. Através do presente trabalho foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Durante as análises iniciais, com relação aos espectros de frequências, foi possível verificar que seria necessário a introdução de um filtro passa alta com limite mínimo de frequências da ordem de 6000Hz. Isto foi feito visando melhorar a visualização dos eventos de emissão acústica durante o ensaio.
- Foi verificado ao calcular a curva  $\log N$  vs  $\log Vol$ , na seção 4.1.1, que o cálculo do expoente fractal que este tipo de curva permite obter está de acordo com o encontrado na bibliografia.
- Analisando os histogramas das amplitudes, foi possível perceber que para o corpo de prova pequeno tivemos já nos períodos intermediários do teste eventos de grandes amplitudes, ao passo que para a amostra média, inicialmente tivemos pequenas amplitudes, no meio do ensaio poucas amplitudes elevadas e uma grande amplitude ao final do ensaio, momento da ruptura. No corpo de prova grande tivemos um evento de alta amplitude por volta da metade do tempo de ensaio e outro evento com amplitude elevada, quando houve a ruptura.
- Através dos histogramas dos eventos, tanto nos dados experimentais como nas simulações, levando em conta as plotagens do número de eventos acumulados ao longo do tempo, é possível perceber que a quantidade de eventos vai crescendo à medida que a peça vai se aproximando da falha. A carga aplicada na amostra, ao lado do número acumulado de eventos e número instantâneo de eventos são fatores indicativos do momento em que a falha está se aproximando.
- A análise do valor “b” nos permite observar que, inicialmente a liberação de energia acontece através de pequenos defeitos distribuídos em todo o volume. Já no trecho final, que corresponde a um valor de “b” mais próximo a 1, a liberação de energia ocorre concentrada em uma única fonte, a qual é a fonte de EA. Como observado em Carpinteri *et al.* 2012.

- Ao longo do estudo da localização através da EA foi possível provar que para a viga de 1 metro de comprimento a instrumentação utilizada foi eficaz, dado que foram testados diversos pontos ao longo do comprimento da viga e suas posições comparadas com os sinais de EA gerados pelos microfones. Conforme explicado na seção 4.2.3, é possível compreender a importância de se conhecer a resolução e os erros da instrumentação que se propõe utilizar, a fim de garantir que a instrumentação seja adequada ao corpo que será monitorado. Por fim, após elaborada a verificação da técnica de localização dos círculos, foi realizado o experimento de rompimento da amostra. Foi utilizada a técnica de localização por círculos e a mesma retornou um resultado com erros de aproximadamente 6%.

- A análise preliminar realizada sobre os resultados numéricos mostra a potencialidade da utilização desta ferramenta para auxiliar na interpretação dos ensaios de emissão acústica.

Ter realizado ensaios com um material de alta flexibilidade tem permitido ganhar experiência, que poderá ser utilizada quando houver a disponibilidade de sensores de alta frequência, sendo possível a realização de ensaios em materiais tais como rochas, polímeros, entre outros.



## **6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

- Utilizando equipamentos de EA com frequências de aquisição de dados maiores, realizar ensaios em outros tipos de materiais, tais como concreto, metais, plásticos, etc.. a fim de analisar o comportamento destes.
- Experimentar o uso de outras técnicas de localização por EA, tais como método da hipérbole e triangulação.
- Estudar a topologia da superfície da ruptura. Determinar rugosidades e formas da superfície rompida comparando com os eventos de EA gerados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anastasopoulos A; Kourousis D; Bollas K; **Acoustic Emission Leak Detection of Liquid Filled Buried Pipeline**, Envirocoustics ABEE, El. Venizelou 7 & Delfon, Athens, Greece.

Anderson T.L. **Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications**. CRC Press. ISBN: 978-0-8493-1656-2, 2005.

Bath M., **Introduction to Seismology**, Birkhauser Boston 1979

Bathe, K.J. **Finite element procedures**, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1996.

Bažant, Z.P. e Chen E.P. **Scaling of structural failure**. Appl. Mech. Rev. 50, p. 593-627, 1997.

Birck G; **Aplicação de Técnicas de Emissão Acústica na Monitoração do Dano Estrutural**, (Trabalho de Conclusão de Curso) UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica, Julho 2013.

Bruel & Kjaer. “Produtos“. <http://www.bksv.com/Products/pulse-analyzer/pulse-platform/pulse-labshop/>. Acessado em 10/02/2014.

Carpinteri A; Lacidogna G; Nicolini G; **Fractal Analysis of Damage Detected in Concrete Structural Elements under Loading**, Politecnico di Torino, Department of structural Engineering and Geotechnics, Torino, Italy, 2009.

Carpinteri A; Lacidogna G; Corrado M; **Three different approaches for damage domain characterization in disordered materials: Fractal energy density, *b*-value statistics, renormalization group theory**, Politecnico di Torino, Department of structural Engineering and Geotechnics, Torino, Italy, 2012.

Carpinteri A; Lacidogna G; Pugno N; **Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring**, Politecnico di Torino, Department of structural Engineering and Geotechnics, Torino, Italy, 2007. Engineering Fracture Mechanics 74 pp. 273-289, 2007.

Charles J. Hellier; **Handbook of Nondestructive Evaluation**, Chapter 10 – Acoustic Emission Testing; McGraw Hil, 2001

Cheeke, J.D.N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. CRC Press L.L.C. 2002

Donato, G. V. P., **Apostila: Curso de Mecânica da Fratura, Escola de Ciências e tecnologia de abastecimento**, Universidade Petrobrás, RH, 2008.

Dowding C. H. **Blast Vibration Monitoring and Control**, 297 pp, 1985.

Dunegan H.L; **Location of Leaks in Pipes by Use of Acoustic Emission Modal Ratio Techniques**, Dunegan Engineering Company Inc, San Juan Capistrano CA [www.deci.com](http://www.deci.com), November 2004.

Glyphworks nCode. “Produtos” <http://www.ncode.com/en/products/ncode-glyphworks/>). Acessado em 10/02/2014.

Grosse C.U; Ohtsu M; **Acoustic Emission Testing**, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008.

Havskov J; **IS 11.1 Earthquake Location**, University of Bergen, Department of Earth Science, Allégaten, Norway, 2002.

Hayashi, Y. **Sobre uma representação discreta de meios contínuos em dinâmica não-linear**. Dissertação (Mestrado), CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 1982.

Iturrioz I; Lacidogna G; Carpinteri A; **Experimental Analysis and Lattice Simulation of Concrete Specimens under Uniaxial Compression**, UFRGS, Department of Mechanical Engineering, Porto Alerge, RS, Brasil; Politecnico di Torino, Department of structural Engineering and Geotechnics, Torino, Italy, 2013.

Jacques C.R; **Avaliação de Parâmetros de Emissão Acústica para Monitoramento de Risers Flexíveis**, Tese (Doutorado) UFRGS, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM, 2009.

Jomdecha C; Prateepasen A; Kaewtrakulpong P; **Study on Source Location Using an Acoustica Emission System for various Corrosion Types**, NDT&E International 40 pp 584-593, 2007.

Justen L.A; **Aplicação de Técnicas de Emissão Acústica na Caracterização de Dano em Estruturas**, (Trabalho de Conclusão de Curso) UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica, Dezembro 2012.

Kanninen M.F. e Popelar C.H. **Advanced Fracture Mechanics**. Oxford University Press 1985. ISBN 0-19-503532-1, 1985.

Kosteski L.E.; **Aplicação do Método dos Elementos Discretos Formado por Barras no Estudo do Colapso de Estruturas**, Tese (Doutorado) UFRGS, Promec, Julho de 2012.

Liu A. F.; **Mechanics and mechanisms of fracture**; an Introduction, 2005

Mandelbrot, B.B. **The Fractal Geometry of Nature**. Freeman, San Francisco, 1982.

Miller R; Hill E; **Acoustic Emission Testing Handbook**, American Society for Nondestructive Testing, Volume 6, Third Edition, 2005.

Nayfeh, A.H.e Hefzy, M.S. **Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures**. AIAA Journal, v. 16(8), p. 779-787, 1978.

Newman, J.C.Jr; James, M.A. **A Review of the CTOA/CTOD Fracture Criterion – Why it Works**. AIAA-2001. 1224, Hampton, VA. 2001.

Newman, J.C.Jr; James, M.A.; Zerbst, U. **A review of the CTOA/CTOD fracture criterion**. Eng. Fract. Mech. 70, 371–385. 2003.

Ohtsu M; **Acoustic Emission Testing**, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008.

Persson P. , **Rock Blasting and Explosives Engineering**, CRC Press, 1993

Rice J. R., **A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks**, Journal of Applied Mechanics, 35, pp. 379-386, 1968.

Rocha, M.M.; Riera, J.D.; Krutzik N.J. **Extension of a model that aptly describes fracture of plain concrete to the impact analysis of reinforced concrete**. Int. Conf. and Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT 11, Trans. Vol. J., Tokyo, Japan. 1991.

Rodrigues S.R; **Aplicação de Técnicas de Emissão Acústica na Localização de Dano em Estruturas**, (Trabalho de Conclusão de Curso) UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica, Dezembro 2012.

Rydelek P; Pujol J; **Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray**, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 4, pp. 1546-1550, August 2004.

Schwalbe, K.H.; Newman, J.C.; Shannon, J.L.Jr. **Fracture mechanics testing on specimens with low constraint – standardization activities within ISO and ASTM**. Eng. Fract. Mech. 72, 557–576. 2005.

Schwalbe, K.H. Notas do: **Summer Course on Assessment of Light-Weight Structures**. Porto Alegre, Brasil, 8-12 Novembro, 2010.

Scruby C.B; **Instrument Science and Technology-An Introduction to Acoustic Emission**, National NDT Centre, Material Physics and Metallurgy Division, Oxon UK, 1987.

Shiotani T., **Evaluation of Progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model test**, Progress in Acoustic Emission VII, JSNDI: 529-534, 1994

Sih, G.C. **A three-dimensional strain energy density factor theory of crack propagation**, Mechanics of Fracture, v. 2 (ed. M.K. Kassir and G.C. Sih), Noordhoff Int. Publ., The Netherlands, pp. XV-LIII, 1975.

Siskind D. E. **Vibrations from Blasting**, International Society of Explosives Engineers, 2005.

Tobias A; **Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors**, CEGB, February 1976.

UNIPAMPA, Colpo Angélica; Friedrich Leandro; **Realização de Simulações utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM)**, Novembro 2013.

## ANEXO I

Segue informações de calibração, sensibilidade, faixa de frequências de operação dos transdutores utilizados no experimento.

### Microfone 1

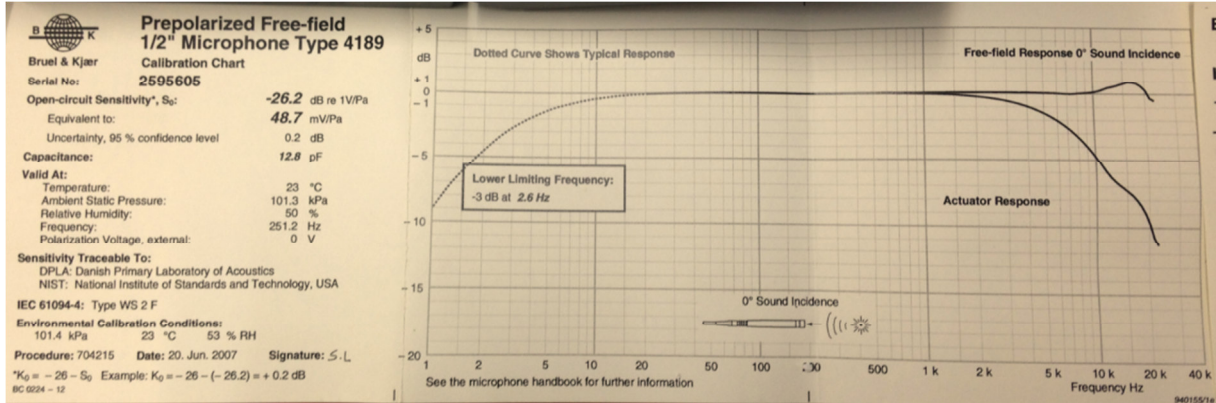


Figura A.1 – Curva de calibração do transdutor 1

### Microfone 2

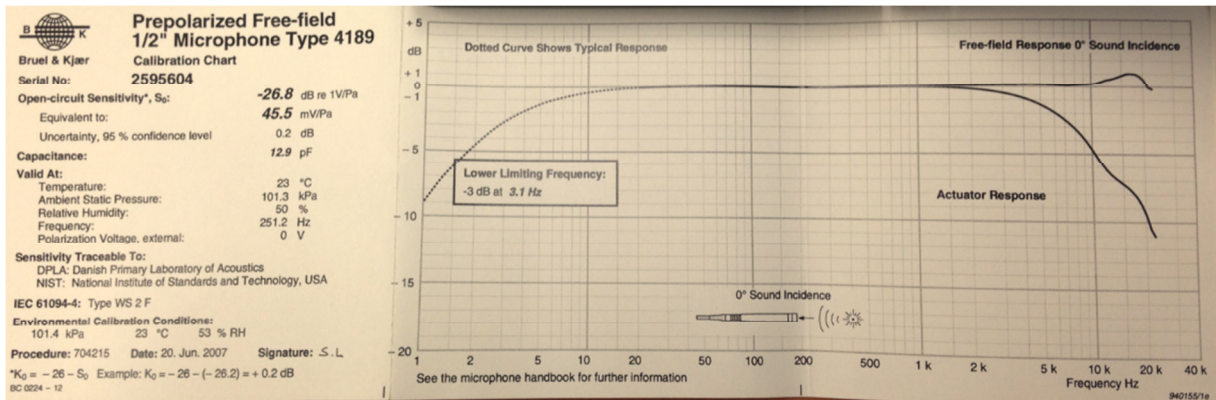


Figura A.2 – Curva de calibração do transdutor 2

### Microfone 3

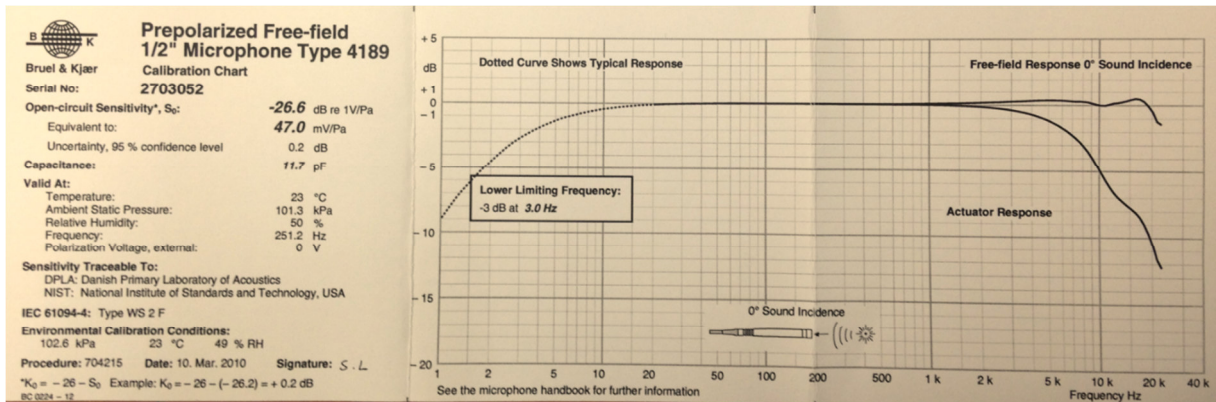


Figura A.3 – Curva de calibração do transdutor 3

# Microfone 4

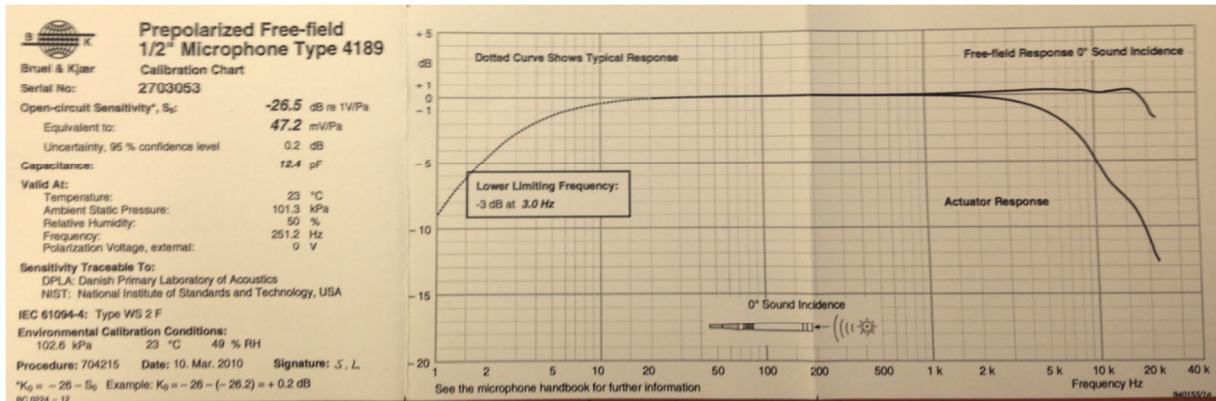


Figura A.4 – Curva de calibração do transdutor 4